

ISSN 2225-6717

**Д**оклады  
**Н**езависимых  
**А**второв

Специальный выпуск № 61

**Электродинамика  
от Ампера до Эйнштейна**

Перевод с английского – ВЛАДИМИР

2023

# The Papers of Independent Authors

Special volume 61, in Russian, 2023

**O. Darrigol**

**Electrodynamics from Ampere to Einstein**

Copyright © 2005 by Publisher “DNA”

Все права (авторские и коммерческие) на отдельные статьи принадлежат авторам этих статей. Права на журнал в целом принадлежат издательству «DNA».

All rights (copyright and commercial) on individual papers belong to the authors of these papers. The rights to the journal as a whole belong to the publisher «DNA».

**Опубликовано 08.12.2023**

**ISBN 978-1-4710-2894-6**

**EAN-13 9772225671006**

**ISSN 2225-6717**

**Сайт со сведениями для автора**

**<http://dna.izdatelstwo.com>**

**Контактная информация**

**[publisherdna@gmail.com](mailto:publisherdna@gmail.com)**

**Адрес: POB 15302, Bene-Ayish,  
Israel, 0060860**

## От издателя и переводчика

Три четверти века прошло между определением электродинамики Ампера и реформой Эйнштейном понятий пространства и времени. Эти два события произошли в совершенно разных мирах: Французская академия наук 1820-х годов кажется очень далекой от Бернского патентного бюро начала 1900-х годов, а силы между двумя электрическими токами совершенно чужды оптической синхронизации часов. Тем не менее, электродинамика Ампера и относительность Эйнштейна прочно связаны между собой исторической цепочкой, включающей немецкое расширение работ Ампера, конкуренцию с британскими концепциями поля, голландский синтез и критику связи эфира и материи в конце века. Оливер Дарригол прослеживает эту интригующую эволюцию с вниманием физика к концептуальным и инструментальным разработкам, а историка - к их культурным и материальным вкраплениям. В книге использован широкий круг источников, и в нее включены многие важные идеи других ученых. Подробно описаны такие важные эпизоды, как новое определение заряда и тока Фарадеем, генезис полевых уравнений Максвелла и эксперименты Герца по изучению быстрых электрических колебаний.

Таким образом, возникает яркая картина интеллектуального и инструментального разнообразия физики девятнадцатого века. Наиболее влиятельные исследователи работали на стыке различных дисциплин и традиций: они не отделяли теорию от эксперимента, часто опирались на конкурирующие традиции, а их научные интересы выходили за пределы физики в химию, математику, физиологию и другие области. Выявляя эти важные особенности, данная книга предлагает тесно связанный и в то же время резко контрастирующий взгляд на раннюю электродинамику. Оливер Дарригол - директор по исследованиям Национального центра научных исследований, Париж. Его исследования посвящены истории квантовой теории и электродинамики.

Мы с удовольствием предлагаем этот специальный выпуск журнала с замечательной книгой Оливера Дарригола по истории электродинамики, ранее недоступной читателю на русском языке

# Содержание

Отзыв Ричарда Кизинга .....	6
Отзыв Даниэля М. Зигеля .....	8
Отзыв Арне Ширрмахера .....	10
Предисловие .....	11
Условные обозначения .....	15
<b>1. Основы</b> .....	17
1.1 Введение .....	17
1.2 Исследования Ампера .....	23
1.3 Фарадеевские вращения .....	33
1.4 Электродинамика .....	41
1.5 Электромагнитная индукция .....	50
1.6 Выводы .....	59
<b>2. Немецкая точность</b> .....	61
2.1 Введение .....	61
2.2. Математическая феноменология Неймана .....	63
2.3 Гауссовский дух .....	74
2.4 Правила измерения, определенные Вебером .....	75
2.5 Сравнение Кирхгофа с Вебером .....	89
2.6 Выводы .....	98
<b>3. Британские поля</b> .....	100
3.1 Введение .....	100
3.2 Электрохимия Фарадея .....	102
3.3 Диэлектрики .....	109
3.4 Магнитные силовые линии .....	121
3.5 Потенциал Томсона .....	140
3.6. Магнитное поле Томсона .....	155
3.7. Выводы .....	164
<b>4. Максвелл</b> .....	167
4.1. Введение .....	167
4.2. О силовых линиях Фарадея .....	171
4.3. О физических силовых линиях .....	178
4.4. Динамическое поле .....	185
4.5. Я воздвиг памятник .....	196
4.6. Выводы .....	203
<b>5. Британские максвелловцы</b> .....	208
5.1. Введение .....	208
5.2. Антипатия Томсона .....	208
5.3. Теория Максвелла в изображениях .....	212
5.4. Модификация уравнений Максвелла .....	221
5.5. Максвелл для телеграфа .....	227
5.6. Электромагнитные волны .....	235
5.7. Выводы .....	239
<b>6. Токи в незамкнутых цепях</b> .....	242

6.1. Введение .....	242
6.2. Континентальные основы .....	244
6.3. Принципы Гельмгольца .....	248
6.4. Ответ Герца .....	269
6.5. Влияние открытия Герца .....	289
6.6. Выводы .....	300
<b>7. Проводимость в электролитах и газах .....</b>	<b>303</b>
7.1 Введение .....	303
7.2 Электролиз .....	304
7.3 Разряд в разреженных газах .....	314
7.4. Газообразные ионы .....	327
7.5. Катодно-лучевая полемика .....	341
7.6 Выводы .....	352
<b>8. Электронные теории .....</b>	<b>356</b>
8.1 Введение .....	356
8.2. Некоторые вопросы оптики движущихся тел .....	356
8.3. Ионная оптика Гельмгольца .....	362
8.4. Синтез Лоренца .....	364
8.5 Реформа Лармора .....	375
8.6 Мировой эфир Вихерта .....	389
8.7 Выводы .....	393
<b>9. Старые принципы и новое мировоззрение .....</b>	<b>396</b>
9.1. Введение .....	396
9.2 Критика Пуанкаре .....	397
9.3. Погружение в электрон .....	407
9.4. Альтернативные теории .....	414
9.5 Эйнштейн об электродинамике .....	421
9.6 Выводы .....	445
<b>Приложения .....</b>	<b>448</b>
1 Силы Ампера .....	448
2 Абсолютные единицы .....	450
3 Потенциал Неймана .....	451
4 Формула Вебера и последствия .....	453
5 Конвективные производные .....	456
6 Система напряжений Максвелла .....	459
7 Электродинамика Гельмгольца .....	460
8 Вывод уравнений Максвелла, сделанный Герцем в 1884 году .....	466
9 Электродинамические лагранжианы .....	467
10 Электрическая конвекция .....	472
11 Коэффициент Френеля .....	476
12 Электродинамика Кона .....	478

Сокращения, используемые в библиографиях .....	482
Библиография первичной литературы .....	485
Библиография вспомогательной литературы .....	522

\* \* \*

*Европейский физический журнал Том 22, Номер 5*  
*обзор книги Электродинамика от Ампера до Эйнштейна*

*Ричард Кизинг*

**Аннотация**

В настоящее время практически без сомнений признано, что уравнения, управляющие электромагнитными полями в вакууме, принадлежат Дж. К. Максвеллу. Они имеют следующую чрезвычайно элегантную и ковариантную форму:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{j} + \epsilon_0 \partial \mathbf{E} / \partial t).$$

Эти уравнения настолько знакомы современному студенту-физику, что кажутся почти вечными по своей природе. Все современные тексты по предмету (по крайней мере, опубликованные за последние пятьдесят лет) цитируют их, их структура считается почти самоочевидной, и они теперь имеют статус, подобный законам классической термодинамики. Возникает вопрос, каким образом они достигли своего нынешнего возвышенного положения и какой путь мы прошли от бесчисленных экспериментальных наблюдений Фарадея и его современников до нынешнего утонченного состояния абстрактного понимания. Кто были главные герои и насколько велик их труд для нашего сегодняшнего знания? Детальный анализ и понимание восьмидесяти с лишним лет усилий, которые вели от «Ампера к Эйнштейну», - вот та сложная задача, которую поставил перед собой профессор Оливер Дарригол.

Монография Дарригола – это очень подробный и математически обоснованный отчет об историческом развитии электромагнетизма, к счастью для читателя переписанный с оригинального математического выражения в современную векторную нотацию, так что не нужно бороться с громоздкой нотацией Максвелла или почти непроницаемой нотацией Хевисайда, чтобы проследить за деталями физических аргументов. Это само по себе большой акт щедрости по отношению к читателю, без которого это историческое развитие было бы чрезвычайно трудно понять.

Несколько областей произвели на меня особое впечатление.

Первая – работа Гаусса по магнетизму. Гаусс был исключительно одаренным математиком и практическим экспериментатором, и он заложил очень важные основы. Гаусс был особенно озабочен тем, чтобы детальные артефакты конкретных экспериментов не влияли на основную наблюдаемую физику. Для этого он ввел идею сокращения измерений

до абсолютных единиц расстояния, силы и переносимой массы (силы полюса) с помощью закона обратного квадрата силы. А чтобы его измерения не зависели от принятых экспериментальных процедур, он использовал несколько различных методов для измерения одной и той же физической величины.

Вторая область – это несравненный Максвелл. Он появился на сцене, когда Фарадей, по сути, завершил работу всей своей жизни. Затем Максвелл применил свои математические способности для синтеза полной системы наблюдений за всеми разрозненными эффектами электромагнетизма через процесс механического моделирования систем сил и моментов. Дарригол подробно описывает, как Максвелл использовал сложные механические аналоги (шестеренки и зубчатые колеса, ролики без трения и т.д.) для создания и перевода нагромождения эффектов в единую математическую структуру. Без этих механических аналогов Максвелл не смог бы построить свою систему математических уравнений, однако, когда синтез был завершен, механические рамки можно было отбросить, освободив математические структуры от моделей. Таким образом, набор из четырех уравнений Максвелла был поднят до статуса, которым обладают соотношения классической термодинамики. Дарригол старательно подчеркивает, что Максвелл не имел четкого представления о том, чем на самом деле является, например, электрический ток, и стоит привести цитату Максвелла по этому вопросу:

*"Крайне маловероятно, что когда мы поймем истинную природу электролиза, мы сохраним в какой-либо форме теорию молекулярных зарядов, ибо тогда мы получим надежную основу, на которой можно будет сформировать истинную теорию электрических токов и тем самым станем независимыми от этих временных теорий".*

После великой работы Максвелла по синтезу предмета остались электромагнитные волны, движущиеся в эфире, и теория, которая облекала различные наблюдения одних и тех же явлений в зависимые от рамки формы. Например, теория силы, действующей на катушку, движущуюся в магнитном поле, зависела от того, находилась ли катушка или источник поля в движении (по отношению к наблюдателю).

Также возникала сложная проблема отсутствия влияния движения эфира на скорость электромагнитного излучения, которое, как предполагалось, является его несущей средой. Эти проблемы решались несколько ситуативно, и к началу прошлого века их удалось решить достаточно количественно, особенно благодаря дальновидной работе Лоренца. Дарригол подробно описывает, как работа Пуанкаре, Лоренца и многих других предвосхитила разработки Эйнштейна. Однако история несправедливо вознаградила Эйнштейна за его вклад в каркасно-инвариантный формализм электромагнетизма, и хотя его вклад был

очень важен, игнорирование его собственного вклада делает значительную несправедливость для многих других.

Всем, кто интересуется предметом электромагнетизма, я бы рекомендовал включить эту книгу в свой список чтения. Помимо того, что эта книга является весьма монументальным научным трудом, я задался вопросом, для кого она была написана. Казалось, что для того, чтобы извлечь пользу из изучения этого текста, необходимо иметь достаточное понимание электромагнитной теории, значительно поможет знакомство со специальной относительностью, а также иметь представление о тензорном исчислении, хотя это и не обязательно.

Эти требования, казалось бы, несколько сужают круг читателей, однако здесь есть уроки, которые следует извлечь каждому, кто хочет добиться прогресса в изучении физики. Прекрасные умы, принимавшие участие в благородной борьбе за систематизацию и понимание электромагнитной теории, являются одними из величайших научных мыслителей в нашей истории, и, хотя они жили до появления двигателя внутреннего сгорания, их подход к решению проблем – уроки для всех нас сегодня.

Я не могу удержаться от упоминания цитаты, которую Дарригол приводит из Гаусса: *“Nil actum reputans si quid superesset agendum”* (Ничего не сделано, если что-то еще не доделано).

В эпоху Гаусса философия «опубликуй или погибни» не была обязательным условием академической жизни, и поэтому он мог завершить свою работу, прежде чем спешить её опубликовать.

История хорошо оценила героев исследования Дарригола: однако остается задуматься, насколько хорошо история оценит наши нынешние поколения.

---

*Физика сегодня. Февраль 2002, 55, 2, стр. 53*

**Оливер Дарригол. Электродинамика от Ампера до Эйнштейна**

*Отзыв Даниэля М. Зигеля*

*Даниэль М. Зигель – заслуженный профессор истории науки в Университете Висконсин-Мэдисон; он писал о физике в 19 и 20 веках, особенно работы Максвелла в области электричества и магнетизма.*

Можно надеяться, что кумулятивность исторической науки приведет к все более богатым, последовательным и более информативным историческим повествованиям и интерпретациям. Однако в реальном мире этот идеал редко реализуется. В отношении материала, освещаемого «Электродинамикой от Ампера до Эйнштейна» Оливера Дарригола, споры между историками часто *генерируют больше тепла, чем света*. Так обстоит дело, например, с такими вечными темами, как происхождение радикальных идей М. Фарадея об электромагнитном поле, появление нововведений Дж. К. Максвелла в области



электромагнитной теории и разработка СТО Альберта Эйнштейна в контексте электродинамики.

В этих и других темах Дарригол сумел выйти за рамки противоречий и путаницы, составив интересный, последовательный и убедительный рассказ. Взяв лучшее от различных ученых, которые внесли свой вклад в эту область, отказавшись от окарины с минимумом суеты и беспокойства, и добавив свои собственные существенные оригинальные исследования и свое собственное синтетическое видение, Дарригол создал историю электромагнитного эксперимента и теории в 19-м веке, которые представляют лучшее, что можно предложить по истории физики. В отношении трех упомянутых вечных проблем, рассказ Дарригола поддерживает следующие позиции:

Во-первых, вопреки многим недавним работам в истории науки, поворот Фарадея к теории поля рассматривается не как результат какой-то первоначальной теоретической или философской ориентации, жестко примененной в его экспериментальной и теоретической практике, а скорее, как результат взаимодействия теории и эксперимента в своей работе. Таким образом, теория поля Фарадея не была «построена» на основе фиксированных предвзятых мнений, но развивалась из его взаимодействия с миром.

Во-вторых, достижения Максвелла следует понимать не как продукт какой-то таинственной интуитивной силы, непостижимой для простых смертных, не как достижения запутанного первопроходца, который каким-то образом натолкнулся на его понимание, а скорее как результат исторического процесса, включающего: научное понимание Фарадея и Уильяма Томсона, на котором основывался Максвелл; методологические традиции университетов Эдинбурга и Кембриджа, которые Максвелл использовал в своих интересах; и целая жизнь кропотливой работы Максвелла, включающей инновационное использование как математических формализмов, так и механических моделей.

Наконец, достижение Эйнштейна в СТО следует рассматривать не как радикальный и беспрецедентный разрыв с прошлым, а как результат развития электродинамики в конце 19 и начале 20 веков. В этих разработках участвовало сообщество мыслителей, имеющих много общего, в том числе не только более известные Х. А. Лоренц и Анри Пуанкаре, но также Макс Абрахам, Альфред Бушерер, Эмиль Кон и другие. Общий вывод, который следует сделать из этих примеров, заключается в том, что инновации в науке возникают в результате исторического процесса, включающего как наблюдение, так и мышление, а также индивидуальный вклад и взаимодействие с сообществом. Кроме того, процесс инноваций может быть описан, проанализирован и понят; не нужно прибегать к непостижимой

интуиции, случайным неуклюжим или предопределенным «конструкциям» как инструментам исторического объяснения.

В книге Дарригола есть гораздо больше, чем примеры, рассмотренные выше. Целое поколение разделяет работы Фарадея-Томсона-Максвелла и Эйнштейна. В течение этого периода было много плодотворной работы как по континентальному подходу, подчеркивающему заряды и токи как фундаментальные объекты, так и по максвелловскому подходу, подчеркивающему поля. Наконец, в работах Германа фон Гельмгольца, Лоренца и других эти два подхода были объединены, в результате чего возникла классическая электромагнитная теория в том виде, в котором мы ее знаем, и на заднем плане работы Эйнштейна. Для деталей, прочитайте Дарригола; это очень богатая и сложная история, и Дарригол рассказывает её хорошо.

Как отмечает сам автор, его книга – не последнее слово по этому вопросу. Например, нюансы дихотомии «теория поля» и «действия на расстоянии» будут в дальнейшем обсуждаться. И провокационное утверждение Дарригола о том, что взгляды Эйнштейна теперь «больше не должны появляться» ... единично [или] изолированно может потребовать некоторого отпущка.

Помимо этого, читатель может иногда считать выбор слова неидиоматичным, часто будет хотеть, чтобы диаграммы из первоисточников были перерисованы, и может иногда иметь проблемы с поиском леса для деревьев в этой трудоемкой работе. С другой стороны, читатель выйдет с полным и авторитетным пониманием основных событий в области электромагнитной науки от Ампера до Эйнштейна.

Некоторые прочитают книгу до конца и будут щедро вознаграждены; другие будут погружаться в книгу по мере необходимости, и они будут также щедро вознаграждены. Так или иначе, каждый физик должен быть пользователем этой книги, если и не её покупателем за 130 долларов.

---

*Арне Шифрмахер*

**Оливер Дарригол. Электродинамика от Ампера до Эйнштейна**  
*Physikalische Blätter 57 (2001) № 6, стр.82*

Спустя 90 лет классическая «История эфира и электричества» Э. Уиттекера получила конкурента, который имеет все необходимое, чтобы утвердиться в качестве нового стандартного труда по истории электродинамики. Новая книга Оливера Дарригола прослеживает во всех соответствующих чертах историческое развитие от лекций Ампера в Королевской академии наук до «Электродинамики движущихся тел» сотрудника Бернского патентного бюро. При этом Дарригол предоставляет компетентную информацию в легко усваиваемых порциях и делает доступной богатую первичную и вторичную литературу.

Отдельные разделы (например, о феноменологическом подходе школы Неймана или о понимании эксперимента Майкельсона-Морли) можно читать независимо. Благодаря хорошему предметному указателю, книга может быть использована в качестве справочника. Каждая из девяти глав заканчивается серией выводов, в которых рассматривается большинство всеобъемлющих связей.

Так что же нового в книге Дарригола – помимо недавно полученной вторичной литературы – отличает ее от книги Уиттекера? По сути, есть три новые точки зрения:

Отношения между теоретической и экспериментальной практикой раскрываются и характеризуются через сравнения (Фарадей против Ампера, Вебер против Неймана и т.д.). Это также дает понять, что и теория, и эксперимент обычно руководствуются одними и теми же основными методологическими принципами проводящего их исследователя.

Во-вторых, электродинамика освещается как проблемная область механической редукции, которая долгое время не терпела неудачу из-за электродинамики, но неоднократно адаптировалась к ней в ходе своего развития.

И, наконец, рассматривается связь между различными, часто соперничающими традициями (например, между сторонниками полевых и дистанционных действий) – область, в которой изложение Уиттекера, несомненно, было очень односторонне предвзятым по отношению к британской (в отличие от континентальной) позиции.

Автору удалось убедительно показать, что общение никогда не прерывалось, а взаимное оплодотворение было нормой, тогда как нельзя утверждать полную независимость традиций или даже несоизмеримость взглядов. Основание Х. А. Лоренцем теории электрона – лучший пример: это был синтез самых разных британских и немецких традиций, и не случайно этот синтез удался именно голландскому коммуникатору и космополиту.

\* \* \*

Оливер Дарригол

## **Электродинамика от Ампера до Эйнштейна**

### **Предисловие**

"Электродинамика – как ее определил Ампер в начале 1820-х годов, – это наука о силах, возникающих при движении электричества".<sup>1</sup> Это стало важной областью исследования вскоре после открытия Эрстедом электромагнетизма. Настоящая книга следует эволюции предмета от его истоков до теории относительности Эйнштейна. Однако это не чисто внутренняя история. Правильное понимание некоторых центральных эпизодов требует экскурсий в другие области физики, и даже за

пределами физики: в химию в случае Фарадея, инженерию Томсона и физиологию Гельмгольца. И наоборот, история электродинамики освещает общую историю физики девятнадцатого века и ее связь с другими дисциплинами.

В 1910 г. Эдмунд Уиттекер опубликовал первый том своей великой *Истории эфира и электричества*, в котором содержится удивительно четкое изложение электродинамических теорий XIX века. Уиттекер наиболее проникновенен, имея дело с британской традицией, которой он сам обучался. В отличие от его описания, континентальная электродинамика часто модернизируется; уделяет мало внимания более широким методологическим вопросам и в значительной степени игнорирует экспериментальную деятельность. Эти недостатки были частично исправлены более поздней историографией по этому вопросу, однако более новые исследования, как правило, носят локальный характер и ограничиваются одним действующим лицом, узким периодом времени или данной традицией.

Огромное количество и разнообразие публикаций по электродинамике XIX века делает невозможной исчерпывающую историю, подобную данной в замечательном труде Джона Хейльброна “Электричество в 17 и 18 веках”. Чтобы сузить свою задачу, я ограничился работами на переднем крае фундаментальной электродинамики. Я сосредоточился на формировании концепции и методологических инновациях и пренебрег более консервативным, производным или изолированным вкладом. В частности, я оставил в стороне технологические применения электричества, если только не было эффекта обратной связи на концептуальное и инструментальное оборудование фундаментальной электродинамики. Как следствие этого выбора, настоящая работа отводит выдающуюся роль тем немногим актерам, которые преобразовали основы электродинамики своими экспериментальными, концептуальными и институциональными усилиями.

Тем не менее, я описал распространение и стабилизацию основных нововведений, уделяя особое внимание тем из них, которые имели более широкое значение в эволюции физики XIX века. В основе моего повествования лежат три эпистемологические темы

Первая тема – это связь между экспериментальной и теоретической практикой. До 1860-х годов главные электродинамики были столько же экспериментаторами, сколько и теоретиками. Их концептуальные инновации зависели от гармоничного сочетания экспериментальных и теоретических процедур. Чтобы показать, как результат зависел от местных или индивидуальных обстоятельств, я применил сравнительный подход, противопоставив, например, Фарадея Амперу или Вебера Нейману.

Вторая тема – электродинамика как полигон для различных форм механического редукционизма. Существенные новшества в электродинамической теории зависели от попыток редукции к механическим системам. И наоборот, механистический идеал развивался в соответствии с конкретными потребностями электродинамики.

Третья тема – это общение между разными традициями. Хорошо известной характеристикой истории электродинамики является длительное сосуществование полевых и дистанционных подходов. Менее известны различные стратегии, разработанные физиками этих двух традиций для общения друг с другом. Например, Максвелл выделил более феноменологический уровень электродинамической теории, который мог бы разделить континентальный физик; и Гельмгольц переосмыслил теорию Максвелла с точки зрения континентальной концепции поляризации.

Это тематическое структурирование раскрывает новые аспекты истории электродинамики и физики XIX века в целом.

Во-первых, показано, что координация экспериментальной и теоретической практики одним и тем же субъектом включала методологические принципы, которыми руководствовались как эксперимент, так и теория. Например, Фарадей следовал принципу смежности, согласно которому и исследование, и представление феноменов сводились к "слиянию фактов"; Ампер свою теорию и свои эксперименты основал на разложении электродинамических систем на элементы тока. Когда действуют такие поперечные принципы, историки больше не могут разделять экспериментальную и теоретическую деятельность данного персонажа, а философы больше не могут считать одно действие просто контролирующим другое.<sup>2</sup>

Вторая тема – механического редукционизма – принесла бы небольшую историографическую новизну, если бы механическая редукция рассматривалась как чистый идеал, относящийся к метафизике действующих лиц. Однако, в этой книге акцент делается на конкретизирующих этот идеал иллюстративных или алгоритмических процедурах. Эти процедуры являются более изменчивыми, более зависимыми от контекста и менее личными, чем может показать идеалистический взгляд. Сторонники механистического мировоззрения, такие как Томсон, Максвелл и Гельмгольц, скорректировали свои редукционистские практики в соответствии с растущими потребностями теории построения и коммуникации.

Более поздние противники механистического идеала поставили под сомнение не только его кантовскую подоплеку, но и его эффективность для построения и выражения теорий.

Моя третья тема, связь между различными традициями, скорее всего,

нарушит историографические и эпистемологические привычки.

Предыдущие исследования физики XIX века колебались между двумя крайностями. В более традиционных исследованиях различия между традициями считаются декоративными, а коммуникация – беспроблемной. В более поздних, пост-Кунианских исследованиях, различия между традициями часто принимаются настолько радикальными, что коммуникация между ними практически невозможна; знание становится по существу локальным. В настоящем исследовании вырисовывается промежуточная картина. Выявлено несколько пар традиций (британская/континентальная, веберовская/неймановская, томсоновская/максвелловская и т.д.), в которых глубокие различия существовали на разных уровнях – от онтологических обязательств до социально-институциональных, экспериментальных и теоретических практик. Тем не менее, представители этих антагонистических традиций общались таким образом, что допускали сравнения, адаптацию и взаимообогащение. Фактически, наиболее творческие деятели желали и планировали это взаимодействие. Разнообразие средств коммуникации, описанных в данном исследовании, должно послужить основой для дискуссий об объективирующих и унифицирующих целях науки.

Основной текст этой книги организован следующим образом:

- в главе 1 рассказывается о реакциях Ампера и Фарадея на открытие Эрстедом электромагнетизма в 1820-х годах и о том, как они основали новую науку о электродинамике.
- в главе 2 показано, как в 1840-х годах в из количественных исследований магнетизма и электродинамики в Германии возникли две важные исследовательские традиции, лидерами которых были с одной стороны Гаусс и Вебер, с другой – Нейман и Кирхгоф.
- глава 3 посвящена двум систематическим способам введения сущностей в пространство между электрическими и магнитными источниками: М. Фарадея в 1830–40-х годах и В. Томсона в 1840-х гг.
- глава 4 описывает формирование теории Максвелла до *Трактата* 1873 г.
- глава 5 рассказывает о британских разработках этой теории в 1880-х гг.
- глава 6 показывает, как Гельмгольц предоставил общую основу для сравнения предсказаний существующих теорий электродинамики; как Герц, работая в этих рамках, производил и обнаруживал ЭМ-волны; и как немецкие физики тогда читали Максвелла.
- главы 7 и 8 рассказывают о способах введения ионов или электронов в теорию Максвелла: в связи с эмпирическими исследованиями электропроводности через растворы и газы и в связи с трудностями электромагнитной оптики.
- наконец, в главе 9 рассматриваются различные подходы к электродинамике движущихся тел в начале двадцатого века, в том числе теория относительности Эйнштейна.

В более теоретических разделах я показал случаи, когда доступность математики сдерживала концептуальные разработки, и случаи, когда новые физические картины вызвали появление новой математики. Однако в основном тексте я сводил формализм к минимуму.

Серия приложений предоставляет больше математического аппарата. Там я свободно использую анахронические методы и обозначения, потому что моя единственная цель – кратко показать последовательность, полноту и взаимосвязь соответствующих теорий.

В основном тексте я тщательно уважал оригинальные стили авторов. Моя единственная вольность – замена декартовой системы координат современной векторной записью, поскольку последняя может в значительной степени рассматриваться как аббревиатура от первой. Разделы, посвященные происхождению векторной записи, должны исправить любое возникающее в результате заблуждение.

Моему изучению обширной первичной литературы за последние несколько лет очень помогло обилие и превосходство более сфокусированных историй электродинамики. Независимо от того, насколько богаты эти источники и насколько сильны мои усилия по их синтезу и дополнению, я не претендую на то, что закрыл главу истории науки. Напротив, я надеюсь стимулировать дальнейшие исследования и размышления за пределами навязанных мне ограничений моей собственной работы и в пробелы, которых я до сих пор не осознаю.

Я буду счастлив, если я выделю несколько удобных троп к великолепному пейзажу высоких вершин истории электродинамики.

Я, конечно, несу ответственность за оставшиеся недостатки.

Париж, 1999 г. О.Д

<sup>1</sup> Для явного определения. См. Ampere 1826b: 97.

<sup>2</sup> Общее обсуждение сквозных методологических принципов, см. Darrigol 999

### Условные обозначения.

- Для двух векторов  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$  обозначает их скалярное произведение и  $\mathbf{A} \times \mathbf{B}$  – их векторное произведение.
- Символ  $\nabla$  («набла») обозначает оператор градиента. Следовательно, для векторного поля  $\mathbf{A}$ ,  $\nabla \times \mathbf{A}$  обозначает вихрь этого поля (rot), а  $\nabla \cdot \mathbf{A}$  его расхождение (div).
- Символ  $\Delta$  обозначает оператор Лапласа.
- Символом  $dl$  обозначен элемент длины,  $ds$  – элемент криволинейных абсцисс,  $dS$  – элемент поверхности,  $d\tau$  – элемент объема,  $\delta$  – вариация,  $\partial/\partial x$  или  $\partial$ , частная производная по  $x$ ,  $D/Dt$  конвективная производная (см. Приложение 5).
- В книге были унифицированы обозначения электрических величин (исключения будут понятны из контекста), такие как:

**A** : векторный потенциал  
**B** : магнитная индукция  
 $c$  : [электромагнитная единица заряда]/[электростатическая единица заряда] (которая равна скорости света в теории Максвелла)  
 $C$  : относительная скорость, для которой исчезает сила Вебера между двумя равномерно движущимися электрическими частицами ( $C = c\sqrt{2}$ )  
**D** : электрическое смещение  
 $e$  : электролитический квант заряда  
**E** : электрическая сила (на единицу точечного заряда)  
 $\varepsilon$  : диэлектрическая проницаемость (за исключением главы 2, где она обозначает постоянную Неймана для электромагнитной индукции)  
**f** : механическая сила  
 $\phi$  : электрический потенциал  
**H** : магнитная сила (на единицу точечного заряда)  
 $h$  : постоянная Холла  
 $i$  : интенсивность электрического тока  
 $j$  : плотность тока электрической проводимости  
 $k$  : основная постоянная электродинамики Гельмгольца  
 $\kappa$  : электрическая поляризуемость  
 $\chi$  : магнитная поляризуемость  
**J** : плотность полного электрического тока (включая ток смещения Максвелла)  
 $L$  : лагранжиан  
 $m$  : масса  
**M** : магнитный момент  
 $n$  : оптический индекс  
 $\mu$  : магнитная проницаемость; веберовская *приведенная масса*.  
 $P$  : потенциал Неймана  
**P** : диэлектрическая поляризация  
**П** : вектор Пойнтинга  
 $q$  : электрический заряд  
**r** : вектор положения  
 $\rho$  : плотность заряда  
 $\sigma$  : проводимость  
 $\sigma_j$  : система напряжений Максвелла  
 $t$  : время  
 $T$  : кинетическая энергия  
**u** : скорость Земли  
**v** : скорость  
 $U$  : энергия  
 $V$  : потенциал или потенциальная энергия  
 $x, y, z$  : декартовы координаты  
 • Используются четыре системы единиц: электростатические,



электродинамические, электромагнитные и рационализированные электромагнитные единицы. Первые три системы определены в Приложении 2. Четвертая получена из третьей путем исключения фактора  $4\pi$  в исходных терминах уравнений поля. Применительно к теории Максвелла рационализация дает  $\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho$  и  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ . Соответствующие потенциалы и результирующие выражения законов силы Кулона и Ампера содержат делитель  $4\pi$  (математическая причина  $4\pi$  – тождество  $\Delta (1/r) + 4\pi\delta(\mathbf{r}) = 0$ ). В общем, для данной теории используется единичная система, для которой основные уравнения являются простейшими:

электродинамическая система для теории Ампера, электростатическая для Вебера; электромагнитный для Неймана и Гельмгольца, рационализированный электромагнитный для Максвелла, Хевисайда и Герца. Такое использование иногда противоречит выбору изобретателя: Гельмгольц предпочитал электростатические единицы, а Максвелл использовал частично рационализированные единицы.

- Цитаты источников представлены в формате автор-дата и относятся к работам, перечисленным в одной из двух библиографий (первичная или вторичная литература). Сокращения, используемые в цитатах и в библиографиях, объясняются ниже. Когда для библиографического элемента упоминается перепечатка ("Также в..."), номера страниц относятся к ней. Квадратные скобки, заключающие дату, указывают, что рассматриваемая работа является неопубликованной рукописью. Символ # обозначает номер абзаца.
- Когда указанная библиографическая запись указывает на несколько публикаций одного и того же текста, номера страниц в цитировании этой записи относятся к последней из этих публикаций.
- Переводы мои, если я не цитирую источник, который содержит или включает перевод. Рисунки из дневника Фарадея воспроизводятся с разрешения Королевского института.

## 1. Основы

### 1.1 Введение

В начале девятнадцатого века электричество уже было широкой областью исследований, с различными методами и множественными дисциплинарными связями. Самой старой и наиболее понятной частью предмета было электричество трения, особенно его распределение по проводникам и его механические воздействия. В своих знаменитых публикациях 1780-х годов Чарльз Кулон, военный инженер, основал количественную электростатику (позже названную так Ампером). Он установил два электрических флюида, положительный и отрицательный, с помощью своего знаменитого торсионного баланса утвердил закон обратных квадратов и разработал его последствия для равновесия

проводников в простых конфигурациях.

В 1812 году Симеон Дени Пуассон, один из первых политехников, завершил математический аппарат теории Кулона. Он позаимствовал из работ Лагранжа и Лапласа о гравитации то, что мы теперь называем потенциалом ( $V$ ), написал соответствующее дифференциальное уравнение ( $\Delta V + 4\pi\rho = 0$ , где  $\rho$  – плотность заряда), решил его в простых случаях и улучшил согласие теории с экспериментальными результатами Кулона.<sup>1</sup> Электростатика Кулона и Пуассона превосходно соответствовала схеме Лапласа, которая тогда доминировала во французской физике. Лаплас и его ученики стремились свести каждое физическое явление к центральным силам, действующим между частицами весомых и невесомых жидкостей, по аналогии с теорией гравитации. В других странах количество, функция и действительность электрических флюидов были спорными вопросами. Британцы и итальянцы предпочли гипотезу Бенджамина Франклина о едином флюиде, которая в равной степени пригодна для количественного анализа, как показал Генри Кавендиш до Кулона. Некоторые из них вообще не предпочитали флюид или, по крайней мере, избегали прямого действия на расстоянии с понятиями, напоминающими электрические «атмосферы восемнадцатого века»<sup>2</sup>.

В Германии немногие маргинальные последователи *Naturphilosophie* Фридриха фон Шеллинга критиковали общее представление о флюидах, действующих на расстоянии, и стремились к более глубокому единству природы, которое связывало бы явно несвязанные явления. Они выступали за динамичный антиньютоновский взгляд на физическое взаимодействие, в котором не следует различать материю и силу: материя была лишь балансом двух противоположных сил, и каждое действие на расстоянии должно было быть сведено к распространяющемуся возмущению или полярности этого баланса. Хотя эти романтические спекуляции порой приносили плоды, они противоречили основному эмпиризму современной немецкой физики. Для количественных исследований электричества ньютоновские теории флюида были единственной подходящей основой.<sup>3</sup>

То же самое можно сказать и о магнетизме. Главной количественной теорией этого предмета снова была теория Кулона, основанный на предположении о двух флюидах (австралийском и бореальном), подчиняющихся закону обратных квадратов. Гениально Кулон объяснил невозможность изоляции магнитного полюса, предположив, что магнитные флюиды постоянно заключены в молекулы магнитных тел. Его магнитные измерения, однако, казались менее надежными, чем его электрические, и аргументы в пользу магнитных флюидов были менее прямыми, чем в электрическом случае. Следовательно, магнитная теория Кулона встретила больше скептицизма, чем его теория электричества.

И все же аналогия между этими двумя теориями понравилась ученикам Лапласа. Уже после того, как Ампер предложил противоречивый взгляд на магнетизм, Пуассон применил свой математический арсенал к кулоновскому взгляду на магниты.<sup>4</sup>

Самой популярной электрической темой был гальванизм. Он внезапно расцвел в 1800 году, когда Алессандро Вольта открыл электрический столб. Сам Вольта рассматривал напряжение и разрядку столба как электрическое явление, следовательно, принадлежащее физике. Тем не менее, другие дисциплины извлекали выгоду из этого удивительного устройства. Его физиологические эффекты и медицинские применения интенсивно изучались в соответствии с вкладом лягушки в открытие Луиджи Гальвани. Британское открытие электролиза привлекло внимание химиков, так что электричество обычно считалось частью химии.<sup>5</sup>

В соответствии с первоначальной интуицией Вольты электрические, термические, физиологические и химические эффекты столба оказались такими же, как и у фрикционного электричества. Обычно считалось, что устройство Вольта ведет себя как батарея лейденских банок, обладающих таинственной способностью самопроизвольно перезаряжаться. Когда полюса столба были соединены проводником, разряд непрерывно повторялся, так что его последствия были постоянными. На этой картине только состояние столба перед разрядкой казалось поддающимся количественному исследованию. Это может частично объяснить, почему количественные исследования гальванического тока до 1820-х годов были столь скудны.<sup>6</sup> Помимо аналогии с лейденской банкой, были глубокие разногласия по поводу причины и характера работы столба. Вольта предположил, что электрическое напряжение возникло при контакте двух разных металлов. В серии  $\text{Cu}/\text{Zn}/\text{mp}/\text{Cu}/\text{Zn}/\text{mp}/\text{Cu}/\text{Zn} \dots$  ( $\text{Cu}$  = медь,  $\text{Zn}$  = цинк,  $\text{mp}$  = влажная бумага) роль влажной бумаги заключалась в том, чтобы просто избежать контакта  $\text{Zn}/\text{Cu}$  – который отменял бы эффект предыдущего контакта  $\text{Cu}/\text{Zn}$  – без предотвращения прохождения электричества. Вольта подтвердил это предположение, показав, что два изолированных диска из меди и цинка демонстрировали противоположные электрические заряды после временного контакта. Французские математики одобрили точку зрения Вольты, в которой они увидели возможность свести гальванизм к электростатике. Шведский химик Йонс Якоб Берцелиус основал свое популярное учение о химической комбинации внутримолекулярных вольтаических сил.<sup>7</sup>

Теория контакта была менее удачной в Англии. Ведущий химик Хамфри Дэви нашел много причин, чтобы предположить, что за электроэнергию столба были ответственны химические изменения. Мало того, что эффекты столба всегда сопровождались химическими процессами, но сила столба, по-видимому, была связана со сродством

участвующих химических веществ. Дэви воспользовался последним открытием, чтобы построить новые виды столбов. Он также предложил механизм электролиза и до Берцелиуса предположил, что химические силы имеют электрическое происхождение.<sup>8</sup>

В целом, новая наука о гальванизме предлагала разительный контраст с электростатикой и магнетизмом. Последние предметы достигли состояния совершенства и были гордо показаны французами как главные достижения их математической физики. Наоборот, гальванизм был богатой, неорганизованной областью, растущей во многих направлениях (физическом, химическом, физиологическом и медицинском), но в основном избегающей математического анализа. В 1820 году произошли радикальные изменения: открытие электромагнетизма неожиданно привело к соприкосновению гальванизма и магнетизма и размывало методологические и социально-профессиональные границы, которые разделяли две темы.

После краткого изложения открытия Эрстеда в настоящей главе предлагается анализ результатов работ Ампера и Фарадея, которые основали электродинамику

<sup>1</sup> Coulomb 1784-1788; Poisson 1811, 1813. Также в Whittaker, 1951: 57-9,60-62; Heilbron 1979, 1982: 225-228, 236-240; Blondel 1982: 13-16; Gillmor, 1971 (о Кулоне); Blondel and Dorries 1994 (на балансе Кулона); Grattan-Guinness 1990, Vol. 1: 496-513 (о Пюассоне).

<sup>2</sup> О физике Лапласа, см. Crosland 1967; Fox 1974; Heilbron 1993; Grattan-Guinness 1990, Vol.1: 436-517. О синглизме/дуализме, см. Heilbron 1982: 213-18, 228-234 (Кавендин); Blondel 1982: 14-15. Об альтернативных взглядах, также в Heilbron 1981.

<sup>3</sup> О *натурфилософии*. См. Caneva 1978; Blondel 1982: 29-30; и Jungnickel and McConnmach 1986. Vol. 1: 27-8 о немецком отказе.

<sup>4</sup> Coulomb 1785; Poisson 1826. Также Whittaker 1951: 59-60,62-5; 1982: 16-18; Heilbron 1982: 87-88; Grattan-Guinness 1990, том. 2: 948-53 (о Пюассоне).

<sup>5</sup> см. Whittaker 1951: 67-75; Heilbron 1982: 233-236; Blondel 1982: 19-22.

<sup>6</sup> см. Brown 1969: 64; Blondel 1982: 21-2; Heilbron 1982: 196.

<sup>7</sup> см. Whittaker, 1951: 71-72; Brown 1969: 76-82 (о французской теории); Blondel 1982: 22-23; Whittaker 1951: 78-79 (о Берцелиусе).

<sup>8</sup> см. Whittaker 1951: 74 – 76; Blondel 1982: 25-27.

### 1.1.1 Электромагнетизм

Несмотря на математическую аналогию их фундаментальных законов равновесия, электричество и магнетизм обычно считались совершенно несвязанными явлениями. Их причины и последствия были совершенно разными: электрификация требовала насильственных действий и подразумевала насильственные эффекты, такие как искры и гром, тогда как магнетизм казался очень тихой силой. Намагничивание громом, которое было давно известно, рассматривалось как вторичное воздействие механического или термического происхождения. Еще в 1804 году блестящий *натурфилософ* Иоганн Риттер полагал, что обнаружил действие незамкнутого столба на магнит, и даже объявил о электролизе воды с помощью магнитов. Вскоре он был осмеян

французским разбором его заявления. Любой, кто знал об этом эпизоде и предполагал, что жидкости для электричества и магнетизма различны, были естественно предрасположены к подобным попыткам.<sup>9</sup>

В июле 1820 года Ганс Христиан Эрстед, датский профессор и друг Риттера, отправил ведущим европейским физикам свою рукопись на латинском языке с потрясающим названием:

***Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magnamam.***

Погруженный в глубины немецкой натурфилософии, он давно ожидал связи между электричеством и магнетизмом. Он понимал гальванический ток как распространяющееся чередование разложений и перекомпоновок двух электричеств и сделал этот «электрический конфликт» источником тепла, света и, возможно, магнетизма. Не нужно говорить о философии Эрстеда более, учитывая, что ведущие исследователи электромагнетизма не удосужились исследовать ее дальше.<sup>10</sup>

Большая часть основного текста Эрстеда была точным описанием ряда экспериментов, выполненных с гальваническим источником, соединительным проводом и вращающейся магнитной иглой. Что касается гальванического аппарата, он следовал рецепту Берцелиуса: 20 медно-цинковых ячеек, заполненных сульфо-азотной смесью. Он удостоверился, что провод стал красным при подключении к аппарату, в качестве теста на сильный электрический конфликт. Он подвесил магнитную иглу, как это обычно делается в компасе, позволил ей принять свое положение равновесия вдоль магнитного меридиана, приблизился к проводу и подключил его к вольтову столбу.<sup>11</sup>

В первом опыте Эрстеда проволока находится над иглой и параллельна ей. Если северная оконечность провода соединена с отрицательным полюсом столба, северный полюс иглы двигался в направлении запада.

В следующем опыте Эрстед сместил проволоку на восток или запад и заметил то же самое, хотя и немного слабее. Он прокомментировал:

*"Наблюдаемый эффект нельзя отнести к притяжению, потому что, если отклонение иглы зависело от притяжения или отталкивания, один и тот же полюс должен двигаться к проводу, независимо от того, находится ли последний на восточной стороне или на западной стороне".<sup>12</sup>*

Затем Эрстед изменил ориентацию иглы, проволоки и магнитного меридиана. Два из полученных экспериментов заслуживают особого упоминания из-за их сходства с более поздними наблюдениями Ампера и Фарадея. В первом случае проволока вертикальная, ее нижний конец соединен с положительным полюсом столба и обращен к северному полюсу иглы. Затем этот полюс движется на восток. Если вместо этого проволока, все еще находясь в вертикальном положении, обращена к одной стороне иглы (восток или запад), между северным полюсом и центром иглы, северный полюс перемещается к западу. В другом

интересном эксперименте проволока была изогнута в вертикальной U-образной форме. Тогда каждая ветвь U притягивает или отталкивает полюса иглы.<sup>13</sup>

Из своих наблюдений Эрстед сделал три существенных вывода:

1. Электрический конфликт действует на магнитные полюса.
2. Электрический конфликт не ограничивается проводником, но также действует вблизи проводника.
3. "Электрический конфликт образует вихрь вокруг провода".

Чтобы обосновать третий пункт, Эрстед утверждал:<sup>14</sup>

*"Иначе нельзя было бы понять, как одна и та же часть провода движет магнитный полюс на восток, когда он находится над ним, и движется на запад, когда он находится под ним. Противоположное действие на концах одинакового диаметра является отличительной чертой вихрей".*

Наконец Эрстед предложил завершить картину электрического конфликта в соответствии с завихренностью магнитного воздействия:

*"Все эффекты, которые мы наблюдали и описывали на северном полюсе, легко объяснить, если предположить, что отрицательная электрическая сила или вещество следует за спиралью правого смещения и действует на северный полюс, не воздействуя на южный полюс. Влияние на южный полюс объясняется аналогичным образом, предполагая, что положительное электрическое вещество движется в противоположном направлении и действует на южный полюс, не воздействуя на северный полюс".*

Ботанический термин *dextrorsum* (определяющий спиральность альпийских растений) не выдержал конкуренции с *bonhomme* Ампера или штопором Максвелла. Но это было первое из мнемонических устройств, предложенных физиками для полярности электромагнитного воздействия. С самого начала Эрстед поместил дуальность круговой оси в сердце электромагнетизма.<sup>15</sup>

В ретроспективе наблюдения Эрстеда были точными, а его выводы – глубокими. Он понимал невозможность свести электромагнетизм к магнитным притяжениям или отталкиванию, и все же видел, как имитировать такие взаимодействия, изгибая соединительный провод. Самое главное, он понял, что воздействие прямолинейного провода на магнитный полюс было круговым, с центром в проводе. Некоторые особенности его публикаций, однако, препятствовали полному пониманию его содержания. Он не предоставил никаких цифр или диаграмм. Он действовал в условиях, для которых электромагнитный эффект сравним с магнитным воздействием Земли, и поэтому пришел к своим общим выводам косвенно, мысленно вычитая влияние Земли. Он сформулировал эти выводы в терминах конкретной картины гальванических токов, хотя его описание отдельных экспериментов было чисто функциональным. Основная идея кругового действия появилась только в контексте электрического конфликта, понятия инопланетного для большинства читателей Эрстеда. Несмотря на эти неясности,

удивительное утверждение о действии между гальваническим током и магнитом было легко подтвердить. В течение нескольких недель лучшие философы мира вошли в привлекательные земли электромагнетизма. Большинство из них пытались свести новое явление к временному магнетизму проволоки. Таким образом, они могли игнорировать сомнительные предположения Эрстеда об электрическом конфликте и применять свои прежние знания о магнитных силах. И все же два человека, которые больше всего повлияли на последующую историю электромагнетизма, не пошли по этому естественному пути.<sup>16</sup>

<sup>9</sup> см. Blondel 1982: 27-30

<sup>10</sup> Oersted 1820; 1812, 1813 электрический конфликт. Также в Meyer 1920; Stauffer 1957; Caneva 1980; Heilbron 1981: 198-9

<sup>11</sup> Oersted 1820: 215

<sup>12</sup> Oersted 1820: 216.

<sup>13</sup> Oersted 1820: 217.

<sup>14</sup> Oersted 1820: 218

<sup>15</sup> Oersted 1820: 218. О философском анализе роли дуальности осевой петли. Также в Châtelien 1993

<sup>16</sup> О раннем восприятии открытия Эрстеда, см. в Meyer 1920: 101-8; Heilbron 1981: 199-204; Blondel 1982: 44-8

---

## 1.2 Исследования Ампера

Первым исключением был Андре-Мари Ампер, математик, увлекающийся теоретической химией и страстью к философии. Для физики он мало что сделал, кроме своего раннего неопубликованного вопроса о принципах электричества и магнетизма. Известие об открытии Эрстеда изменило его судьбу в возрасте 45 лет. Летом 1820 года он начал неистовые исследования, которые, по мнению Джеймса Клерка Максвелла, сделали его «Ньютоном электричества».<sup>17</sup>

### 1.2.1 Отмена магнита

Ампер впервые отметил усложнение экспериментов Эрстеда из-за магнитного воздействия Земли. Он задумал то, что сейчас называется аstaticкой иглой, то есть магнитной иглой, плоскость вращения которой перпендикулярна Земле. В этой конфигурации ориентация иглы зависит только от действия проволоки. Ампер обнаружил, что игла находится под прямым углом к самой короткой линии между центром иглы и проволокой. Здесь был простой факт электромагнетизма, из которого могли быть получены более сложные наблюдения Эрстеда.<sup>18</sup> Тогда Ампер искал подобный эффект, производимый самой вольтовой батареей. Эксперимент ни в коем случае не был излишним из-за отсутствия единого мнения о работе батареи: вопрос существования тока внутри батареи было открытым. По сути Ампер сформировал концепцию "цепи", в которой "электрический ток" был замкнут. В то же время он превратил подвесную магнитную стрелку в универсальный

токовый детектор, который вскоре назвал "гальванометром"<sup>19</sup>.

На этом этапе Ампер задумался:

*"Учитывая, что порядок обнаружения двух фактов, не имеет никакого значения к доступным аналогиям, мы могли бы предположить, что, прежде чем мы узнали об ориентации магнитной иглы по направлению Юг-Север, мы уже знали свойство иглы занимать перпендикулярное положение к электрическому току [...]. Тогда для того, кто пытается объяснить ориентацию Юг-Север, разве не было бы самой простой идеей предположить электрический ток в Земле?"*

С этой точки зрения магнитное свойство Земли было сведено к электрическому току, циркулирующему вдоль параллелей Земли. Ампер также вообразил, что неоднородный состав Земли вдоль параллели создал естественный электрический столб, замкнутый на себя – устройство, магнитную активность которого он только что доказал.<sup>20</sup>

Затем Ампер вернулся к аналогии между Землей и магнитом, чтобы сделать вывод, что каждый магнит обязан своими свойствами существованию замкнутых токов в своей массе. Как следствие, электрические токи должны были обладать всеми свойствами магнита. В частности, электрический ток должен был притягивать или отталкивать магнитную иглу. Предположительно, ток, протекающий по плоской или винтовой спирали, будет создавать северный полюс и южный полюс.

Ампер сообщил об этих размышлениях во Французскую академию 18 сентября, всего через несколько дней после того, как там был продемонстрирован эффект Эрстеда, и до того, как он доказал что-либо, кроме магнитного действия тока в батарее и мощности электрического тока для привлечения магнитной иглы, подвешенной на нитке.<sup>21</sup>

Новая теория магнетизма Ампера соответствовала философии его ранних неопубликованных попыток реформировать электричество и магнетизм.<sup>22</sup> Он полагал, что в теории, основанной на различных видах флюидов, не было единства, которое должно быть найдено в Божьих планах Вселенной. Должна была быть одна фундаментальная сила, желательно исключаяющая прямое действие на расстоянии. Новая концепция магнита была первым шагом в правильном направлении, т.к. устраняла магнитные флюиды. Это мнение противоречило лапласианской ортодоксальности. Ампер стремился, однако, соответствовать другим критериям французской математической физики. Он хотел построить свою теорию на твердых экспериментальных основаниях и облечь ее в безупречную математическую форму.

25 сентября Ампер продемонстрировал скептически настроенным академикам, что токи в плоских спиралях притягивают друг друга и реагируют на стержневой магнит. Он заказал у компетентного механика довольно сложный аппарат. Основной трудностью было подать ток в спираль, препятствуя ее подвижности. Универсальное приспособление



Ампера состояло из небольших ртутных чашек, в которых могли вращаться концы подвижной части цепи, осуществляя при этом контакт с проводами батареи. Ампер считал, что с его вращающимися спиралями он дал «окончательное доказательство» эквивалентности между магнитами и током. Позже в том же месяце он получил более совершенную имитацию стержневого магнита спиралью тока, подвешенной за середину (рис. 1.1).<sup>23</sup>

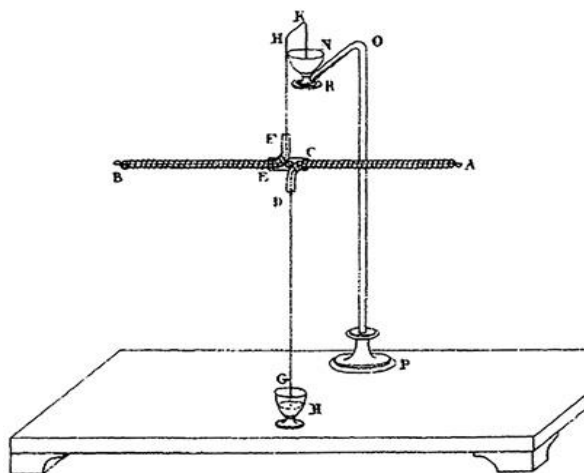


Рис. 1.1. Аппарат для отображения эквивалентности между спиральным током и стержневым магнитом (Ампер, 1820b).

<sup>17</sup> Maxwell 1873a: № 528. О биографии Ампера и точной библиографии, также в Hofmann 1995.

<sup>18</sup> Ampere 1820a, 1820b. Также в Blondel 1982: 69-70; Hofmann, 1995: 236-8; Steinle 1998: примечание 20.

<sup>19</sup> Ampere, 1820a. 1820b. Также в Blondel 1982: 72-73.

<sup>20</sup> Ampere. 1820b: 238.

<sup>21</sup> Ampere 1820a, 1820b.

<sup>22</sup> см. Ampere [1801].

<sup>23</sup> Ampere 1820a. 1820b. Также в Blondel 1982: 75-6; Hofmann 1995: 242-244.

### 1.2.2 Физические элементы токов

Затем исследования Ампера приняли более аналитический характер. С самого начала своих исследований он полагал, что взаимодействие между двумя токами можно проанализировать с точки зрения элементов тока. Эксперименты по притяжению/отталкиванию между двумя частями параллельных/антипараллельных прямолинейных токов были проведены в октябре 1820 г. с помощью прибора, показанного на рис. 1.2.

За исключением ртутных чашек (R, S, T, D, X, Y) и окружающей стеклянной коробки, конструкция устройства была полностью продиктована необходимостью изолировать взаимодействие двух токовых элементов (здесь AB и CD), от действия остальной части цепи, к которой они принадлежат.

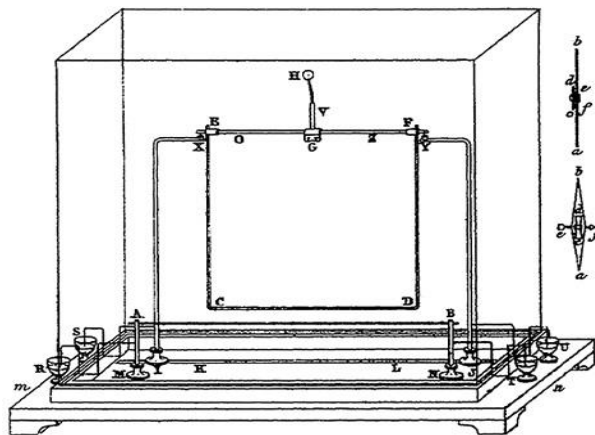


Рис. 1.2. Прибор для отображения действия между двумя параллельными прямолинейными токами (Ампер, 1820b).

Сегмент АВ длиннее CD, а противовес Н отрегулирован таким образом, чтобы в положении равновесия (без токов) CD был очень близок к АВ. Тогда действие АВ на CD доминирует над всеми другими электрическими воздействиями и определяет вращение CDEF вокруг (непроводящей) оси EF.<sup>24</sup>

В соответствии с этой конкретной возможностью изолировать две части тока, Ампер приписал силе между двумя элементами тока отдельное физическое существование. Следовательно, он заставил эту силу подчиняться равенству действия и реакции, и она лежала на линии, соединяющей элементы<sup>25</sup>.

Для получения информации об угловой зависимости он использовал прибор, в котором два прямолинейных тока могли свободно вращаться в плоскостях, перпендикулярных линии, соединяющей их центры. В октябре он догадался, что в наиболее общей конфигурации сила между двумя элементами тока пропорциональна

$$(\cos \gamma \sin \alpha \sin \beta) / r^2 \quad (1.1)$$

Эти три угла показаны на рис. 1.3:

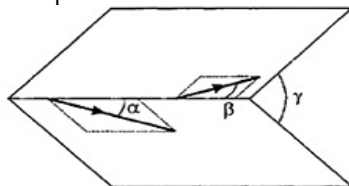


Рис. 1.3. Углы, определяющие взаимную ориентацию двух токовых элементов.

Аналогия с гравитационными силами диктовала зависимость от расстояния  $r$  между двумя элементами, центральный характер сил и исключение элементарных крутящих моментов. Простота, необходимость извлечь свойства магнитов и два эксперимента с прямолинейными токами подсказали угловую зависимость<sup>26</sup>.

В том же месяце А. Ампер сконструировал торсионные весы, которые могли бы измерить силу между двумя элементами тока в любой геометрической конфигурации и таким образом проверить его предположительную формулу. Вскоре он отказался от этого проекта, предположительно потому, что непостоянство его батареи и трение в ртутных чашках не позволяли добиться достаточной точности.<sup>27</sup>

Амперу нужен был другой способ обосновать свою основную формулу. Он нашел его в провале менее амбициозного эксперимента, в котором он проверял взаимодействие двух параллельных спиралей. К его удивлению, спирали вели себя как параллельные провода вместо того, чтобы имитировать параллельные стержневые магниты.

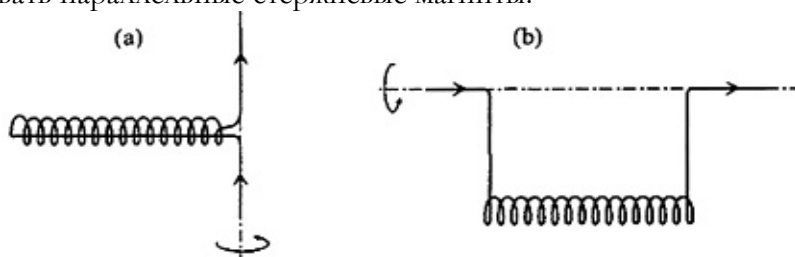


Рис. 1.4. Два вида спирального тока.

Вскоре он узнал причину аномалии. В его предыдущих экспериментах со спиралью ток подводился к спирали так, как показано на рис. 1.4 (а), что позволяло ей вращаться вокруг вертикальной оси. В новом эксперименте ток подводился по схеме рис.1.4 (б), которая позволяла вращение вокруг горизонтальной оси. Ампер предположил, что ток в витке спирали можно рассматривать как суперпозицию кругового тока вокруг оси и линейного тока вдоль оси. Если предположить, что суммарное действие тока равно результату действия парциальных токов, то спираль на рис. 1.4 (а) можно сравнить только с параллельными круговыми токами магнита; спираль на рисунке 1.4 (б) включает в себя дополнительное действие линейного тока, который доминирует над первым действием, когда радиус спирали мал.<sup>28</sup>

Ампер обнаружил здесь более общий принцип, согласно которому любые два бесконечно коротких тока с одинаковыми пределами эквивалентны, независимо от того, насколько они могут быть искривлены. Этот принцип сильно ограничивал угловую зависимость силы между двумя элементами тока. Ампер показал это следующим образом<sup>29</sup>

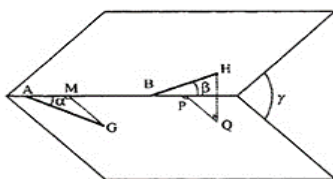


Рис. 1.5. Ортогональное разложение двух элементов тока.

Два элемента AG и BH, представленные на рис. 1.5, можно разложить на элементы AM и MG, с одной стороны, и BP, PQ и QH, с другой. В соответствии с принципом и в очевидном обозначении сила  $(AG \rightarrow BH)$  равна сумме сил  $(AM \rightarrow BP)$ ,  $(AM \rightarrow PQ)$ ,  $(AM \rightarrow QH)$ ,  $(MG \rightarrow BP)$ ,  $(MG \rightarrow PQ)$  и  $(MG \rightarrow QH)$ . Назовем  $m$  силой, действующей между двумя параллельными единичными элементами тока, когда они перпендикулярны линии, соединяющей их центры, а  $n$  – аналогичной силой, когда они лежат на этой линии. Тогда сила  $(AM, BP)$  пропорциональна  $n \cos a \cos \beta$ , а сила  $(MG, PQ)$   $m \sin a \sin \beta \cos \gamma$ . Все остальные силы исчезают из-за симметрии: геометрическая конфигурация соответствующих элементов инвариантна при инверсии одного из токов (пренебрегая бесконечно малыми второго порядка). Следовательно, сила, действующая между двумя произвольными элементами тока, имеет угловую зависимость

$$\sin a \sin \beta \cos \gamma + k \cos a \cos \beta, \quad (1.2)$$

где  $k$  равно  $n/m$ . Объявляя об этом результате в декабре 1820 года, Ампер полагал, что он может «без всяких неудобств»<sup>30</sup> принять  $k$  равным нулю.

Чтобы закрепить эту красивую аргументацию, Ампер задумал эксперименты, которые прямо доказали бы лежащий в основе принцип. Его первой идеей было сравнить последовательные действия прямолинейного и синусоидального тока на магнит. Проекту опять помешала нестабильность гальванического источника. В итоге Ампердэр заставил прямолинейный и синусоидальный токи одновременно действовать на третий подвижный ток, расположенный на равном расстоянии. Так родился его знаменитый *ноль-метод*. Как обычно для него, Ампер описал аппарат и ожидаемые результаты до того, как они были сделаны. На чертеже, который он предоставил (рис. 1.6), SR и PQ – это два сравниваемых тока, а GH – испытательный ток. Обратите внимание, что Ампер тщательно исключил влияние соединительных проводов. Например, mn и de расположены на одинаковом расстоянии от тестового тока; провода fg и hi для подвода тестового тока очень близки друг к другу, так что их эффекты взаимно аннулируются в соответствии с предыдущим экспериментом. Ампер избежал воздействия магнитного поля Земли, включив тестовый ток в двойную петлю GFHI, BCDE.<sup>31</sup>

Этот эксперимент завершил первый этап исследований Ампера, в котором открытие Эрстеда было единственным внешним стимулом, за исключением нескольких замечаний Лапласа и его друзей Августина Френеля и Франсуа Араго.

К Рождеству 1820 года у Ампера были в руках основные элементы его электродинамики: экспериментальные устройства и математическая формула для взаимодействия двух токов, нулевой метод и сведение магнетизма к движению электричества.

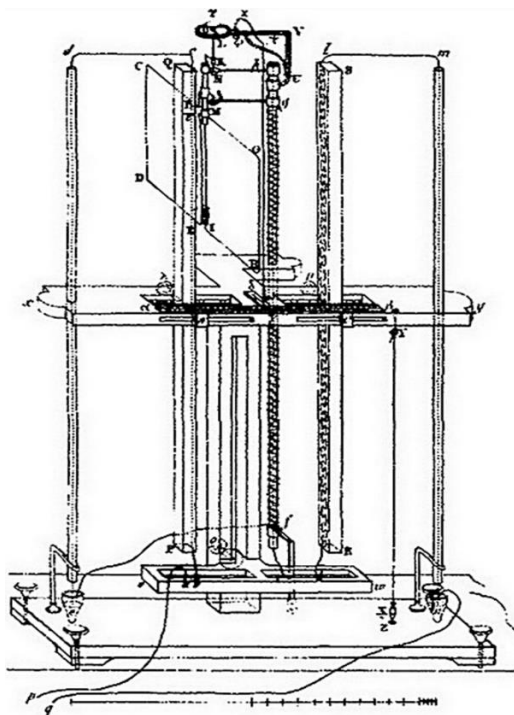


Рис. 1.6. Аппарат для доказательства закона синусоидальных токов (Ампер 1822с).

Сохранялась некоторая неопределенность в отношении точного выражения силы между двумя элементами тока, и все еще отсутствовал систематический вывод следствий. Однако основные черты электрической философии Ампера уже были очевидны.

<sup>24</sup> Ampere 1820a (публикация 9 октября). 1820b. Электрические силы, действующие на EC и FG, имеют в достаточной степени приближение, не влияющее на движение подвижной части ECD F контура, поскольку соответствующий крутящий момент пренебрежимо мал (предполагая вместе с Ампером, что силы между двумя элементами параллельны прямой, соединяющей элементы)

<sup>25</sup> Ампер позже объяснил, что силы между двумя элементами должны были быть центральными, потому что, если бы они не были, вечное движение можно было бы получить, жестко соединя эти два элемента (Ampere 1826b: 1-2).

<sup>26</sup> Ampere 1820a: 247-8 (мемуары 9 октября) содержит только краткое изложение его анализа. Полная версия находится в Ampere [1820c]. Также в Blondel 1982: 83-85; Hofmann 1995: 239-241.

<sup>27</sup> Ampere 1820b Описание двух устройств такого рода, первое из которых было показано Био и Араго 17 октября. Также в Blondel 1982: 84-5; Hofmann 1995: 245-246

<sup>28</sup> Ampere 1820b: 174-176 (от 6. 11). Также в Blondel 1982: 87-8; Hofmann 1995: 246- 250.

<sup>29</sup> Ampere [1820d], 1820e, 1820g. В анахронических терминах мы бы сказали, что сила является линейной функцией каждого элемента тока, рассматриваемого как вектор.

<sup>30</sup> Ampere 1820e: 229. Также в Blondel 1982: 92-95; Hofmann 1995: 250-252. Аргумент симметрии об аннулировании силы между перпендикулярными элементами впервые появляется в примечании Ампера 1822a: 209n.

<sup>31</sup> Ampere 1810f (мемуары от 26 декабря). 1822: 162. Также в Blondel 1982: 96-8; Hofmann 1995: 252-261.

### 1.2.3 Овеществлённые теоремы

По большей части эксперименты Ампера планировались в соответствии с заранее продуманными теоретическими идеями. Только самые первые эксперименты имели исследовательское значение. Чем дальше, тем больше окончательные устройства были прямым выражением его теоретических представлений в рамках материальных ограничений, таких как совместимость подвижности с питанием током. Они выполняли уникальную функцию и не могли быть преобразованы для ответа на новые вопросы. Эта жесткость усиливалась тем, что Ампер, не обладая навыками ручного труда, всегда изготавливал аппараты для себя. В целом он знал результаты своих экспериментов заранее. Однако материальные ограничения могли привести к поучительным сюрпризам, как мы видели на примере установки с параллельными спиралями.

Эксперименты Ампера не привели к получению чисел. В одном классе экспериментов он показал качественное сходство спиралей с магнитами. В другом классе он исследовал более фундаментальное действие между прямолинейными токами. Там он хотел получить количественные результаты. Однако он потерпел неудачу, потому что соответствующие силы были слишком малы, а источник напряжения слишком нестабилен. Затем он переключился на нулевой метод, который, по его мнению, обеспечивал точность и универсальность, не приводя ни к какому числу, кроме нуля. Эксперименты Ампера, материализовавшие предвзятые идеи, сыграли небольшую роль в развитии его теории. Более важным было его критическое отношение к увеличению невесомых флюидов, которое он разделял со своими друзьями Френелем и Араго. Он также извлек выгоду из ньютоновской аналогии и соответствующих математических методов, которым он научился в лапласианском круге. У истоков его интуиции стояла идея, что каждое магнитное действие можно свести к взаимодействиям между токами. Ампер видел виртуальную историю, в которой открытие Эрстеда предшествовало изобретению компаса. Его первые догадки о силе взаимодействия между двумя токами были вдохновлены его новой концепцией магнитов и аналогией с гравитационными силами.

Все же некоторые из экспериментов Ампера способствовали его первоначальной интуиции. Самое главное, что неудачный эксперимент на параллельных спиралях позволил принципиально изменить метод. От комбинации теоретических догадок и экспериментальных подтверждений Ампер перешел к более аксиоматическому методу, в котором вся теория вытекала из нескольких экспериментально установленных принципов, первым из которых была бесконечно малая эквивалентность прямолинейных и синусоидальных токов.

Ампер стремился придать своей теории бесспорный характер. В вопросе о природе электрического тока он придерживался французской идеи о двойном потоке отрицательного и положительного электрических флюидов, добавив лишь, что интенсивность потока одинакова во всех частях цепи. Он настаивал на том, что его выводы не зависят от какой-либо конкретной картины электрического тока, а свои рассуждения о глубинных эфирных процессах он держал в основном при себе. Он не считал новую концепцию магнитов спекуляцией: он путал ее *возможность*, показанную с помощью спиральных токов, с *необходимостью*, а противоположный взгляд рассматривал как «необоснованное предположение».<sup>32</sup> Наконец, он не считал центральный характер сил, действующих между элементами тока, гипотетическим: казалось, что его аппарат прямолинейного тока доказывал физическое существование этих сил

#### 1.2.4. Антипатии

В эти первые месяцы лихорадочной активности результаты Ампера получили больше внимания, чем похвалы. Его друзья Араго и Френель дома и Гаспар де ла Рив в Женеве, похоже, были его единственными активными сторонниками. Многочисленные спешные публикации Ампера создавали впечатление растерянности, «факты» не были четко отделены от теории. Эксперименты были впечатляющими на бумаге, но намного меньше, когда их продемонстрировал изобретатель.

*"Месяц Ампер настолько неуклюж, - сказал Лаплас, - что когда его аппарат не двигается, он, как сообщается, толкает его".*

Эрстед также не был впечатлен:

*"Я был у Ампера по предварительной записи, чтобы увидеть его эксперименты [...] У него было три значительных гальванических аппарата готовы; его инструменты для показа экспериментов очень сложны, но что случилось? Вряд ли кто-нибудь из его экспериментов увенчался успехом [...]. Он ужасно смущен и одинаково неумел как экспериментатор и как спорщик".<sup>33</sup>*

Хуже того, приборы Ампера было гораздо сложнее скопировать, чем устройства Эрстеда. Де ла Рив выразил сожаление по поводу того, что "гениальные инструменты" Ампера «требуют квалифицированных рабочих и довольно высокие расходы». Как дешевую и простую замену, де ла Рив предложил плавучие устройства, сделанные с кислотной ванной, пробкой, цинковым лезвием, медным лезвием и куском проволоки (рис. 1.7). С рецептом он предложил мудрость<sup>34</sup>:

*"По моему мнению, мы делаем одолжение науке, пытаясь уменьшить материальные препятствия, с которыми мы сталкиваемся в нашем исследовании и позволяем большому количеству людей изучать новый эксперимент: таким образом, мы даем шансы на новые открытия".*

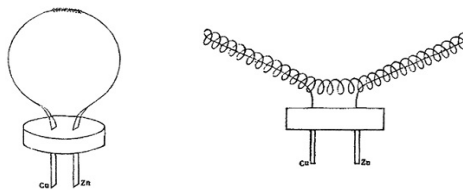


Рис. 1.7. Плавающие устройства Де ла Рива, 1821.

С помощью или без помощи де ла Рива физики быстро приняли основные «факты» Ампера: притяжение между двумя параллельными токами и схожесть поведения спирали и стержневого магнита. Тем не менее, теория Ампера встретила много скептицизма или враждебности. Иностранные физики вряд ли последовали бы математическим рассуждениям Ампера, они предпочитали рассматривать действие между двумя токами как следствие временного магнетизма. Французским ученым было легче с исчислением Ампера, но они осудили его уход из ортодоксальности Лапласа. Будучи наследниками кулоновской теории магнетизма, они оценили концепцию магнитов Ампера как неясную и поставили под сомнение введение тригонометрических линий в фундаментальный закон силы<sup>35</sup>. Они даже отрицали оригинальность открытия Ампером взаимодействия двух токов. Если, как они утверждают, ток действовал на магнит, а магнит воздействовал на ток, то ток, очевидно, должен был воздействовать на другой ток. Защищая Ампера, Араго возразил, что два железных ключа не притягивают друг друга, хотя каждый из них взаимодействовал с магнитом.<sup>36</sup>

Самым опасным критиком Ампера был политически и интеллектуально консервативный Жан-Батист Био. Будучи более лапласианцем, чем сам Лаплас, Био применил стандартные французские методы для определения силы между элементом тока и магнитным полюсом (то есть концом длинной, равномерно намагниченной иглы). С помощью Феликса Савара он впервые установил методом кулоновской колеблющейся магнитной иглы, что сила между полюсом и длинным прямолинейным проводом изменялась как обратная величина расстояния между ними. Как сказал ему Лаплас, это подразумевает зависимость  $1/r^2$  для вклада элемента тока в силу. Для получения угловой зависимости он измерил силу между V-образным током и полюсом, изменяя апертуру V. С неконтролируемой точностью и искаженным исчислением он вывел синус, который мы все знаем. 18 декабря 1820 года он объявил полный закон в Академии наук.<sup>37</sup>

После того, как один из учеников Ампера указал на математическую ошибку Био,<sup>38</sup> Био обобщил свои доказательства и высказался против теории Ампера следующим образом. Силы Ампера между движущимися электрическими флюидами были *«полностью вне аналогий, предлагаемых всеми другими законами притяжения»*. Его интерпретация магнитов была сложной регрессией к вихрям Декарта. Истинным курсом был закон Био-



Савара, из которого каждый электромагнитный факт мог быть выведен, не противореча кулоновской теории магнитов. Сила притяжения Ампера была следствием магнитной силы проводов, когда по ним идут токи.<sup>39</sup>

Критика Био вряд ли может быть признана честной. Его собственный закон мало напоминал известные законы притяжения. Его объяснение силы взаимодействия между двумя токами было чисто качественным и зависело от причудливого, если не невозможного, распределения магнетизма внутри провода, тогда как Амперовское описание магнитов можно было сделать таким же точным и количественным, как Кулоновское. Ампер мог бы использовать такие аргументы против Био, но не сделал это, потому что нашел более мощную защиту в факте, обнаруженном британским новичком в области электричества.

---

<sup>33</sup> Комментарий Лапласа из Колладона 1893: 121; Oersted 1920, вып.1: CXIV, оба цитируются в Blondel 1982: 167n.

<sup>34</sup> G. de la Rive 1821: 201.

<sup>35</sup> см., Например, Biot 1824, Vol. 2: 771-772.

<sup>36</sup> см. Arago, 1854, вып. 2: 58-59.

<sup>37</sup> Biot и Savart 1820, 1821; Biot 1824, Vol. 2: 706-74. Также в Frankel, 1972; Galtan-Guinness 1990, вып. 2: 923-925.

<sup>38</sup> Savary 1823: 364.

<sup>39</sup> Biot 1824, Vol. 2: 704-774 ("О намагничивании, сообщаемом движущимся металлам электричеством"); Там же: 769-771 (объяснение силы притяжения Ампера).

## **1.3 Фарадеевские вращения**

### **1.3.1 Поклонник Дэви**

Когда Фарадей вступил в область электромагнетизма, он был известен как первооткрыватель хлорида углерода. Его опубликованные теоретические и прикладные работы были по химии. Его первый интерес к науке возрос во время его обучения в магазине переплетчика, когда он читал книги, под рукой или посещал популярные лекции. Новорожденная область гальванизма пленила его. При помощи любых инструментов и химикатов, которые он мог собрать, он импровизировал со своими собственными электрохимическими экспериментами.<sup>40</sup>

В свои двадцать с лишним лет Фарадей привлек внимание Гемфри Дэви и стал его помощником в Королевском институте. Этот основанный в 1799 году институт имел официальную цель:

“Распространение знаний и содействие общему внедрению полезных механических изобретений и усовершенствований; и преподавание на курсах философских лекций и экспериментов применения науки к общим целям жизни”.

Под влиянием Дэви институт стал также центром химических исследований и популярных научных экспозиций. Когда Фарадей поступил в институт, Дэви был героической фигурой как для своих сверстников, так и для мирян. Он был человеком, который выделил хлор

и опроверг принцип Лавуазье, что кислород является причиной кислотности. После того, как Вольта создал свой столб, Дэви продемонстрировал важную роль химических реакций в гальванических источниках против теории контакта Вольта. Он верил в тесную связь между химическими силами и электричеством, и имел критическое отношение к *электрическим жидкостям*.

Под руководством Дэви Фарадей вскоре стал выдающимся химиком в фундаментальных и прикладных вопросах. Он обнаружил новое соединение карбона и хлора, новое масло, теперь называемое бензолом, новые стали и новые оптические стекла.<sup>42</sup> Его первый экскурс за пределы чистой химии произошел в 1820 году вследствие открытия Эрстеда. Осенью того же года он помог Дэви в серии электромагнитных экспериментов.

Дэви использовал гораздо более мощную батарею, чем Эрстед (100 пластин по 4 квадратных дюйма), и заметил, что один из полюсов магнитной иглы, размещенный под проволокой, был «сильно притянут» проволокой и оставался в контакте с ней. По его мнению, это можно объяснить только предположением, что сам провод стал магнитным. Чтобы доказать это предположение, он распылил железные опилки на проволоку и заметил их массивное прилипание к проволоке. Дэви также получил намагниченность небольших кусков стали. Сначала он интерпретировал эти эффекты в терминах четырех магнитных полюсов в проводе (как и Берцелиус), но вскоре принял идею «своего рода революции магнетизма вокруг проволоки», которую Уильям Воластон представил под названием «головокружительный магнетизм». В соответствии с этим представлением маленькие стальные иглы, расположенные по центру проволоки, стали намагниченными. Воластон никогда не публиковал свои взгляды полностью. В короткой опубликованной заметке он говорил об «электромагнитном токе» вокруг оси провода и предоставил рисунки, объясняющие действие между двумя параллельными проводами (рис. 1.8).

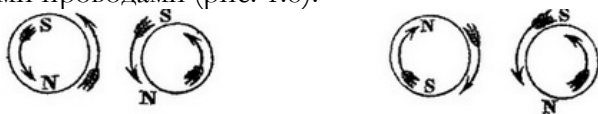


Рис. 1.8. Диаграмма Воластона для притяжения двух параллельных токов (слева) и отталкивание антипараллельных (справа).

Для двух одинаково направленных токов «силы Севера и Юга встречаются» и поэтому притягивают друг друга. Для противоположных токов «сходные силы встречаются» и в результате отталкивания. Никто не видел ясно, что имел в виду Воластон. Кажется, он изменил представление Эрстеда о спиральном токе, чтобы ограничить его внутри проводника. Сам Эрстед вскоре интерпретировал силы Ампера между двумя токами в терминах симпатии или антипатии между

соответствующими спиральными движениями.<sup>44</sup>

Помогая Дэви в его экспериментах, Фарадей знал результаты и предположения Волластона. В этот период он опубликовал анонимный «Исторический очерк электромагнетизма», в котором он рассмотрел состояние экспериментальных и теоретических знаний в этой области. Стоит отметить его агностицизм в отношении электрического тока, его верность концепции электромагнетизма Дэви в терминах магнитных притяжений и его критику взглядов Ампера. В первой главе он написал в унисон с Дэви:<sup>45</sup>

*"Есть много аргументов в пользу материальности электричества, но мало против этого; но все же это только предположение; и сосредотачиваясь на предмете электромагнетизма, хорошо бы помнить, что у нас нет доказательств материальности электричества или существования любого тока через провод".*

В эксперименте Эрстеда Фарадей повторил выводы Дэви, настаивая на ориентации иглы по проводу, когда можно пренебречь влиянием Земли, и формулируя все с точки зрения *притяжения* или *отталкивания* магнитной иглы с одной или другой стороны провода. Он описал две спиральные силы Эрстеда во введении: *"Я мало что могу сказать о теории г-на Эрстеда, потому что должен признаться, что не совсем ее понимаю"*.

Он осудил поспешную интерпретацию Берцелиусом эксперимента Эрстеда в терминах четырех магнитных полюсов и упрекнул Ампера в отсутствии ясности. Ампер не мог притворяться, продолжал Фарадей, чтобы дать электрическое объяснение магнетизма, потому что его теории не хватало точной картины электрического тока. Как он признавался де ла Риву, методы Ампера были ему чужды:<sup>46</sup>

*"Что касается экспериментов (Ампера), то я надеюсь и верю, что им придается должное значение, но их, как вы знаете, мало, а теория составляет большую часть того, что опубликовал г-н Ампер, и теория во многих пунктах не подкреплена экспериментами, когда их следовало бы привести. В то же время эксперименты г-на Ампера превосходны, а его теория гениальна, и я сам очень мало думал об этом до получения вашего письма, просто потому, что, будучи по природе скептиком в отношении философских теорий, я думал, что существует большая нехватка экспериментальных доказательств."*

<sup>40</sup> см. Williams 1965: гл.1.

<sup>41</sup> Rumford 1870-1875, Vol. 4: 755. О Королевском институте. Также в Berman 1978. О Дэви; в Williams 1965: гл.1; рыцарь 1996.

<sup>42</sup> см. Williams 1965: 120-3, 107-8, 109-15, 115-20.

<sup>43</sup> Davy 1821 (прочитано 16 ноября 1820 г.)

<sup>44</sup> Wollaston, 1821: 363; Oersted 1821: 235-236.

<sup>45</sup> Faraday 1821: 196. Очень рано Фарадей прочитал статью «Электричество» в Британской энциклопедии, которой Джеймс Титлер защитил вибрационную теорию электричества. Также в Williams 1965: 14-15.

<sup>46</sup> Faraday 1822a: 107. 109; Фарадей в письме G. De la Rive, 12 сентября 1821 года. CMF 1.

### 1.3.2 Вращения и силы

В сентябре 1821 года Фарадей экспериментировал с вертикальной проволокой и подвешенной магнитной иглой. Предположительно, он не доверял результатам Эрстеда и не уделял много внимания деталям его сообщений. Кроме того, повторения Дэви, должно быть, были слишком грубыми для его вкуса.

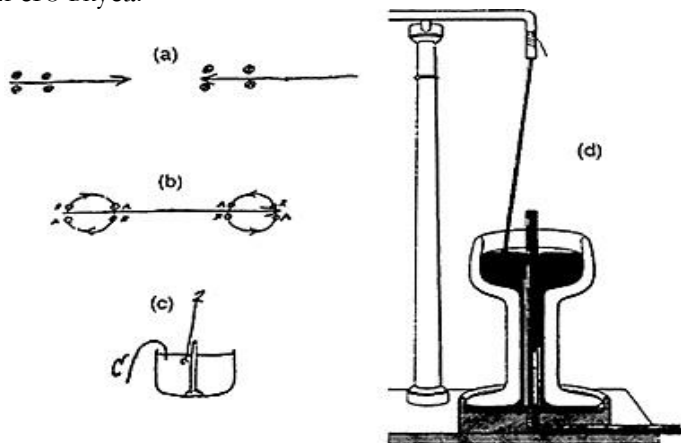


Рис. 1.9. Шаги Фарадея к электромагнитным вращениям:

- (a) притяжения и отталкивания провода и магнитной иглы (*FD*)
- (b) воображаемые повороты (там же),
- (c) первое вращательное устройство (*FD 1: 50*),
- (d) версия для учебной аудитории (*FER 2: табличка 4*).

Согласно Дэви, проволока притягивала одну сторону иглы и отталкивала другую. Используя гальванический источник с большой пластиной и тщательно изменяя положение вертикальной проволоки, Фарадей заметил, что на определенной стороне иглы притяжение превращалось в отталкивание, или наоборот, когда проволока проходила определенную точку, расположенную между центром и концом иглы (рис. 1.9 (a)). Он пришел к выводу, что истинные полюса иглы находятся на её концах. Самое главное, это наблюдение исключало его и Дэви мнение о том, что движения иглы были результатом притяжения или отталкивания между полюсами и проволокой. Фарадей мысленно экстраполировал движение свободной проволоки вокруг неподвижного магнитного полюса (кружки на рис. 1.9 (б) и предположил, что оно будет круговое. Методом проб и ошибок он вскоре нашел геометрическую конфигурацию проволоки и магнита, при которой происходило непрерывное вращение провода (рис. 1.9(c), (d))<sup>47</sup>.

В последующей разработке Фарадеем электромагнетизма этот эксперимент был самым основным. Все притяжения и отталкивания, наблюдавшиеся Эрстедом, Дэви и Ампером, вытекали из простого факта вращения полюса вокруг проволоки.

Действие любой системы проводов на магнитный полюс (конкретнее,

на окончательность однократно намагниченной иглы) можно проследить по комбинированным круговым эффектам различных частей провода.

Например, с помощью рисунка рис. 1.10 Фарадей объяснил, что система из двух параллельных проводов с одинаковым направлением тока, притягивает полюс с одной стороны их плоскости и отталкивает его с другой. Вращения, реальные или воображаемые, связывали различные факты электромагнетизма.<sup>48</sup>

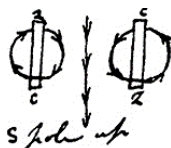


Рис. 1.10. Движение магнитного полюса между двумя прямолинейными токами (FD 1: 51).

Концепция полюса здесь сыграла центральную роль. Фарадей систематически избегал любых ссылок на магнитные флюиды и определял полюс как центр действия. Согласно этому определению полюса больше не были специфичны для магнитов; они также могли создаваться электрическими токами, например, на концах спиралей. Более широким объединяющим понятием была “способность”, которое Фарадей широко использовал, не определяя его. Очевидно, способности относятся к частям пространства, из которых исходят определенные действия. Способности могли в равной степени принадлежать магниту или сторонам провода, и они могли притягиваться друг к другу или отталкиваться друг от друга:

*"Я полагаю, что все, кто экспериментировал с этими явлениями, допускали, что подобные способности отталкивают друг друга, а разнородные способности притягивают друг друга; и что они существуют и в полюсах магнитов или в противоположных сторонах проводящих проводов"*<sup>49</sup>

Язык способностей не был таким универсальным, как думал Фарадей. Но Дэви и Воластон использовали его, вероятно, чтобы избежать магнитных флюидов, и, возможно, из сочувствия к динамичному отрицанию дуализма материи/силы. На этом языке, объяснил Фарадей, простейший случай магнитной способности — это случай двух центров концентрации воздействий, то есть прямолинейное притяжение или отталкивание двух полюсов.

Затем рассматривался случай провода и полюса, который включал три способности: способность из полюса и способности из двух сторон провода. Полюс одновременно притягивается и отталкивается равными способностями, и поэтому не удаляется и не приближается; но воздействия из провода исходят от противоположных сторон провода, и полюс в своем двойном стремлении удалиться от одной стороны и приблизиться к другой, вращается по кругу.

Затем рассматривался случай двух параллельных проводов, в котором участвуют четыре *способности*, по две на каждый провод. Фарадей объяснил, что *способности*, действующие на противоположные стороны провода, были противоположного вида, когда провода находились в одинаковом состоянии, и одинакового вида для противоположных состояний проводов, в соответствии с притяжением и отталкиванием, наблюдаемыми Ампером.<sup>50</sup>

Представление о двух различных *способностях* на противоположных сторонах провода было немного запутанным, как понял сам Фарадей:

*"Что касается противоположных сторон соединительного провода и способностей, исходящих от них, я просто говорил о них как о двух, чтобы отличить один набор эффектов от другого. Высоким авторитетом пользуется мнение доктора Волластона о том, что одного электромагнитного тока, проходящего вокруг оси провода [...] достаточно для объяснения явлений"*.

Однако Фарадею это понятие было необходимо для объяснения действий между токами, а также для выражения единства магнетизма и электромагнетизма:

*"Полус магнитной иглы представляет нам свойства одной стороны провода"*.<sup>51</sup>

Таким образом, Фарадей заполнил пространство вокруг проводов и магнитов *способностями*, виртуальными вращениями и, в конечном счете, железными опилками. В отличие от этого, он оставил внутреннее состояние проводов и магнита неопределенным:

*"Я не собирался ни принимать какую-либо теорию причины магнетизма, ни опровергать ее. Представляется весьма вероятным, что в обычном стержневом магните сталь или железо находится в том же состоянии, что и медная проволока спирального магнита; и возможно, как утверждает г-н Ампер в своей теории, с помощью тех же средств, а именно токов электричества; но все же необходимы другие доказательства присутствия такой способности, как электричество, кроме только магнитных эффектов"*.

Заметим, что амперовские токи не были несовместимы со взглядами Фарадея. Фарадей отвергал идею о том, что притяжения и отталкивания двух токов были примитивные факты. Они были следствием распределен распределения сил, продемонстрированного в электромагнитных вращениях.<sup>52</sup>

<sup>47</sup> FD (Дневники Фарадея) 1: 49-50 (3 сентября 1821); Faraday 1821. FER 2: 127-128.

Также в Gooding 1985.

<sup>48</sup> FD 1: 52, № 17, № 22 (4 сентября 1821 г.); Faraday 1822 г. FER 2: 133-136. 139-142.

Также вSteinle 1995.

<sup>49</sup> Faraday 1822, FER 2: 128; Там же: 136.

<sup>50</sup> Faraday 1822, FER 2: 146, 132.

<sup>51</sup> Faraday 1822, FER 2: 136-7. 132-3.

<sup>52</sup> Faraday 1822. FER 2: 145-146. Фарадей использовал железные опилки, чтобы показать "путь, по которому будет идти полюс" (там же: 140).

### 1.3.3 Противоположные стили

Между исследованиями Фарадея и Ампера существовало много других отличий. Если Ампер пришел к основному факту своей электродинамики путем умозрительных рассуждений с привлечением виртуальной истории и аналогии, то Фарадей открыл непрерывные вращения, терпеливо изучая детали взаимодействия между магнитом и проволокой, которые другие принимали как должное. На более поздних этапах своих исследований Ампер и Фарадей использовали совершенно разные теории. Ампер использовал аналогично с теорией гравитации и обосновал ее в математических терминах. Фарадей не знал математики и мыслил в терминах смутно определенных *способностей* и конкретно мыслимых действий. Для первого теоретическое единство зависело от математического вывода из небольшого числа аксиом; для второго теория всегда была открытой, и единство вытекало из связности различных известных экспериментальных фактов. Как объяснил Фарадей Амперу:

*"Мне не хватает математических знаний и способности легко входить в любые абстрактные рассуждения. Я вынужден прокладывать свой путь с помощью фактов, тесно расположенных друг к другу".*<sup>53</sup>

Различные виды теории подразумевали различные стили экспериментов. Жесткая, профессионально разработанная аппаратура Ампера полностью противоречила импровизированным, быстро изготовленным устройствам Фарадея. В то время как Амперу приходилось уделять несколько дней своему механику, Фарадей справлялся с правильным расположением проводов и иголок за несколько минут. Он находил маленькие плавающие приспособления для Рива *"очень простыми, легко изготовленными и эффективными"* и использовал их в изобилии. Он хотел иметь возможность изменять и комбинировать геометрические конфигурации как можно проще и быстрее, частично, чтобы умножить возможности обнаружения неожиданных эффектов, отчасти для того, чтобы обеспечить связь между известными фактами.

Учитывая эти различия, легко понять, почему Ампер не смог открыть непрерывные вращения, хотя его теория неявно содержала их. Устройства Ампера были направлены на доказательство следствий его теории, которые он мог предсказать. Он не предвидел непрерывных вращений, предположительно потому, что аналогия с другими теориями притяжения скрывала это явление. Для механической системы, движимой гравитационными, электростатическими или магнитостатическими силами, было хорошо известно, что эти силы, будучи центральными, не могут компенсировать фрикционную потерю живой силы (кинетической энергии) во время цикла системы. Другими словами, теорема о живых силах запрещала вечный двигатель. Ампер, естественно, упустил из виду,

что его силы с их угловой зависимостью противоречат предположениям теоремы. Сведя магниты к токам, он не мог представить, что электрические токи позволят создать вечный двигатель, который еще никому не удавалось создать с помощью магнитов.

### 1.3.4 Насколько оригинально?

Открытие Фарадеем непрерывного вращения привлекло большое внимание его британских коллег, хотя не такое внимание, которого он ожидал. Распространился слух, что он украл эту идею. Воластон действительно предполагал возможность заставить проволоку вращаться вокруг собственной оси под действием магнита и безуспешно пытался провести такой эксперимент с Дэви. Фарадей защищался следующим образом. Он знал об идее и опыте Воластона, но первоначально не соглашался с ней и интерпретировал явление Эрстеда в терминах притяжения и отталкивания (как можно убедиться из рисунка). К вращению Фарадея привело более тщательное исследование действия вертикального провода на магнитную иглу. И вращение, которое он произвел, отличалось по виду от того, которое предполагал Воластон.<sup>55</sup>

Нет причин сомневаться в искренности Фарадея. Сам Воластон принял его объяснения. Однако Фарадей не прояснил, в какой степени его открытие было новым открытием. Были ли вращения совершенно новыми? Играли ли прежние представления об электромагнетизме роль в решающем шаге Фарадея от притяжения к вращению?

На первый вопрос ответ, безусловно, отрицательный. Спиральный конфликт Эрстеда и электромагнитный ток Воластона указывали на круговое движение магнитного полюса вокруг проволоки. Более того, наблюдения Фарадея с вертикальным проводом ничего не добавили к предыдущим наблюдениям Эрстеда того же рода, кроме различия между полюсами и концами магнитной иглы. Сам Эрстед настаивал на том, что его наблюдения не могут быть объяснены с точки зрения притяжения и отталкивания. Фарадей ввел новшество в конкретизацию вращений, а не в их воображение.

Если читать защиту Фарадея буквально, то он представлял себе вращения только путем созерцания различных кажущихся притяжений и отталкиваний иглы проволокой. Это возможно, но не обязательно. Фарадей мог бессознательно опираться на идею Эрстеда или Воластона о круговом действии.<sup>56</sup> Существенная оригинальность Фарадея заключается в том, как он мог перейти от воображаемого вращения к действительному. Когда Воластон и Эрстед поняли круговой характер электромагнитного действия, их первым побуждением было предложить его теоретическое объяснение. Затем Воластон предсказал случай вращения проволоки, который имел мало общего с первоначальной схемой Эрстеда. В отличие от него, Фарадей избегал рассуждений о причине кругового действия. Он модифицировал конкретное устройство,



на котором задумал вращение, пока не смог продемонстрировать его во всем великолепии.<sup>57</sup>

Подражая рекламной стратегии де ла Рива, в сентябре 1821 года Фарадей разослал своим иностранным корреспондентам по почте небольшой набор устройства для вращения (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Компактный вариант вращающегося устройства (FER 2: табличка 4).

Он предоставил пробку, проволоку и стеклянную трубку. Счастливым получателям оставалось только налить в трубку немного ртути и подключить ее к гальванической батарее. Один из них, Жан Хашетт, воспроизвел чудесное явление в компании Ампера.<sup>58</sup>

<sup>53</sup> Фарадей - Амперу. Сентябрь 1822 г. CMF 1.

<sup>54</sup> Faraday 1821: 288.

<sup>55</sup> Faraday 1823 года. Также в Williams 1965: 157-160.

<sup>56</sup> В тот день, когда он получил вращение, Фарадей отметил отсутствие вращений типа Воластона: FD 1:50. № 7 (3 сентября 1821 года).

<sup>57</sup> см. Gooding (Gooding) 1985.

<sup>58</sup> см. Faraday 1822c: 150-я; Фарадей - Г. де ла Риву, 16 ноября 1821 года, CMF 1; Хашетт (Hachette) - Фарадею, 19 ноября 1821 года, CMF 1; Gooding 1985; Blondel 1982: 110.

## 1.4 Электродинамика

### 1.4.1 Пробуждение

Болезнь легких и метафизические размышления надолго прервали электромагнитные исследования Ампера, когда он получил мемуары Фарадея об электромагнитных вращениях. Восстановление последовало волшебным образом: *"Метафизика заполнила мою голову"*. Однако с тех пор, как появился мемуар Фарадея, все мои сны - об электрических токах". Вскоре мечтатель создал несколько устройств непрерывного вращения в своем собственном стиле: с прямыми проводами, ртутными чашками и кислотными ваннами. Эти устройства имели меньшее трение, чем устройства Фарадея, они позволяли заменить магнит катушкой и легче поддавались расчетам. В одном пункте Ампер превзошел Фарадея: он получил вращение магнита и проволоки вокруг собственной оси (рис. 1.12).<sup>59</sup>

Ток подводится к магниту через конец вертикального провода DI и отводится от него через ртутную ванну XY.

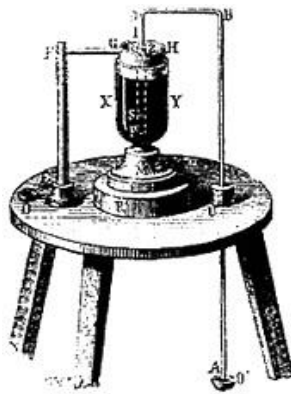


Рис. 1.12. Аппарат для вращения магнита (NS) вокруг своей оси (Ампер, 1822b).

Магнит плавает вертикально в ванне благодаря грузу SP. Теоретические аспекты работы Фарадея больше не тревожили Ампера:

*"Эта публикация содержит очень необычные электромагнитные факты, которые прекрасно подтверждают мою теорию, хотя автор пытается бороться с ней, противопоставляя одно из своих изобретений".*

Ампер объявил, что правильные вычисления, которые он не предоставил, объяснили вращение в оригинальном устройстве Фарадея. Более качественно он показал, что в его собственном устройстве вращение происходит в результате действия сил между различными токами. Несмотря на временное отсутствие строгости, Ампер не сомневался:

*"Эти факты соответствуют общим законам физики, и не нужно признавать как простой примитивный факт вращательное действие, которому природа не дает другого примера и которое нам трудно рассматривать как таковое".*

У Ампера были и другие причины не любить простые вращения Фарадея:

- они не предоставили достаточной основы для расчета;
- они включали разнородные объекты (полюс и ток);
- они противоречили принципу равенства действия и реакции, т.к. в системе полюс-ток действовал суммарный крутящий момент.

Короче говоря, они нарушали все принципы французской Ньютоновской физики.<sup>60</sup> Непонимание было взаимным.

*"Я сожалею, что мой недостаток в математической теории, - писал Фарадей Амперу, - делает меня тупым в понимании этих предметов. Я по природе скептически отношусь к теории, и поэтому вы не должны сердиться на меня за то, что вы не приняли тот, который вы сразу же выдвинули немедленно".*

В ряде случаев Фарадей гордился своим незнанием математики. Позднее, когда он открыл электромагнитную индукцию, он сказал:

*"Довольно удобно обнаружить, что эксперимент не должен пасовать перед*

математикой, но вполне способен конкурировать с ней в открытии".<sup>61</sup>

Хотя Ампер искажил и отверг теоретические идеи Фарадея, он не оставил без внимания теоретические последствия нового факта непрерывных вращений. Самое поразительное, что вращение предлагало очевидное исключение из невозможности вечного двигателя. Ампер объяснил, что непрерывное снабжение вращающегося провода живой силой происходит за счет электрического тока. Подчеркнув таким образом динамическую природу вольтова электричества, он решил назвать новую науку о взаимодействии токов "*электродинамикой*". Самое главное, он использовал этот аргумент, чтобы изгнать любую теорию о временном магнетизме проводов. Расположение магнитов, какими бы сложными они ни были, не может привести к непрерывным вращениям, поскольку известно, что магнитные воздействия подчиняются теореме о живых силах.<sup>62</sup> Эксперименты с вращением также сыграли важную роль в определении формулы силы для двух элементов тока. Экспериментируя со своими собственными ротационными устройствами. Ампер заметил, что явление исчезало всякий раз, когда оба конца провода оказывались на оси магнита.

Однако расчеты с простой формулой (1.1) показали положительный результат в этом случае. Тогда Ампер вернулся к более общей формуле (1.2) и стал искать значение  $k$ , при котором вращение не происходило.

В июне 1822 года он нашел  $k = -1/2$ , что дает

$$d^2f = i i' ds ds' / r^2 (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - 1/2 \cos \alpha \cos \beta) \quad (1.3)$$

для силы  $d^2f$ , действующей между элементами  $ds$  и  $ds'$  токов  $i$  и  $i'$  (притяжение считается положительным). Из этой формулы следует, что, вопреки раннему предположению Ампера, два тока элемента на одной прямой линии и с одинаковой ориентацией отталкиваются друг от друга.

Вскоре Ампер подтвердил это в Женеве с помощью устройства, нынче знакомого каждому изучающему электродинамику (рис. 1.13)<sup>63</sup>

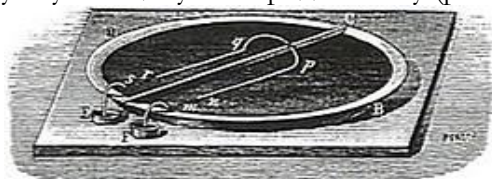


Рис. 1.13. Устройство для демонстрации взаимного отталкивания частей прямолинейного тока (Ампер 1822с). Токи в сегментах  $qr$  и  $pn$  плавающего провода отталкивают токи  $rs$  и  $mt$  в ртутной ванне

Аналитические расчеты, выполненные в этом контексте, представляют особый интерес. Ампер заменил магнит простым круговым током и потребовал, чтобы полный вращающий момент, создаваемый элементом этого тока на любой ток, начинающийся и заканчивающийся на оси круга, был равен нулю.<sup>64</sup>

Для математика Ампера это означало, что крутящий момент, действующий на любой элемент тока, должен быть точным дифференциалом по отношению к расстоянию этого элемента от оси. Помня об этом свойстве, Ампер преобразовал свою формулу тригонометрической силы в другую, которая включала производные взаимного расстояния двух элементов относительно криволинейных абсцисс  $s$  и  $s'$  двух линейных токов, к которым они принадлежали (см. Приложение 1):

$$d^2f = i i' ds ds' / r^2 [r (\partial^2 r / \partial s \partial s') - 1/2 (\partial r / \partial s)(\partial r / \partial s')] \quad (1.4)$$

Хотя эта формула была выведена в результате рассмотрения особого класса неудачных экспериментов, эту формулу ждало процветающее будущее.<sup>65</sup> Новая методика оказалась весьма адекватной в важном случае замкнутых цепей. Таким образом, Ампер доказал, что сила, действующая на элемент тока в замкнутой цепи, перпендикулярна к этому элементу.

Несколько месяцев спустя Феликс Савар, бывший его ученик получил и другие существенные результаты. Он интегрировал формулу силы по круговому витку тока, а затем по плотному столбу таких витков с током, который Ампер позже назвал *соленоидом*, от греческого *σωλην* (канал). Когда радиус окружностей был намного меньше длины канала, соленоид вел себя как два магнитных полюса, расположенных на его концах. Сила между полюсом и другим током подчинялась закону Био-Савара, а сила между двумя полюсами удовлетворяла закону Кулона (см. Приложение 1). Ампер поздравил Савара с тем, что он свел три основных действия магнетизма в один закон магнетизма, что доказывает обоснованность его концепции магнитов.<sup>66</sup>

<sup>59</sup> Ампер - Бредину 3 декабря 1821 года. *CA* 2: 576; Ampere 1821a: 329-33; 1821b, 1822a. Также в Blondel 1982: 109-116.

<sup>60</sup> Ампер в письме Бредену, 3 декабря 1821 года. *CA* 2: 576 (цитата): Ampere 1821b: 370, 374 (цитата): Ампер в письме А. де ла Риву, 14 октября 1822 года, *CA* 2: 605 (против простых вращений).

<sup>61</sup> Фарадей Амперу, 2 февраля 1821 года. *CMF* 1: Фарадей в письме Филиппу. 29 ноября 1831 года, *CMF* 1.

<sup>62</sup> Ampere 1822a: 66; Ampere 1822b. 1826b: 97 для «электродинамики»; Ampere 1822a: 65-56; 1826b: 96n.

<sup>63</sup> Ampere 1822c: 235 и 1822d: 418; Ampere [1822e]: 331. и 1826b: 28. Также в Blondel 1982: 127-8. 132-133; Hofmann 1995: 293-308.

<sup>64</sup> Последнее условие не является строго следствием аналогичного условия со всем круговым током. Предположительно, по этой причине Ампер позже предпочел другой случай равновесия. См. Blondel 1982: 127-128.

<sup>65</sup> см. Grattan-Guinness 1990, Vol. 2: 930-33. Я использую обозначение Кирхгофа для частных дифференциалов.

<sup>66</sup> Ampere 1822d: 419-20; Savary 1823. См. Grattan-Guinness 1990, Vol. 2: 934-9. Савари начинает с замкнутого соленоида, руководствуясь неопубликованным экспериментом Гей-Люссака и Уэлтера.

### 1.4.2 Ньютон электричества

К началу 1823 года электродинамика Ампера достигла зрелости. С помощью усовершенствованного закона Ампера, токов Ампера и соответствующих аналитических инструментов можно было рассчитать любой известный магнитный или электромагнитный эффект. Однако систематическое изложение теории все еще было необходимо. Ампер дал его в 1826 году в своей образцовой «Теории электродинамических явлений, выведенной исключительно из опыта».<sup>67</sup>

Подражая риторике «Принципов Ньютона» или «Теории Аналитики Фурье де Шалеора», Ампер представил свои результаты как простое выражение экспериментальных истин:

*"Я обратился исключительно к эксперименту, чтобы установить законы этих явлений, и я вывел единственную формулу, которая может представлять силы, которыми они обусловлены".*

Более поздние комментаторы без труда обнаружили в теории Ампера несколько необоснованных гипотез, например, центральный характер элементарных сил, отсутствие элементарного момента и токи Ампера.

Однако нет никаких оснований сомневаться в искренности Ампера. Понятие физических элементов тока, от которых зависел характер действия между элементами тока, казалось, материализовалось в его аппарате. Токи в магнитах не были гипотезой, поскольку они были единственным последовательным способом объединения магнетизма и электромагнетизма:

*"Доказательства, на которых я основываю [свою теорию], главным образом, вытекают из того, что они сводят к единому принципу три вида действий, которые, как доказывают все явления, зависят от общей причины, и которые по-другому нельзя свести к минимуму".*<sup>68</sup>

Наиболее важно то, что формула Ампера для силы между двумя элементами тока не зависела от какого-либо предположения о природе электрического тока и связанных с ним механизмов:

*"Какова бы ни была физическая причина, с которой мы можем пожелать связать явления, вызванные этим действием, полученная формула всегда останется выражением фактов."*

Как мы увидим, это оказалось в значительной степени правдой, поскольку формула Ампера (по крайней мере, ее следствия для замкнутых токов) оставалась существенной основой для построения всех последующих теорий электродинамики. Ампер снова сравнил себя с Фурье, чьи уравнения для распространения тепла пережили волновую теорию света и тепла Френеля. Продлевая параллель, Ампер не исключил поиска физических причин. Он сам размышлял о различных механизмах производства электродинамических сил, как это будет показано ниже. Но он требовал четкого разделения между законами и

причинами.<sup>69</sup> Для определения силы между двумя элементами тока Ампер предложил усовершенствованный вариант нулевого метода, который был *"более прямым, простым и давал большую точность"*.

Первый случай равновесия касался отсутствия действия двух смежных противоположных токов. Второй устанавливал эквивалентность прямолинейного и синусоидального токов, по примеру 1821 года. Третий заменил приборы 1822 года на приборы без вращения и доказал, что сила, действующая из замкнутой цепи на элемент тока, перпендикулярна элементу. Четвертый установил масштабную инвариантность электродинамического действия<sup>70</sup>.

Ампер принял как само собой разумеющееся, что действие между двумя элементами тока приводит к равным и противоположным силам, направленным вдоль линии, соединяющей элементы, и уменьшающимся как  $n$ -я степень расстояния между ними. Затем он использовал первый случай равновесия, чтобы доказать, что сила между двумя ортогональными элементами исчезает. Второй случай, как и прежде, определял угловую зависимость силы вплоть до постоянной  $k$ . Третий и четвертый случаи давали два соотношения между  $k$  и  $n$ , из которых вытекали  $k = -1/2$  и  $n = 2$ .

Полное выражение силы все еще включало очевидные факторы: длины элементов и интенсивности токов. По мысли Ампера, последний фактор представлял собой количественное определение силы тока, включая определенную единицу тока, как только была определена единица силы.<sup>71</sup>

Эксперименты и рассуждения о нулевом методе имели атмосферу большого систематизма. Однако при ближайшем рассмотрении в них обнаруживаются серьезные недостатки. Ампер не проверил точность своего прибора, как будто измерение нулевой величины требует нулевых усилий по анализу ошибок. Хуже того, его третий случай равновесия был совершенно неустойчивым и едва наблюдаемым, а аппарат для четвертого случая, по собственному признанию Ампера, так и не был построен.<sup>72</sup>

Может быть, закон Ампера опирался на бумажные доказательства? Конечно же, нет: Ампер знал, что эквивалентность магнитов и систем токов полностью определяет значения  $n$  и  $k$ .<sup>73</sup> Однако ради редукционистской риторики он предпочел идеальное обоснование своей формулы, которое не зависело бы от сложной физики магнитов.

В основной части своих теорий Ампер разработал следствия своей формулы для замкнутых токов, соленоидов Савара и магнитов. Следует подчеркнуть разнообразие его математических приемов. В некоторых рассуждениях он использовал исходное выражение силы в терминах тригонометрических линий, но в большинстве своем он начал с *"очень простых форму"*

$$d^2f = - (i i' ds ds') (2/\sqrt{r}) (\partial^2 \sqrt{r} / \partial s \partial s') \quad (1.5)$$

Иногда он обращался к декартовым координатам. Например, он записал силу  $(X, Y, Z)$ , действующую из замкнутого контура на элемент тока

(dx, dy, dz) в виде

$$X = \frac{1}{2} i' (Cdy - Bdz), \text{ и т.д.} \quad (1.6)$$

$$\text{с } A = \int [(y' - y)dz' - (z' - z)dy'] / r^3, \text{ и т.д.} \quad (1.7)$$

где  $(x', y', z')$  - координаты точек замкнутого контура (см. Приложение 1)

Это выражение показывает перпендикулярность силы токовому элементу. Кроме того, это показывает, что сила перпендикулярна направлению вектора  $(A, B, C)$ , который Ампера назвала «directrice», поскольку она зависела только от внешних обстоятельств. Современные читатели должны противостоять искушению отождествить директрису с концепцией магнитного поля: Ампер рассматривал только направление, и он не включал интенсивность  $i'$  в вектор  $(A, B, C)$ .<sup>74</sup>

В качестве частного случая замкнутого тока Ампер рассмотрел одну бесконечно малую петлю тока и показал, что она эквивалентна магнитному диполю. Конечный замкнутый ток, продолжал он, может быть заменен сетью бесконечно малых токовых петель (рис. 1.14), и поэтому он математически эквивалентен двойному слою северного и южного флюида.

<sup>67</sup> Ampere 1826b

<sup>68</sup> Ampere 1826b: 2, 83-84.

<sup>69</sup> Ampere 1826b: 4.

<sup>70</sup> Ampere 1826b: 6, 9-18.

<sup>71</sup> Ampere 1826b: 18-44 и 18-19 для определения интенсивности.

<sup>72</sup> Ampere 1826b, 1-е изд.: 205 (третий случай); 2-е изд.: 151 (четвертый случай). В издании «Записок Королевской академии наук» (1827) Ампер опроверг критику третьего случая равновесия. См. Blondel 1982 147-8

<sup>73</sup> См., например, замечания в Ampere 1826b: 17. 151. указывающие на то, что свойства действия между током и магнитами можно использовать вместо четвертого случая равновесия.

<sup>74</sup> Ampere 1826b: 30-1. См. Grattan-Guinness 1991; Хофманн, 1995: 341-3. С точностью до коэффициента нормализации формулы соответствуют современным  $\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$ , с  $\mathbf{B} = \int i' d\mathbf{l}' \times \mathbf{r} / r^3$

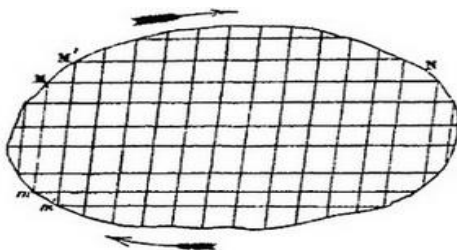


Рис. 1.14. Сеть тока (Ампер 1826b: пластина 1). Ток по часовой стрелке одинаков с током, обтекающим каждый маленький квадрат, так что ток в общей стороне двух квадратов исчезает.

Эта гениальная эквивалентность не сыграла большую роль в выводах Ампера, кроме доказательства того, что непрерывное вращение невозможно для замкнутых жестких контуров. Однако она могла бы оказаться очень полезной для любого, кто, в отличие от Ампера, захотел

бы вывести законы электродинамики из законов магнетизма<sup>75</sup>.

В начале 1820-х годов успех оптического эфира Френеля возродил его желание свести всю физику к локальным движениям среды. Когда он обнаружил эквивалентность прямолинейного и синусоидального тока, он представил себе соответствующую суперпозицию движений эфира. Позже эквивалентность замкнутого контура и сети бесконечно малых токовых петель навела его на мысль о вращательном движении среды. В каждом случае факт предшествовал интуиции, и Ампер оставался очень сдержанным в отношении своего эфира<sup>76</sup>.

Ампер был более откровенен в отношении своей концепции электрического тока. В 1821 году он отказался от идеи Вольты об электрическом движении, единственным препятствием для которого является субстрат проводника. Вместо этого он принял идею Эрстеда о серии композиций и разложений двух электричеств, начинающихся в батарее и распространяющихся по проводнику. В своих пространственных рассуждениях он объединил это представление с атомистической концепцией материи, чтобы объяснить контактное напряжение и электролиз. Более четко он представлял себе эфир, состоящий из нейтральной жидкости, возникающей в результате комбинации отрицательного и положительного электричества.<sup>77</sup>

Ближе к концу своих мемуаров Ампер ослабил свою суровую позицию и предался размышлениям о причине и природе электрических движений. В своих предыдущих исследованиях он неоднократно пытался понять электродинамические силы в терминах распространяющегося действия в среде. В молодости он осуждал *"предположение о действии между телами, которые не касаются друг друга"*.

В мемуарах 1826 года Ампер изложил свою точку зрения на электрический ток и упомянул соответствующую концепцию эфира. Он кратко предложил распространение электромагнитных воздействий через этот эфир, но одобрил более консервативный подход, в котором электростатический закон Кулона оставался основным. Идея заключалась в том, чтобы взять среднее значение кулоновских сил между разделенными флюидами во взаимодействующих токах. Поскольку разделение было временным, пространственным направленным процессом, угловая зависимость суммарных сил, возможно, могла бы возникнуть таким образом.<sup>78</sup> В целом, влиятельный мемуар Ампера 1826 года был не просто воссоединением равновесных случаев, формулы Ампера и амперовских токов в магнитах. Он также содержал набор математических методов, которые могли бы заимствовать его преемники, и предвосхитил два пути углубления нашего понимания электродинамических сил: свести их к движениям в эфире или суммировать прямые действия электрических жидкостей, протекающих в проводниках.<sup>79</sup>



Великолепная архитектура мемуаров опирается на вымышленную трехэтапную историю. На первом этапе фундаментальные эксперименты установили общие свойства электродинамических сил. На втором этапе из этих свойств была выведена общая формула силы. На третьем этапе все известные явления электродинамики и магнетизма были выведены из закона силы и предположения об амперовских токах. Такая архитектура помогла прояснить предмет и убедить читателей Ампера. В то же время она скрывала динамическое взаимодействие эксперимента, математических методов и теоретических идей в фактическом генезисе электродинамики.

Новый эффект Эрстеда, ньютоновская аналогия и принцип единства были источниками первоначальных теоретических убеждений Ампера. Затем Ампер задумал, заказал и использовал прибор, предназначенный для поддержки этих убеждений. Структура прибора была обусловлена скупозным анализом теории, предполагавшим представление о физическом элементе тока как о делимой сущности по отношению к принципам механики. В целом, эксперименты подтвердили эти догадки. Однако несколько неудачных экспериментов сыграли решающую роль. Они устранили прежние неопределенности теории, переориентировали Ампера на нулевой метод и подтолкнули к разработке новых математических методов, позволивших подтвердить более качественные компоненты теории Ампера и предложили более фундаментальные объяснения электродинамических сил.

Эта сложная история и простая реконструкция электродинамики Ампера имеют общую черту: математика является строгой и адаптируемой, в то время как экспериментам не хватает точности и гибкости. Эта асимметрия, позже рассматриваемая как основной дефект французской физики, имеет естественное объяснение: эксперименты были призваны найти теорию на простейшем уровне анализа, для которого эффекты являются небольшими, а геометрические конфигурации сильно ограничены. Существовали два очевидных способа избежать трудности: отрицать контроль математической теории над экспериментом, как это сделал Фарадей, или переместить контроль на уровень более сложных, но все еще вычисляемых систем, как позже сделал Вебер.

<sup>75</sup> Ampere 1826b: 41, 101. 145-146; Ampere 1826a. Также в Blondel 1982: 150-3; Grattan-Guinness 1990, Vol. 2: 956-9. В главе 2 будет показано, как Франц Нейман использовал эквивалентность.

<sup>76</sup> Ampere [1801]: 175; 1820a: 257; 1826a: 47. Также в Blondel 1982, 88-89, 152-153; также в Caneva 1980.

<sup>77</sup> Ampere 1821c, *MRP* 2: 216 (идея Эрстеда); 1822a, *MRP* 2: 249 (эфир); [1824a]. 1824b (электрохимия). Также в Blondel 1982: 155-157 (ток). 161-165 (эфир).

<sup>78</sup> Ampere 1826 h: 87, 97-99.

## 1.5 Электромагнитная индукция

### 1.5.1 Первые попытки

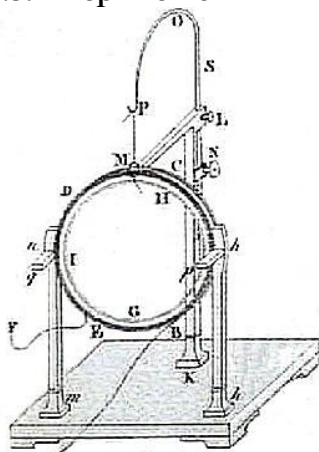


Рис. 1.15. Устройство для индукционного эксперимента Ампера (Ampere 1821с: 448).

До сих пор не была упомянута пара экспериментов Ампера, не имевших никакого отношения к математике элементов тока.

Гипотеза о молекулярных токах в магнитах играла центральную роль в его теории, и Ампер хотел определить, существовали ли эти токи в немагнитном железе или возникали в процессе намагничивания. Для этого в июле 1821 года он представил устройство, в котором медное кольцо HIG висит внутри неподвижной катушки BCDE (рис. 1.15). Он поместил магнит на палочки pq и rk. и запитал катушку от батареи. Кольцо не двигалось, и поэтому не казалось местом возникновения индуцированных токов. Ампер сделал вывод, что в немагнитном железе существуют случайно ориентированные молекулярные токи, и объяснил намагничивание ориентацией этих токов<sup>80</sup>.

В сентябре 1822 года он повторил эксперимент в Женеве с мощным магнитом и на этот раз получил *"альтернативное притяжение и отталкивание кольца"*. Положительный результат этого эксперимента не подтверждал существования молекулярных токов в железе. Он также не был связан с фундаментальным законом электродинамики. Теперь у Ампера не было мотивации для продолжения этой темы. Он даже не уточнил, был ли эффект постоянным или преходящим, оставил его направление неопределенным и оставил публикацию Огюсту де ла Риву.<sup>81</sup>

Для Фарадея индукция токов не была безразличным вопросом. Если, рассуждал он, состояние проводника с током предполагает наличие магнитной силы, то, вероятно, существует и обратный эффект: магнитная сила должна вызывать электрические токи в проводниках. В ноябре 1825г он исследовал случай двух линейных проводников. Если первый проводник был подключен к батарее, то его магнитная сила могла бы

вызвать ток во втором проводнике. Фарадей попробовал три геометрические конфигурации: пара параллельных проводов, прямой индуцирующий провод внутри спиралевидного собирающего провода и спиралевидный индуцирующий провод вокруг прямого собирающего провода. В каждом случае его гальванометр не давал никаких отклонений.<sup>82</sup>

Возможно, эффект был слишком мал, чтобы его можно было обнаружить, подумал Фарадей. В августе 1831 года, вероятно, под впечатлением от экспериментов Джозефа Генри и Геррита Молла с электромагнитами, Фарадей придумал новое устройство, использующее эффект умножения витков и концентрирующий эффект железа. Он намотал длинные медные провода вокруг двух противоположных сторон железного кольца с соответствующей изоляцией витков. Железо передавало сильную магнитную энергию первичной катушки вторичной катушке. Три фута провода соединяли последнюю катушку с примитивным гальванометром, состоящим из подвешенной магнитной иглы и параллельного провода. Стоит отметить недоверие Фарадея к готовым измерительным приборам в его поисках новых эффектов.<sup>83</sup>

Фарадей подключил первичную катушку к батарее и сообщил:

*"Немедленно осязаемое воздействие на иглу. Она колебалась и окончательно обосновалась в исходном положении. При **разрыве соединения** [...] с аккумулятором снова происходит отклонение иглы"* (акцент Фарадея).

Фарадей говорил о *"волне электричества"*, имея в виду ток короткий и интенсивный, как прибой на берегу.<sup>84</sup>

Для Фарадея кратость тока была неожиданной. Имеющиеся аналогии, особенно с электростатической индукцией, предполагали постоянный индуцированный ток. К счастью, он мог увидеть даже кратковременный индуцированный ток по простой причине: его гальванометрическая игла имела малое затухание и могла совершить *"несколько колебаний"*, прежде чем вернуться в равновесие. Поэтому он мог наблюдать возмущение иглы, даже если смотрел на нее спустя долгое время после замыкания первичной цепи. По сравнению с предыдущими попытками обнаружения индуцированных токов, решающим усовершенствованием Фарадея стало усиление эффекта за счет катушек и железного сердечника. В примитивном устройстве, созданном в ноябре 1825 года, его гальванометр был слишком нечувствителен, чтобы показать даже малейшее кратковременное возмущение.<sup>85</sup>

<sup>80</sup> Ampere 1821b: 377; 1821c: 448. Также в Blondel 1982: 118-19; Hofmann 1995: 310-315.

<sup>81</sup> Ampere [1822c]: 333-334; А. де ла Рив 1822: 48; Г. Де ла Рив к Фарадею. 24 сентября 1822 года. *CMF* 1: 291. Также в Ross 1965; Williams 1986; Hofmann 1987b; Romo and Doncel 1994: 299. Современное повторение и интерпретация эксперимента Ампера, см. Mendoza 1985.

- <sup>82</sup> FD 1: 279 (28 ноября 1825 года). В апреле 1828 года (FD 1: 310) Фарадей исследовал случай индукции, похожий на случай Ампера: он поместил магнит внутри тонко подвешенного медного кольца, и попытался и не смог переместить кольцо, приближаясь к полюсам другой, мощный магнит. О его мотивации ожидать индуцированных токов, также в FER 1: 1-2.
- <sup>83</sup> FD 1: 367, ## 1-5 (29 августа 1831 г.). Об экспериментах Генри и Молла, также в Молла к Фарадею, 7, 9, 10 июня 1831 года, CMF 1.
- <sup>84</sup> FD 1: 367, № 3; FD 1: 369. № 14 («волна электричества»). Тщательное изучение случаев выражения «волна электричества» в дневнике показывает, что Фарадей не имел в виду колебательное движение. По-французски можно было бы сказать, что он имел в виду *vague* (неопределенное), а не *onde* (волна).
- <sup>85</sup> FD 1: # 7. Некоторые связывают успех Фарадея с его ожиданием того, что эффект должен быть преходящий и рассуждал о различных причинах такого ожидания.

### 1.5.2 От тины к рыбе

Еще одним ключом к успеху Фарадея была его готовность исследовать то, что на первый взгляд казалось паразитическим явлением, и таким образом превратить грубое наблюдение в полноценное открытие. В день первого наблюдения он усовершенствовал обнаружение, заменив прямую проволоку над иглой компаса плоской спиралью, и показал, что вместо железного кольца можно использовать железный цилиндр (хотя и менее эффективно). Однако ему не удалось получить два ожидаемых эффекта от индуцированного тока: искру и электролиз. Три недели спустя, на пороге начала новой серии экспериментов, он написал своему другу Ричарду Филлипсу:

*"Я снова занят электромагнетизмом и думаю, что ухватился за хорошую вещь, но не могу сказать; возможно, это сорняк, а не рыба, которую после всех моих трудов я, наконец, смогу вытащить наверх".<sup>86</sup>*

На следующий день Фарадей попробовал индукцию от катушки к катушке без железного сердечника, а также индукцию от движущегося магнита к спирали. Это не удалось. Тогда он вернулся к предыдущему железному цилиндру, превратил окружающую его проволоку в единую спираль, соединенную с гальванометрическим прибором, и расположил два стержневых магнита и железный цилиндр в треугольной магнитной цепи (рис. 1.16). Всякий раз, когда магнитный контакт устанавливался или разрывался, магнитная игла перемещалась. Фарадей заключил: *"Очевидное преобразование магнетизма в электричество"*.<sup>87</sup>

В октябре, с обновленной батареей и усовершенствованными катушками, Фарадей получил прямую индукцию от катушки к катушке, хотя и очень слабую. Ему также удалось получить искру с помощью оригинального железного кольца и катушки. Наконец, он получил отклонение иглы гальванометра, поместив магнит в полую катушку, и записал: *"Волна электричества была получена от простого приближения к магниту, а не от его образования на месте"*.<sup>88</sup>

К тому времени Фарадей смог получить все случаи электромагнитной индукции, за исключением той, которая возникает при относительном

движении двух контуров и которую он получил в конце года.<sup>89</sup> Его исследовательская стратегия включала усиление эффектов с помощью усовершенствованных катушек, батарей и детекторов, а также простые мутации устройств, предполагаемые эквивалентностью токов и магнитов в отношении магнитной силы. Согласно этой эквивалентности, железо в первом индукционном эксперименте не могло быть существенным, поскольку оно просто направляло и усиливало магнитную энергию первичной катушки. И наоборот, первичную катушку можно заменить магнитом, как это сделал Фарадей в треугольном устройстве на рис. 1.16.



Рис. 1.16. Устройство для магнитоэлектрической индукции (FD 1: 372).

Поскольку появление и приближение магнита приводило к одинаковому изменению магнитной силы, Фарадей придумал индукцию движущимся магнитом.

<sup>86</sup> FD 1: # 6. # 7. # 18. # 15. # 11 Фарадей Филлипсу. 23 сентября 1831 года, CMF1.

<sup>87</sup> FD 1: # 21. ## 25-27. № 33 (24 сентября 1831 г.).

<sup>88</sup> FD 1: ## 36-39, # 46, # 57.

<sup>89</sup> FD 1: ## 250-251 (26 декабря 1831 г.).

### 1.5.3 Электротоническое состояние

Эта серия наблюдений не зависела от конкретного представления о процессе индукции. Тем не менее, Фарадей очень рано пришел к такому мнению. По его мнению, переходный характер индукционного тока был слишком удивительным, чтобы оставить его без объяснения. Переходный индукционный ток можно было представить себе при замыкании первичной цепи: интуитивно понятно, что внезапное увеличение первичного тока может быть более эффективным, чем постоянный ток. Но возникновение переходного тока сравнимой интенсивности при разрыве первичной цепи озадачило Фарадея. Как может затухающий ток оказывать индуктивное действие, если постоянный ток его не оказывает?

В своем первом сообщении о последнем эффекте Фарадей подчеркнула слово "разрыв". В тот же день он написал: *"Повторение при разрыве связи показывает, что где-то существует равновесие, которое должно быть способно стать более отчетливым"*. Согласно этой точке зрения, которую Фарадей позже

изложил в Королевском обществе, проводник принимает "тоническое" состояние во время начального переходного тока и сохраняет такое состояние до тех пор, пока существует первичный ток. Когда первичная цепь разрывается, это состояние ослабевает, и возникает обратный переходный ток. По словам самого Фарадея

*"Когда провод подвергается действию вольта-электрической или магнито-электрической индукции, он, видимо, находится в некотором особом состоянии, ибо он сопротивляется образованию в нем электрического тока, при обычном же состоянии провода ток бы в нем возбуждался; предоставленный самому себе, такой провод обладает способностью давать начала току, каковой способностью он в обычных условиях не обладает. Это электрическое состояние материи до сих пор не было известно, но оно, вероятно, оказывает значительное влияние во многих, если не в большинстве явлений, производимых токами электричества.[...] Посоветовавшись с некоторыми сведущими друзьями, я позволил себе назвать это состояние электротоническим".<sup>90</sup>*

Фарадей понимал, что если новое состояние материи действительно существует, необходимо привести независимые доказательства этому

Он безуспешно искал магнитные воздействия от проводников в этом состоянии или изменения их проводящей способности.<sup>90-1</sup>

Кроме того, Фарадей вскоре разработал другое описание явления индукции. К своему опубликованному описанию электротонического состояния он добавил сноску о том, что это понятие стало излишним. Он не хотел давать ход домыслам, но сохранил веру в электротоническое состояние до конца жизни. В 1835 году он написал Уэвеллу:

*"Я на время отказался от этого электротонического состояния как экспериментального результата (помните, мои исследования являются экспериментальными), потому что я не смог найти ни одного факта, подтверждающего его, но я цепляюсь за него в фантазиях или гипотезах от общих впечатлений, произведенных всей серией исследований".*

Среди более поздних предварительных доказательств Фарадея тонического состояния мы находим самоиндукцию в 1834 году, быстро отброшенное различие между индуцирующими способностями вольтаического и магнитоэлектрического токов в 1840 году и диамагнетизм в 1845 году. Это упорство показывает приверженность Фарадея к градуации причины и следствия: он не мог признать, что следствие может быть больше, чем его непосредственная причина. Прерванный ток в данной цепи не может быть причиной большего тока в другой цепи без "звена в цепи эффектов, колеса в физическом механизме действия, пока еще не распознанного"<sup>91</sup>.

<sup>90</sup> FD 1: # 3. # 8; FER 1: серия 1 (ноябрь 1831): № 60.

<sup>90-1</sup>(FER 1: серия 1 (ноябрь 1831): № 61 -76).

<sup>91</sup> FER 1: 16п (сноска); Фарадей Уэвеллу. 19 сентября 1835 года. CMF 1; FER 1, серия 9 (декабрь 1834 г.): # 1114 (самоиндукция и цитирование). О разнице между вольтовым

### 1.5.4 Пересечение магнитных кривых

Тем не менее, электротоническое состояние не играло большой роли в ранних экспериментах Фарадея по электромагнитной индукции. После доказательства вольтаической и магнитной индукции он скорее исследовал связь, которую он подозревал между эффектом Араго и новым явлением. В 1822 году, измеряя магнитную силу Земли вблизи Гринвича, Араго заметил демпфирующее действие немагнитных металлов, расположенных вблизи иглы компаса. Два года спустя он изучил и опубликовал обратный эффект: замедление вращающегося медного диска близлежащим магнитом. Этот новый вид магнитного воздействия привлек большое внимание и даже вызвал приоритетную ссору между Араго и Дэвидом Брюстером. Несмотря на первоначальную сдержанность Араго, было высказано несколько предположений о причине нового эффекта, самым популярным из которых было временное намагничивание вращающегося диска<sup>92</sup>.

В первый же день своих индукционных экспериментов Фарадей задался вопросом: *"Не могут ли эти переходные эффекты быть связаны с причинами разницы между способностью металлов в покое и в движении в опытах Араго?"*. Фарадей имел в виду, что сила между магнитом и вращающейся пластиной может быть вызвана токами, индуцированными в пластине. Два месяца спустя он проверил это предположение с помощью медного диска, вращающегося между губками "большого магнита Королевского общества". Он поместил два скользящих контакта в двух точках диска, подсоединил их к гальванометру и наблюдал явное отклонение. Так родилась новая электрическая машина.<sup>93</sup>

В отсутствие какой-либо точной теории Фарадей предположил, что конфигурация индуцированных токов будет имитировать конфигурацию индуцирующего тока. Соответственно, в своих ранних экспериментах по вольта-электрической индукции он решил, что растущий ток индуцирует токи в том же направлении.<sup>94</sup> Ему понадобилось не менее трех месяцев, чтобы осознать эту ошибку в знаке. В эксперименте с вращающимся диском он ожидал увидеть полувихрь токов в части диска, расположенной между полюсами магнита, в соответствии с конфигурацией индуцирующих амперовских токов. К счастью, это предубеждение не мешало дальнейшим исследованиям. Изменяя положение скользящих контактов, Фарадей вскоре обнаружил, что предполагаемого вихря не существует. Токи индуцировались радиально, то есть в направлении, перпендикулярном движению.<sup>95</sup>

Для прямого доказательства этого закона, Фарадей пропустил прямоугольные лезвия и провода между губками электромагнита и

полюсом цилиндрического магнита. Он пришел к выводу: «Ток электричества, который возбуждается в металле при движении по соседству с магнитом, зависит для его направления в целом по отношению металла к результирующему магнитному действию, или к магнитным кривым».

Не зная векторного произведения, Фарадей счел это направление "довольно трудным для выражения" и потратил три параграфа, чтобы объяснить его с помощью диаграмм, лезвия ножа и модели из дерева и ниток. Основная идея заключалась в том, чтобы рассмотреть, как провод пересекает "магнитные кривые", определяемые как "линии магнитных сил [...], которые изображаются железными опилками или теми, к которым очень маленькая магнитная игла образует касательную".<sup>96</sup>

В более поздних экспериментах, касающихся индукции под действием магнитного поля Земли и индукции вращающимся цилиндрическим магнитом, Фарадей доказал, что простого пересечения магнитных кривых без изменения магнитной интенсивности было достаточно для индукции тока. Он также сравнил (в противоположность) индукцию в разных металлах и обнаружил, что «тенденция генерировать ток» одинакова для всех металлов. В начале 1832 года он объединил свои результаты в один закон:

*"Если проводник движется так, чтобы пересечь магнитную кривую, то в действие вступает сила, вызывающая электрический ток через него".<sup>97</sup>*

Первоначально это утверждение касалось только индукции, вызванной относительным движением магнита и проводника. Позже Фарадей включил случай двух проводников в относительном движении и, наконец, случай индукции переменным током. В последнем случае магнитные кривые должны рассматриваться как развивающиеся во время роста первичного тока и, тем самым, пересекающими проводник вторичной цепи. С этим окончательным расширением закон пересечения силовых линий завершенным и самодостаточным: «Предоставляя идеальную причину для произведенного эффекта [закон, кажется] устраняет любое предположение того специфического состояния, которое я рискнул назвать электротоническое состояние».<sup>98</sup>

Магнитные кривые широко использовались в кругу Фарадея, включая Дэви, Стерджена и Молля, для представления магнитной силы магнитов, электрических токов и электромагнитов. С помощью этого геометрического представления магнитной силы Фарадей смог соединить два своих важнейших открытия: электромагнитное вращение и индукцию. Он осознал основную двойственность оси и контура, применимую к обоим явлениям:

*"Способность индуцировать токи проявляется по окружности вокруг магнитной равнодействующей или силовой оси точно так, как расположенный по окружности магнетизм возникает вокруг электрического тока и им обнаруживается".<sup>99</sup>*

<sup>92</sup> Arago 1825. См. также в Arago 1826; Williams 1965: 170--172; Romo and Doncel 1994:



<sup>93</sup> *FD* 1: # 17; *FD* 1: # 85, ## 99-109 (28 октября 1831 г.).

<sup>94</sup> *FD* 1: # 9. Правильное направление индуцированных токов Фарадей дал 8 декабря, *FD* 1: 190-208. Рукопись серии1, прочитанная перед Королевским обществом 15 декабря, содержала ошибку знака. Также в Romo and Doncel 1994; Doncel 1996.

<sup>95</sup> *FD* 1: # 77 (24 октября 1831 г.) для полувихря; *FD* 1: ## 110-19 (28 октября 1831 г.). Также в Steinle 1994; Romo and Doncel 1994; Doncel 1996.

<sup>96</sup> *FD* 1: ## 130-42 (4 ноября 1831 года), ## 194-213 (8-9 декабря); *FER* 1, серия 1 (ноябрь 1831 г.): 33, ## 114-116, # 114п (магнитные кривые).

<sup>97</sup> *FD* 1: ## 232-9 (21 декабря) для земной индукции, ## 255-7 (26 декабря) для вращающегося магнита; *FD* 1: ## 283-87 (26 Декабрь) и *FER* 1: серия 2 (январь 1832 г.): 160 для разных металлов. Первоначально Фарадей считал равенство индукция в разных металлах противоречащим зависимости эффекта Араго от металла. Это заняло у него несколько недель и г-н Christie помог понять роль проводящей способности металла. С точки зрения закона Ома, который Фарадей не знал, индуцированная ЭДС зависит не от металла, а от тока. См. Steinle 1996.

<sup>98</sup> *FER* 1. серия 2 (январь 1832 г.): # 232. # 238. # 231 (цитата). См. Steinle 1996.

<sup>99</sup> *FER* 1, серия 1 (ноябрь 1831 г.): 118. О предыдущих применениях магнитных кривых, см. Simpson 1968:: 80-86; Heilbron 1981: 202; Gooding 1985, 1990: гл. 4.

### 1.5.5 Неопределенности успеха

Необыкновенное открытие Фарадея вызвало бурный восторг среди его коллег. Без разрешения автора Жан Хашетт зачитал Французской Академии личное письмо, в котором Фарадей кратко изложил свои основные выводы. Через французский журнал новости достигли двух выдающихся итальянских физиков, Леодольфо Нобили и В. Антинори, которые немедленно провели эксперименты на эту тему и опубликовали свои результаты. Вскоре распространился ложный слух об их приоритете, хотя они включили в свою статью текст письма Фарадея. Более того, статья в *Le lусее* рассказывала о французских предчувствиях открытия Фарадея. Фарадею не составило труда прояснить факты.<sup>100</sup>

Однако он задел чувства Ампера, приписав ему "ошибочный результат", что индуцированные токи имеют то же направление, что и индуцирующие токи. В длинном, мучительном письме Фарадею Ампер доказывал, что он никогда не делал никаких заявлений о направлении электрического тока. Неявно он рассматривал свой эксперимент с подвешенным медным кольцом как предвосхищение открытия Фарадея. Однако это наблюдение не имело большого исторического значения, независимо от того, имело оно какое-то отношение к электромагнитной индукции или нет: Ампер провел единственный, сомнительный эксперимент, Фарадей же выполнил систематическую серию длительных исследований и постепенно установил факт электромагнитной индукции.<sup>101</sup> Ключ к успеху Фарадея можно увидеть в его способности к методичному исследованию. Он придавал своим приборам оптимальную гибкость и внимательно относился к деталям, которые можно было изменять в соответствии с возможностями, предоставляемыми его

лабораторией. Таким образом, он выстраивал цепочки или деревья экспериментов, прокладывая свой путь *"по фактам, тесно связанными воедино"*. Он хранил в памяти большой запас предыдущих экспериментов, которые должны были быть объяснены новыми фактами (в случае эффекта Араго) или использованы для объяснения новых фактов (в случае движения магнитных полюсов). Он определился со своими взглядами и экспериментальной деятельностью, когда была создана простая, согласованная сеть реальных и виртуальных экспериментов<sup>102</sup>.

Фарадей избегал двух способов блокирования исследовательской функции экспериментов.

Во-первых, он не направлял свою энергию на разработку практических приложений. Он *"скорее желал открыть новые факты и новые отношения, чем превозносить силу уже полученных"*. Он был удовлетворен, как только новые эффекты были ясны и легко воспроизводимы (в конечном счете, в классе), и оставил другим концепцию эффективных электродвигателей и динамомашин.

Во-вторых, Фарадей не позволял теории вторгаться в его исследования. Хотя такие предположения, как существование индуцированных токов, электротоническое состояние или вихри в диске Араго, сыграли свою роль в ориентации его исследований, но они были легко устранимы. Фарадей гордился и стремился к этой гибкости и осуждал бесплодие закрытых математических теорий.<sup>103</sup>

*Я не помню, чтобы математики многое предсказывали. Возможно, в теории Ампера один или максимум два независимых факта. Я сомневаюсь в обоих. Факты предшествуют математике, и там, где не было фактов появлялись неожиданности, хотя, как при электромагнитном вращении и магнетизме вообще, расчеты были выполнены; а иногда, когда факт присутствовал, как в явлении Араго, вычисления были недостаточны для иллюстрации его истинной природы, пока на помощь не приходили другие факты*

Только в конце своей экспериментальной серии по электромагнитному вращению и индукции Фарадей предложил синтетический взгляд на исследуемое поле. Мы можем назвать этот взгляд теорией из-за его способности упорядочивать сложное. Однако это очень отличалось от того, что Ампер (и Фарадей) называли бы теорией. Это не было представлено ни математически, ни даже количественно.<sup>104</sup>

Это была незамкнутая цепь, в которой природа электрического тока оставалась неопределенной. Центральное понятие - магнитная сила и линии ее действия - имело неоднозначный статус. Было ли это простым удобством выражения, или это была физическая сущность? Рабочее определение магнитных кривых, данное Фарадеем, предполагает первую альтернативу. Но его объяснение притяжения между двумя токами в терминах соответствующих магнитных сил указывает на второе.<sup>105</sup>

Историки тщетно пытались устранить эту двусмысленность. Вместо

этого ее можно рассматривать как существенную характеристику исследований Фарадея с самого начала его интереса к электричеству и магнетизму и до его последних работ. С одной стороны, он хотел сохранить экспериментальный характер своих исследований и обеспечить чисто инструментальное значение силовых линий, как ясного и эффективного способа сформулировать правила электромагнетизма. С другой стороны, он сильно подозревал, что магнитные кривые и тоническое состояние являются реальными "звеньями в цепи эффектов", производимых магнитами и электрическими токами. Соответственно, он ожидал, что магнитные и электрические действия "прогрессируют и требуют времени, как это уже произошло с распространением звука и света". Эта догадка, высказанная в марте 1832 года, оказалась в сейфе Королевского общества. Фарадей потратил еще двадцать лет на исследования, пока не обнаружил ее.<sup>106</sup>

<sup>100</sup> письмо Фарадея к Хашетту (потеряно), выдержка из публикации в *ACP* 48 (1831): 402 и в *Le temps*, 28 декабря 1831 г. (зачитано Nobili); Nobili and Antinon 1831 (от 31 января 1832 г., но опубликованное в ноябре 1831 г.); сплетня в Литеровской газете (1832): 185; "Лицей" 36. 1 января 1832 года; *FER* 1. серия 1: 40-41.

<sup>101</sup> *FER* 1, серия 1 (ноябрь 1831 г.): # 78n; письмо Ампера Фарадею, 13 апреля 1833 года, *CMF* 2. Фарадей был введен в заблуждение описанием эксперимента Ампера, который он обнаружил в *Demonferrand* 1823 (см. Romo and Doncel 1994: 301). Он извинился в *FER* 1, серия 3 (33 января): 107-109 (примечание от 29 апреля 1833 года).

<sup>102</sup> письмо Фарадея Амперу, 3 сентября 22, *CMF* 1.

<sup>103</sup> *FER* 1. серия 2 (январь 1832 года): ## 159; Фарадей в Сомервилле, ноябрь 1833, *CMF* 2.

<sup>104</sup> Количественная концепция плотности силовых линий появилась только в 1851 году: *FER* 3, серия 28 (октябрь 1851 года): № 3115, № 3122.

<sup>105</sup> Когда Фарадей представил идею развития или сжатия магнитных кривых вокруг изменяющегося тока (*FER* I, серия 2: #238), он указал в скобках, что магнитные кривые были "простыми выражениями для расположенных магнитных сил". В своих экспериментах с вращающимся цилиндрическим магнитом он считал, что магнитные кривые не вращаются вместе с магнитом и пришел к выводу о "сингулярной независимости магнетизма и стержня, в котором он находится" (*FER* 1, серия 2: #220). Williams (1965: 203-204) считает, что это указывает на то, что силовые линии Фарадея уже стали "гораздо более реальными". Однако представление о линиях как о простой диаграмме магнитных сил подразумевает их независимость от вращения магнита. Подчеркивая "единичный" характер этой независимости, Фарадей, вероятно, имел в виду контраст с поведением гипотетических магнитных жидкостей или амперовских токов, которые должны были бы вращаться вместе с магнитом.

<sup>106</sup> Фарадей, запечатанная записка от 12 марта 1832 года. Королевское общество, цитируется в Williams 1965: 181.

## 1.6 Выводы

Ампер и Фарадей соучредили новую науку электродинамику. В сборе экспериментальных фактов их вклад был взаимодополняющим: Ампер продемонстрировал силы между двумя токами и доказал эквивалентность между магнитами и распределениями тока (не путать с гипотезой об амперовских токах), а Фарадей открыл непрерывное вращение и

электромагнитную индукцию. Однако их экспериментальные и теоретические методы были настолько разными, что они вряд ли могли обмениваться чем-то большим, чем неинтерпретированными фактами.

В физике Ампера доминировала теория. Несмотря на индуктивную риторику его главного мемуара, он построил свою теорию в основном из теоретических ресурсов, включая аналогию, виртуальную историю и математическую унификацию в неоньютоновском стиле. Большинство его экспериментов проверяли теоретические предсказания или выбирали между заранее продуманным диапазоном возможностей. Они были очень жесткими по своему построению и отражали математическую структуру теории.

В отличие от Ампера Фарадей не знал математики и старался свести к минимуму теоретические предубеждения. Он считал ньютоновские представления об электрических и магнитных флюидах недоказанными и усилил исследовательскую функцию эксперимента, систематически совершенствуя свои экспериментальные устройства. Он не стремился к созданию закрытой математической теории, но вместо этого максимизировал взаимные связи своих экспериментальных действий и результатов. Его агностицизм в отношении сокровенной природы электричества и магнетизма сосредоточил его внимание на действиях различных наэлектризованных или магнитных тел, а не на их внутренней структуре. Его основным философским понятием была "*power*", охватывающая реальные и виртуальные действия. В его идиоме различные вызывают различные состояния тел (состояния движения, или внутренние состояния). Наиболее существенным было распределение *power*. Источники (наэлектризованное тело, магнит, ток) были подчинены *power* которые они развивали.<sup>107</sup>

Есть существенная гармония между исследовательским стилем экспериментов Фарадея и его концепцией *power*. Распределение *способностей* можно рассматривать как заданное набором виртуальных экспериментов. Например, магнитные кривые представляют собой движение, которое будет накладываться на магнитный полюс в каждой точке пространства. Умножая и варьируя экспериментальные конфигурации, Фарадей "сопоставил факты", что означает, что он связывал реальные эффекты с виртуальными экспериментами, которые определяют распределение *power*. Например, он придумал электромагнитные вращения, соединив на бумаге виртуальные действия сторон магнитной иглы на проволоке. Или он объяснил притяжение Ампера между двумя токами в терминах виртуальных вращений, выявляющих распределение *power* вокруг токов. Следовательно, исследование может выявить или отобразить *power*. Или же оно может искать новые виды состояний, вызываемых данной *power*. Фарадей занимался именно этим, когда искал электромагнитную индукцию. Поскольку результат не укладывался в схему "*power* -

индуцированное состояние", он представил себе электротоническое состояние.

Ампер и Фарадей по-разному стремились к теоретическому единству. Французский философ представлял себе внутреннюю структуру различных источников действия, которая свела бы их только к одному виду. Сводя магниты к токам, он объединял электродинамику и магнетизм; сводя токи к потокам электричества, он надеялся объединить электростатику и электродинамику; отождествляя эфир с нейтральным соединением двух электричеств, он надеялся объединить оптику и электродинамику. В отличие от него, Фарадей достиг единства, определив *способности*, исходящие из различных источников. По его мнению, магнитные, электромагнитные и электродинамические эффекты происходят от взаимодействия магнитных *power*. Поразительно, но он принял утверждение Ампера о том, что сторона тока подобна полюсу магнита. Но если Ампер подразумевал, что магниты состоят из токов, то Фарадей имел в виду, что в обоих случаях существует одна и та же *power*.

Теория Ампера в своей зрелой форме имела успех, особенно во Франции и в Германии. Она была изложена ясным математическим языком, опиралась на в основном знакомые ньютоновские понятия и методы, и, казалось, опиралась на прочную эмпирическую основу. Короче говоря, все, кто ее понимал, принимали ее, за исключением более спорных амперовских токов.

Теория Фарадея была полностью проигнорирована в течение многих лет. Даже правило пересеченных силовых линий не нашло поддержки у современных физиков. Первые читатели Фарадея испытывали трудности с его необычным стилем и упустили существенную согласованность его материала и концептуальных приемов. Первые математические теории электромагнитной индукции, о которых пойдет речь в следующей главе, не основывались на взглядах Фарадея. Их отправной точкой была математическая теория Ампера в сочетании с фактами Фарадея.

<sup>107</sup> Для Фарадея '*force*' и '*power*' были примерно синонимами. В его более поздних работах '*force*' встречается чаще, а '*power*' используется для обозначения вида силы, например, "магнитная *power*", "электрическая *power*". Естественно, Фарадей также использовал эти два слова в их наиболее обычном смысле: например, "*сила* этого аргумента" или "*мощность* этого электромагнита."

## 2. Немецкая точность

### 2.1 Введение

До 1830-х годов большая часть немецкой физики состояла из эмпирического, качественного расширения основных иностранных открытий, таких как столб Вольта или эффект Эрстеда. Излюбленными темами были состав столба и обстоятельства электромагнитного воздействия. Самым известным прибором, изобретенным в Германии,

был "умножитель" Швейгтера и Потгендорфа - катушка, которая усиливала действие гальванического тока на магнитную иглу. Это устройство вскоре стало неотъемлемой частью гальванометров - хотя и не в руках немецких изобретателей, которые мало заботились о количественных измерениях.<sup>1</sup>

Вместо этого немецкие физики обращали внимание на взаимосвязи между различными разделами физики. Следуя примеру Эрстеда, они искали прямые связи между химическими реакциями и магнетизмом, а также между теплом и магнетизмом. Последний вид исследований привел Томаса Сибека, сдержанного натурфилософа, к открытию термоэлектричества в 1822 году. Другой плодотворной темой была связь между гальванизмом (эффекты батареи Вольты) и (фрикционным) электричеством. В 1801 году берлинский физик Пауль Эрман наблюдал электроскопическое напряжение вдоль влажного проводника, соединенного с полюсами вольтовой батареи. В современной терминологии "разряд батареи" был неполным. Эрман показал, что напряжение между полюсами было выше для более плохих проводников и что оно постоянно распределялось вдоль проводника. Он считал, что эти эффекты характерны для влажных проводников, и положил их в основу своей личной теории батарей.<sup>2</sup>

Связь между электроскопической силой (которую дает электроскоп), током и проводимостью оставалась туманной темой, пока Георг Симон Ом не изучил ее в середине 1820-х годов с помощью концепции цепи Ампера и новой гальванометрической техники. Для измерения силы тока Ом использовал термоэлектрический источник Зеебека (который обладает постоянной электромагнитной силой) и магнитную иглу, подвешенную к кулоновским торсионным весам. Терпеливо изменяя длину и характер соединительных проводов, он получил закон, который носит его имя. Старые наблюдения Эрмана теперь казались результатом конкуренции между внутренним сопротивлением батареи и сопротивлением внешнего проводника. Несколько месяцев спустя Ом опубликовал общую математическую теорию электропроводности, основанную на аналогии с теорией тепла Фурье. Ом постулировал, что плотность электрического тока пропорциональна градиенту электроскопической силы, как тепловой поток пропорционален градиенту температуры. Используя многочисленные ряды Фурье, он определил, как сопротивление конечного однородного проводника зависит от его формы.<sup>3</sup>

Высоко математическое, экспериментально точное количественное описание гальванической цепи Ома обладало достоинствами лучшей французской физики. Но она было чуждо доминирующему немецкому стилю, и поэтому было принята прохладно. Доверие к закону Ома возросло только после тщательного подтверждения закона Густавом

Фехнером в 1831 году. Но даже тогда Ом и Фехнер не имели средств для распространения своих методов, вдохновленных французами.

Преподавание физики в университетах оставалось элементарным, и не существовало никакой структуры для подготовки исследователей в этой области.<sup>4</sup> Более благоприятные институциональные условия начали появляться только около 1830 года. Самым решающим стало создание "физических семинаров" в нескольких немецких университетах.

Семинары знакомили студентов с физическими приборами и обучали их решать задачи по математической физике. Два самых важных реформатора немецкой физики, Франц Нейман и Вильгельм Вебер, были руководителями семинаров в Кенигсберге и Геттингене соответственно. Вместе с Фридрихом Бесселем и Карлом Фридрихом Гауссом они значительно улучшили немецкие стандарты точности в экспериментах и в физико-математической теории. Настоящая глава посвящена сравнительному исследованию их методов и достижений в их любимых областях - электродинамике и магнетизме.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Schweigger 1821. Ср. Pfaff 1824; Caneva 1978; Jungnickel and McCormmach 1986, Vol.1: 43-44.

<sup>2</sup> Seebeck 1822-1823; Erman 1801. Также в Jungnickel and McCormmach 1986, Vol.1: 43

<sup>3</sup> Ohm 1826a, 1826b (ссылка на Эрмана), 1827 (теория). См. Schagrin 1963; McKnight 1967; Pourprix 1990; Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. 1: 51-55. Предположительно введенный в заблуждение аналогией теплового потока, Ом отождествил электрическую силу или напряжение с плотностью заряда. См. ниже, как Вебер и Кирхгоф обнаружили и исправили эту ошибку.

<sup>4</sup> см. Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. I: 55-8 (прием Ома), 58-62 (Fechner), гл. 2 (физика и институты).

<sup>5</sup> О создании семинаров по физике. см Jungnickel and McCormmach, Vol. 1: гл. 4; Olesko 1991 (Neumann's).

## 2.2 Математическая феноменология Неймана

### 2.2.1 Исключение влияния аппарата

Первой специальностью Франца Неймана была кристаллография, которую он изучал у берлинского минералога Кристиана Вейса. Следуя своему наставнику, Нейман использовал геометрические методы, основанные на однородности кристаллов, симметрии и гониометрических измерениях. Согласно изречению *Hypotheses a naturae explicatione prohibendae*, (Гипотезы, препятствующие объяснению природы естественных явлений), он избегал атомистического представления кристаллов. Его интерес к физическим свойствам кристаллов привел его к чтению "Аналитической теории тепла" Фурье, которую он нашел очень близкой ему по духу. В отличие от учеников Лапласа. Фурье воздерживался от предположений о природе тепла и структуре материи. Начав с закона лучистого теплообмена между соседними элементами материи, он свел проблему распространения тепла к решению простого

дифференциального уравнения. Константы в этом уравнении, а также переменная температура имели непосредственный эмпирический смысл.<sup>6</sup>

В 1826 году 28-летнего Неймана вызвали в Кенигсберг, где он провел остаток своей жизни.<sup>7</sup> Там он познакомился с астрономом Фридрихом Бесселем, который в то время был занят усовершенствованием секундного маятника для прусской реформы мер и весов. Бессель выполнил эту задачу со всей строгостью и точностью, которые он знал из астрономии. Он самым тщательным образом изучал влияние окружающей среды на маятник и контролировал статистические ошибки своих измерений с помощью метода наименьших квадратов Гаусса. Его заявленной целью было "исключить прибор из результатов", то есть дать полный теоретический анализ связи между исследуемой величиной и измеряемыми числами. Как он объяснял Александру фон Гумбольдту:

*"Результаты, основанные на наблюдениях, никогда не могут быть найдены с той уверенностью, на которую математическая истина претендует по праву закона. Поэтому я считаю необходимым, чтобы результаты появлялись вместе с информацией, которая дает критерии для их оценки"*<sup>8</sup>.

Другой астроном, Лаплас, уже давно ратовал за астрономически точную физику. Однако, французские точные измерения относились больше к идеологии, чем к практике. Анализ ошибок проводился редко, а экспериментальные протоколы часто оставались в тени.<sup>9</sup> Бессель был главным среди немцев, превративших лапласовский идеал в строгую дисциплину. Его молодой коллега Нейман ревностно следовал за ним. Он сделал анализ маятника парадigmой своей физики и применил бесселевские методы к физике кристаллов и тепловым измерениям. На своих знаменитых семинарах он обучал студентов тщательному анализу условий измерения и необходимых теорий. До конца своей жизни он боролся с пренебрежением к эксперименту в математической физике и пренебрежением к математической теории в экспериментальной физике.<sup>10</sup> Суровая, повторяющаяся дисциплина анализа ошибок оказала два важных влияния на стиль физики Неймана. С экспериментальной стороны, он улучшал использование и дизайн существующих устройств, а не изобретал новые виды аппаратуры.<sup>11</sup>

С теоретической стороны он отдавал предпочтение тому типу теории, который лучше всего подходил для математического анализа измерений и их возмущений. Поэтому он старался устранить гипотетические элементы предыдущих теорий, даже больше, чем это сделали его французские герои. Его теория тепла устранила механизм излучения Фурье, а его оптика игнорировала молекулы эфира Френеля. Дифференциальные уравнения, наблюдаемые величины и средства их измерения - вот все, что ему было нужно.<sup>12</sup>

В принципе, он, как и большинство его коллег, считал, что механика должна быть фундаментом физики. На практике он не рискнул выдвигать



гипотезы, которые потребовала бы такая редукция, и остался доволен набором в значительной степени разобщенных феноменологических теорий. Он оставил великое объединение и экспериментальные исследования более авантюрным физикам. Такое отношение полностью соответствовало его психологии, о которой писал Гельмгольц:

*"К Нейману трудно найти подход, он ипохондрик, застенчив, но у него первоклассный мозг".<sup>13</sup>*

<sup>6</sup> F. Neumann 1826: 324; Фурье 1822. Также в Olesko 1991, 33-4, 62-3; Jungnickel and McCormmach 1986. Vol. 1: 84-5; Voigt 1895. По методу Фурье. см Фридман, 1977; Wice 1981a; Grattan-Guinness 1990, Vol. 2: 583-632; Dhombres and Robert 1998: гл. 8.

<sup>7</sup> Титулами Неймана в Кенигсберге были: Приват-доцент в 1826 году, экстраординарный профессор в 1828 году и экстраординарный профессор минералогии и физики в 1829 году. См. также в Jungnickel и McCormmach, Vol. 1: 85.

<sup>8</sup> письмо Бесселя Гауссу. 18 июля 1816 г. в Оверс 1880: 242; письмо Бесселя Гумбольдту, 24 января 1838 года Humboldt Nachlass, цитируемый в Olesko 1991: 73; Bessel 1828. См. также в Olesko 1991: 66-73.

<sup>9</sup> см. Olesko 1991: 162-3; Caneva 1974: 345-6, 355-63; Buchwald, 1989: 12, 18, 19.

<sup>10</sup> см. Olesko 1991: 73-80.

<sup>11</sup> см. Olesko 1991: 73, 390.

<sup>12</sup> см. Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. 1: 148-149; Voigt 1895: 14. Самые ранние работы Неймана имели более лапласианский привкус.

<sup>13</sup> F. Neumann, 1883 г.: I; Гельмгольц - Буа-Реймонду, 15 января 1850 года, в Кирстене, 1986: 92. См. также в Olesko 1991: 145, 156, 163, 306, 456.

### 2.2.2 Элементарный закон

Помимо вклада в кристаллическую оптику, наиболее важная теоретическая работа Неймана касалась законов электромагнитной индукции. Его отправной точкой был качественный закон, установленный в 1834 году русским физиком Эмилем Ленцем. Фарадей уже дал общее правило для определения направления индукционных токов в терминах пересечения силовых линий. Однако он почти не применял это правило к вольта-электрической индукции (индукции переменными токами), и сделал это только во второй серии. В первой серии он дал направление вольта-индуцированных токов непосредственно в терминах движения задействованных линейных проводников. Следовательно, Ленц считал, что у Фарадея нет общего правила индукции. Изучив примеры Фарадея и проведя несколько собственных экспериментов, он пришел к выводу:

*"Закон, согласно которому магнитоэлектрическое явление сводится к электромагнитическому, следующий: когда металлический проводник [провод] движется вблизи гальванического тока или магнита, гальванический ток индуцируется в таком направлении, что этот ток вызвал бы движение проволоки из состояния покоя в направлении, противоположном ее действительному движению, при условии, что покоящаяся проволока может двигаться только в направлении [действительного] движения или в*

противоположном направлении.

*Иначе говоря, направление индуцированного тока таково, что электродинамическая сила, действующая на движущийся провод, противодействует движению, приданному этому проводу".<sup>14</sup>*

Нейман назвал  $E \cdot Ds$  ЭДС, индуцированной в ориентированном элементе  $Ds$ , а  $F \cdot Ds$  - проекцией вдоль движения элемента электродинамической силы, которая действовала бы на элемент, если бы в нем протекал единичный ток. В этих условиях закон Ленца требует, чтобы  $E \cdot Ds$  и  $F \cdot Ds$  имели противоположные знаки. От Фарадея Нейман знал, что  $E$  пропорциональна скорости  $v$  элемента и не зависит от металла. Как простейшее выражение, удовлетворяющее этим условиям, Нейман написал «элементарный закон»:

$$E \cdot Ds = - \varepsilon v F \cdot Ds \quad (2.1)$$

Коэффициент  $\varepsilon$ , пояснил он, - постоянная, зависящая только от выбора единиц измерения, если индуцирующее действие изменяется медленно во времени, что выполняется только для индукции в проводах. В более общих случаях, таких как диск Араго, он ожидал, что индуцированные токи будут отставать от индуцирующего действия. Нейман также исключал индукцию незамкнутыми токами, для которых закон Ома он полагал недействительным.<sup>15</sup>

С самого начала Нейман тщательно разграничивал экспериментальные обстоятельства, при которых его теория могла быть обоснованной. Его забота об измерении также заставила его сосредоточиться на «интегральном токе», который является интегралом по времени тока, наведенного в движущейся цепи:

$$J = - \varepsilon / R \int_{t_0}^{t_1} dt \oint v F \cdot Ds, \quad (2.2)$$

где  $R$  - сопротивление цепи.

Эта величина, в отличие от дифференциального выражения (2.1), непосредственно наблюдается при измерении воздействия тока на магнитную стрелку в течение соответствующего интервала времени. Как мы увидим, центральная концепция теории Неймана, потенциал, естественным образом проявляется в выражении интегрального тока. Это ранний пример того, как рассмотрение наблюдаемости может формировать математическую теорию.<sup>16</sup>

<sup>14</sup> Lenz 1834: 488

<sup>15</sup> F. Neumann 1846 (ч. 27 октября 1845 г.): 13-16.

<sup>16</sup> F. Neumann 1846:18-19. Также Olesko 1991:175-177; Jungnickel and McCormmach:148-52.

Нейман не назвал интегральный ток электрическим зарядом: он не хотел анализировать ток как поток электричества.

### 2.2.3 Закон потенциала

Чтобы вывести законы для различных случаев индукции, Нейман использовал "элементарный закон" (2.1), выражения Ампера для

электродинамических сил и два дополнительных принципа:<sup>17</sup>

1. Индукция зависит только от **относительного движения** (иначе, отметил Нейман, движение Земли означало бы индукцию в проводнике, находящемся в покое, рядом с покоящимся магнитом).

2. Интегральный ток (2.2) зависит только от начального и конечного состояний и конфигураций связанных тел (что следует из элементарного закона в случае токов, индуцированных движением).

Сначала Нейман рассмотрел случай линейного замкнутого проводника, движущегося вблизи магнита. Он шел постепенно, от одного магнитного полюса к непрерывному распределению полюсов. При этом он не делал различий между амперовскими токами и магнитными массами: полюс можно рассматривать либо как концентрированную магнитную массу, либо как конец соленоида.<sup>18</sup> Для магнитного полюса сила, создаваемая замкнутым током, является производной от потенциала, что вытекает из амперовской эквивалентности между этим током и двойным магнитным слоем. В этом простом случае Нейман обнаружил, что интегральный индуцированный ток является просто изменением потенциала, рассчитанным для тока  $\epsilon$  в цепи и разделенным на сопротивление цепи. Аналогичный результат имеет место и для магнита, причем соответствующий потенциал теперь является функцией геометрической конфигурации цепи и магнита, а также распределения магнетизма в магните. В соответствии с принципом (1) тот же потенциал применим к случаю, когда магнит движется, а цепь находится в состоянии покоя.<sup>19</sup>

Для случая двух цепей, находящихся в относительном движении, Нейман заменил первичную цепь двойным магнитным листом Ампера и определил потенциал между двумя токами как потенциал соответствующих двойных слоев. Получив в результате непрacticный интеграл с шестью парами, он вернулся к элементарному закону (2.1) и ввел в него выражение (1.6), которое Ампера дал для силы, действующей на элемент тока из замкнутого контура. Это дало хорошую потенциальную формулу:

$$P = - (i i' / 2) \oint \oint (ds ds' \cos \theta) / r \quad (2.3)$$

где  $i$  и  $i'$  - токи в двух цепях,  $\theta$  угол между  $ds$  и  $ds'$  и  $r$  расстояние между ними (см. Приложение 3).<sup>20</sup>

В случае индукции переменным током Нейман использовал принцип (2), чтобы заменить изменение интенсивности следующими операциями: перенести первичную цепь в бесконечность, изменить интенсивность до ее конечного значения и вернуть схему в исходное положение.

Поскольку вторая операция, выполняемая на бесконечности, не может иметь никакого индуктивного эффекта, интегральный индуцированный ток снова определяется изменением потенциала.<sup>21</sup>

Нейман объявил об этих результатах в 1845 году. Первоначально его рассуждения были ограничены жесткими цепями. Через несколько месяцев он смог доказать в полном объеме "общий принцип" своей "математической теории индуцированных токов": интегральная ЭДС в цепи дается изменением ее потенциала, вычисленным так, как если бы ток в этой цепи имел интенсивность  $\varepsilon$ . Не имело значения, как происходило изменение потенциала: смещением контуров или магнитов, деформацией контуров, скользящими контактами, изменением силы первичных токов или магнитов. Основа рассуждений была такой же, как и в его первом мемуаре. Изменилась лишь математическая техника: Нейман теперь использовал выражение Ампера (1.4) для электродинамических сил в терминах криволинейных абсцисс, поскольку оно было хорошо приспособлено к криволинейным интегралам, которые ему приходилось выполнять<sup>22</sup>.

<sup>17</sup> F. Neumann 1846: 22, 62.

<sup>18</sup> F. Neumann 1846

<sup>19</sup> F. Neumann, 1846 г.: № 5-9.

<sup>20</sup> F. Neumann, 1846 г.: № 10-11.

<sup>21</sup> F. Neumann, 1846 г.: № 10.

<sup>22</sup> F. Neumann 1848.

## 2.2.4 Математическая феноменология

Появление потенциала Неймана и соответствующая простота законов индукции тесно зависели от его внимания к интегральному току в замкнутой цепи.

Для отдельного элемента цепи интеграл электродвижущей силы по времени определяется не просто изменением потенциала. Нейман нашел, что эта величина равна потенциалу воображаемой цепи, составленной из начального и конечного положений элемента и следов его концов.<sup>23</sup> Очевидно, он не стал бы выводить такой искусственный закон, если бы не знал заранее простой потенциальный закон для интегрального тока.

При выводе различных форм потенциала Нейман опирался на обширные ресурсы электродинамики Ампера, включая различные формы закона Ампера, соответствующие математические методы, эквивалентность между концом соленоида и магнитным полюсом, а также эквивалентность между токовой петлей и двойным магнитным листом. Однако эта зависимость от амперовских методов имела недостаток: Нейману не удалось создать понятий более подходящих, чем те, которые были найдены Ампером. Например, векторный потенциал, интегралом которого является потенциал (2.3), значительно упростил бы аналитические манипуляции Неймана.<sup>24</sup>

Для того, кто хотел придать четкий эмпирический смысл своим символам, интеграл потенциала был смелым шагом в абстракцию. Французские математики, однако, уже ввели потенциалы для гравитационных, электростатических и магнитических сил. В случае

Ампера с полюсом, находящимся под действием цепи, градиент потенциала давал силу, действующую на полюс. Для жесткой цепи Нейман обнаружил, что изменение потенциала цепи в зависимости от глобального перемещения дает результирующую электродинамических сил.<sup>25</sup> Таким образом, математическое понятие электродинамического потенциала стало центральным, объединяющим понятием электродинамики, из которого путем простых вариаций можно было вывести все пондеромоторные и электродвижущие силы

Теперь мы можем дать более точную характеристику "математической феноменологии" Неймана, как позже назвал ее Больцман. Нейман построил свою теорию на основе эмпирического правила, которое позволяло установить связь с предыдущей теорией. Простота, ориентация на непосредственно измеряемые величины и доступные аналитические методы направляли развитие. Полученная теория выражала непосредственно измеряемые величины (интегральный ток и электродинамические силы) в терминах одного, более абстрактного понятия (потенциал). Таким образом, Нейман намеревался дать недостающее количественное описание хорошо известного явления - электромагнитной индукции. Он не собирался открывать новые эффекты. Напротив, он ограничил сферу применения своей теории случаями, для которых эмпирическая база была неоспорима: линейные проводники, замкнутые цепи и медленно меняющиеся токи<sup>26</sup>.

Строгость и трезвость Неймана обеспечили непреходящую ценность его работы. Его формула потенциала (2.3) до сих пор встречается в современных учебниках по электродинамике, а его стиль математической физики положил начало мощной традиции в его стране. Однако лишь немногие современные немецкие физики знали математику достаточно, чтобы оценить величие достижений Неймана. Даже для редактора "Анналов", Иоганна Поггендорфа, мемуары Неймана были "скорее похожи на китайский язык". Редактирование рукописи было поручено компетентному математику Карлу Якоби. У Неймана был по крайней мере один благодарный читатель, Вильгельм Вебер, который решил, что законы Неймана "не вызывают сомнений относительно их взаимных связей и переплетающихся эмпирических правил" и доказал их эквивалентность с его собственной теорией в случае замкнутых токов. В ответ Нейман изящно признал, что конкурирующая теория индукции Вебера "перекинула мост через разлом в наших знаниях об электростатическом и электродинамическом действии электричества"<sup>27</sup>.

### 2.3 Гауссовский дух

Электродинамика Вебера во многом обязана его сотрудничеству с геттингенским астрономом и математиком Карлом Фридрихом Гауссом. В 1828 году Гаусс посетил магнитную обсерваторию, которую Александр

фон Гумбольдт недавно построил в Берлине по французской методике. Гаусс не был впечатлен. Сотрудничая с Бесселем в улучшении астрономических измерений, он привык к гораздо более высоким стандартам точности. Вскоре он придумал, как улучшить проект Гумбольдта. Три года спустя Вильгельм Вебер получил кафедру физики в Геттингене. Гаусс, зная об исключительных качествах Вебера, воспользовался этой возможностью, чтобы начать амбициозную программу геомагнитных исследований.<sup>28</sup>

У Гаусса было несколько мотивов. Он, конечно, осознавал практическую важность магнитных измерений для навигации и геодезии, что обеспечило ему финансовую поддержку со стороны земли Ганновер. Он также подчеркивал "чисто научный интерес предмета", который мог принести новые методы магнитометрии, магнитные законы и теоремы, а также понимание внутренней структуры Земли.

*"Для естествоиспытателя", - заявлял он, - "поиск законов природных явлений имеет цель и ценность сам по себе, и особое очарование сопровождает открытие меры и гармонии в кажущемся без правил".*

Самое главное, Гаусс и Вебер хотели создать новые стандарты для практики физики. Как позже писал Вебер:<sup>29</sup>

*"Я убежден, что принятый до сих пор подход к физике устарел и нуждается в изменении, и что наше рассмотрение магнитной проблемы является первым испытанием. Оно противоречит многим укоренившимся практикам и вызывает у многих желание, чтобы что-то подобное не было начато; но если это осуществится, то вскоре получит дальнейшее развитие и принесет пользу всем частям науки".*

<sup>23</sup> F. Neumann 1846: 68. Это правило эквивалентно правилу Фарадея о пересечении силовых линий, которое Нейманом полностью игнорируется.

<sup>24</sup> см. Приложение 3

<sup>25</sup> F. Neumann 1846: 66-7 (выражение Неймана в терминах элементов тока, но он имел в виду, что оно будет действительным только после интегрирования); 1848: 66-71 (с расчетом вращающего момента, действующего на жесткую цепь).

<sup>26</sup> Boltzmann 1897:1899: 217-24. См. также Caneva 1978: 119-121.

<sup>27</sup> письмо Якоби Нейману. 5 декабря 1845 г. Наследие Neumann, цитируется в Olesko 1991: 176 и в Jungnickel and McCormmach 1986. Vol. 1: 150 (как китайский); Weber 1846: 140; F. Neumann 1848: 48. См. ниже о трудностях доказательства эквивалентности Вебера-Неймана.

<sup>28</sup> ср. Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. I: 65-6; Cawood 1977; Schaefer 1929.

<sup>29</sup> Gauss 1838: 119; 1837: II; письмо Вебера Карлу фон Рихтгофену. 9 апреля 1841 года. Наследие Вебера. Цитируется в Jungnickel and McCormmach 1986. Vol. I: 76..

### 2.3.1 Теория потенциала

Первый компонент программы Гаусса был математическим. Он хотел определить наилучшее представление земного магнетизма и виды измерений, которые необходимо провести. Для этого новые эксперименты были не нужны. В своей "общей теории земного магнетизма" Гаусс изобретательно объединил разрозненные

теоретические источники: Кулоновскую теорию двух жидкостей для магнитов, теоремы из электростатики и магнетизма Пуассона, свои собственные исследования распределения гравитационных сил и свою старую теорию квадратичных форм<sup>30</sup>.

Вслед за Лагранжем, Лапласом и Пуассоном, Гаусс ввел скалярную функцию, от которой зависят силы, и назвал ее "потенциалом" в 1839 году.<sup>31</sup> С помощью квадратичных форм распределения масс он вывел ряд теорем для потенциальной функции. Согласно наиболее важной из этих теорем, которую он знал из предыдущего исследования гравитационной силы вокруг массивного эллипсоида, знание потенциала на замкнутой поверхности, окружающей все массы, достаточно для определения потенциала везде за пределами поверхности. Следовательно, измерения горизонтальной составляющей магнитной силы в каждой точке Земли в принципе достаточно для определения всей силы, включая вертикальную составляющую.<sup>32</sup> На практике Гаусс развил потенциал в отрицательные значения расстояния от центра Земли. Коэффициенты этого развития являются функциями широты и долготы (сферические гармоники Лапласа), которые в силу гармоничности потенциала должны быть линейной суперпозицией конечного числа базовых функций. Таким образом, задачей магнитного исследователя стало определение последовательных коэффициентов в быстро сходящихся рядах.

Большинство этих результатов Гаусс получил в 1832 году, хотя опубликовал их только в 1838 году. Здесь он ставил математику на службу магнитным измерениям. Но его также интересовали сами теоремы, и он посвятил отдельный мемуар их систематическому изложению. Как он подчеркивал, одна и та же абстрактная теория (теория потенциала) может быть применена к гравитационным, электростатическим и магнитным явлениям, несмотря на различия в их природе<sup>33</sup>.

В этом духе математической декантации. Гаусс игнорировал споры о сущности магнетизма. Амперовские токи и магнитные флюиды были для него строго эквивалентны. Более того, математические свойства потенциала позволяли ему рассматривать Землю как черный ящик. Благодаря вышеупомянутой теореме он мог игнорировать распределение магнетизма внутри Земли и заменить его эквивалентным поверхностным распределением. Его общая теория *«не зависела от конкретного предположения о перераспределении магнитных флюидов в Земле»*. Его эпистемологическое убеждение было феноменологическим: *«Под объяснением натуралист подразумевает не что иное, как сведение к минимально возможному числу числу простых фундаментальных законов; он ничего не знает, кроме этих законов [...], но он выводит явления из них исчерпывающе и с полной необходимостью»*<sup>34</sup>.

В частной жизни Гаусс был более авантюрным. Рукописи 1835-36 годов свидетельствуют, что он пытался объяснить силы Ампера в

терминах зависящих от скорости сил между частицами электричества. Он не опубликовал свои результаты, руководствуясь принципом *Nil actum reputans si quid superesset agendum*.<sup>35</sup> Он считал, что зависящие от скорости величины указывают на еще не найденное распространяющееся действие. У него было *"субъективное убеждение, что сначала нужно дать конструктивное представление того, как происходит распространение."*<sup>36</sup>

<sup>30</sup> Gauss 1838. Гаусс получил основные результаты в 1832 году: см. Schaefer 1929: 14.

Большая часть теоремы Гаусса и название "потенциал" содержалось в малоизвестном эссе, опубликованном в 1828 году Джорджем Грином: см. Grattan-Guinness 1995.

<sup>31</sup> Gauss 1839: 200.

<sup>32</sup> Процедура такова: интегрируйте горизонтальный компонент по широте и долготе, чтобы получить потенциал на поверхности Земли, затем найдите соответствующую гармоническую функцию за пределами этой поверхности и, наконец, выведите эту функцию по высоте, чтобы получить вертикальный компонент.

<sup>33</sup> Gauss 1839 г.

<sup>34</sup> Gauss 1838: 125; 1836b: 315-316.

<sup>35</sup> *Ничего еще сделано, если что-то недоделано.*

<sup>36</sup> *GW* 5: 616-620: Гаусс Веберу, 19 марта 1845 г., в *GW* 5: 629. Формула Гаусса для действия между двумя частицами электричество, движущихся со скоростями  $v$  и  $v'$  и разделенных расстоянием  $r$ :  $ee'\{1 + [(v - v')^2 - (\dot{r}/c)^2]/c^2\}$  (*GW* 5: 617). Это эквивалентно закону Вебера, когда движение каждой частицы прямолинейно и равномерно. Это не совместимо с энергетическим принципом. См. также в J.J. Thomson 1885:

108: Maxwell 1873a: ## 846-853.

### 2.3.2 Абсолютное измерение

Гаусс одинаково хорошо разбирался как в теоретических, так и в практических вопросах. Его и Вебера улучшения методов магнитных измерений были решающими. Прежде всего. Гаусс отметил, что прежние магнитные измерения зависели от переменного эталона. Магнитный момент иглы компаса Анри Гамбея уменьшался со временем, и это изменение нельзя было контролировать, возвращая компас в стандартное положение, поскольку земной магнетизм изменялся во времени. Следовательно, Гауссу требовался метод измерения, который давал бы магнитную силу в "абсолютных единицах":

*"Для того чтобы свести эту меру к отчетливым понятиям, прежде всего необходимо стабилизировать единицы вокруг трех видов величин, а именно: единства расстояния, единства размышляемой массы и единства ускоряющей силы [ускорения]"*.

Согласно этому фундаментальному принципу абсолютная единица магнитной массы такова, что два полюса, несущие эту единицу и единицу весомой массы и разделенные на единицу расстояния, отталкиваются друг от друга с единичным ускорением. Короче говоря, абсолютная единица магнитной массы - это единица, для которой никакой числовой коэффициент не входит в магнитный закон Кулона:  $f = mm'/d^2$  в понятном виде.<sup>37</sup>



Для абсолютного измерения горизонтальной интенсивности  $T$  магнитной силы Земли Гаусс использовал две серии измерений, выполненных с помощью двух различных приборов. В первой серии он определил период  $\tau$  малых колебаний подвешенной магнитной иглы (кручение нити подвеса пренебрежимо мало) для различных вычисляемых нагрузок на иглу. Этот период определяется инерционным моментом  $K$  иглы, инерционным моментом  $nk_0$  нагрузки и магнитным моментом  $M$  иглы:

$$\tau = 2\pi\sqrt{(K + nk_0)/TM} \quad (2.4)$$

Посредством этой формулы Гаусс вывел значение произведения  $TM$ .<sup>38</sup>

Затем, следуя предложению Пуассона, он определил положение равновесия второй подвешенной магнитной иглы, расположенной на некотором расстоянии от первой иглы. Это положение зависит от отношения  $T/M$ , а также от высших моментов первой магнитной иглы, как это вычислил Гаусс. Для того чтобы устранить эти высшие моменты. Гаусс провел несколько измерений для различных взаиморасположений двух игл. Наконец, он извлек интенсивность  $T$  из  $TM$  и  $T/M$ .<sup>39</sup>

Из этого примера видно, как идеал абсолютного измерения предъявляет высокие требования к экспериментатору. Приборы должны быть задуманы так, чтобы их работа могла быть вычислена на основе фундаментального закона, связывающего измеряемую величину с механическими понятиями. Если это не может быть реалистично сделано, экспериментатор должен придумать, как устранить не поддающиеся вычислению аспекты прибора. Это может потребовать большой изобретательности и превосходных аналитических навыков. В схеме Гаусса момент инерции и высшие моменты магнитометрической иглы не поддаются вычислению. Изменяющаяся вычисляемая нагрузка на эту иглу и изменяющаяся конфигурация второй иглы - это хитрые уловки для устранения этих не вычисляемых элементов. Заметим, что последний трюк требует многополярного расширения действия первой иглы на вторую, что, конечно, во времена Гаусса являло нетривиальным шагом.

Гаусс был столь же изобретателен, когда при поддержке Вебера пришел к точной конструкции аппарата (рис. 2.1).

Он использовал магнитную иглу весом в 1 фунт и длиной в 1 фут, подвешенную на шелковой нити длиной два с половиной фута.

Деревянный ящик А защищал систему от воздушных сквозняков.

Отклонения иглы измерялись с помощью зеркала, прикрепленного к игле, и гониометра  $\theta$ , расположенного вдали от системы.

Этот прибор имел ряд преимуществ перед старым компасом Гамбея.

Игла, будучи намного тяжелее, была менее чувствительна к возмущениям.

Её больший период было легче измерить. Гониометрическое измерение отклонения иглы исключено микроскопическое наблюдение Гамбея.

Гаусс и Вебер также уделяли большое внимание качеству различных деталей своих приборов. Вебер дошел до того, что руководил изготовлением стали для магнитных игл на королевском железоделательном заводе. Наконец, Гаусс задумал создать оптимальные условия для установки приборов, без возмущающего железа и с правильно организованным пространством. В 1833 году он убедил куратора Геттингенского университета создать магнитную обсерваторию, отвечающую этим условиям.<sup>40</sup>

Глобальное понимание геомагнетизма требовало одновременных измерений во многих частях света. Поэтому оно предполагало высокоорганизованную социальную деятельность. Гаусс полностью осознавал этот аспект своего проекта и сделал следующие выводы:

- Аппарат должен быть описан во всех деталях, чтобы другие исследователи могли повторить его, не видя оригинала.
- Протокол измерений должен быть гораздо более четким, чем это обычно делалось.
- Сеть магнитных обсерваторий должна была быть построена в соответствии с моделью, созданной в Геттингене.
- Должны быть даны указания относительно времени и частоты измерений, а данные должны быть централизованы.

Такова была цель неофициального Магнитного союза и его журнала, созданного в 1836 году.<sup>41</sup>

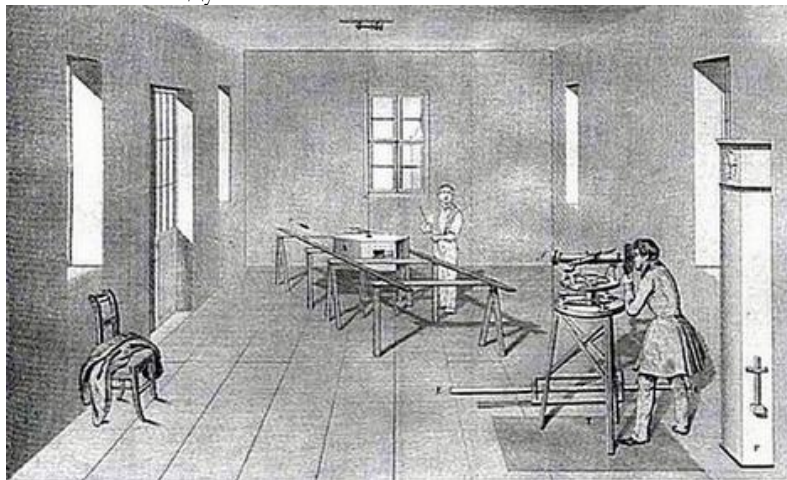


Рис. 2.1. Прибор Гаусса для измерения магнитной интенсивности (из А. Беккереля 1834-40, т.7: пластина 5).

Проект Гаусса был чрезвычайно успешным. В Германии и Англии методы Гаусса и Вебера быстро пришли на смену старым французским. Появилось лучшее знание о магнетизме Земли. Абсолютное измерение стало лейтмотивом немецкой физики, хотя оно оказалось редко применимым на практике. По словам Вебера, магнитные обсерватории действовали как "учебные заведения для точных наблюдателей".

В итоге. Гаусс и Вебер сократили разрыв между физикой и прикладной математикой. Как выразился Гаусс,<sup>42</sup>

*"Магнитные эксперименты становятся способными к точности, которая намного превосходит все, что было до этого, и их фундаментальные законы могут иметь действительно математическую точность, так что разделение между фактической так называемой физикой и прикладной математикой здесь также (как в теории движения и оптике давным-давно) начинает исчезать, и на долю математика начинается выпадать более сложная обработка."*

<sup>37</sup> Gauss 1832a: 85

<sup>38</sup> Gauss 1832a: 92-100

<sup>39</sup> Gauss 1832a: 100-101 1. Увеличение расстояния уменьшило бы вклад более высоких моментов, но тогда точность измерения  $T/M$  была бы слишком слабой.

<sup>40</sup> Gauss 1832a: 95; 1832b: 298-301. См. также Jungnickel and McCormmach 1986, том 1: 71-73; Dorries 1994; Olesko 1996 (по вопросу тиражируемости).

<sup>41</sup> см. Jungnickel and McCormmach 1986. Vol. 1: 73-5; Dorries 1994.

<sup>42</sup> Вебер Сабине. 20 сентября 1845 г., цитируется в Jungnickel and McCormmach 1986, Vol.I: 77; Гаусс куратору Геттингенского университета, 29. 01833 г., цитата там же: 70.

## **2.4 Правила измерения, определенные Вебером.**

Гаусс стремился распространить свои методы на гальванизм. В своей популярной лекции 1836 года он провозгласил:

*"Блестящие открытия Эрстеда и Фарадея открыли новый мир научных исследований, зачарованные сады которого наполняют нас восхищением; эти богатства могут быть освоены только с помощью искусства измерения".*

Через год он получил высокочувствительный гальванометр, соединив один из своих высококлассных магнетометров с мультипликатором Швейгера. Он также установил электромагнитный телеграф - первый в этом роде - между обсерваторией и институтом Вебера и с его помощью определил, что скорость электричества слишком велика, чтобы ее можно было измерить. С помощью Вебера он использовал электромагнитную индукцию в медном кольце для измерения вертикальной составляющей магнитной силы Земли. К сожалению, в 1838 году Вебер был уволен с кафедры в Геттингене по политическим причинам. Гаусс был обескуражен:

*"Устройство нового аппарата интенсивности позволяет нам заглянуть в новый мир чудес. Но теперь, когда путь в этот мир уже проложен, ворота должны быть захлопнуты перед нашим носом".*

Вебер продолжил работу в одиночку и с некоторой задержкой<sup>43</sup>.

### **2.4.1 Измерение и изображение**

Интерес Вебера к точным измерениям возник еще до его сотрудничества с Гауссом. В студенческие годы в Галле он вместе со своим братом Эрнстом Генрихом тщательно изучал механические волны. Он читал и восхищался французскими классиками в этой области, Лапласом, Коши и Пуассоном, но сожалел, что эта область развивалась в

чисто математической манере, без надлежащего эмпирического обоснования. Целью двух братьев было создание такого фундамента, как это сделал Френель для волновой оптики. В своем авторитетном труде "*Weellenlehre auf Experimente begründet*" (Волновая теория на основе экспериментов) они почти не использовали математику, хотя и не испытывали недостатка в компетенции. В отличие от стиля измерений Неймана, стоит отметить их изобретательность в отношении измерительных приборов, использование визуальных представлений (графиков и диаграмм), а также их заинтересованность в установлении новых стандартов. Например, они отметили, что частота вилок зависит от режима возбуждения и от резонирующей полости, и предложили специальные язычковые флейты в качестве альтернативного стандарта частоты. Привлеченные логикой своего предмета и сильным чувством единства, они легко преодолевали дисциплинарные границы, переходя к музыкальной акустике и физиологии слуха<sup>44</sup>.

Во время сотрудничества с Гауссом Вебер был особенно заинтересован в распространении методов Гаусса на электромагнетизм и электродинамику. К концу этого периода он изучал "униполярную индукцию", то есть индукцию при движении одиночного магнитного флюида. Согласно неопубликованным соображениям Гаусса, магнитная точечная масса  $\mu$ , движущаяся со скоростью  $v$ , создает в элементе  $dl$  линейного проводника в состоянии покоя ЭДС  $v\mu dl \sin\theta / r^2$ , где  $r$  - расстояние между магнитной массой и элементом, а  $\theta$  - угол между скоростью массы и элемента. Из этого правила Вебер вывел, что циклическое движение магнитной массы создает ЭДС в проводящем контуре тогда и только тогда, когда движение охватывает контур.

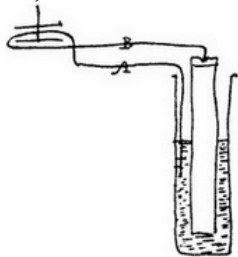


Рис. 2.2. Устройство Фарадея для индукции во вращающемся цилиндрическом магните (*FD 1: 403*). Магнит плавает в ртутной ванне и приводится во вращение пружиной (не показана).

Провода А и В ведут к гальванометру.

Если, продолжал Вебер, магнитные флюиды действительно существуют в магните и если они разделены внутри микроскопических кулоновских ячеек, то вращение магнита вокруг собственной оси должно создавать ЭДС на любом стационарном пути между N- полюсом и меридианом магнита (замкнутым внешним неподвижным проводом), поскольку для любой ячейки, пересекающей путь, только северный

флюида охватывает этот путь в своем движении.

Так Вебер объяснил эффект, наблюдавшийся Фарадеем на приборе рис. 2.2, и далее продемонстрировал несколько количественных свойств этого вида индукции. Наконец, он утверждал, что теория магнитов Ампера несовместима с этим явлением. По его мнению, амперовские петли, в отличие от клеток Пуассона, не могли индуцировать ток, когда они пересекали проводящий путь<sup>45</sup>.

Этот эпизод раскрывает важные аспекты веберовского способа изображения явлений. В отличие от Гаусса, он не уклонялся от гипотез о природе магнетизма и даже рассматривал микроскопическую модель магнита. В отличие от Фарадея, он рассматривал ньютоновскую аналогию как подсказывающую такие гипотезы. Как и Ампер, он ориентировался в выборе структурных гипотез на их объединяющую силу. Ампер овегцествил амперовские токи, потому что они объединяли электромагнетизм и электродинамику.

Вебер овегцествил магнитные флюиды, потому что они объединили электромагнетизм и магнитоэлектрическую индукцию. У этих двух физиков был разный взгляд на то, в каком порядке следует увеличивать единство, но их объединял один и тот же идеал глобальной физико-химической картины. Когда Вебер позже обнаружил ошибку в своем доказательстве того, что униполярная индукция исключает амперовские токи, он принял их.<sup>46</sup>

<sup>43</sup> Gauss 1836b: 336 (цитата): [837: 367 (гальванометр), 369-72 (телеграф)]; Гаусс и Weber, 1837 (кольцо); Гаусс к Оберсу, 2 сентября 1837 г. цитируется в «Юнгникел и Маккормах», 1986: 75. По причинам увольнения Вебера, см. там же: 131.

<sup>44</sup> Weber и Weber 1825; WW I: 267 (язычковые духовые инструменты). См. также Jungnickel and McConnmach 1986, Vol. 1: 45-50.

<sup>45</sup> Weber 1839. Теория Гаусса основана на взаимности между электромагнитными силами и магнитоэлектрической индукцией. Это было объявлено в Gauss 1835: 532, но никогда не публиковалось. Данный закон в Weber 1846: 136-7, без конкретной атрибуции. Петли Ампера эквивалентны ячейкам Пуассона в отношении униполярной индукции. Противоположная вера Вебера зависела от отсутствия того, что он считал взаимным эффектом: нормальной силой между плоскостью (макроскопической) токовой петли и элементом тока (принадлежащим току Ампера), пересекающим эту плоскость.

<sup>46</sup> Об этой ошибке см. Weber 1852: 558n.

### 2.4.2 Критика Ампера

Потеряв свой Геттингенский институт, Вебер несколько лет оставался без постоянной должности. Однако в 1843 году ему предложили кафедру физики в Лейпциге с очень хорошими материальными условиями. Там он возобновил свои исследования по электродинамике. В 1846 году он опубликовал первую часть своего монументального труда "*Elektrodynamische Maassbestimmungen*" ("Электродинамические измерения"). Его целью было распространение гауссовских методов на различные

аспекты электродинамики.

По его мнению, чистая электродинамика не имела надлежащего эмпирического фундамента. Никаких количественных измерений обескураживающе малых сил между двумя электрическими токами никогда не проводилось. В электромагнетизме (взаимодействие тока и магнита) силы были больше и лучше измерялись. Однако для сомневающихся в существовании амперовских токов, электродинамику нужно было изучать отдельно.<sup>47</sup>

Экспеиметальное обоснование электродинамики, данное Ампером, не соответствовало стандартам Вебера:<sup>48</sup>

*"Ампер, больше теоретик, чем экспериментатор, самым острым образом использовал самые слабые указания экспериментов и придал своей системе такое тонкое развитие, что грубое состояние наблюдений, на которые он первоначально опирался, не находилось в справедливой пропорции с развитой теорией. Будь то для более прочного основания и развития или для опровержения, электродинамика нуждается в более совершенной технике наблюдения, позволяющей нам вступать в более конкретные дискуссии о сопоставлении теории и эксперимента и тем самым снабжать душу теории соответствующим органом наблюдения, без которого силы души не могут раскрыться."*

Вебер нашел много поводов для критики в экспериментах Ампера. Он напомнил, что некоторые из них существовали только на бумаге, и дал повод усомниться в их осуществимости. Он упрекал Ампера в том, что тот давал только *"отрицательные опыты"*, то есть опыты, доказывающие исчезновение сил только при определенных обстоятельствах. Этот *нулевой метод* не мог считаться количественным, поскольку Ампер не анализировал чувствительность своих приборов. В более общем плане Вебер критиковал молчание Ампера о протоколе эксперимента:<sup>49</sup>

*"В таких фундаментальных экспериментах недостаточно указать их цель, описать инструменты, с помощью которых они проводились, и в целом просто добавить заверение, что они увенчались ожидаемым успехом; напротив, необходимо также указать точные детали экспериментов и сказать, как часто повторялся каждый эксперимент, какие модификации были сделаны, какое влияние оказали последние, короче говоря, сообщить в виде протокола все данные, которые способствуют формированию нашего суждения о степени уверенности результатов"*

<sup>47</sup> Weber 1846:

<sup>48</sup> Weber 1848a: 216.

<sup>49</sup> Weber 1846: 6. См. Caneva 1978: 106-09

### 2.4.3 Электродинамометр

Используя гауссовские стандарты, Вебер стремился получить количественное доказательство электродинамического закона Ампера. Приборы Ампера были неадекватны, по крайней мере, по двум причинам. Из-за простой геометрии они создавали чрезвычайно малые электродинамические силы. Их сочленения, основанные на ртутных

чашках, предполагали слишком большое трение.

Вебер заменил одиночные провода Ампера квадратными или круглыми катушками, действие которых все еще было приемлемым, но гораздо более мощным, и изобрел новый вид подвеса подвижной катушки.

История этой подвески - замечательный случай сближения между материальными ограничениями и требованиями точности измерений. Идея подвесить гальваническую катушку на двух проводах питания, пришла в голову Веберу уже в 1834 году. Идея была почти очевидна, так как провода многовитковых катушек стали очень тонкими и, следовательно, гибкими. Такая подвеска была лишена трения и могла быть использована для демонстрации электродинамического влияния другой, статической катушки. И все же Вебер осознал весь потенциал этого устройства только после того, как узнал о бифилярной подвеске, изобретенной Гауссом в 1837 году.

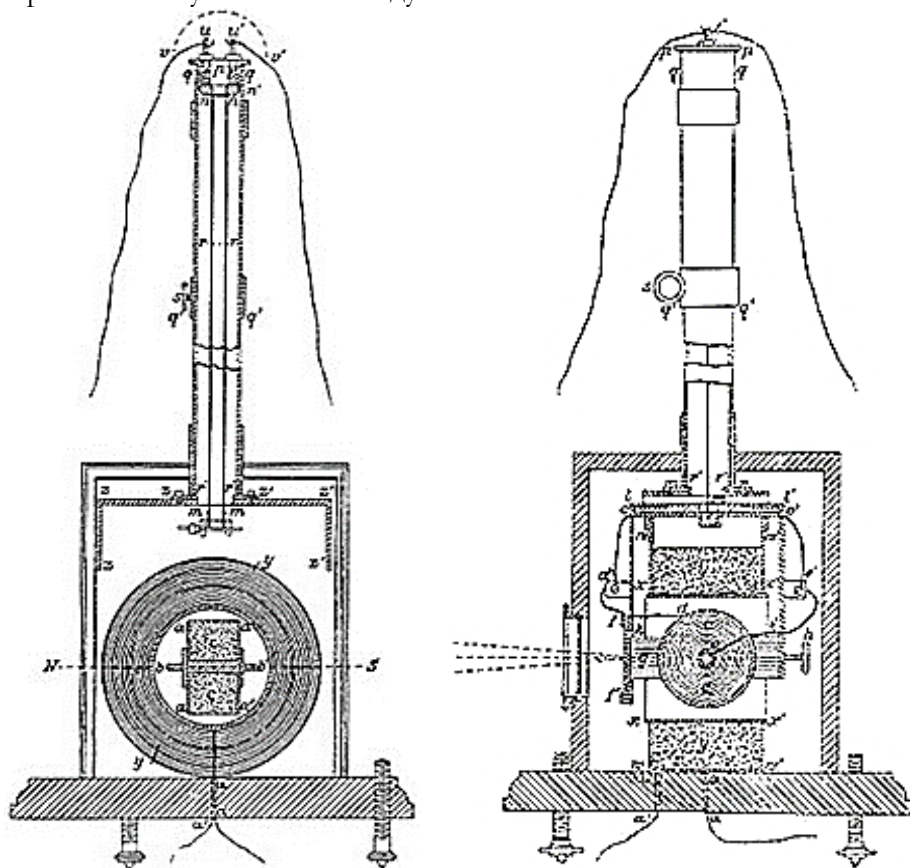


Рис. 2.3. Вертикальные разрезы электродинамометра (Weber 1846: 11-12). Статическая катушка  $uu'$  питается от проводов  $aa'$ . Бифилярная катушка  $cc'$  прикреплена к вилке  $klk'l'$ , которая висит на двух питающих её проводах. Зеркало  $ff$  позволяет оптически измерять вращение этой катушки.

Целью Гаусса было проведение квазипостоянных измерений магнитной силы Земли, что метод колебаний, конечно, не позволял. Очевидным решением было превратить подвешенный магнит в торсионные весы. Но для абсолютного измерения восстанавливающий крутящий момент подвеса должен быть вычислим и соизмерим с магнитным моментом. Гаусс придумал подвесить магнит на двух параллельных шелковых нитях, для которых восстанавливающий момент был простой функцией веса магнита и который можно было регулировать, изменяя длину нитей и расстояние между ними. Подвешенная таким образом магнитная игла вместе с деревянным футляром, зеркалом и гониометрическим прибором составляли бифилярный магнитометр Гаусса. Вебер понял, что тот же метод измерения можно перенести на его прибор с двойной катушкой. Так родился "электродинамометр" (рис. 2.3).<sup>50</sup>

В Лейпциге Вебер проверил простые следствия закона Ампера с помощью этого высокочувствительного прибора без трения. Сначала он доказал, что электродинамический момент между двумя катушками пропорционален квадрату силы тока в катушках, причем ток измерялся по воздействию статической катушки на магнитометр, удаленный на определенное расстояние.<sup>51</sup> В этом и других экспериментах Вебер тщательно устранил внешние возмущения и описал свой протокол с предельной точностью. Однако, в отличие от Неймана, он не сделал никакой оценки погрешности. Он довольствовался показом стабильности своих результатов при повторении.<sup>52</sup>

Затем Вебер использовал специальный электродинамометр, с которого можно было снять статическую катушку и расположить ее на различных расстояниях и под различными углами от подвешенной катушки (рис. 2.4). С помощью этого устройства он проверил последствия закона Ампера для крутящего момента в зависимости от геометрической конфигурации. Расчеты облегчались аналогией с более ранним устройством Гаусса с двумя магнитными стрелками. Вебер заключил несколько оптимистично: *"Это полное совпадение величин, рассчитанных по формуле Ампера, и наблюдаемых [...] является, принимая во внимание многообразие обстоятельств, при которых имеет место это согласие, полным доказательством основного закона Ампера"*. Конечно, он ничего не доказал для незамкнутых или переменных токов, однако он смог убедиться, что закон Ампера по-прежнему действует для очень кратковременных токов, возникающих при разряде лейденской банки.<sup>53</sup>

Измерения Вебера определили абсолютные единицы электрического тока. Электродинамометр, проанализированный в соответствии с законом Ампера, дал измерение тока в "электродинамических единицах", в то время как комбинация мультипликатора и абсолютной магнитометрической процедуры Гаусса дала ток в "электромагнитных единицах".



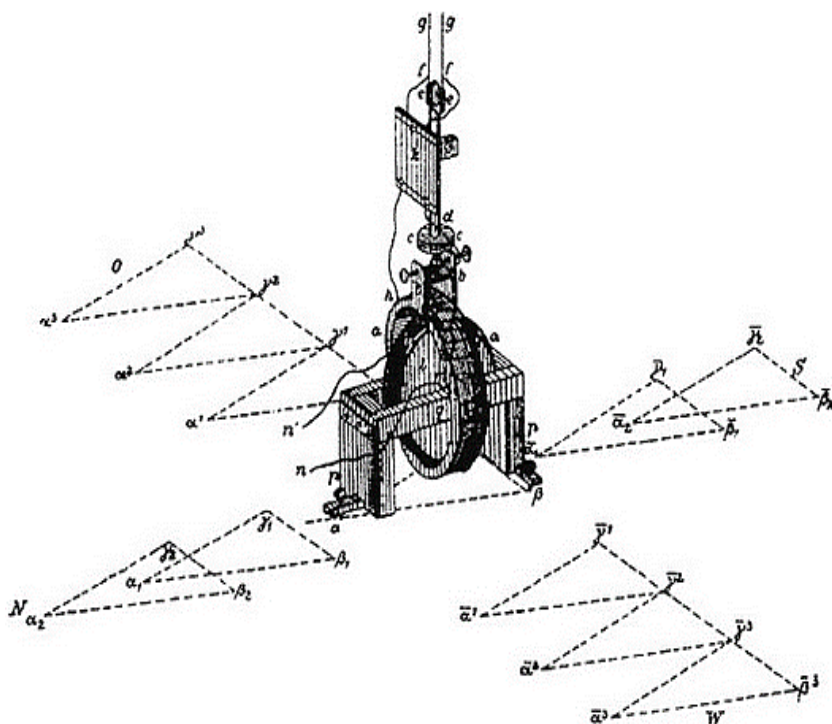


Рис. 2.4. Разделяемый электродинамометр (Weber 1846: 28). Бифилярная катушка А-А-А удерживается в постоянном положении. Статическая катушка III может перемещаться в разные положения  $\alpha \beta \gamma$

Вебер рассчитал, что первое определение в  $\sqrt{2}$  раза больше второго, и проверил, что его фактические измерения соответствуют этому соотношению (см. Приложение 2). В своем заключении он подчеркнул свою гауссову заботу об абсолютном измерении, но отметил трудности:

*Настоящее исследование направлено главным образом на экспериментальное определение мер электродинамических сил и на выражение этих мер в абсолютных единицах, приведенных к единицам пространства, времени и массы. Такова была мотивация компоновки приборов, требующих, как и магнитометры Гаусса, требуют более жесткой установки и большего пространства, чем другие физические приборы, для которых эталон [Maassstab] непосредственно включен в наблюдательный прибор.*

Работа, продолжал Вебер, была бы невозможна, если бы Лейпцигский Физический институт был менее просторным. Беспокоился, что дублирование будет невозможно для менее привилегированных исследователей, он рекламировал упрощенные переносные версии своих инструментов, сделанные местным механиком<sup>54</sup>

Чтобы оценить историческое значение нововведений Вебера и Гаусса в конструкции инструментов, нужно помнить, что на протяжении большей части девятнадцатого века инструменты создавались и часто задумывались

почти неграмотными мастерами. Вмешательство в эту область физиков ознаменовало существенный прорыв в инструментальных традициях. Их инструменты широко имитировались с вариациями в зависимости от предполагаемого использования, или некоторые новые аспекты были перенесены на другие виды измерений, как это произошло с бифилярным подвесом или методом зеркального гониометра.<sup>55</sup>

<sup>50</sup> Weber 1846: 10; Гаусс 1837 г.

<sup>51</sup> Влияние подвесной катушки на магнитометр было незначительным, потому что у неё было очень мало витков по сравнению со статической катушкой. Конечно, Вебер должным образом учел магнитную силу Земли.

<sup>52</sup> Weber 1846: 15-25.

<sup>53</sup> Weber 1846: 25-50; цитата из 50.

<sup>54</sup> Вебер 1846: 51-60. 96.

<sup>55</sup> см. Blondel 1997 о производстве электрических приборов во Франции XIX века. Не каждый аспект инструментальных методов Вебера убедил техников: см. также Olesko 1996: 121.

#### 2.4.4 Орган и душа

Электродинамометр был для Вебера подходящим "органом" для измерения "души" электродинамики Ампера. Он задумал два вида применения:<sup>56</sup>

*"Более тонкая техника электродинамических наблюдений не только значима и важна для доказательства фундаментального принципа электродинамики [закона Ампера], но и потому, что она послужит источником новых исследований, которые иначе вообще не могли бы быть выполнены."*

Вебер полагал, что Ампер пропустил открытия Фарадея из-за отсутствия у него надлежащей техники наблюдения, тогда как электродинамометр показывал вольт-индукцию и позволял изучать ее количественно. Веберу достаточно было замкнуть бифилярную катушку на себя и наблюдать ее колебания, когда на статическую катушку подавался постоянный ток. В бифилярной катушке индуцировался ток, поэтому на нее действовал электродинамический момент. Используя метод Гаусса для измерения периодов колебаний, Вебер определил эффект демпфирования статической катушки и вывел два основных свойства индуцированного тока: его знак и пропорциональность угловой скорости цепи. Он также доказал, что такой же демпфирующий эффект получается при замене статической катушки системой магнитов, которые воздействовали таким же крутящим моментом на бифилярную катушку, когда на нее подавался такой же постоянный ток. Таким образом он свел законы вольт-индукции к более известным законам магнитоэлектрической индукции.<sup>57</sup>

Вебер также представлял себе применение электродинамометра вне области электродинамики. Поскольку взаимодействие двух катушек зависело от квадрата силы тока, этот прибор мог реагировать на быстро меняющиеся токи. В то время такой ток не был известен, если только, как

предполагал Вебер, свет сам по себе не был разновидностью колебательного тока с чрезвычайно высокой частотой. Однако механические колебания могли вызывать электрические колебания с помощью прикрепленного магнита и статической катушки. Вебер использовал это устройство для изучения колебаний звучащего стержня, тем самым возрождая свой старый интерес к физике волн. Он также задумал физиологическое применение электродинамометра. Интенсивность  $i$  и длительность  $\tau$  электрических импульсов, используемых для возбуждения нервов, можно было определить с помощью электродинамометра и гальванометра. В первом случае амплитуда первого колебания давала произведение  $i^2\tau$ , во втором -  $i\tau$ <sup>58</sup>.

В целом, изысканная техника измерения, воплощенная в электродинамометре Вебера, обеспечила единство внутри и вне электротехнической науки. Один и тот же прибор использовался во многих различных контекстах: электродинамические силы, электромагнитная индукция, электростатические разряды, механические колебания и даже физиология. Конечно, единство в инструментальных методах не обязательно означает единство в природе явлений. Однако в более узком контексте науки об электричестве веберовские *Maassbestimmungen* выходили за рамки цели измерения. Они определяли измеряемые явления в той же мере, в какой они их измеряли. Поэтому инструментальное единство подразумевало феноменальное единство.

<sup>56</sup> Weber 1846: 9-10.

<sup>57</sup> Weber 1846: 61-75.

<sup>58</sup> Weber 1846: 89-92. 76-81. Инструменты используются баллистически:  $\tau$  очень мала по сравнению с периодом, а демпфирование достаточно велико, чтобы легко было наблюдать максимальное отклонение. Томсон назвал это «Баллистический гальванометр» (TMPP 2: 332).

## 2.4.5 Идея Фехнера

Единство было особенно впечатляющим для электродинамических сил и вольта-индукции, поскольку оба явления были важны для работы электродинамометра как измерительного прибора. Однако на теоретическом уровне количественной теории вольта-индукции еще не было (Вебер узнал о теории Неймана только после завершения своей собственной), а правило Ленца, связывающее вольта-индукцию с электродинамическими силами, было чисто эмпирическим и качественный. Эту ситуацию Вебер принять не мог:<sup>59</sup>

*"Измерения/определения меры вольта-индукции относятся к электродинамическим измерениям/определениям меры, составляющим основной предмет этой публикации и которые для полноты должны включать явления вольта-индукции. Очевидно, что установление таких мерных определений тесно связано с установлением законов, которым подчиняются*

*соответствующие явления, так что одна задача не может быть отделена от другой. "*

За предложениями о завершении теоретической электродинамики Вебер обратился к Амперу, помнению которого электродинамические силы, возможно, являются результатом действия электростатических сил между движущимися электрическими флюидами. Вебер надеялся, что если подобная редукция удастся, из этого может последовать вольт-индукция. Предшественник Вебера на лейпцигской кафедре, Густав Фехнер, уже исследовал эту идею.<sup>60</sup>

Вслед за Ампером Фехнер представил, что электрический ток состоит из симметричного двойного потока электрических флюидов и что силы между двумя элементами тока являются результатом сил, действующих на флюиды. В отличие от Ампера, он предполагал, что поток является постоянным и равномерным. Тогда силы между двумя частицами флюидов<sup>61</sup> должны были зависеть от их скорости, о чем Фехнер догадался из действий между элементами тока. Далее Фехнер рассмотрел движение прямого проводника в направлении параллельного прямолинейного тока и показал, что зависящие от скорости силы, действующие на частицы флюида в проводе, стремятся разделить две жидкости со скоростью, пропорциональной скорости провода. Таким образом, он вывел простой случай Вольт-индукции из существования сил Ампера. Для обратного случая, когда индуктирующий ток движется, а проводник находится в покое, он использовал принцип, согласно которому индукция зависит только от относительного движения. Для индукции переменным током он предположил, что уменьшение тока эквивалентно его прекращению<sup>62</sup>.

Фехнер сожалел об искусственном характере этого предположения и по поводу своей слабости в математике, ограничивавшей его простейшими геометрическими случаями индукции, и заставившей его перейти к психофизике. Вебер взялся за дело и развил блестящую идею Фехнера с превосходной аналитической силой. Он принял для расчетов равномерный двойной поток, хотя видел больше правды в композиции-разложении двух флюидов, принятой Ампером:

*"Это одновременное, противоположное движение положительного и отрицательного электричества, обычно предполагаемое во всех частях линейного проводника, не может существовать в действительности, но может рассматриваться для нашей цели как идеальное движение, которое, пока мы имеем дело только с действием на расстоянии, заменяет реально происходящие движения в отношении всех рассматриваемых действий и имеет тем самым преимущество, что лучше поддается расчету."*

Ближе к концу своих мемуаров Вебер убедился, что это упрощение не повлияло на его результаты.<sup>63</sup>

<sup>59</sup> Weber 1846: 99

<sup>60</sup> Weber 1846: 5; Фехнер 1845

<sup>61</sup> Под «частицей» (*Teilchen*) Фехнер и Вебер подразумевали только бесконечно малую часть. Электричество Вебера стало корпускулярным только позже.

<sup>62</sup> Fechner 1845. Фехнер также вывел магнитное действие конвекционного тока.

<sup>63</sup> Weber 1846: 100, 164-6. Вебер косвенно исключил члены, пропорциональные  $(v-v')^2$ . Если такие члены разрешены, закон Вебера не единственно возможный (см. примечание 36 в подпункте 2.3.1).

### 2.4.6 Закон Вебера

Вебер предположил, что действие между двумя частицами электричества зависит только от их относительного расстояния и его первых двух производных по времени, которые он ошибочно назвал относительной скоростью и ускорением. Далее он определил это действие на основе двух фактов: отталкивания двух коллинеарных элементов тока и притяжения двух параллельных элементов тока, образующих противоположные стороны прямоугольника. Первое действие можно объяснить, скорректировав закон Кулона с помощью члена, зависящего от скорости, по способу Фехнера. Во втором случае, однако, относительная скорость (в смысле Вебера) частиц электричества двух элементов всегда равна нулю, поскольку расстояние между этими частицами достигает минимума, при прохождении элементов. Поэтому Вебер ввел еще одну, зависящую от ускорения, поправку к закону Кулона. В частности, он показал, что формула

$$f = (ee'/r^2) [1 - (1/C^2)(dr/dt)^2 + (2r/C^2)(d^2r/dt^2)] \quad (2.5)$$

где  $r$  - взаимное расстояние между частицами,

$e$  и  $e'$  - их заряды, а  $C$  - постоянная, дающая соответствующие электродинамические силы в обоих случаях<sup>64</sup>.

Примечательно, что Вебер обнаружил, что из этой простой формулы следует формула Ампера в самом общем случае, даже для переменных токов. Затем он использовал ее для вывода формул индукции, которые соответствовали известным эмпирическим законам (см. Приложение 4). Например, зависящий от ускорения член его основного закона непосредственно обеспечивал индукцию переменным током. В этих расчетах Вебер ограничивался линейными проводниками, для чего ему пригодились различные математические методы Ампера, включая сферическую тригонометрию и криволинейные абсциссы. Последний инструмент был особенно удобен, поскольку для линейных проводников относительные скорости и ускорения Вебера непосредственно переводились в производные Ампера по отношению к криволинейным абсциссам<sup>65</sup>.

Ознакомившись с формулами Неймана, Вебер проверил их соответствие своему фундаментальному закону для замкнутых токов. Однако вскоре Нейман указал на противоречие в случае скользящих контактов в индукционной цепи. Он провел эксперимент,

подтверждающий предсказание закона потенциала, и показал, как спасти закон Вебера: необходимо было учесть преходное ускорение частиц флюида Вебера в скользящих контактах. Вебер согласился и усовершенствовал аргументы Неймана. В целом, чтобы обосновать переход от молекулярных сил, действующих на флюид, к макроскопическим силам, действующим на общий ток или на носитель тока, теория Вебера требовала детального микроскопического рассмотрения, но она была более общей, чем у Неймана, поскольку включала электростатику и индукцию открытыми токами. Она также более наглядно показывала, каким образом материя может взаимодействовать с электричеством.<sup>66</sup>

В подходе Вебера зависимость скорости в формуле фундаментальной силы была неслыханной. Вебер предвидел критику этого аспекта своей теории и защищал его, как Ампер защищал появление углов в своей формуле силы. На вопрос о том, следует ли допускать производные по времени в выражении элементарных сил, он ответил:

*"Априори этот вопрос не может быть решен, поскольку в предположении О таких силах нет ничего противоречивого, неясного или неопределенного".*

Он придал своему закону силы лишь описательное значение:

*"Законы, дающие зависимость сил от данных физических обстоятельств, называются физическими фундаментальными законами: согласно цели физики, эти законы не предназначены для объяснения сил их истинными причинами, а дают ясно представленный и полезный общий метод для количественного определения сил с помощью фундаментальных мер, установленных в физике для пространства и времени. Поэтому с физической точки зрения нет никакого скандала в том, чтобы сделать силу функцией зависимых от времени отношений, не больше, чем для зависимости от расстояния, потому что зависимое от времени отношение является такой же измеряемой величиной, как и расстояние."*

Вебер даже предложил корректировать другие виды сил, например, гравитационные, так, как он это сделал для электростатических сил.<sup>67</sup>

Опять же следуя Амперу, Вебер не исключал более фундаментального уровня описания. Он отметил, что зависимость силы между двумя зарядами от их относительного ускорения подразумевает, что в присутствии третьего тела их относительное ускорение зависит от действия этого третьего тела. Этот факт указывал на то, что взаимодействие двух зарядов не было прямым, что оно требовало среды, на которую могло действовать третье тело. Затем Вебер сослался на предположение Ампера о том, что такой средой может быть нейтральный флюид, состоящий из связанных положительных и отрицательных электричеств. Возможно, эта же среда может служить для распространения света, о чем свидетельствует недавнее открытие Фарадеем действия магнетизма на распространение света<sup>68</sup>.

Вебер не стал сразу же развивать эти предположения. Для него более важным было закрепление теории на точных, четко определенных измерениях. Как он утверждал в своей защите сил, зависящих от скорости, целью фундаментальных законов было определение сил с помощью фундаментальных мер пространства и времени. Это определение весьма интересно, поскольку оно указывает на тесную связь между веберовским понятием закона и гауссовским идеалом абсолютного измерения. Это подтверждается причиной, которую Вебер позже привел для возможности абсолютных единиц:<sup>69</sup>

*"Все другие виды величин [кроме времени, длины и массы] могут наблюдаться на определенных геометрических или механических объектах одновременно с теми [длиной, временем и массой], для которых установлена фундаментальная единица: и имеющихся тогда отношений между различными видами величин, данных в виде геометрических или механических законов, будет достаточно, чтобы вывести единицы для всех других видов величин из трех установленных фундаментальных единиц. "*

<sup>64</sup> Weber 1846: 99-108. См. также Whittaker 1951: 201-3. Первоначально Вебер использовал константу  $a = 4 / C$  вместо  $C$ . В 1850 году он использовал константу  $C$ , которую он обозначил  $s$ . Я использовал обозначение  $C$ , чтобы избежать путаницы с модом  $s (= C/\sqrt{2})$ , который обозначает отношение электромагнитного к электростатическому заряду ( $n$  равен скорости света согласно теории Максвелла).

<sup>65</sup> Weber 1846: 109-12, 113-19, 126-32, 143-64. См. также Whittaker 1951: 204-5.

Современную разработку см. в Ассис 1994.

<sup>66</sup> Weber 1846: 138-143; Нейман 1848: 48-66; Weber 1852: 310-334.

<sup>67</sup> Weber 1846: 112 -113.

<sup>68</sup> Weber 1846: 167-170.

<sup>69</sup> Weber 1861: 529

### 2.4.7 Тройное единство

Концепция Вебера об определении величин измерений привнесла особую гармонию в его работу. Его унификация науки об электричестве имела три тесно связанных аспекта: акцент на абсолютном и точном измерении, изобретение универсального прибора и введение фундаментального закона электрических взаимодействий. Получение двух различных явлений, электродинамических сил и вольтовой индукции, с помощью одного и того же прибора указывало на теоретическое единство. Придание измерений к абсолютным единицам предлагало искать это единство в механических терминах. Поэтому Вебер задумал свою теорию электродинамики как исправление единственной теории электричества, которая до этого сводилась к действию механических сил на заданные массы: кулоновской электростатике. Поэтому он свел электродинамические взаимодействия к механическим силам между движущимися электрическими флюидами.

Сравнение с Нейманом поучительно. Оба физика продвигали новые

стандарты точности измерений. Тем не менее, они создали разные теории. Нейман предпочитал феноменологический подход, в то время как Веберу требовалась базовая картина электрических токов и их взаимодействий. Это различие может частично отражать их первый опыт в математической физике: Нейман начал с тепловых свойств кристаллов и почитал Фурье, тогда как Вебер дебютировал с колебаний твердых тел, лучшую теорию которых дал Пуассон. Теоретический стиль Неймана можно рассматривать как продолжение феноменологии Фурье, а Вебера - как модификацию новоНьютоновской физики Пуассона.

Однако это хрупкая интерпретация, поскольку она игнорирует отношения между теоретической и экспериментальной практикой двух немецких физиков. Предпочтение Неймана к феноменологическим теориям скорее следует рассматривать как корреляцию его статичной, региональной концепции эксперимента. Для него приборы и теории, необходимые для их анализа, были, по сути, данностью. Точно так же его новые теории основывались на уже известных экспериментальных фактах. Следовательно, ему не требовалось больше теоретического единства, чем было в уже известных фактах. Напротив, в рамках гауссианского призыва к абсолютному измерению Вебер задумал принципиально новые приборы и использовал их для связи различных явлений. Это стремление к единству побудило его открыть теоретический "черный ящик" электрического тока и выйти за рамки феноменологии Неймана.

#### **2.4.8 Новая фундаментальная константа**

В своем объединении электродинамики с электростатикой Вебер ввел новую фундаментальную константу  $C$ ., которая фигурирует в фундаментальном законе и дает масштаб поправки к закону Кулона, зависящей от скорости. В 1850 году он определил  $C$  как *"относительную скорость, при которой две электрические массы совершенно не взаимодействуют"* (согласно формуле (2.5)). Он также выявил существенную роль константы в контексте абсолютного измерения. С одной стороны, электрический ток может быть измерен по его электродинамическому действию, и таким образом определяется абсолютная электродинамическая единица интенсивности. С другой стороны, ток может быть измерен как количество электричества, которое он переносит в единицу времени, в соответствии с картиной тока Вебера и доказательствами Фарадея и Вебера, что электростатическое электричество может производить те же электродинамические эффекты, что и вольтовское электричество. Количество электричества само по себе может быть подсчитано в абсолютной единице, для которой в законе Кулона нет постоянного коэффициента. Полученная единица тока - это то, что Вебер назвал механической или электростатической единицей. Согласно закону Вебера, электростатическая мера тока в  $C/2$  раз больше его



электродинамической меры (см. Приложение 2).<sup>70</sup>

Определение численного значения  $C$  имело большое значение для Вебера. После пяти лет усилий и в сотрудничестве со своим другом Рудольфом Кольраушем ему удалось решить эту задачу. Принцип определения был прост. Лейденская банка разряжалась через самодельный баллистический гальванометр, который давал электродинамическую меру интегрального тока. Затем эта мера сравнивалась с электростатической мерой потери заряда банки. На практике измерения были очень сложными. Гальванометрическая часть требовала всех навыков Вебера, а электростатическая - всех навыков Кольрауша. Чтобы измерить заряд банки, два друга касались ее проводящей сферой, определяли заряд этой сферы с помощью кулоновских весов и находили, какую долю заряда банки она представляет, измеряя напряжение банки до и после контакта. Необходимо было учитывать утечку из банки, а кулоновскими весами нужно было манипулировать с особой осторожностью, в ночное время и в неотапливаемом помещении, чтобы избежать сквозняков. Вебер и Кольрауш взяли среднее значение из пяти измерений и нашли, с обилием иллюзорных десятичных цифр:  $C = 439450 \times 10^6$  мм/с.<sup>71</sup>

Вебер отметил близость этой величины к скорости света, но только для того, чтобы подчеркнуть несходство их физических значений. В его глазах существенное значение измерения  $C$  заключалось в том, что оно привело его объединение электростатики и электродинамики к количественному экспериментальному завершению. Все электродинамические величины теперь можно было измерять в электростатических единицах. Называя последние единицы "механическими единицами", Вебер рекламировал свое сведение всех электрических явлений к механическому движению электрических флюидов. И наоборот, он предположил, что новая фундаментальная постоянная, вместе с гравитационной постоянной, может служить для сведения трех независимых единиц механики к единице длины.<sup>72</sup>

<sup>70</sup> Weber, 1850: 268; там же: 267-70. См. также в d'Agostino 1996.  $C$  не является оригинальной нотацией Вебера: см. примечание 64 выше. Для соотношения электростатического и электродинамического измерения тока Вебер вместо  $C/2$  использовал  $C/4$ , потому что для электростатического измерения тока он рассчитывал только поток положительного электричества. Это пример того, как микроскопическая картина может влиять на условные обозначения на макроскопическом уровне.

<sup>71</sup> Weber, 1855; Вебер и Кольрауш 1856.1857. См. Rosenfeld 1956; Jungnickel and McCormmach 1986, Vol.1: 144-6; d'Agostino 1996.

<sup>72</sup> Weber 1855: 595; Вебер и Кольрауш 1857: 667-9. См. Розенфельд 1956.

## 2.5 Сравнение Кирхгофа с Вебером

Соображения о едином мировоззрении не имели аналога в

феноменологии Неймана. Дальнейшие различия между методологиями Неймана и Вебера можно проследить в работах, выполненных в их кругах. Первый пример - это решение Густавом Кирхгофом призовой задачи, предложенной Нейманом в 1846 году: определение "глубоко загадочной" константы в теории электромагнитной индукции Неймана.<sup>73</sup>

### 2.5.1 Таинственный $\mathcal{E}$

Кирхгоф был самым выдающимся из первых участников семинара Неймана. Его первая работа по физике, определение электрического тока в проводящем диске, питаемом из двух точек на его периферии, воспроизводила темы физики Неймана с некоторыми изменениями. Целью было рассчитать распределение тока согласно уже известной теории, теории электропроводности Ома, и проверить следствия для напряжения и сопротивления с помощью имеющихся приборов. Это было бы типичным упражнением на семинарах Неймана, если бы Кирхгоф не вывел математический анализ далеко за рамки нормы. Он виртуозно решил соответствующие дифференциальные уравнения и использовал измерение сопротивления в качестве предлога для теории линейных проводящих сетей (наши "законы Кирхгофа"), которую он опубликовал в двух последующих статьях<sup>74</sup>.

Для определения константы  $\mathcal{E}$  Кирхгоф объединил ресурсы теории индукции Неймана и своей собственной теории сетей. В теории Неймана эмпирический смысл константы проявляется в выражении "интегрального тока" (интеграла тока по времени)  $J$ , индуцируемого в цепи при изменении ее потенциала относительно постоянного тока  $I$ :

$$J = (\mathcal{E}/R) \Delta P \quad (2.6)$$

где  $R$  - сопротивление цепи, а  $\Delta P$  - изменение потенциала для  $I = 1$ .

Следовательно, значение  $\mathcal{E}$  можно определить, измерив  $I$  по статическому отклонению гальванометра,  $J$  - по баллистическому отклонению того же гальванометра и вычислив  $\Delta P$ . Результат зависит от единиц, выбранных для электрического сопротивления, для длины (при расчете потенциала  $P$ , который имеет размерность, обратную длине) и для времени (для периода гальванометра, соотносящего интегральные измерения интенсивности с измерениями интенсивности).<sup>75</sup>

Вместо использования отдельных цепей, Кирхгоф хитроумно представил себе сеть, показанную на рис. 2.5, в которой  $R_1$  и  $R_2$  - две катушки,  $M$  - гальванометр (умножитель и подвесная магнитная игла с зеркалом и телескопом),  $K$  - батарея, а  $O$  - медная проволока. Он измерил интенсивность  $I_2$  в ветви 2, когда две катушки были неподвижны, и интегральную интенсивность  $J_2$  во время разделения двух катушек.

Сопротивление  $R_0$  ветви  $O$  намного меньше, чем сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  двух других ветвей, мы имеем приближенные соотношения,

$$J_2 \sim (\mathcal{E}/R_2) \Delta P, \quad R_2 I_2 = R_0 I_0 \sim R_0 I_1 \quad (2.7)$$

и поэтому постоянная  $\mathcal{E}$  дается просто как

$$\mathcal{E} = J_2 I_0 / I_2 \Delta P \quad (2.8)$$

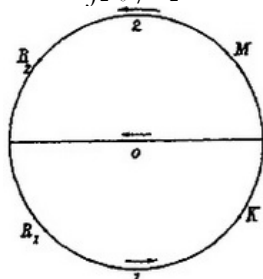


Рис. 2.5 Диаграмма для измерения постоянной индукции  $\mathcal{E}$ .  
(Кирхгоф 1849а: 119).

После напряженных измерений и долгих, "скучных" расчетов (для потенциала) Кирхгоф выиграл конкурс на премию и превратил работу в свою диссертацию. Его вывод, опубликованный в 1849 году после многочисленных усовершенствований, гласил:

*"Постоянная  $\mathcal{E}$  равна единице, если за единицу скорости принять 1000 футов в секунду, а за единицу сопротивления - сопротивление медной проволоки сечением в одну квадратную линию и длиной 0,434 дюйма".<sup>76</sup>*

### 2.5.2 Абсолютное сопротивление

Во время короткого визита в Лейпциг в октябре 1848 года Кирхгоф узнал, что Вебер работал над "той же темой". Он оценил свою работу как "поверхностную по сравнению с ним" и почти отказался от публикации. Результаты Вебера появились во второй части его "*Maassbestimmungen*", опубликованной в 1850 году.<sup>77</sup> Там он определил абсолютную единицу сопротивления как отношение абсолютных единиц электродвижущей силы и интенсивности. Для интенсивности он выбрал электромагнитную единицу, а для электродвижущей силы определил абсолютную единицу как ту, для которой нет числового коэффициента в законе индукции для движущейся цепи.<sup>78</sup> Как он объяснил, его абсолютная единица сопротивления была идентична тому, что Кирхгоф назвал единицей, для которой  $\mathcal{E} = 1$ , если только единица скорости была той же самой. Короче говоря, Кирхгоф и Вебер определили одно и то же число, хотя их выраженные цели были совершенно разными. Кирхгоф хотел определить неуказанный параметр феноменологической теории Неймана, тогда как Вебер стремился к измерению абсолютного сопротивления, дальнейшему расширению гауссовой программы.

Абсолютная единица сопротивления была тем более необходима, что единица длины медной проволоки с единичным сечением не обеспечивала достаточно стабильного стандарта из-за колебаний в проводимости меди. Чтобы избежать этих колебаний, Мориц фон Якоби (брат математика) создал стандарт и распространил его в Германии,

чтобы можно было сделать местные копии и скорректировать их. Целью Вебера было увековечить стандарт Якоби, представив его меру в абсолютных единицах. Сначала он описал простое идеальное устройство, с помощью которого можно было провести абсолютное измерение сопротивления.

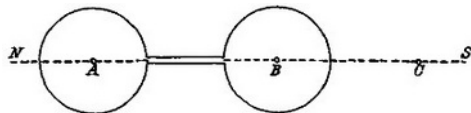


Рис. 2.6. Идеальная схема для измерения абсолютного сопротивления (Weber 1850: 220).

Исходная конфигурация линейного проводника приведена на рис. 2.6: он состоит из двух жестких круговых петель радиуса  $r$ , соединенных двумя гибкими параллельными проводами; причем все они находятся в вертикальной плоскости.  $NS$  представляет собой направление магнетизма Земли. В точке  $C$ , на большом расстоянии  $d$  от  $B$ , помещается подвешенная магнитная игла. С помощью этого прибора производятся два измерения. Во-первых, определяется период колебаний  $\tau$  магнитной иглы. Во-вторых, проводящий круг с центром в точке  $A$  внезапно поворачивается в положение, перпендикулярное направлению  $NS$ . При этом в цепи индуцируется кратковременный ток, который воздействует на магнитную иглу через контур с центром в точке  $B$ . Измеряется максимальное отклонение  $a$  иглы. Простой расчет показывает, что абсолютное сопротивление равно  $\pi^3 r^4 / ad^3 \tau$ .

На практике Вебер увеличил индукцию, используя катушки вместо кругов и поместив иглу в центр второй катушки. Чтобы определить сопротивление эталона Якоби, он вставил его копию в цепь, измерил общее сопротивление и вычел сопротивление исходной цепи.<sup>79</sup>

Вебер сравнил свой результат с результатом Кирхгофа и нашел удовлетворительное согласие, учитывая неопределенность в проводимости меди у Кирхгофа. Он также подчеркнул радикальное различие их процедур. Контраст очевиден на рисунках, представленных двумя физиками (рис. 2.5 и рис. 2.6). Рисунок Кирхгофа представляет собой схему проводящей сети и конкретизирует алгебраическое извлечение константы  $\epsilon$ . Рисунок Вебера представляет собой реальную геометрию прибора, необходимую для сокращения до фундаментальных единиц пространства и времени.

Другой гауссовой особенностью прибора Вебера является использование магнетизма Земли, в то время как прибор Кирхгофа является чисто электродинамическим, что предполагает сложные вычисления для электродинамического потенциала. Кирхгоф считал, что метод Вебера превосходит его собственный, особенно потому, что его характеристика сопротивления зависела от не совсем постоянного удельного сопротивления меди. Тем не менее, оба метода отличались

изысканностью и элегантностью. Они воплощали, каждый по-своему, взаимные отношения между теорией и точными измерениями.<sup>80</sup>

<sup>73</sup> письмо Неймана к Якоби. 5 февраля 1846 г. цитируется в Jungnickel and McCormmach 1986, Vol 1: 152.

<sup>74</sup> Kirchhoff 1845. 1847. 1848. См. Olesko 1991 '179-182; Jungnickel and McCormmach 1986, Vol 1: 153-155 Для измерения высокого уровня сопротивления Кирхгоф заново изобрел мост Уитстона.

<sup>75</sup> Kirchhoff 1849a. См. Olesko 1991: 184-187.

<sup>76</sup> Kirchhoff 1849a: 131. Кирхгоф не принял во внимание самоиндукцию катушек. Его формулы, тем не менее, верны, потому что интеграл времени от самоиндуцированной электродвижущей силы = 0.

<sup>77</sup> Кирхгофа Нейману. 13 октября 1848 г. цитируется в Olesko 199 I: 185-6; Weber 1850.

<sup>78</sup> Точнее, единица электродвижущей силы создается вращением проводящей петли в блоке с однородной магнитной силой, когда поверхность проекции петли в плоскости, перпендикулярной магнитной силе, изменяется на одну единицу в единицу времени.

<sup>79</sup> Weber 1850: 199-202: 220; 218-252.

<sup>80</sup> Weber 1850: 252-255; Кирхгоф 1849a: 118; Кирхгофа Нейману, 13 октября 1848 г., цитата из Olesko 1991: 185-186.

### 2.5.3. Вывод закона Ома

Восхищение Кирхгофа достижениями Гаусса и Вебера повлияло на его собственные методы. Он позаимствовал у них большую часть своей техники гальванометрических измерений. Что еще более важно, он разделял интерес Неймана к объединяющей силе теории Вебера. Во время своего визита в Лейпциг он согласился с Вебером, что следует попытаться заменить соображения Ома "другими, более тесно связанными с остальной теорией электричества". Год спустя, в 1849 году, он использовал теорию Вебера для вывода и исправления законов электрической проводимости Ома. Он рассуждал по аналогии с теорией распространения тепла Фурье и предположил, что электродвижущая сила в данной точке проводника пропорциональна градиенту "электростатической силы" или "напряженности", которую он отождествлял с плотностью заряда. Этот закон, как заметил Кирхгоф, правильно отражает распределение токов в проводнике, для которого истинная природа напряжения не имеет значения. Однако он был несовместим с электростатикой, поскольку предполагал, что равномерно заряженные проводники должны находиться в равновесии. Теория Вебера, продолжал Кирхгоф, подразумевала альтернативную формулировку закона Ома для проводников в состоянии покоя и стационарных токов. В этой формулировке плотность тока пропорциональна градиенту электростатического потенциала.<sup>81</sup>

Этот закон можно разделить на два частичных закона. Во-первых, плотность тока должна быть пропорциональна электродвижущей силе, определяемой как механическая сила, действующая на единицу

положительного электричества. В 1846 году Вебер предположил эту пропорциональность без детального описания механизма. Он лишь представил себе серию разложений и перестановок нейтрального флюида, происходящих со скоростью, пропорциональной разделительной силе. Эта картина была недостаточной, когда в проводнике также присутствовало свободное электричество. Тем не менее, Кирхгоф предположил, что и в этом случае ток пропорционален электродвижущей силе.<sup>82</sup>

Согласно второму частичному закону, электродвижущая сила в данном элементе объема равна электростатической силе, действующей на единицу положительного флюида в этом объеме. Этот закон не является очевидным следствием закона Вебера, поскольку движение электричества в элементе объема в принципе подразумевает вклад зависящей от скорости части сил Вебера. Кирхгоф утверждал, что механизм проводимости может быть таким, что электрические флюиды почти всегда находятся в состоянии покоя, за исключением внезапных скачков от одной молекулы к другой. Его общая стратегия была проста: он использовал гипотетическую теорию Вебера, чтобы угадать феноменологические соотношения, не зависящие от деталей механизма проводимости. Точнее, он всегда предполагал, что микроскопические детали таковы, что феноменологические законы максимально просты.<sup>83</sup>

Неудивительно, что Вебер занимался той же проблемой в то же время. Как и Кирхгоф, он признал несовместимость закона Ома с законами электростатики и сделал электростатические силы причиной тока везде, где исчезает приложенная электродвижущая сила (от батареи или по индукции). Однако он не дал общего закона проводимости, а вместо этого показал, что в конкретных случаях поверхностное распределение свободного электричества может поддерживать непрерывность тока. По его мнению, путь к такому общему закону преграждали большие математические трудности. Когда ему стала известна теория Кирхгофа, он признал ее большую обобщенность, но, по-видимому, сожалел об упрощениях, лежащих в ее основе.<sup>84</sup>

Для Вебера не могло быть окончательной теории проводимости без предварительного понимания причин электрического сопротивления. В своих пространственных рассуждениях на эту тему он отдавал предпочтение идее, что сопротивление возникает в результате взаимодействия между противоположными частицами флюида в соответствии с его фундаментальным законом. В качестве несовершенной иллюстрации он рассмотрел линейную последовательность положительных частиц и движение отрицательной частицы вдоль этой последовательности. Первоначально отрицательная частица движется по орбите вокруг данной положительной частицы. В присутствии постоянной электродвижущей силы орбита постепенно деформируется, пока не

достигнет сферы действия следующей положительной частицы и не начнет перекрывать ее. Таким образом, ожидается регулярное перескакивание отрицательной частицы с одного положительного участка на другой, в соответствии с постоянной (средней) скоростью электрических флюидов под действием данной ЭДС.<sup>85</sup>

Вебер осознавал отрывочный характер таких рассуждений. Тем не менее, он высоко ценил их, поскольку они "вели в еще нетронутые области науки", касающиеся "природы тел". В отличие от них, микрофизические предположения Кирхгофа были лишь лестницей, ведущей к полезным феноменологическим законам; лестницей, которую можно отложить после использования.<sup>86</sup>

<sup>81</sup> Кирхгоф Нейману. 13 октября 1848 г. цитируется в Jungnickel and McCormmach 1986. Vol. 1: 155; Кирхгоф 1849b: 49, 52. См. Archibald 1988. По теории Ома, см. также Jungnickel и McCormmach 1986, Vol. 1: 53-55.

<sup>82</sup> Kirchhoff 1849a: 52.

<sup>83</sup> Kirchhoff 1849a: 55.

<sup>84</sup> Weber 1850: 270-93; Там же: 293-5 за комментарии к Кирхгофу.

<sup>85</sup> Weber 1850: 304-10. Вебера не беспокоило, что периодическое улавливание движущегося заряда несовместимо с увеличением энергии за счет электродвижущей силы. И он не учел Джоулево тепло.

<sup>86</sup> Weber 1850: 305.

## 2.5.4 О движении электричества

В конце своей публикации о законе Ома Кирхгоф отметил, что в общем случае за основу движения электричества в проводниках следует принимать закон Вебера, а не закон электростатики. Это обобщение было необходимо в случае движущихся проводников или переменных токов, для которых имеет место электромагнитная индукция. Однако Кирхгоф переоценил сложность этой проблемы и занялся ею лишь в 1857 году. В этом году он впервые изучил идеальный случай бесконечно тонкого проводника.<sup>87</sup>

Интегрируя формулу индукции Вебера для элементов с переменным током, Кирхгоф обнаружил, что электродвижущая сила в точке провода включает, помимо электростатического вклада, член, пропорциональный производной по времени от силы тока в той же точке. Объединив полученное уравнение, закон Ома и принцип сохранения электричества, он показал, что интенсивность подчиняется волновому уравнению с коэффициентом затухания, пропорциональным сопротивлению:

*"очень замечательная аналогия между распространением электричества в проводе и распространением волны в натянутой струне".*

Скорость распространения не зависела от природы провода; она всегда была равна  $C/\sqrt{2}$ , где  $C$  - константа в законе Вебера. Используя значение  $C$ , полученное Вебером и Кольраушем в предыдущем году, Кирхгоф обнаружил, что скорость распространения "очень близка к скорости

света в пустом пространстве". Однако он не рискнул высказать свое мнение о причине этого необычного совпадения.<sup>88</sup>

В последующей публикации Кирхгоф рассмотрел общий случай трехмерных проводников. На основе закона Вебера он вывел общее выражение электродвижущей силы, которое в анахроничных обозначениях (см. Приложение 4) имеет вид:

$$E = -\nabla\phi - (1/c^2) \partial\mathbf{A}/\partial t \quad (2.9)$$

где  $\phi$  - электростатический потенциал,  $c$  постоянная  $C/\sqrt{2}$ , а вектор  $\mathbf{A}$  зависит от плотности тока  $\mathbf{j}$  как

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int d\tau' [(\mathbf{r} - \mathbf{r}')/|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3] \mathbf{j}(\mathbf{r}') \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}'). \quad (2.10)$$

Это было первое появление векторного потенциала в континентальной электродинамике. Это понятие появилось естественно, как только была рассмотрена векторная электродвижущая сила.

Предыдущие математические исследования индукции могли обойтись без него, поскольку они были ограничены линейными проводниками.<sup>89</sup>

Кирхгоф дал весь набор уравнений для (макроскопического) движения электричества без явного вывода и почти без комментариев относительно основных предположений. Он только дал достаточное условие для распространения закона Ома на нестационарные токи:

*Это предположение будет выполнено, если силы, действующие на частицы электричества и ответственные за сопротивление, настолько интенсивны, что время, в течение которого частица электричества остается в инерционном движении после прекращения действия ускоряющих сил, можно считать бесконечно малым, даже по сравнению с малым характерным временем нестационарных токов.*

Позже Вебер доказал невозможность этого предположения для бесконечно тонкого провода. Он также обнаружил другие неявные предположения Кирхгофа: что количество свободного электричества ничтожно мало по сравнению с количеством нейтральных флюидов, и что ток отрицательного электричества везде равен току положительного электричества.<sup>90</sup>

Опять же, Вебер работал над той же темой, что и Кирхгоф, в одно и то же время, но с разными целями и методами. В то время как исследование Кирхгофа было чисто теоретическим, Вебер стремился получить результаты, которые можно было бы проверить экспериментально. Поэтому он вывел уравнения движения электричества в простом частном случае - в случае круглого провода, но с конечным сечением провода и конечной массой электрического флюида. Он обнаружил, что эффектами конечной массы нельзя пренебречь для исчезающего сечения провода. Среди этих эффектов была зависимость скорости распространения от длины цепи. Следовательно, скорость распространения электричества не была точно определена. Вместо этого Вебер говорил о модификации закона Ома для тонких проводов и



Такое положение дел обусловило отношение Вебера к численному совпадению скорости Кирхгофа со скоростью света:

*Если это близкое согласие скорости распространения электрических волн со скоростью света рассматривать как указание на глубокую связь между двумя науками, то это увлекло бы наше внимание, учитывая высокую важность поиска такой связи. Тем не менее, очевидно, что истинный смысл этой скорости [Кирхгофа] в отношении электричества должен быть рассмотрен, и это значение не такого рода, что позволяют большие ожидания.*

В отличие от Кирхгофа, Вебер был готов рискнуть гипотезами об электрической природе оптического эфира. Например, в конце жизни он отождествил эфир с решеткой из невесомых положительных паникадил. Но он не думал, что скорость псевдо - распространения Кирхгофа может помочь в таких предположениях.<sup>92</sup>

Вебер считал эту скорость недостижимой в экспериментальном плане и отверг предыдущую оценку Чарльза Уитстона как бессмысленную. Вместо этого он хотел проверить удивительное следствие теории: что при периодическом возбуждении большой цепи сила и фаза тока равномерны, даже если источник локализован в одной точке цепи. В 1857 году он начал измерения такого рода вместе с Рудольфом Кольраушем. Источником возбуждения служил небольшой вращающийся магнит, а амплитуда и фаза тока в данной точке цепи измерялись с помощью электродинамометра. К сожалению, Кольрауш умер, а Вебер получил результаты, пригодные для публикации, только в 1864 году. Вебер также надеялся определить инерцию электричества, сравнивая амплитуды тока в цепи, состоящей из двух наложенных друг на друга колец, с параллельными токами в одном случае и противоположными токами в другом, но он так и не провел необходимых измерений<sup>93</sup>.

В итоге Вебер выбрал кратчайший путь между своим фундаментальным законом и конкретными измерениями. Он рассчитал последствия закона для простых, но реалистичных установок и провел измерения, надеясь подтвердить каждый аспект своего закона и связанных с ним микрофизических предположений. В отличие от него Кирхгоф построил феноменологическую теорию, которая была посредником между микрофизикой Вебера и экспериментами, полагая, что микрофизическая теория Вебера помогла построить феноменологическую теорию, но последняя не была порабощена первой. Упрощенные, общие феноменологические соотношения могут быть более истинными, чем точные частичные соотношения, вытекающие из теории Вебера.

<sup>91</sup> Kirchhoff 1849b: 54-5; 1857a. См. Уиттекер 1951: 230-232.

<sup>92</sup> Kirchhoff 1857a: 146. 147. См. Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. 1: 296-297;

Rosenfeld 1956: 1635, 1640.

<sup>89</sup> Kirchhoff 1857b. См. Уиттекер 1951: 232-3. Потенциальный вектор Кирхгофа отличается от нашего векторного потенциала (Максвелла) градиентом, как позже доказал Гельмгольц: ср. Приложения 4 и 7.

<sup>90</sup> Kirchhoff 1857b: 137. Вебер 1863: 98; 1864: 114.

<sup>91</sup> Weber 1863: 102; 1864: 126-131.

<sup>92</sup> Weber 1864: 157; Вебер [ $> 1880$ ]: 524-525.

<sup>93</sup> Weber 1863: 100 (об Уиттстоне); 1864: 183-234 (единообразие), 226 (история), 235-241 (эффект Мертгга). С современной точки зрения, однородность тока является следствием крайней малости эффектов запаздывания для частот, используемых Вебером и Кольраушем. Идея, лежащая в основе эксперимента с двумя крутами, заключается в том, что влияние инерции на амплитуду одинаково в параллельной и антипараллельной конфигурациях, тогда как эффект самоиндукции различен. Герц позже выполнил такой эксперимент: ср. Buchwald 1994: 59-74.

## 2.6. Выводы

Нейман и Вебер значительно расширили количественную оценку электродинамики и тем самым положили начало двум важным традициям немецкой физики. С экспериментальной стороны, они сосредоточились на точных измерениях, тогда как Фарадей и Амплфкр редко измеряли величины. С теоретической стороны, они стремились к созданию полных математических теорий электродинамики. Вдохновленные двумя выдающимися астрономами, Бесселем и Гауссом, они привнесли астрономическую точность в новую область электродинамики.

Усилия Неймана и Вебера были в значительной степени независимыми, и их методы сильно различались.

Измерения Неймана были повторяющимися и жесткими, они опирались на уже известные приборы и требовали длительного и точного анализа ошибок. Измерения Вебера были постоянно инновационными и приводили к появлению новых приборов, и Вебер считал, что ловкое конструирование и манипулирование приборами устраняет необходимость анализа ошибок<sup>94</sup>.

Нейман обычно измерял константы, тогда как Вебер "определял" явления (воспроизводил их в количественно контролируемых условиях) и проверял их законы. Гауссово требование абсолютных единиц в значительной степени обусловило оригинальность Вебера: оно предполагало новые виды приборов с простой геометрией и высокой чувствительностью и требовало проверки законов, по которым эти приборы анализировались. Хотя ученики Неймана иногда придумывали новые измерительные установки, они комбинировали существующие приборы, как символы комбинируются в уравнении. Таким образом, можно сказать, что неймановское измерение было алгебраическим, а веберовское - геометрическим.

В теоретических работах Нейман сосредоточился на наблюдаемых величинах, хотя и допускал более абстрактное понятие потенциала. Он не требовал большего единства, чем можно было ожидать на

экспериментальной основе. Его физика была фрагментарной и пессимистичной. Но она была очень прочной, давала прочные феноменологические законы и определяла математические термины и структуры для будущих теорий.

Стратегия Вебера была почти противоположной. В гармонии с идеей абсолютного измерения он стремился к глобальному, геометрическо-механическому единству физики, которого он достиг как инструментально, так и теоретически. Его теория основывалась на законе механической силы и гипотезе о природе электрических токов. С одной стороны, она поддавалась микрофизическим спекуляциям. С другой стороны, она предлагала новые феноменологические законы. Вебер преуспел в первом случае, и был более сдержан во втором, поскольку считал, что только микромир может подчиняться простым универсальным законам.

Теория Неймана была неполной, поскольку она зависела от ограничения известных эмпирических законов замкнутыми линейными токами. Теория Вебера была в принципе полной, поскольку предполагалось, что ее основной закон действителен для всех видов электрических явлений. Однако на практике это оказалось не так. Основной закон и общая интерпретация токов в терминах движения электрических флюидов были достаточны только для выведения электродинамических сил Ампера и законов электромагнитной индукции. Другие явления, например, электропроводность или магнетизм, требовали дополнительных микроскопических предположений.

Кирхгоф сумел завершить обе теории, Неймана и Вебера, объединив их достоинства. От Неймана (а также Фурье и Гаусса) он сохранил доверие к математической простоте макроскопических законов и математические методы дифференциальных уравнений и интегрального исчисления. У Вебера он позаимствовал идею о том, что объединяющий принцип электрических явлений - микрофизический. Его стратегия заключалась в выведении макроскопических следствий закона Вебера и корректировке картины токов таким образом, чтобы эти следствия были как можно более простыми. Таким образом, он достиг общих дифференциальных уравнений, из которых можно было вывести движение электричества в любом проводнике и при любых внешних обстоятельствах, без дальнейшего обращения к микрофизическому уровню. Для него теория Вебера была лишь трамплином к феноменологическому уровню. Опора Кирхгофа на теорию Вебера и та легкость, с которой Нейман и Вебер приняли теории друг друга, позволяют предположить, что, несмотря на все различия, физика Кенигсберга и физика Лейпцига разделяли общие ценности. Фактически

и те и другие сделали точные измерения основной физики, и оба ограничили эксперименты количественными измерениями с помощью вычисляемых приборов, которые давали числовые константы (для Неймана) или количественные законы (для Вебера). Следовательно, их адепты свели исследовательскую ценность эксперимента к минимуму, и они почти не открывали новых эффектов.<sup>94</sup> С теоретической стороны они оба зависели от неоньютоновских и амперовских представлений. Это совершенно очевидно в случае Вебера, поскольку его фундаментальный закон выражает прямое действие между двумя частицами. Это также верно для теорий Неймана и Кирхгофа, хотя и в более упрощенной форме. Будучи тесно связанными с законом Ампера и частично выводимыми из теории Вебера, они предполагают прямое действие на расстоянии. Хотя они не выражали это действие в терминах механических сил, заменяющее его понятие электродинамического потенциала было аналогично потенциалу, уже введенному в теории тяготения. Все французские теории электричества и магнетизма были неоньютоновскими. Поэтому последующие математические теории в той же области вряд ли сильно отклонялись от ньютоновской схемы взаимодействия. Исключения составляют тему следующей главы.

<sup>94</sup> см. Olesko 1991: 410-411.

<sup>95</sup> За интересным исключением, ср. Dorries 1991.

### **3. Британских поля**

#### **3.1 Введение**

В первые два десятилетия XIX века мнения о природе электрических и магнитных воздействий все еще расходились, особенно в Англии и Германии. Сохранились даже следы "атмосфер" XVIII века, изобретенных для того, чтобы избежать прямого действия на расстоянии. Однако после создания электродинамики Ампера и ее немецких продолжений гегемония ньютоновских теорий флюида из Франции распространилась в другие страны. Проникновение методов французской математической физики способствовало наиболее легкому количественному представлению явлений и отвлекало внимание от более качественных представлений.<sup>1</sup>

Несколько британских физиков избежали этой общей эволюции и предложили альтернативные взгляды на электричество и магнетизм. Первым и главным был Фарадей, который сохранил свою интеллектуальную независимость и незнание математических теорий. Он искал более непосредственную связь физических объектов и явлений и продолжал исследовать пространство, в котором находятся электрические и магнитные источники. В 1830-х и 1840-х годах он сделал ряд крупных открытий, включая электромагнитную индукцию, электрохимическую эквивалентность, индуктивную способность (диэлектрики),

магнитооптическое вращение и диамагнетизм. В то же время он разработал полевую концепцию электрического и магнитного действия.

В 1840-х годах Уильям Томсон выявил аналогии между математическими законами электричества и магнетизма и динамикой сплошных сред. Таким образом, он изобрел основные понятия математики поля и указал на удивительную эквивалентность между рассуждениями Фарадея о силовых линиях и французской теорией потенциала. После 1850 года Томсон неоднократно рассуждал о динамической эфирной теории электричества и магнетизма. Однако в большинстве своих ранних работ он избегал рассуждений о глубинной природе электричества и магнетизма. Его понятия и аппарат могли быть использованы любыми пользователями этих наук, будь то физики различных школ, химики, математики или инженеры. Они были чрезвычайно успешны в своей межкультурной цели и обеспечили прочный фундамент для будущих исследований электричества и магнетизма. Своими аналогиями, механическими моделями и энергетикой Томсон отстаивал новый вид британской физики.

Настоящая глава посвящена физике поля Фарадея и Томсона, их связям и расхождениям. Понятие "поле" здесь используется в свободном, метансторическом смысле, означающем внедрение физических или математических объектов в пространство между электрическими и магнитными источниками. При таком определении вопросы о точном происхождении концепции поля или относительной важности вклада Томсона и Фарадея становятся в значительной степени бессмысленными. Понятие поля в этом смысле существовало уже в восемнадцатом веке. Силовые линии Фарадея, однако, обеспечили первое точное и количественное понятие поля. Более того, Фарадей отстаивал чистую теорию поля, в которой электрический заряд и ток были производными понятиями. Томсон первым ввел математические понятия поля и искал их основу в динамической теории эфира.<sup>2</sup> В значительной степени концепции, используемые сегодня в распространенных областях применения электричества изобретены Томсоном. Этот факт облегчает доступ к его произведениям, но он скрывает заслуги Томсона, которые объясняемые в двух последних разделах этой главы. Напротив, взгляды Фарадея трудно понять, т.к. они отличаются от современных на самом базовом уровне. Тем не менее, они стали важнейшими компонентами системы, культивируемой Максвеллом и его последователями. Поэтому они подробно рассматриваются в трех первых разделах этой главы.

<sup>1</sup> Для полевых теорий до 1820 года, см. Heilbron 1981.

<sup>2</sup> Об амбициях концепции поля и ее началах, см. Nersessian 1985.

## **3.2 Электрохимия Фарадея**

### **3.2.1 Влажная нить**

В своих исследованиях электромагнитной индукции Фарадей неоднократно искал электрические эффекты индуцированных токов: искру, действие на язык, электролитическое разложение и нагревание. Он также пытался индуцировать токи, разряжая лейденскую банку в первичной обмотке двойной катушки. Хотя его попытки не увенчались успехом, он не сомневался, что все формы электричества эквивалентны. Большинство натурфилософов разделяли это мнение со времен Вольты, а Волластон подкрепил его экспериментальными фактами. Тем не менее, иногда высказывались сомнения. Например, Дэви ставил под сомнение идентичность животного электричества с трением или вольтаическим электричеством. В конце своей серии работ по электромагнитной индукции Фарадей решил, что полного, систематического доказательства эквивалентности всех видов электричества все еще не хватает, и поставил перед собой задачу восполнить пробелы.<sup>3</sup>

Пытаясь улучшить доказательство Волластоном электролитического эффекта для электричества при трении, Фарадей придумал следующее устройство (рис. 3.1(а)). Он смочил лист бумаги раствором соли или кислоты и цветовым индикатором, положил его на стеклянную пластину и положил на него концы двух платиновых проволок. Первый провод был подключен к электростатической машине через мокрую нитку и выключатель, сделанный из другой стеклянной пластины и оловянной фольги. Второй провод вел к заземлению с помощью газовых или водопроводных труб. Достаточно нескольких оборотов электростатической машины, чтобы на концах проводов произошло химическое разложение. Фарадей высоко оценил достоинства бумаги:

*"Она создает контакт с очень малой поверхностью, удерживает разлагающееся вещество на месте и своей белизной хорошо показывает эффекты изменения цвета".*

Это стало отправной точкой для показательной серии мутаций.<sup>4</sup>

Мокрая нить "замедляла" электричество своей плохой проводимостью и этим делала его более похожим на гальваническое электричество.

В конце концов, Фарадей обнаружил, что электролитический эффект так же хорош и без мокрой нити. Вскоре он воспользовался еще одним достоинством этого неметаллического проводника. Он взял два куса бумаги, смочил их раствором сульфата соды и цветными индикаторами кислоты/щелочи (лакмус/куркума) и соединил их нитью длиной 4 фута (рис. 3.1(б)). Положительный платиновый полюс, опирающийся на лакмусовую бумагу, выделял кислоту, а отрицательный, опирающийся на куркуму, - щелочь. Фарадей обнаружил, что эффект был примерно таким же, как при прямом контакте двух бумажек. Это показало, что разложение не зависит от расстояния между двумя металлическими полюсами.<sup>5</sup>

Мгновение спустя Фарадей поместил положительный платиновый полюс на лист лакмусовой бумаги и коснулся бумаги мокрой нитью,

подключенной к разряднику. Разложение произошло, несмотря на отсутствие настоящего отрицательного полюса.

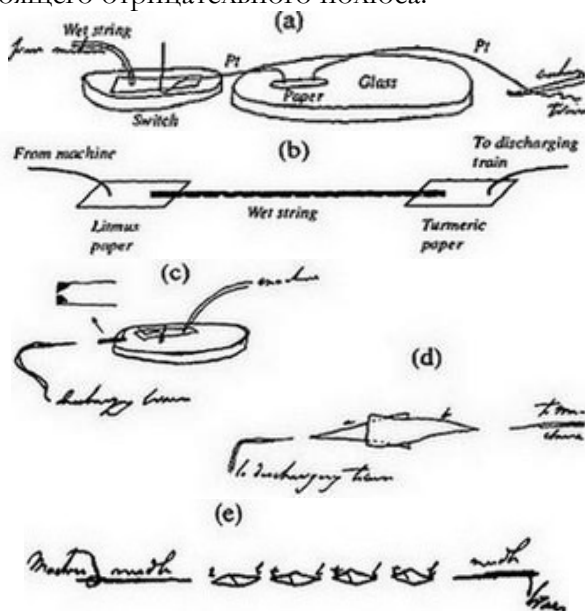


Рис. 3.1. Эксперименты Фарадея по электролитическому разложению:

- (a) с двумя платиновыми полюсами на бумаге (FD 2: 9),
- (b) с удаленными полюсами,
- (c) без полюсов по углам бумаги для куркумы (FD 2: 17),
- (d) без полюсов в куркуме и лакмусовой бумаге,
- (e) без полюсов в цепи куркумы-лакмусовой бумаги.

Через два дня Фарадей модифицировал свой прибор, чтобы определить, куда девается щелочь, образующаяся при разложении. Теперь он использовал куркумовую бумагу, а мокрую нить заменил металлической точкой, расположенной на расстоянии двух дюймов от конца бумаги (рис. 3.1(c)), используя проводящую способность воздуха вблизи заряженных металлических точек. После нескольких оборотов электростатической машины края бумаги стали коричневыми, что свидетельствовало о накоплении щелочи. Фарадей прокомментировал:<sup>6</sup>

*Отсюда следует, что это не просто отталкивание щелочи и притяжение кислоты положительным полюсом и т.д. и т.п., но что электрический ток проходит, независимо от того, металлические полюса или нет, элементарные частицы располагаются сами по себе, и что щелочь проходит настолько далеко, насколько она может пройти с током в одном направлении, а кислота - в другом. Используемые металлические полюса, по-видимому, являются просто окончаниями разлагаемого вещества.*

Еще через два дня Фарадей нашел лучшую иллюстрацию этого

представления, соединив куркумовую бумагу, лакмусовую бумагу и две удаленные металлические точки (рис. 3.1(d)). Наконец, в апреле 1833 года он представил визуализацию воображаемого внутреннего разложения электролитов с помощью совмещения пар индикаторных бумажек (рис. 3.1(e)). Этот случай разложения, - комментировал он, - "сразу же указывает на внутреннее действие частей, подверженных разложению, и показывает, что сила, которая эффективна при разделении элементов, действует там, а не на полюсе". Это расположение было аналогично железным напильникам между полюсами магнитов: в обоих случаях Фарадей принял эффекты, наблюдаемые в промежуточном пространстве, за распределение силы в этом пространстве.<sup>7</sup>

### 3.2.2 Законы электролиза

В мае 1833 года Фарадей искал независимое подтверждение распределенной разлагающей силы, пропуская луч поляризованного света через проводящий раствор. Это не удалось. Однако несколькими днями ранее Фарадей совершенно случайно обнаружил еще один признак того, что разложение необходимо для электролитической проводимости. Он хотел использовать лед в качестве неметаллического проводника вместо мокрой нити или воздуха вокруг металлической точки. Но лед совсем не проводил электричество. В общем, Фарадей обнаружил, что жидкие электролиты при замерзании теряют свою проводимость. Он поспешил опубликовать это как "новый закон электрической проводимости", который "в значительной степени компенсировал его минутное разочарование". И он задался вопросом, *"не препятствует ли замерзание электропроводности, просто приковывая частицы к их местам под влиянием агрегации и предотвращая их окончательное разделение, необходимое для разложения?"*<sup>8</sup>

Для Фарадея электролитическое разложение происходило во всем веществе электролита. То, что продукты разложения были видны только на краях вещества, означало, внутри вещества с той же скоростью происходит восстановление. Эта точка зрения согласуется с цепным процессом, представленным Гроттусом (1806) и Дэви (1807), согласно которому серия разложений и восстановлений происходила на линиях, соединяющих концы вещества (рис. 3.2).

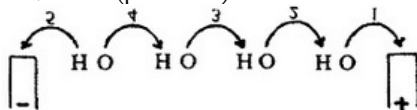


Рис. 3.2. Цепочка Гроттуса в воде

(Н обозначает частицу водорода, О обозначает частицу кислорода).

Но это противоречило более поздним взглядам Био (1824) и Огюста де ла Рива (1825), согласно которым разделение элементов происходило только на полюсах и сопровождалось миграцией заряженных частиц элементов. Фарадей также отрицал, что процесс разложения вызван



притяжением или отталкиванием от полюсов. По его мнению, распад частицы вещества происходит как следствие распада соседней частицы. Это противоречило идее Гроттуса о непосредственном действии полюсов на частицы разделяемых элементов, а также более сложной идее Дэви о действии полюсов, передаваемом промежуточными частицами.<sup>9</sup>

Из тесной связи между электролитической проводимостью и разложением Фарадей сделал два важных вывода:<sup>10</sup>

1. *'Сумма химического разложения постоянна для любой секции, проходящей через разлагающийся проводник, однородной по своей природе, на любом расстоянии полюсов друг от друга или от секции'.*
2. *Для постоянного количества электричества, каким бы ни был разлагающийся проводник, будь то вода, солевые растворы, кислоты, плавленные тела и т.д., количество электрохимического действия также является величиной постоянной, т.е. всегда эквивалентно стандартному химическому эффекту, основанному на обычном химическом средстве.'*

Последний вывод мы называем законом Фарадея. Фарадей доказал его в мае, августе и сентябре 1833 года с помощью серии электролитических ячеек различных видов. Он составил таблицы "электрохимических эквивалентов" и описал "единственный реальный измеритель вольтова электричества", "вольта-электрометр" (в дальнейшем "вольтметр"), основанный на электрохимическом разложении воды.<sup>11</sup>

Фарадея особенно интересовали последствия для природы химических сил. То, что электрохимические эквиваленты совпадали с химическими, казалось, подтверждало электрическую концепцию Дэви и Берцелиуса о химическом средстве. По словам Фарадея:

*"Доктрина определенного электрохимического действия чрезвычайно важной. Она затрагивает своими фактами более прямо и тесно, чем любой предыдущий факт или набор фактов, прекрасную идею, что обычное химическое средство является простым следствием электрических притяжений частиц различных видов материи. Короче говоря: "ЭЛЕКТРИЧЕСТВО определяет эквивалентное число, потому что оно определяет объединяющую силу".*<sup>12</sup>

<sup>3</sup> FER 1: 6; Wollaston 1801; Davy 1829: 17. См. FER 3, серия 3: 76-7; Уильямс 1965: 211-23.

<sup>4</sup> FD 2: ## 46-55 (1 сентября 1832 г.), цитата из # 51. Ср Уильямс 1965: 220 -223.

<sup>5</sup> FER 1: # 295 (роль мокрой нити); FD 2: № 57 (1 сентября); № 72 (3 сентября).

Фарадей также отметил, что в большинстве случаев искрового разряда реакция на двух полюсах была одинаковой.

<sup>6</sup> FD 2: № 74 (3 сентября), № 81 (4 сентября); № 99, № 103 (цитата, 6 сентября). Позже Фарадей подтвердил этот результат с помощью другого устройства, в котором вода играла роль отрицательного полюса: FD 2: # 577 (30 мая 33).

<sup>7</sup> FD 2: № 108 (8 сентября); № 469 (22 апреля 33 года); FER 1, серия 5: # 471 (цитата).

<sup>8</sup> FD 2: ## 482-94 (2 мая 1833 года); № 222-49 (23-4 января 1833 г.); FER 1, серия 4: 110 (цитата), 118 (цитата).

<sup>9</sup> Grotthus 1806; Davy 1807; Biot 1824., вып.1: 636-642; A. de la Rive 1825. Согласно мнению Дэви, в середине решения не должно быть разлагающего действия. Я следил

за чтением Фарадеем этих текстов: FER 1: 136-139. См. также Ostwald 1896; Whittaker 1951: 75-7; Williams 1965: 227-1..

<sup>10</sup> FER 1, серия 5 (июнь 1833 г.): ## 504-505. См. также более слабое утверждение серии 7, FER I: # 377: «Химический порошок; как магнитная сила прямо пропорциональна количеству электричества, которое проходит. См. Уильямс 1965: 241-257.

<sup>11</sup> FER 1: # 739; # 1355 (вольтметр).

<sup>12</sup> FER 1: # 248, # 256 (примечание Фарадея). Также FD 2: # 1917 (5 августа 1834 г.): «Электричество - это силы притяжения, с помощью которых две частицы объединяются».

### 3.2.3 Переопределение электрического тока

Почему электрическая природа химических комбинаций должна подразумевать, что в них присутствует определенное количество электричества? Фарадей знал о возможном атомистическом ответе:

*"Если мы примем атомную теорию или фразеологию, - писал он, - то атомы тел, которые эквивалентны друг другу в их обычном химическом действии, имеют равные количества электричества, естественно связанные с ними".*

Однако он предпочел избежать этой спекуляции:

*"Должен признаться, что я ревниво отношусь к термину "атом", поскольку, хотя говорить об атомах очень легко, очень трудно ясно представить их природу, особенно когда рассматриваются составные тела".*<sup>13</sup>

Его объяснение электрохимической эквивалентности основывалось на новом определении электрического тока. Как мы видели в главе I, он сомневался в существовании электрических флюидов с самого начала своего интереса к электричеству. В своей работе о тождестве различных форм электричества он занял агностическую позицию:

*"Под током я понимаю все прогрессивное, будь то электрический флюид, или два флюида в противоположных направлениях, или просто вибрация, или, говоря более общо, прогрессивные силы".*

В своей серии статей по электрохимическому разложению он сделал более определенный выбор:<sup>14</sup>

*"Если судить только по фактам, то пока нет ни малейших оснований считать влияние электрического тока, - будь то в металлических или сплавленных телах или влажных проводниках, или даже в воздухе, пламени и разреженной упругой среде, - составным или сложным влиянием. Оно никогда не было разложено на более простые или элементарные влияния, и, возможно, его лучше всего представить себе как ось силы, имеющую противоположные силы, точно равные по величине, в противоположных направлениях."*

Фарадей, как и Эрстед, имел в виду, что ток — это распространение полярного состояния в проводнике. В случае электролитической проводимости полярное состояние соответствует грани разложения; оно распространяется путем серии разложений-восстановлений.<sup>15</sup> Короче говоря, ток - это серия разложений-восстановлений:

*"Я не представляю, - писал Фарадей своему другу, - что в том, что мы называем током при разложении тел, происходит что-либо иное, кроме*

*устранения и восстановления между смежными частицами".*

Таким образом, в соответствии с законом Фарадея, степень разложения определяется силой тока. В металлических проводниках разложение не могло иметь места. Тем не менее, Фарадей подозревал, что имеет место аналогичный механизм. В своем исследовании самоиндукции, опубликованном в декабре 1834 года, он предположил, что любой электрический ток связан с повторяющимся состоянием временного возбуждения, которое вполне может быть электротоническим состоянием. Проводимость возникала в результате "вибрации или любого другого способа, при котором противоположные силы последовательно и быстро возбуждаются и нейтрализуются".<sup>16</sup>

Фарадей считал, что его концепция электрического тока несовместима с обычной электрохимической терминологией. Фразы типа "положительный полюс" были пропитаны понятием флюидов электричества и относились к электростатическому действию на расстоянии. Фарадей хотел заменить их более нейтральными терминами. Он обратился за консультацией к изобретателю слова "физик", преподобному Уильяму Уэвеллу:<sup>17</sup>

*"Идеи тока, особенно одного тока, - это очень неуклюжий и гипотетический взгляд на состояние электрических сил в данных обстоятельствах. Идея двух токов кажется мне еще более подозрительной, и я почти не сомневаюсь, что нынешний взгляд на электрический ток и понятия, с помощью которых мы пытаемся его представить, скоро исчезнут, и поэтому я хочу дать названия [...] без привлечения какой-либо теории о природе электричества".*

После дружеского обмена мнениями эти два человека договорились о новом слове для обозначения электрохимического разложения: "электрод", "анод" и "катод" для терминирования разлагающегося вещества, "электролиз" для самого разложения, "электролит" для вещества, непосредственно разлагаемого электрическим током, "ион", "анион" и "катион" для тел, проходящих к электродам. Обратите внимание, что "анод" и "катод" не просто заменили положительный и отрицательный полюса старой терминологии; они включали случаи разложения без металлического полюса. Например, в эксперименте рис. 3.1(с) с куркумовой бумагой, помещенной на расстоянии от разряжающейся отрицательной иглы, катодом был конец бумаги, обращенный к игле. Определение Фарадея отражает устранение притяжений и отталкиваний в пользу разложения. Этимология сделала то же самое: Уэвелл образовал слова "анод" и "катод" от греческих слов "путь вверх" и "путь вниз", поскольку токи вокруг оси Земли согласуются с ее магнетизмом, если они следуют за движением Солнца. Так полярность тока определялась без ссылки на положительное или отрицательное электричество.<sup>18</sup>

<sup>13</sup> FER 1, серия 7: # 869.

<sup>14</sup> FER 1, серия 3: # 283; серия 5: # 517.

<sup>15</sup> FER 1, серия 5: ## 519-520.

<sup>16</sup> письмо Фарадея Лемону. 25 апреля 1834 года, *CMF* 2; *FD* 2: № 1167 (2 декабря 1833 г.): «Подумайте о передаче электричества: существует три режима, как в металлической проволоке, в разлагающихся жидкостях, в воздухе, в парах и т.д. как искра или кисть разряда. Не все ли это одно?»; *FER* I, серия 9: # 1115.

<sup>17</sup> Фарадей Уивеллу, 24 апреля 1834 года, *CMF* 2. См. Williams 1965: 257-267.

<sup>18</sup> Whewell to Faraday, 25 апреля, 5 мая 1834 года, *CMF* 2; Фарадей Уивеллу, 3 мая 1834 г., там же; *FER* 1, серия 7: # 661-662.

### 3.2.4 К источнику питания

Фарадей завершил изучение электролиза в конце 1833 года. В феврале 1834 года он решил "дойти до корыта". Согласно электрической концепции химического сродства, вольтова ячейка была просто электролитической ячейкой, работающей в обратном направлении: химическое разложение теперь было причиной тока. Соответственно, Фарадей поддержал химическую теорию Дэви об эл. батарее и отверг более популярную теорию контакта.



Рис. 3.3. Разложение йодида калия (KI) в точке X без контакта металл-металл (*FD* 2: 244). Прямой электрод P и проволока выполнены из платины; изогнутый электрод Z из амальгамированного цинка.

Оба электрода погружены в раствор сернистой кислоты.

Он показал, что ЭДС элемента в значительной степени зависит от электролита, и привел многочисленные примеры разложения без контакта двух металлов, первым из которых было разложение йодистого калия в цепи цинк/раствор сернистой кислоты/платина/раствор йодистого калия/цинк (рис. 3.3).

Этот аргумент, однако, не убедил немецких и итальянских сторонников контактной теории. Последняя теория может быть обобщена и включать контактное напряжение между металлами и неметаллами.<sup>19</sup>

Пять лет спустя Фарадей принял возражения некоторых своих противников, в частности, Стефано Марианини. Он возобновил свои исследования вольтова столба, приумножил факты в пользу химической теории и осудил фундаментальный недостаток теории контакта: она отрицала "великий принцип натурфилософии, согласно которому причина и следствие равны". Если бы контакт двух металлов был источником voltaического эффекта, то имело бы место "производство энергии без соответствующего истощения чего-то, что ее предоставляет".<sup>20</sup> В 1850-х годах, после того как энергетические соображения заняли центральное место в физике, этот аргумент, безусловно, ослабил позиции теоретиков контакта. Однако он не смог вызвать какого-либо

впечатляющего обращения к взглядам Фарадея. Напротив, британский глашатай энергетической физики, Уильям Томсон, восстановил форму теории контактов.<sup>21</sup>

Большинство электрохимиков признавали вольтовы элементы без контакта металл-металл и электролиз без металлических электродов. Они приняли терминологию Фарадея и приветствовали его демонстрацию электрохимических эквивалентов. Однако они не смогли легко отказаться от теории контакта и полностью проигнорировали концепцию Фарадея об электрическом токе. Те, кто хотел объяснить закон электрохимических эквивалентов, делали это с помощью атомов и электрических флюидов. Никто не воспринимал всерьез утверждения Фарадея о том, что его взгляды просто выражают факты. Его исключение альтернативных теорий действительно зависело от личных суждений: для него электрические флюиды были нефилософскими, атомистические объяснения были слишком произвольными, и ни одна приемлемая теория не могла быть основана на принципах, последствия которых можно было предвидеть только математически.<sup>22</sup>

<sup>19</sup> FD 2: # 1487 (10 февраля 1834 года); № 1577 (19 февраля 1834 г.); FER 1, серия 8. На приеме, ср. FER 1: # 1769 и Ostwald 1896, Vol. 1: 476-80 для ведущего немецкого сторонника теории контактов, С. Пфаффа. и vol. 2: 693-701 для других немцев.

<sup>20</sup> Marianim 1837; FER 2. серия 17 (январь 1840 г.): № 2069, № 2071. См. также FD 3: # 5112 (26 августа 1839 г.): "«Благодаря великому аргументу о том, что никакая сила не может быть развита без потребления равного количества той же или какой-либо другой силы, нет создания силы; но контакт был бы таким творением. " См. также Williams 1965: 364-72. Фарадей не знал, что в 1829 году Питер Роже уже заметил, что теория контакта подразумевает возможность вечного движения: см. также FER 2: 103n.

<sup>21</sup> Thomson 1862. У Томсона было несколько последователей, в то время как Максвелл, Лодж и Хевисайд поддерживали химическую теорию. Для глубокого изучения возникающих противоречий, ср. Hong 1994a. О стойкости немецкой теории контактов, ср. Ostwald 1896, Vol. 2: 731-740.

<sup>22</sup> Современная электролитическая теория не соответствует критериям Фарадея, поскольку требует электрических атомов (электронов) и объясняет роль электродов с помощью сложных электрокинетических расчетов.

### 3.3 Диэлектрики

#### 3.3.1 Переопределение электрического заряда

Основав новую электрохимию и предложив новый взгляд на электрический ток, Фарадей все еще не знал, как определить электричество. В апреле 1834 года он признавался соему другу:

*"В настоящее время мое мнение относительно природы электрического агента весьма неустойчиво. Обычные понятия, связанные с положительным и отрицательным зарядами и термином "ток", я считаю совершенно неправильными, но у меня нет четкого представления о том, что должно быть поставлено на их место".*

Он не мог четко представить, как при электролизе происходит "разложение

и восстановление сил между соприкасающимися частицами" Вопрос от ноября 1835 года показывает, как он надеялся вскоре решить эту проблему:<sup>23</sup>

*"В последнее время много думал о связи обычного и вольтова электричества: об [электростатической] индукции первого и разложении второго, и совершенно убежден, что между ними должна быть самая тесная связь. Сначала необходимо выяснить истинный характер обычных электрических явлений."*

По мнению Фарадея изолятор, подключенный к источнику электричества (батарея или электростатической машине), находится в том же напряженном состоянии, что и электролит до разложения:

*"Это состояние электролита в цепи до того, как произошло то перемещение частиц, при котором передается электрическая сила и тело проводит. Это должен быть электролит в твердом состоянии".*

Разница была только в одном: изолятор находился под напряжением до тех пор, пока действовал источник, тогда как в электролите напряжение постоянно появлялось путем разложения. Это состояние напряженности, предположил Фарадей, может быть сущностью электричества, так как непрерывное разложение является сущностью электролитического тока. Отсюда возник следующий вопрос:

*"Находится ли обычное электричество на поверхности проводника или на поверхности изолятора, находящейся в контакте с ним? Я думаю, что на поверхности изолятора, и должен выработать результаты, исходя из этой точки зрения", с комментарием:*

*"Это было бы причиной, почему все на поверхности проводников".<sup>24</sup>*

Согласно новому мнению Фарадея, изолятор при электростатической индукции поляризовался: любая его часть, разделенная в воображении, была положительной с одной стороны и отрицательной с другой, точно так же, как северная и южная стороны частей магнита. На поверхности поляризованного изолятора не было чистого заряда, поскольку заряды двух его сторон взаимно отменяли друг друга, но поверхность контакта между проводником и изолятором могла быть заряжена, поскольку проводник, по определению, не мог иметь поляризацию. Тогда электрический заряд был просто прекращением поляризации; он принадлежал изолятору, а не проводнику. Изолятор, ставший теперь местом нахождения электричества, Фарадей назвал "электриком", а по предложению Уэвелла он стал "диэлектриком". Фарадей позже писал:

*"великое отличие и сила (если она вообще есть) в теории заключается в том, что диэлектрик приобретает существенное и специфическое значение".<sup>25</sup>*

Фарадей представлял себе три способа проверки своего нового взгляда.

Во-первых, эксперименты с полыми проводниками доказали бы невозможность абсолютного заряда: если бы заряд происходил от начала или конца поляризации, то каждый заряд всегда был бы связан с противоположным зарядом.

Во-вторых, любое влияние состава диэлектрика доказывало бы, что

электричество связано с диэлектриком, а не с проводником.

В-третьих: *"Нужно снова попробовать [как для разлагающегося электролита] очень тонкую пластинку под индукцией и искать оптические эффекты, то есть обнаружить ее поляризованное состояние".*<sup>26</sup>

<sup>23</sup> Faraday to Lemon, 25 апреля 1834 года, *CMF* 2; *FD* 2: # 2468 (3 ноября 1835 года), ожидаемый в *FD* 2: ## 1846-7 (22 февраля 1834 года). См. также Williams 1965: 287.

<sup>24</sup> *FD* 2: # 2511. № 2469 (3 ноября 1835 г.). См. также исторические замечания Фарадея.

*FER* 1: 362: «Как весь эффект в электролите оказался действием частиц, ввергнутых в своеобразное состояние, я был подозревать, что сама по себе общая индукция во всех случаях была действием смежных частиц, и что электрическое воздействие на расстоянии (то есть обычное индуктивное действие) никогда не происходило, кроме как под влиянием материи, попавшей внутрь».

<sup>25</sup> *FD* 2: № 2507-8 (3 ноября 1835 года); Whewell to Faraday, 29 декабря 1836 г., *CMF* 2; *FER* 1: 364: Диэлектрик, «то вещество, через которое действуют электрические силы или через которое они действуют»; *FER* 1, серия 13: # 1666.

<sup>26</sup> *FD* 2: ## 2474-91; # 2497; # 2512. См. также Gooding 1978.

### 3.3.2 Абсолютного заряда нет

Фарадей так и не добился успеха по третьему пункту (более поздний "эффект Керра"). Но он добился успеха по первым двум. 26 ноября он убедился, что в наэлектризованной квартовом котле нет электричества. В начале декабря он провел более систематические эксперименты с наэлектризованным медным котлом, электрометрами и шариками (рис. 3.4). Он обнаружил, что на внутренней части котла нет заряда независимо от того, насколько наэлектризован весь котел.



Рис. 3.4. Один из экспериментов Фарадея с наэлектризованным медным котлом (*FD* 2: 408).

Электрометр с листочками из сусального золота на дне котла не показывает никаких признаков электричества. По мнению Фарадея, это означало, что часть поверхности проводника могла быть заряжена, только если она была индуктивно связана с другим проводником. Т.е. поляризация, начинающаяся на одном проводнике, должна была заканчиваться на другом, и любой заряд был индуктивно связан с противоположным зарядом.<sup>27</sup>

Однако Фарадей ненадолго признал, что это правило может быть недействительным, если речь идет об очень большой длине изолятора. 10 декабря он экспериментировал с медным сферическим зеркалом (рис. 3.5), обращенным к звездному небу сухой холодной ночью и подключенным к заряженной лейденской банке через проводник. В нижней части зеркала не было видно проводника, и все же оно несло электрический заряд

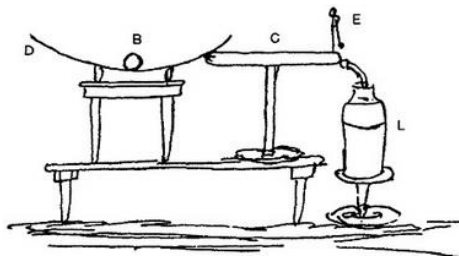


Рис. 3.5. Приспособление Фарадея, демонстрирующее индукцию при отсутствии заряженного тела (FD 2: 417).

L - лейденская банка, E - электрометр, C - проводник, D - металлический сосуд, B – шарик для проверки заряд внутри блюда. Фарадей предположил, что полярное напряжение от внутренней поверхности затухает на больших расстояниях и поэтому не нуждается в прекращении действия другого заряженного проводника. Тогда он был "совершенно уверен", что внутренние стенки очень большого полого проводника могут быть заряжены. Но вскоре он задался вопросом:

*"Может ли индукция через воздух происходить по кривой или за угол?"*

*Вероятно, это можно доказать экспериментально. Если может, то это не действие излучения, и рассуждения о действии неба требуют изменения".<sup>28</sup>*

В январе 1836 года Фарадей построил 12-футовый проводящий куб из дерева, медной проволоки, бумаги и оловянной фольги. Он подключил его к электростатической машине и "жил в нем", проверяя внутреннее электрическое состояние с помощью шариков и электрометров. Не удалось обнаружить электричества, которое нельзя было бы объяснить несовершенством проводящей способности оловянной фольги или индукцией на входе в куб.

Фарадей пришел к выводу, что индукция "не поддается объяснению", что не может быть глобальной потери энергии вдоль поляризованного диэлектрика. Например, заряд проводника, помещенного в полый проводящей сфере, всегда будет равен заряду внутренних стенок сферы, независимо от того, насколько велика эта сфера. Следовательно, абсолютного заряда не существует, весь заряд поддерживается индукцией и связан с другим, противоположным зарядом.<sup>29</sup>

<sup>27</sup> FD 2: № 2634 (26.11 1835 года); ## 2664-2736 (5 - 8 декабря 1835 г.).

<sup>28</sup> FD 2: ## 2741-6 (10.12 1835 года); # 2766 (12 декабря 1835 года). См. Gooding1978: 137.

<sup>29</sup> FD 2: ## 2808-74 (15-16 января 1836 г.); FER 1. Серия II: # 1174; FD 2: № 2826 (15.01). 2864 (16 января); FER 1: № 1178, № 1295. См. также Gooding 1978: 139-142.

### 3.3.3 Удельная индуктивность

В конце 1836 года Фарадей обратился к другому доказательству своей теории индукции: зависимости индуцированных зарядов от природы диэлектрика. Для этого он построил кулоновские торсионные весы в соответствии с указаниями самого Кулона, но с некоторыми улучшениями: например, он поместил заземленный двойной



проводящий пояс на стеклянный цилиндр, окружающий весы, "чтобы индуктивное действие внутри электрометра могло быть равномерным во всех положениях". Затем он построил два образца лейденской банки нового типа, в которой диэлектрик можно было менять по своему усмотрению.

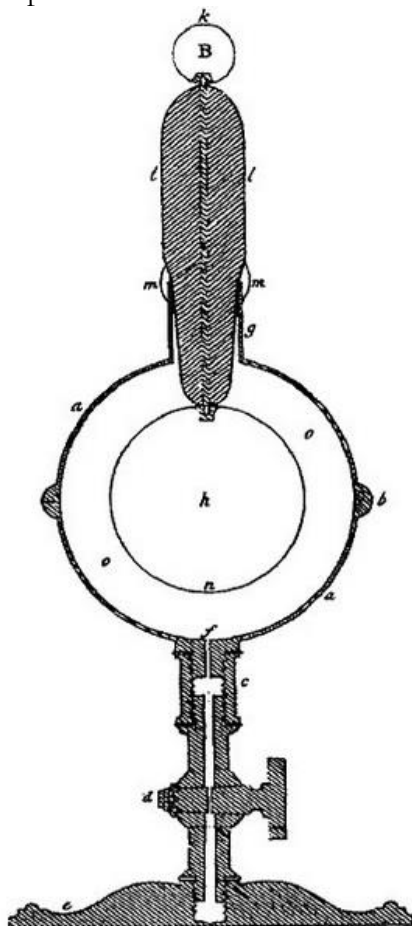


Рис. 3.6. Аппарат Фарадея для изучения удельной индуктивности (FER 1: табличка 7).(рис. 109)

Этот прибор, представленный на рис. 3.6, состоит из двух концентрических латунных сфер  $aa$  и  $bn$ . Внутренняя сфера  $bn$  соединена с проводящим шаром  $B$  латунным стержнем  $i$ , изолированным слоем  $ll$  из шеллака (отличного изолятора). Этот стержень вмазан в латунную втулку  $g$  смоляной замазкой  $mm$  и поддерживает шар  $B$  и сферу  $bn$ , а также герметизирует воротник внешней сферы  $aa$ . Открывая внешнюю сферу в суставе  $b$ , можно поместить в пространство  $oo$  между внутренней и внешней сферами твердый или жидкий диэлектрик. Газообразный диэлектрик после соответствующего истощения может быть введен через запорный кран  $d$ .<sup>30</sup>

Принцип измерений Фарадея был прост. Сначала он зарядил первый образец устройства от лейденской банки и измерил его "напряжение" или "степень заряженности" (который я называю  $V_0$ ), прикоснулся переносным заряженным шаром к неподвижному шару и измерил его заряд с помощью кулоновского электрометра. Затем он привел два образца в контакт и измерил их результирующие напряжения ( $V_1$  и  $V_2$ ), которые должны быть равны.

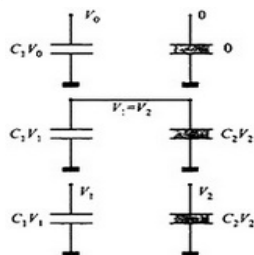


Рис. 3.7. Современная схема экспериментов Фарадея по удельной индуктивной ёмкости

На рис. 3.7 показана современная схема этой процедуры. Если два образца заполнены разными диэлектриками, они имеют разные "ёмкости для электрической индукции"  $C_1$  и  $C_2$ . Первоначальный **заряд** первого прибора,  $C_1V_0$ , разделяется на  $C_1V_1$  и  $C_2V_2$  при контакте со вторым прибором. Следовательно, отношение уменьшения напряжения  $V_0 - V_1$  первого прибора к увеличению напряжения  $V_2$  второго дает отношение  $C_2/C_1$  их ёмкостей. Так рассуждал Фарадей, используя конкретные цифры вместо букв.<sup>31</sup>

Эксперименты были чрезвычайно сложными и длились более года. Фарадей предпринимал серьёзные меры предосторожности, чтобы избежать паразитной индукции и зарядов. Это включало длительные опыты и хитроумные уловки, например, дышать на шеллак и вытирать его пальцем, завернутым в шелковый носовой платок. Ему приходилось работать очень быстро, чтобы избежать утечки электричества. Кроме того, он обнаружил, что большинство диэлектриков не являются идеальными изоляторами и, следовательно, они могут "поглощать" электрический заряд. Чтобы обойти это явление, необходимо было соблюдать особую осторожность.<sup>32</sup>

Фарадей определил, что у твердых и жидких диэлектриков различие удельной индуктивности может превысить 50 процентов. Однако Фарадей не смог обнаружить какой-либо заметной разницы в удельных индуктивностях газов и разреженного воздуха. Тем не менее он считал индукцию смежными частицами общепризнанным, а однородность индуктивности газов еще одним примером простоты их физических свойств.<sup>33</sup>

### 3.3.4 Индукция в изогнутых линиях

Чрезвычайное внимание Фарадея к деталям привело его к побочным

открытиям. Одно из них - поглощение электричества (позднее названное диэлектрическим последствием). Другим открытием была индукция в изогнутых линиях. Фарадей обнаружил, что паразитные заряды на шеллаковой оболочке стержне могут заряжать несущий шар, когда его подносят к вершине к *заземленного* неподвижного шара В. Несущий шар был маленьким, он не находился в поле зрения паразитных зарядов. Поскольку В и все другие близлежащие проводники были заземлены, индукция могла исходить только от стержня. Поэтому индукция должна была идти по изогнутым линиям вокруг шара В.<sup>34</sup>

В окончательном варианте этого эксперимента Фарадей избегал прямого контакта между несущим и неподвижным шарами. Он заземлил неподвижный шар, поднес переносящий шар к вершине к, ненадолго отсоединил неподвижный шар от заземления, снова изолировал его и обнаружил, что он заряжен. Этот вариант эксперимента исключал передачу заряда от стержня к несущему шару через неподвижный шар, которую могли предложить защитники флюидной теории электричества. По мнению Фарадея, этот эксперимент стал лучшим доказательством того, что индукция - это действие между смежными частицами, поскольку прямое действие было бы прямолинейным.<sup>35</sup>

<sup>30</sup> FD 3: ## 3622-4015 (23. 12. 1836 г. -7.10 1837 г.) и ## 3597-3621 (22.11 – 21. 12. 1836 г.) для предварительных экспериментов; FER 1, серия II: 311- 409. цитата из 368. См. также Williams 1965: 291-294.

<sup>31</sup> FER 1: ## 1257-1259.

<sup>32</sup> FER 1: # 1203, ## 1233-1231.

<sup>33</sup> FER 1: # 1260: "Эта разница была неожиданной количественно ..."; Там же: № 1292.

<sup>34</sup> FD 3: # 4016.

<sup>35</sup> FD 3: ## 4016-1 (7. 10 1837 года), ## 4092-104 (14.10.1837 года). FER 1: 380-383. Рисс, А. де ла Рив и Меллони упустили заземление экрана: см. также письмо Рисса к Фарадею 10. 12 1855 года. SCMF 2. Фарадей получил более ранние признаки индукции в изогнутых линиях при экспериментах с клеткой FD 2: ## 2866-2867 (16. 01. 1836 г.).

### 3.3.5 Общие взгляды

Для Фарадея индукция в диэлектриках была "основным принципом развития электричества". Электрический заряд был пространственным разрывом индукции, а электрический ток - изменением во времени или распространением индукции. При металлической проводимости или искровом разряде происходила временная поляризация частиц среды, за которой следовал взаимный разряд смежных частиц. При электрическом ветре (медленный разряд металлической точки в воздухе) наэлектризованные частицы перемещались с окружающей их индукцией.

В электролите Фарадей представлял себе

*"сперва поляризацию молекул вещества, затем уменьшение сил за счет разделения, движения в противоположных направлениях и рекомбинации элементов молекул".*

В каждом случае по проводящему каналу передавалось неизменное количество индукции. Как выразился Фарадей, электрический ток был *"постоянным и неделимым"*<sup>36</sup>.

Поэтому магнитная сила тока была

*"одинакова, независимо от того, проходил ли [ток] в электролите, или в проводнике, или в искре, или в [электрическом] ветре, или даже в индукции"*.

Следовательно, конвекционный ток и даже диэлектрик с изменяющейся индукцией обладают магнитной силой, или *"так, по крайней мере, казалось"*. И наоборот, Фарадей ожидал, что пересечение магнитных кривых поляризует диэлектрик. Он предполагал, что частицы вещества играют роль в передаче магнитной силы. Однако все эксперименты, проведенные им в 1838 году на эту тему, не увенчались успехом.<sup>37</sup>

Индукция была главной во взглядах Фарадея на электричество, и он стремился представить ее наглядно. С февраля 1836 по сентябрь 1837 года он экспериментировал с разрядами в газах при различных давлениях и различной форме проводников. Он рассматривал искры, кисти и свечения как свидетельство предыдущего состояния индукции газа. В середине этих исследований он ввел *"линии электрической индукции"* или напряжения - понятие, аналогичное магнитным кривым или линиям тока:

*"Описание тока как оси силы, которое я уже приводил ранее, предполагает некоторое аналогичное общее выражение для сил покоящегося электричества. Линии электрического напряжения могли бы подойти; и в дальнейшем я буду использовать термины Pos. и Neg., подразумевая под ними окончания таких линий"*

При разрядах в газах светящиеся картины показывали линии индукции (рис. 3.8), как железные опилки показывали магнитные силовые линии<sup>38</sup>.

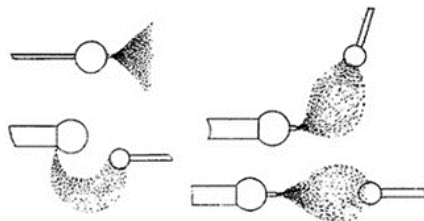


Рис. 3.8. Электрические щетки (FER 1: табличка 8).

Фарадей настаивал на *"воображаемости"* линий индукции, как и силовых магнитных линий. Они были *"временным условным способом выражения направления силы в случаях индукции"*. Однако Фарадей представлял себе механическое притяжение вдоль линий и взаимное отталкивание между ними. Отталкивание объясняло индукцию в изогнутых линиях и концентрирующую способность проводящих краев. Притяжение объясняло движущие силы между заряженными телами. Соответственно, два заряженных тела могли притягиваться друг к другу только в той степени, в какой они были связаны линиями индукции. Электрические отталкивания были лишь кажущимися, они являлись

следствием притяжения другими телами. Например, листики электрометра из сусального золота на самом деле не отталкивали друг друга: их притягивали окружающие тела, заряженные индукцией.<sup>39</sup>

Фарадей отказался занять определенную позицию относительно причины индукции. Он сосредоточился на

*"способе расположения электрических сил в различных явлениях в целом [...], не высказывая никакого мнения о причине электричества"*.

Однако он представил себе молекулярный процесс распространения индукции. По его мнению, вся материя состоит из поляризуемых частиц, рассеянных в пустом пространстве. Поляризованная молекула поляризует своих ближайших соседей и только их, так что действие между удаленными молекулами могло быть только косвенным, через цепочки промежуточных поляризованных молекул. Этот перенос поляризации происходил без глобальной потери интенсивности, что объясняло "иллюзорный" характер индукции, в соответствии с представлением о силовых линиях. Притяжение последовательных полярных молекул вдоль одной и той же линии объясняет притяжение вдоль этой линии. Отталкивание между расположенными рядом молекулами объясняет боковое отталкивание линий индукции. То есть поляризованные молекулы вели себя как крошечные стержневые магниты.

Обратите внимание, что Фарадей не полностью исключил действие на расстоянии. Действие между ближайшими соседями было прямым действием на расстоянии. В то время он лишь хотел устранить крупномасштабное действие на расстоянии, подразумеваемое в обычных флюидных теориях электричества.<sup>40</sup>

На этом домыслы Фарадея закончились. Он не объяснил полярность молекул, а просто определил ее как *"расположение сил, при котором одна и та же молекула приобретает противоположные силы в разных частях"*. Он не хотел решать, является ли это расположение результатом какого-то напряжения или смещения флюидов,. Вот как следует понимать его удивительное заявление:

*"Теория индукции, которую я излагаю, не претендует на решение вопроса о том, является ли электричество одной жидкостью или двумя жидкостями, или просто свойством или состоянием известной материи"*.<sup>41</sup>

<sup>36</sup> FD 3: # 3425 (3 августа 1836 года); FER 1, серия 12: # 1338 (металлы). ## 1405-1424 (искры), ## 1562-610 (конвекция); № 1347 (электролиз, также № 1622-1624); FER 1, серия 13 (февраль 1838 г.): № 1627 (неделимый ток). Таким образом, Фарадей предвосхитил учение Максвелла о том, что все токи замкнуты.

<sup>37</sup> FD 3: # 3471 (3 августа 1836 года); также FER 1, серия 14 (июнь 1838 г.): № 1644, № 1654; ## 1709-30 (неудачные эксперименты). Вклад изменения диэлектрической поляризации в ток соответствует более позднему току смещения Максвелла. При поиске роли материи в сообщении магнитных действий. Фарадей также имел в виду *электростатическое состояние* (FER 1: # 1729).

- <sup>38</sup> FD 2: 443-67; FD 3: 14-96; FER 1. серия 12: 447-72. серия 13: 473-502; FD 3: № 3423 (цит. 3 августа 1836 г.); FER 1. серия II: # 1224. # 1231. См. Gooding 1978: 142-143.
- <sup>39</sup> FER 1, серия 11: # 1304 (воображаемый), # 1231 (временный), серия 12: ## 1371-4 (растяжение и отталкивание); FD 2: № 2642: «Я начинаю сомневаться в электрическом отталкивании», также № 2653 (26 ноября 1835 г.).
- <sup>40</sup> FD 3: # 3423 (3 августа 1836 года); # 3512 (6 сентября 1836 г.): "Индукция [...] действие смежных частиц, поочередно влияющих друг на друга, а не действие на расстоянии"; FER 1, серия 11: 409-411 и 362п: "Смежное" - не лучшее слово, которое можно было использовать [...]; Поскольку частицы не касаются друг друга, это не совсем правильно [...]. Под смежными частицами я подразумеваю те, которые находятся рядом"; FER 1: # 1231. См. также Gooding 1978: 122-127.
- <sup>41</sup> FER 1: # 1304; Там же: 409п. В дневнике (FD 3: ## 4567-70, 1 апреля 1838 г.) Фарадей предположил, что молекулы диэлектриков были проводниками, изолированными друг от друга (как в теории магнитной поляризации Пуассона). Но он не уточнил соответствующий механизм проведения.

### 3.3.6 Необщительность

Демонстрация Фарадеем удельной индуктивной ёмкости была сразу же названа важнейшим открытием в области электричества. Его эксперименты с полыми проводниками и индукцией в изогнутых линиях стали популярными. Его теоретическая интерпретация, однако, осталась без внимания. Осознавая иконоборческий характер своих взглядов, Фарадей завершил свою одиннадцатую серию словами:

*"Я хотел бы сказать, что я высказал свою особую точку зрения с сомнением и страхом, чтобы она не выдержала испытания общей экспертизой, поскольку, если она не верна, она только поставит в тупик прогресс науки об электричестве. Я долго думал об этом, но я не решался на публикацию до тех пор, пока растущее убеждение в её соответствии известным фактам и в том, как она связывает эффекты, по-видимому, весьма различного в своем роде, не побудило меня написать настоящую статью."*

Опасения Фарадея были оправданы. Его теоретические выкладки встретили больше недоразумений и подозрений, чем когда-либо.<sup>42</sup>

У специалистов по математической электростатике была по крайней мере одна веская причина сомневаться в правильности рассуждений Фарадея. Его заявление о том, что индукция в изогнутых линиях, удельная индуктивная способность и невозможность абсолютного заряда "не согласуются с теорией действия на расстоянии", можно было легко опровергнуть. Несколько теорем французской электростатики покрывали первый и третий факты. Фарадей не мог этого видеть, поскольку считал себя "непригодным для формирования суждения о восхитительных работах [Пуассона]" 1811 года. Что касается удельной индуктивной способности, Фарадей упустил из виду, что зависимость индукции от диэлектрического вещества не обязательно означает, что это вещество полностью ответственно за способность.

Оттавиано Моссотти и Уильям Томсон вскоре разработали математические теории поляризации диэлектриков, основанные на

стандартном действии на расстоянии. Любой, кто мог понять их расчеты, скорее всего, разделял следующее мнение немецкого эксперта:<sup>43</sup>

*"Таким образом [путем расширения электростатики Кулона и Пуассона] электростатические проблемы превращаются в проблемы чистой механики [...]. Преимущество этого метода очень велико, он дает результат каждого эксперимента как сумму отдельных действий, которые ум связывает без труда, и оставляет математику муки суммирования отдельных эффектов и нахождения величины суммы [...]. Поэтому я уже давно защищал эту теорию против ее — правда, не очень опасных — антагонистов и не мог воздержаться от продолжения защиты, поскольку появился противник в лице человека, которого я почитаю как величайшего натурфилософа века."*

Хотя Фарадею не удалось опровергнуть математическую теорию флюидов, он мог бы убедить своих читателей в том, что его взгляды являются возможной альтернативой, однако этого почти никогда не происходило. Даже благосклонно настроенные читатели находили в его высказываниях неясности и нелепости. Фарадей приписывал это двусмысленности языка:

*"Я чувствую, что многие слова в языке науки об электричестве обладают большим значением; и все же их толкование разными философами часто варьируется в большей или меньшей степени, так что они не несут совершенно одинаковой идеи в умах разных людей: использование таких слов часто затрудняет кратко выразить то, что действительно хочется сказать."*

Написанное Фарадеем о невозможности абсолютного заряда "невозможно зарядить часть материи одной электрической силой независимо от другой" многие из его читателей поняли так, что не могут быть получены изолированные заряженные частицы. На самом деле Фарадей имел в виду только то, что заряд будет начальной точкой индукции, которая закончится где-то (возможно, очень далеко) противоположным зарядом<sup>44</sup>.

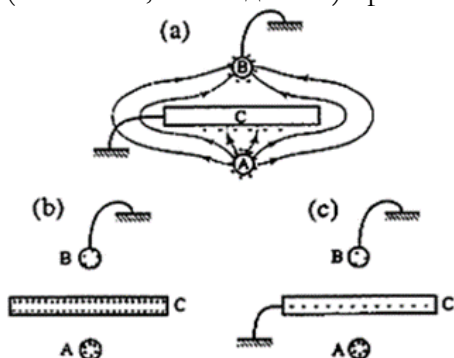


Рис. 3.9. «Индукция Фарадея в изогнутых линиях»: (а) достоверная, (б) неверно истолкованная Уэвеллом и Риссом, (с) переосмысленная Риссом.

Другая трудность была связана с индукцией в изогнутых линиях. Назовем А первоначально заряженным телом, В - воздействующим

телом, а С - экраном. Согласно Фарадею, действие А на В уменьшается из-за присутствия С. Реверент Уэвелл, Огюст де ла Рив, Македонно Меллони и Питер Рис, среди прочих, не понимали, как действие между двумя телами может зависеть от третьего тела. В их интерпретации (рис. 3.9(b)) проводник С был поляризован под действием А, и Фарадей заметил, что это суперпозиция действий А и С на В. Фарадей не отрицал, что С действует на В, если тело С было изолировано. Но в его эксперименте С и В были **заземлены**, так что никакая линия силы не могла их соединить. Эффект С заключался в отклонении линий силы от А и, таким образом, в уменьшении числа линий, достигающих В (рис. 3.9(a)). В этот момент непонимание стало полным и взаимным. Рисс утверждал, что и в этом случае присутствие С вовсе не уменьшает действие А на В. Наблюдался лишь дополнительный эффект отрицательного заряда, возникающего в С под влиянием (рис. 3.9(c)). В основе этого недоразумения лежала иная концепция взаимодействия.

Для Рисса взаимодействие А и В полностью определялось их электрическими состояниями и относительным положением. Для Фарадея это взаимодействие измерялось числом силовых линий, соединяющих два тела.<sup>45</sup>

Наконец, много подозрений вызвала молекулярная картина индукции Фарадея. Роберт Хэйр, профессор химии из Пенсильванского университета, упрекал Фарадея в том, что он допускает как смежное действие, так и прямое действие на расстоянии. Действительно, Фарадей настаивал на том, что индукция - это действие между смежными частицами, но в то же время он признавал прямое действие через вакуум, даже на расстоянии более одного дюйма. Как, спрашивал Хейр, может один и тот же закон применяться к силам, появляющимся в таких разных обстоятельствах? Следует ли в случае вакуума признать существование эфира, частицы которого могут быть поляризованы так же, как и частицы вещества?<sup>46</sup>

В своем публичном ответе Фарадей прежде всего напомнил, что его интересует механизм действия электрической силы, а не глубинная природа электричества. Под действием между соседними частицами он подразумевал только действие между последовательными частицами, а не контактное действие, как предполагал Харе. Данная возбужденная частица могла действовать непосредственно на удаленные частицы, если в промежуточном пространстве не существовало других частиц. В этом смысле близкое действие было вполне совместимо с прямым действием в вакууме. Далее Фарадей показал, что если закон  $1/r^2$  применим к вакууму, то он применим и к диэлектрику, если последний ведет себя как множество взаимно изолированных проводящих молекул.<sup>47</sup>

Несколько лет спустя Фарадей обнаружил парадокс в своем представлении материи: промежуточный вакуум должен был быть



проводником в проводящих телах и изолятором в изолирующих телах. Тогда он предложил догадку Босковича: атомы могут быть центрами силы, окруженными атмосферой силы. Поскольку атмосферы никогда полностью не исчезали, "материя заполняла все пространство", и парадокс исчезал. В предыдущих работах Фарадей заменил невесомые флюиды, связанные с материей, силами в промежуточных пространствах. Благодаря атомам Босковича он, возможно, смог свести всю физику к понятию силы. Если материя была конденсированной силой, то ее роль в передаче электрических и других действий становилась самоочевидной<sup>48</sup>

Фарадей вряд ли мог надеяться обезоружить критику своих коллег подобными рассуждениями. Но он мог укрепить свой иммунитет против чужеродных подходов. Как отметил в письме Фарадею остроумный Рисс, это было сделано на пользу науке:<sup>49</sup>

*У меня мало надежды убедить вас, дорогой сэр, изменить ваши взгляды [на электричество], и, признаюсь, если бы я мог, то едва ли желал бы этого. Великий философ лучше всего работает с собственными инструментами, недостатки которых он обходит ловким применением. Но эти инструменты, столь эффективные в его руках, бесполезны и очень опасны в руках других.*

<sup>42</sup> FER 1, серия II: # 1306. См. также Williams 1965: 372.

<sup>43</sup> FER 1: ##1166-8, #1305; Рисс - Фарадею, 10 декабря 1855 г., SCMF 2. О Томсоне и Моссотти см. следующий раздел. О Риссе см. Simpson 1968: 122.

<sup>44</sup> Фарадей - Харе, 18 апреля 1840 г., FER 2: 262; FER I: #1177; FER 2: 268. Недоразумение, например, в письме Харе к Фарадею, FER 2: 254.

<sup>45</sup> Уэвелл - Фарадею, 22 ноября 1848 года, и Фарадей Уивеллу, 24 ноября 1848 года, SCMF I; A. de la Rive 1853, Vol. I: 143-4; Рисс 1854; Фарадей -Риссу, 19 ноября 1855 г., Фарадею 1856 г. и в SCMF2; Рисс- Фарадею, 10 декабря 1855 г., SCMF2.

<sup>46</sup> Хэйр - Фарадею, июль 1840 года, в FER 2: 251-261, особенно 251, 252, 260; FER 2: # 1616 для однодюймового вакуума.

<sup>47</sup> Фарадей - Хэйру, 18 апреля 1840 года, FER 2: 262-274, особенно 262,265-267,264-265. См. также в Gooding 1978: 119-127.

<sup>48</sup> Фарадей 1844a: 293; также FER 3: # 2225. См. также Williams 1965: 375-80. Ссылка Фарадея на Босковича должна рассматриваться в неопределенном смысле атомов как центров силы. Фарадей игнорировал другие существенные характеристики атомизма Босковича: см. в Spenser, 1967; James 1985: 142-143.

<sup>49</sup> Riess 1856: 17. См. также защиту несоизмеримости в Biagioli 1990.

### **3.4 Магнитные силовые линии**

#### **3.4.1 Освещение магнитной силовой линии**

В 1839 переутомление, потеря памяти и, возможно, чувство интеллектуальной изоляции свергли Фарадея в длительную депрессию. Однако он помнил цель - доказать роль вещества в распространении силы. По инициативе Уильяма Томсона осенью 1845 года он возобновил свою более раннюю попытку показать влияние электролитических токов на поляризованный свет и попытался добиться аналогичного эффекта с поляризованным прозрачным диэлектриком. Оба эксперимента

провалились. Неделю спустя он "работал с линиями магнитными силовыми линиями, пропуская их через различные тела" (рис. 3.10).

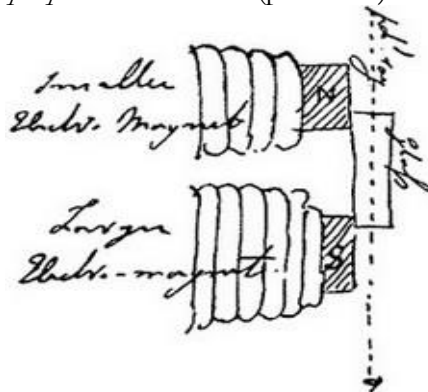


Рис. 3.10. Первое устройство Фарадея, производящее магнитное вращение поляризованного луча (FD 4: 264).

Воздух и кремневое стекло не сработали, но особый вид тяжелого оптического стекла, который Фарадей ранее изготавливал, вызывал слабое, но отчетливое вращение плоскости поляризации, когда луч света был параллелен магнитным силовым линиям. Фарадей писал:

*"Этот факт, вероятно, окажется чрезвычайно плодотворным и будет иметь большое значение для исследования обоих состояний природных сил [магнетизма и света]"*.<sup>50</sup>

Вращение плоскости поляризации предполагало какое-то вращение в веществе стекла, и Фарадей задался вопросом:

*"Возможно ли, что подобные электрические токи циркулируют как в частицах железа, так и в частицах стекла? Или, скорее, не может ли быть так, что в железе существуют круговые токи, а в стекле только напряжение или тенденция к круговым токам?"*.

Впоследствии Фарадей получил этот эффект с другими прозрачными телами, включая скипидарное масло, кремневое стекло, каменную соль, воду и спирт. Чтобы увеличить длительность действия магнитной силы, вместо магнита он использовал очень длинный соленоид, содержащий цилиндр из прозрачного тела. В этом устройстве плоскость поляризации света вращалась в том же направлении, что и ток в соленоиде. "Прекрасная простота" этого закона укрепила идею Фарадея о внутреннем вращении:

*"Нельзя не предположить некоторого родства или сходства конституции между телами, вращающимися сами по себе, и телами, находящимися под действием магнитной силы. Такие тела являются для последних тем же, чем обычные магниты являются для соленоидов, когда через них проходит ток"*.<sup>51</sup>

Если вещество изменяется под действием магнитной силы, рассуждал Фарадей, то она, вероятно, играет определенную роль в передаче магнитной силы. Он быстро ввел слово "димагнетик" (позже, по совету Уэвелла, ставшее "диамагнетиком") по аналогии с "диэлектриком" и

предположил, что "магниты действуют через промежуточные частицы", как уже действовали наэлектризованные тела. В то же время он подчеркивал прогресс, достигнутый им в сопоставлении сил другого рода. Как он объяснил в своей публикации:

*"Я уже давно придерживаюсь мнения, почти убеждения, как и многие другие любители естественных знаний, что различные формы проявления сил материи, имеют одно общее происхождение; или, другими словами, они настолько непосредственно связаны и взаимозависимы, что превращаются одна в другую и обладают эквивалентной силой в своем действии".*

Его новое открытие подтвердило эти ожидания:

*"Наконец-то мне удалось, - воскликнул Фарадей, - осветить магнитную линию силы и намагнитить луч света".*<sup>52</sup>

<sup>50</sup> Томсон Фарадею. 6 августа 1845 года, *SCMF* 1; *FD* 4: ## 7434-71 (30 августа, 1 сентября 1845 г.), более ранняя попытка в *FER* I, серия 8: ## 951-5; *FD* 4: ## 7483-97 (5. 09. 1845 г.), уже запланированный в *FD* 2: # 2512 (3 ноября 1835 г.); *FD* 4: # 7498. № 7504 (13 сентября 1845 г.) См. также Williams 1965: 384-91; Gooding 1981:234-236

<sup>51</sup> *FD* 4: № 7569 (18 сентября 1845 года); *FER* 3, серия 19: # 2200; *FD* 4: № 7688 (26 сентября 1845 г.).

<sup>52</sup> *FD* 4: № 7576 (18 сентября 1845 года); Whewell to Faraday, 10 декабря 1845 года, *SCMF* 2; *FER* 3, серия 19: # 2146; *FD* 4: № 7705 (26 сентября), № 7718 (30 сентября). Здесь «сила» следует понимать в широком смысле качественное понимание причины физических действий; «сила» имеет обычное значение интенсивности произведенных преобразований. О соотношении сил, см. также в Gooding 1980.

### 3.4.2 Касание магнитными кривыми

Непосредственной целью Фарадея было доказать роль вещества в передаче магнитного действия. Через несколько дней после открытия эффекта воздействия на свет, он попытался показать магнитное состояние намагниченного тяжелого стекла с помощью стрелки компаса. Это результатов не дало. В начале ноября 1845 года он повесил стержень из тяжелого стекла на конце шелковой нити между полюсами нового мощного электромагнита. При включении тока стержень сразу принял ориентацию под прямым углом к той, которую принимал железный стержень. Фарадей прокомментировал: "Таким образом, мы коснулись димагнетика с помощью магнитных кривых и наблюдали свойство, совершенно независимое от света"<sup>53</sup>.

Затем Фарадей попробовал другие вещества. Хорошие проводники, такие как медь, демонстрировали сложное поведение из-за токов, индуцированных во время их движения. Однако большинство немагнитных веществ вело себя как тяжелое стекло, хотя и не с такой же интенсивностью. Плохо проводящий металл, висмут, дал наилучший результат. Фарадей ожидал, что и человеческое тело будет диамагнитным:

*"Если бы немагнитный человек мог находиться в магнитном поле, как гроб Магомета, он бы поворачивался, пока не пересек бы магнитную линию".*

Это первое известное появление "магнитного поля", означающего пространство между полюсами. Возможно, Фарадей ввел это здесь из-за антропоморфного контекста: люди или пророки исследуют поля. Его растущее пристрастие к этому слову, вероятно, стало результатом его осознания того, что диамагнитные воздействия не даются напрямую обычными магнитными кривыми<sup>54</sup>.

10 ноября Фарадей *"исследовал магнитное поле с помощью стержня висмута"*. Он обнаружил, что висмут имеет тенденцию двигаться от более сильных к более слабым точкам намагничивания. Удивительно, но направление магнитной силы здесь не играло никакой роли:

*"В силе нет двойственного характера - это уникальное явление в своем роде"*. Это действие указывало на *"новый набор магнитных кривых"*.

Вскоре Фарадей рассмотрел предыдущий эффект ориентации как производное от последнего действия: когда висмутовый стержень, находящийся в центре поля, составлял угол с магнитной осью, его концы отталкивались от оси, на которой находился висмут. Отталкивались от оси, на которой магнитная интенсивность была наибольшей, пока не было достигнуто экваториальное положение.<sup>55</sup>

12 ноября Фарадей представил себе два возможных объяснения диамагнитных ориентаций и отталкиваний. В первом объяснении, которое я называю амперовским, он ссылаясь на образование обратных амперовских токов: *"Может ли в висмуте образоваться ток противоположного направления?"*. Во втором объяснении, которое я называю дифференциальным, причиной может быть различная проводящая способность воздуха и диамагнитного тела для магнитного действия:<sup>56</sup>

*Висмут переходит от сильных к слабым точкам магнитного действия. Это может быть связано с тем, что он не обладает достаточной индуктивной силой или действием, и поэтому вытесняется веществом с большей силой, уступая ему место. Как и при электрической индукции, лучшие проводники или тела, лучше всего приспособленные для выполнения действия, притягиваются в непосредственной близости от индуцирующих тел или на линии их действия.*

Последняя интерпретация продолжала аналогию между магнитной и электрической индукцией и мнение, что магнетизм - это действие между смежными частицами. Амперовская интерпретация не так хорошо сочеталась с представлениями Фарадея и, как ему казалось, имела нежелательное следствие: электромагнитно индуцированные токи в висмуте и меди будут иметь противоположные направления. Тем не менее, в печати Фарадей упомянул только амперовское объяснение.<sup>57</sup>

*Теоретически, объяснение движений диамагнитных тел [...] может быть предложено в предположении, что магнитная индукция вызывает в них состояние, противоположное тому, которое она создает в магнитном веществе [...]. Согласно теории Ампера, эта точка зрения была бы эквивалентна предположению о том, что поскольку в железе и магнетиках индуцируются*

*токи, параллельные тем, которые существуют в индуцирующем магните или проводе батареи, так и в висмуте, тяжелом стекле и диамагнитных телах токи индуцируются в противоположное направление.*

Фарадей не мог одобрить дифференциальное объяснение, потому что не смог проверить ясное следствие из него: что отталкивание диамагнитного тела полюсом магнита должно зависеть от давления окружающего воздуха и превращаться в притяжение в случае вакуума. Можно было еще представить, как это сделал Эдмонд Беккерель, что роль воздуха играет магнитный эфир. Но этот вариант не мог удовлетворить Фарадея, который выступал против невесомых флюидов и эфиров. Вместо этого он неохотно признал два вида магнитных тел с противоположными индуктивными свойствами:

*«С моей точки зрения к индукции через частицы, я склонен думать, что все тела находятся в одном магнитном списке, но факты пока что скорее поддерживают мнение о двух списках».*<sup>58</sup>

<sup>53</sup> FD 4: ## 7691-2 (26 сентября 1845 года), № 7871 (20 октября); № 7902 (4. 11 1845 г.)

См. также Williams 1965: 392-4; Гудинг 1981: 236-237. Воздействие магнитов на висмут и другие неферромагнитные тела было отмечено давно, но никогда не было объектом систематического исследования: см. Williams 1965: 393.

<sup>54</sup> FD 4: ## 7999-8078 (8 ноября 1845 года); № 8014 (8 ноября), также № 8085 (10.11: "между великими полюсами, то есть в магнитном поле."

<sup>55</sup> FD 4: # 8108 (10 ноября 1845 года); # 8119 (10 ноября): "Его [висмута] стремление на самом деле состоит не в том, чтобы идти исключительно вдоль или поперек кривых, а в том, чтобы выбраться из кривых, переходящих от более сильных к более слабым точкам магнитного воздействия"; № 8137 (12 ноября); № 8121 (10 ноября); FER 3, серия 20 (декабрь 1845 г.): № 2269. См. также Gooding 1981: 239-243.

<sup>56</sup> FD 4: # 8138, ## 8144-5 (12 ноября 1845 г.). Под «лучшими проводниками» индуктивного действия Фарадей, вероятно, имел в виду металлические проводники (которые не выдерживают поляризацию, но передают ее наиболее эффективно: FER I: № 1566 и Фарадей Риссу. 19 ноября 1855 г., SCMF 2): было хорошо известно, что незаряженный проводящий шар движется в области более сильного электрического воздействия. Диэлектрик с высокой удельной индуктивной способностью предложил бы лучшую аналогию, но эффект был слишком мал, чтобы его наблюдать.

<sup>57</sup> FD 4: # 8141 (12 ноября 1845 г.): "Будет ли провод или стержень из висмута, перенесенный через магнитные кривые, подавать ток в том же направлении, что и медный провод, или в противоположном?" Фарадей ответил отрицательно в ## 8425-8426 (26 ноября 1845 г.) (однако он увидел, что микроскопические потоки могут вести себя иначе, чем макроскопические: FER 3: # 2431); FER 3, серия 21: ## 2429-2430.

<sup>58</sup> FD 4: # 8257 (15 ноября 1845 г.): "Что должен делать вакуум? Это важно в отношении воздуха, газов и вообще всего объекта"; # 8262 (15 ноября): "Если воздух разрежается, не должны ли в нем suspendироваться разные тела для последовательного поворота в осевое положение - вода, тяжелое стекло, висмут и т. д.?" [воздух становится все менее магнитным, чем вода, тяжелое стекло и висмут]; № 8362-78 (22 ноября): не обнаружен эффект разрежения; Э. Беккерель 1846a, 1846b, 1849, 1850; FD 4: № 8514 (цитата от 6 декабря 1845 г.). См. Tyndall 1870: XIII; Gooding 1981: 249-251. Беккерель самостоятельно разработал идею дифференциального действия по аналогии с толчком Архимеда. По его мнению, эфирная среда ответственна за магнитные свойства вакуума. См. Williams 1965: 420-22.

### 3.4.3. Магнитокристаллический эффект

Новые открытия Фарадея сразу же привлекли внимание немецких исследователей. В Бонне Юлиус Плюккер изучал магнитное поведение двупреломляющих кристаллов и обнаружил "отталкивание оптической оси" полюсами магнита. В августе 1848 года Фарадей тщательно изучил этот эффект в сотрудничестве с Плюккером. В сентябре он исследовал магнитное поле с кристаллическим висмутом. Помимо отталкивания, наблюдавшегося на аморфном висмуте, он обнаружил новый эффект ориентации, зависящий от кристаллической структуры. В однородном магнитном поле, для которого обычные отталкивания не существуют, четко определенная ось кристалла, "магнитокристаллическая ось", располагалась в направлении, параллельном магнитным кривым. В неоднородном поле кубический кристалл все еще показывал направление магнитных кривых, потому что кубическая форма предотвращала эффект экваториальной ориентации. Это действие, по словам Фарадея, было "важным индикатором направления силовых линий в магнитном поле", поскольку кристалл висмута, в отличие от иглы компаса, не нарушал линии.<sup>59</sup> Что касается природы магнитокристаллического эффекта, Фарадей сначала рассмотрел возможность того, что кристалл будет менее склонен к диамагнитной индукции вдоль оси магнитного кристалла, чем вдоль других направлений, в духе амперовой интерпретации диамагнетизма. Если бы это было так, то отталкивание кристалла магнитным полюсом было бы слабее, когда ось направлена в сторону полюса. С помощью тщательно сконструированных бифилярных торсионных весов Фарадей проверил это различие, но не смог его обнаружить.

В этот момент он "не смог удержаться, чтобы не предложить другой взгляд на эти феномены", согласующийся с его более ранней дифференциальной интерпретацией диамагнетизма: линии магнитной силы могут "*проходить более свободно*" в направлении оси магнитного кристалла, подобно тому, как лучи света проходят быстрее (или медленнее) вдоль оптической оси кристалла. Тогда равновесное положение кристалла будет положением "*наименьшего сопротивления*" прохождению силовых линий.<sup>60</sup>

### 3.4.4 Диамагниты Вебера

Тем временем Вильгельм Вебер опубликовал двойное экспериментальное доказательство интерпретации диамагнетизма в терминах обратных амперовских токов. Диамагнитные действия были очень малы, и Вебер сожалел, что пока не может изучить их количественно. Однако он мог использовать гауссовы методы для прямого доказательства диамагнитной полярности. Его первый эксперимент был направлен на демонстрацию действия диамагнитной поляризации на магнитную иглу. В устройстве, представленном на рис.

3.11, действие подковообразного магнита на иглу п точно уравновешено действием стержневого магнита до тех пор, пока между губками магнита не будет помещен блок висмута В. С помощью гауссова метода зеркала и телескопа Вебер обнаружил движение иглы в направлении, противоположном тому, которое давал бы железный блок

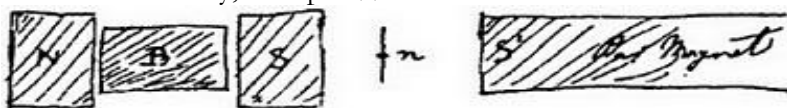


Рис. 3.11. Воспроизведение Фарадеем эксперимента Вебера по проверке магнитной поляризации блока висмута (В) в области подковообразного магнита (NS) с помощью стрелки компаса и компенсационного стержневого магнита S' (FD5: 153).

Второй эксперимент Вебера (рис. 3.12) касался электромагнитной индукции, создаваемой переменной диамагнитной поляризацией.

Цилиндр из висмута В периодически вдвигается в полу катушку С, расположенную на конце мощного электромагнита Е. Индуцированный ток измеряется гальванометром, соединенным с катушкой коммутатором К, компенсирующим изменения знака индукционных токов<sup>61</sup>

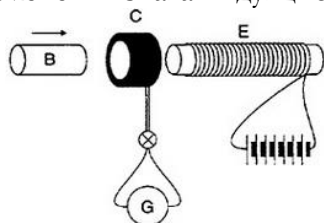


Рис. 3.12. Устройство Вебера для отображения электромагнитной индукции с помощью переменной диамагнитной поляризации.

Положительный результат этих экспериментов был не единственным источником веры Вебера в диамагнитную полярность. Ему также удалось включить это явление в свою общую теорию электричества. Фарадей уже предположил, что полярность, если она существует, может быть обусловлена временным образованием молекулярных токов, идущих противоположно обычным амперовским токам. Вебер увидел, что законы электромагнитной индукции предполагают образование таких токов, если диамагнитное тело содержит микроскопические круговые каналы с нулевым сопротивлением для электрических жидкостей. В цепи без сопротивления электродвижущая сила пропорциональна изменению тока (с коэффициентом, зависящим от инерции электрических жидкостей и самоиндукции). Поэтому любое изменение магнитной силы в контуре влечет за собой пропорциональное изменение тока. По закону Ленца, это изменение должно быть таким, чтобы противодействовать внешней магнитной силе, что согласуется с отрицательным знаком диамагнитной поляризации.<sup>62</sup>

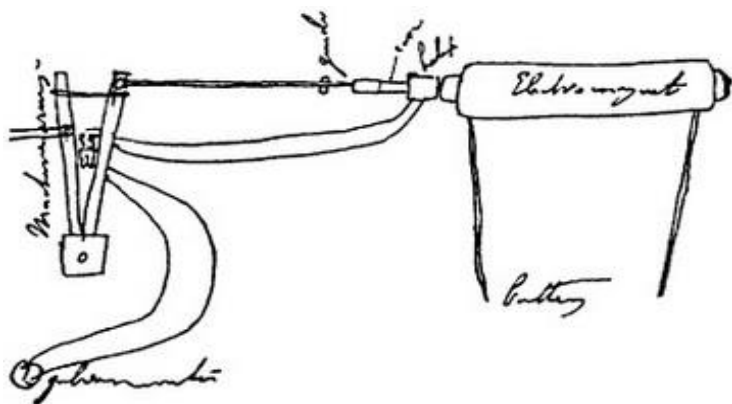


Рис. 3.13. Устройство Фарадея для проверки токов, вызванных движением различных сердечников в поле электромагнита (FD 5: 204). По часовой стрелке написаны рукописные слова: гальванометр, манипуляторы, направляющая, сердечник, спираль, электромагнит, батарея.

Такие микроскопические рассуждения об электрических жидкостях были настолько чужды взглядам Фарадея, что он полностью проигнорировал теорию Вебера. Однако Фарадей потратил несколько месяцев на эксперименты Вебера. В марте 1849 года он повторил первый эксперимент, но обнаружил, что висмут не оказывает никакого действия. С сентября по декабрь он работал над другим экспериментом Вебера, практически с тем же устройством, за исключением того, что он автоматизировал периодическую тягу висмутового цилиндра (рис. 3.13).

Ему было чрезвычайно трудно избежать передачи вибраций от механизма, перемещающего висмут, к катушке и электромагниту. Он также пытался отличить токи, индуцированные в висмутовой массе, от истинной диамагнитной полярности: *"Удивительно, насколько велики меры предосторожности, необходимые в этих деликатных экспериментах. Терпение. Терпение"*, - можно прочесть в его дневнике.

По окончании этой кропотливой экскурсии на территорию гауссовой точности Фарадей пришел к выводу, что эффект, наблюдаемый Вебером, должен был быть паразитной электромагнитной индукцией.<sup>63</sup>

<sup>59</sup> FD 5: ## 9378-465 (16 августа - 1 сентября 1848 г.); FER 3, серия 12: # 2592-613; FD 5: # 9467, # 9475, # 9494 (2 сентября 1848 г.); FER 3: # 2479, # 2546. Активная деятельность Фарадея в этой области была в значительной степени мотивирована его надеждой получить информацию о молекулярных силах. См. также Williams 1965: 417.

<sup>60</sup> FD 5: ## 9920-25 (24 октября 1848 г.), более грубая попытка в ## 9855- 6 (13 октября); FER 3, серия 22: # 2551, # 2552, # 2588, # 2591 (цитата).

<sup>61</sup> Weber 1848b

<sup>62</sup> Weber 1848b: 267.

<sup>63</sup> FD 5: # 10050, # 10691 (Фарадей ошибочно приписал это устройство Фердинанду Рейху); там же: ## 10330-10690, цитата из # 10462 (16 ноября 1849 г.). Фарадей переработал колебательный механизм из более ранних экспериментов по связи между гравитацией и электричеством



### 3.4.5. Проводящие силовые линии

После этого эпизода Фарадей отбросил возможность диамагнитной полярности. В последующих экспериментах с газами он нашел больше доказательств против немецкой точки зрения на диамагнетизм. Осенью 1847 года он узнал от Франческо Зантедески, что пламя отталкивается от полюсов сильного магнита. Фарадей объяснил этот эффект зависящим от температуры (диа)магнетизмом газов и доказал, что все текущие газы, кроме кислорода, диамагнитны по отношению к воздуху, наблюдая их движение после освобождения в воздухе между полюсами электромагнита.<sup>64</sup>

Фарадей полагал, что если это движение было вызвано притяжением или отталкиванием, как предполагалось в интерпретации полярности, то отдельный газ должен быть более плотным (если парамагнитным) или менее плотным (если диамагнитным) в более интенсивных частях магнитного поля. В октябре 1849 года оптическим методом и в январе 1850 года с закрытым сосудом и капиллярным манометром он доказал отсутствие таких сжатий. Что он прокомментировал:

*«Является ли тогда этот эффект не эффектом притяжения или отталкивания, а дифференциальным эффектом другого рода между двумя телами, которые могут свободно двигаться к полюсу?»*

В апреле он окончательно утвердился в мысли, что "проводник [магнитного действия], который может проводить больше всего, обязательно будет втянут в место наиболее интенсивного действия". Большим преимуществом этой точки зрения было то, что она объясняла, почему газы не сжимаются (или расширяются) вблизи магнитных полюсов, несмотря на их пара- или диамагнитное поведение по отношению друг к другу.<sup>65</sup>

В своей 26-й серии от октября 1850 года Фарадей развил понятие проводимости "как общее выражение для способности тел влиять на передачу магнитной силы, ничего не подразумевая о том, как происходит процесс проводимости". По определению, диамагнитное тело проводит меньше, а парамагнитное - больше, чем вакуум, а некоторые кристаллы имеют разную проводимость в разных направлениях. Тогда все известные отталкивания, притяжения и ориентации вытекают из правила наименьшего сопротивления прохождению силовых линий. Таким образом, Фарадей вернулся к дифференциальной интерпретации диамагнетизма, предложенной в ноябре 1845 года, но теперь избежал ее главного недостатка - зависимости от эфира, отделив проводимость от действия между соприкасающимися частицами.<sup>66</sup>

Фарадей увеличил изображения нарушений силовых линий диа и парамагнитными телами, настаивая на деформациях линий вне тел (рис. 3.14).

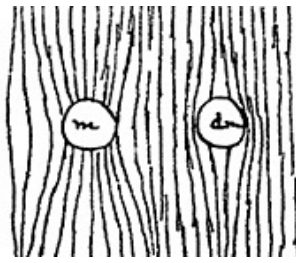


Рис. 3.14. Изображение Фарадеем силовых линий вокруг парамагнитного (m) тела и диамагнитного (dm) тела (*FD* 5: 320).

Эти деформации, вместе с законом наименьшего сопротивления, предполагали новые эффекты, например, ориентацию продолговатого куска висмута в однородном магнитном поле, как Томсон ранее объяснил Фарадею. Такие эффекты были слишком малы, чтобы их можно было наблюдать с помощью висмута в воздухе. Фарадей получил их с помощью висмута в крепком растворе протосульфата железа, благодаря большей разности проводимостей.<sup>67</sup>

Например, на рис. 3.15 две диамагнитные сферы отталкивают друг друга, потому что силовые линии сжаты между двумя сферами, и потому что диамагнитные тела, будучи худшими проводниками, чем вакуум, стремятся удалиться от полей большей напряженности.

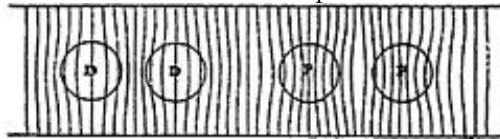


Рис. 3.15. Силовые линии деформированы двумя соседними диамагнитными (D) или парамагнитными (P) сферами (*FER* 3: 212).

Эффекты, обычно приписываемые магнитной полярности и ранее отрицавшиеся Фарадеем, были результатом правил проводимости.

Парамагнитные сферы также отталкиваются друг от друга, причем по двойному механизму: силовые линии находятся дальше друг от друга в пространстве между сферами, а парамагнитные тела, будучи лучшими проводниками, чем вакуум, стремятся удалиться от мест с более низкой интенсивностью. В этом контексте Фарадей все еще использовал понятие "полярность", но в смысле, отличном от веберовского. Он имел в виду только асимметрию возмущения силовых линий при входе и выходе из тела. Соответственно, он отверг идею Вебера о том, что диамагнитное тело ведет себя как парамагнитное, поворачиваясь из конца в конец без изменения своего магнитного состояния<sup>68</sup>.

<sup>64</sup> Zantedeschi 1847; *FD* 5: ## 9066-291 (23 октября - 18 ноября 1847 года); Фарадей, «О диамагнитных условиях пламени и газов», *FER* 3: 467-93. См. также Williams 1965: 396-9. Намного позже, в июле 1850 года, Фарадей смог сравнить газы с вакуумом и доказать, что кислород был парамагнитным: *FD* 5: ## 10896-967.

<sup>65</sup> Plateau Фарадею, 25.03 1849 г. в *FD* 5: 196-8 (Plateau предложил оптический метод); *FD* 5: ## 10277-301 (5-10.10 1849 г.): «Нет заметной конденсации или расширения

воздуха или газов в огромном магнитном поле»: ## 10714-43 (7-21.01. 1850 г.) и связанные эксперименты в феврале-марте; № 10744 (21.01); № 10793(4.041850 г.) Аргумент сомнительный: если принцип наименьшего сопротивления прохождению силовых линий управляет равновесием газа, то диамагнитный газ должен быть более расширен там, где сила сильнее. Современные физики знают, что эффект существует, но он слишком мал для обнаружения с помощью устройств Фарадея.

<sup>66</sup> FER 3, серия 16: # 2797. См. также в Gooding 1981: 268-75

<sup>67</sup> FD 5: # 10832 (8 апреля 1850 года); # 10921, # 10922 (20 июля 1850 г.) FER 3: # 2807, # 2810, # 2821, # 2812; Томсон - Фарадею, 19 июня 1849 года, SCMF 2.

<sup>68</sup> FER 3, серия 26: # 2815, # 2816, # 2831, # 2820. Однако Фарадей допустил поляризацию в смысле Вебера для ферромагнитных тел (# 2833)

### 3.4.6 Реванш Вебера

В 1852 году Вебер опубликовал новую часть своих *"Maassbestimmungen"*, темой которой был диамагнетизм. Возможно, задетый критикой Фарадея в адрес своих предыдущих экспериментов, он заявил, что его отчет был лишь частичным и предварительным и что на самом деле он учел токи, индуцированные в висмутовой массе. Он объяснил неспособность Фарадея повторить его результаты некачественной техникой магнитометрических и гальванометрических измерений. Но он признал, недостаточность соих предыдущие доказательства диамагнитной полярности, заявив:

*"Чтобы получить уверенные результаты, наблюдение столь слабых действий требует количественного контроля, чего до сих пор совершенно не было".*

Главной целью новых исследований *Maassbestimmungen* было создание количественных версий двух предыдущих экспериментов по диамагнитной полярности.<sup>69</sup>

Чтобы измерить магнитный момент равномерно поляризованного висмутового цилиндра, он придумал устройство, показанное на рис. 3.16.

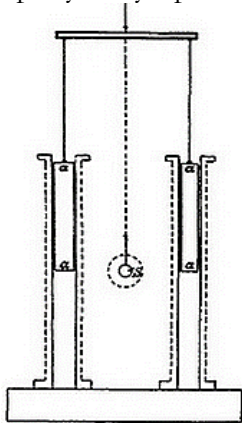


Рис. 3.16. Аппарат Вебера для измерения магнитного момента «диамагнетиков» (Weber 1852: 491).

Два одинаковых висмутовых цилиндра *aa* могут скользить внутри двух длинных параллельных соленоидов, питаемых одним и тем же

постоянным током в противоположных направлениях. Южный полюс  $S$  подвешенной магнитной стрелки магнитометра лежит на точно одинаковом расстоянии от двух соленоидов. Из-за этой симметрии соленоиды не оказывают магнитного воздействия на иглу. Любая диссимметрия компенсируется удаленной катушкой (не показана на рисунке). Тогда на иглу действуют только "диамагниты". Внутри соленоидов магнитная сила равномерна и вертикальна, поэтому вертикальные смещения висмутовых стержней не могут вызвать токи в их массе. Такие смещения имели место в измерениях Вебера, поскольку, согласно старому гауссову трюку, он умножал действие диамагнитов на иглу, раскачивая висмутовые цилиндры синхронно с колебаниями магнитометрической иглы. Вместе с четырьмя сотрудниками, включая Иоганна Листинга и Бернхарда Римана, Вебер определил магнитный момент висмутовых стержней для заданного тока соленоида. Этот момент, как и ожидалось, оказался очень малым и отрицательным.<sup>70</sup>

В усовершенствованной версии своего второго эксперимента Вебер снова использовал однородность магнитной силы внутри соленоида.

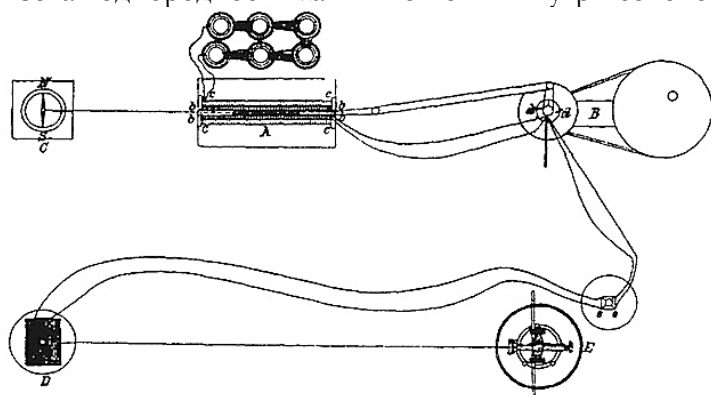


Рис. 3.17. Устройство Вебера для измерения токов, индуцированных движущимся диамагнетиком (Weber 1852: 508).

В части  $A$  (рис. 3.17) один из висмутовых цилиндров предыдущего эксперимента,  $aa$ , колеблется внутри соленоида  $cc$ , питаемого от шестизлементной батареи. Индукционная катушка  $bb$  окружает движущийся цилиндр. Эта катушка состоит из двух противоположно соединенных половин (на рисунке не показаны), так что индуктивные действия двух полюсов диамагнита имеют одинаковый знак. Механизм в  $B$ , заимствованный у Фарадея, управляет переменным движением висмутового стержня, а также коммутатора  $dd$ . Ток от индукционной катушки проходит через этот коммутатор и другой ручной коммутатор  $ee$  и поступает на гальванометр  $D$ , наблюдаемый с помощью телескопа  $E$ . Наконец, компас  $SN$  используется для измерения тока в соленоиде  $cc$ . С помощью этого сложного устройства Вебер получил ожидаемую индукцию от движущегося диамагнита в количественном согласии с

магнитным моментом, измеренным в первом эксперименте.<sup>71</sup>

Доказав таким образом существование диамагнитной полярности, Вебер обратился к ее теории. Он выделил четыре вида объяснения магнетизма: микроскопические ячейки Пуассона для разделения магнитных жидкостей, элементарные вращающиеся магниты, вращающиеся амперовские токи и молекулярные каналы нулевого сопротивления для электрических жидкостей. Три первые гипотезы приводили к магнитной поляризации в направлении приложенной магнитной силы. Поэтому они не могли объяснить диамагнетизм. Оставалось только последнее предположение. В своем теоретическом мире невесомых жидкостей, действующих на расстоянии и организованных в микроскопические структуры, Вебер считал, что исследовал все возможности. Поэтому он утверждал физическое существование незатухающих микроскопических токов. Диамагнетизм соответствовал индукции таких токов при приложении магнитной силы, а (ферро)магнетизм - ориентации уже существующих токов такого рода.

Теперь Вебер отрицал существование магнитных жидкостей, хотя первоначально он предпочитал их амперовским токам<sup>72</sup>.

<sup>69</sup> Weber 1852: 534-5. 488. Фарадей использовал готовый гальванометр Румкорфа (FER 3: # 2651), тогда как Вебер использовал метод Гаусса.

<sup>70</sup> Weber 1852: 489-505.

<sup>71</sup> Weber 1852: 506-531.

### 3.4.7. Безразличие

Впечатляющие мемуары Вебера убедили большинство экспертов в этой области, даже друга Фарадея Джона Тиндалла, который усовершенствовал эксперименты Вебера с помощью самого Вебера. Однако Фарадей остался невозмутимым. В 1854 году он включил работу Вебера в длинный список "магнитных гипотез" с двусмысленной похвалой:

*Вебер выделяется как глубокий математик, который подтвердил исследования Ампера по мере их продвижения и дополнил его гипотетические взгляды [микроскопические индуцированные токи] [...] Казалось бы, большое разнообразие этих гипотез и их быстрая смена была скорее доказательством слабости в этом отделе физических знаний."*

Фарадей считал, что идея Вебера о полярном диамагнетизме "если не магнитная невозможность, то, по крайней мере, большое противоречие и путаница". Если магнит вызывает обратную поляризацию частиц диамагнитного тела, рассуждал он, то обратная индукция также должна происходить от частицы к частице и предотвращать глобальную поляризацию<sup>73</sup>. Антагонизм Фарадея зависел от его нежелания или неспособности представить себе вторичные источники и наложение их действия на первичные источники. Для него возмущение поля, производимое

диамагнитным телом, было примитивным, его нельзя было вывести из образования нового магнитного состояния тела. Полярность Фарадея была связана с нарушением силовых линий. Полярность Вебера была связана с вторичными источниками. Он писал:

*"Под магнитной или диамагнитной полярностью тела я понимаю такое состояние этого тела, при котором оно оказывает на другие тела действия, которые могут быть полностью объяснены идеальным распределением магнитных жидкостей".*

Как и гауссово представление земного магнетизма поверхностным распределением магнитных жидкостей, это определение было онтологически нейтральным, и оно придавало вопросу о диамагнитной полярности четкий эмпирический смысл. Фарадей, будучи простым человеком, который *"чувствовал [свой] путь по фактам, тесно связанным друг с другом"*, не мог увидеть в этом ничего, кроме извращения математика.<sup>74</sup>

Нарушение связи было аналогично тому, с чем Фарадей уже сталкивался (см. в главе об электрической индукции). За это отвечали неоднозначные понятия: "взаимодействие" в одном случае, "полярность" - в другом. Фарадей определял эти понятия в терминах распределения энергии в поле, в то время как другие исследователи мыслили в терминах взаимодействующих состояний удаленных объектов или источников. Следовательно, один и тот же экспериментальный факт мог сопровождаться совершенно разными интерпретациями. После дружеской беседы о диамагнетизме с Тиндаллом Фарадей заметил:

*"Я сильно расхожусь с Тиндаллом во фразах, но когда я разговариваю с ним, то не нахожу, что мы расходимся в фактах. Фраза "полярность" в ее нынешнем состоянии является большой мистификацией".*<sup>75</sup>

<sup>72</sup> Weber 1852: 538-46, 557-560.

<sup>73</sup> Tyndall 1856; FER 3. «О магнитных гипотезах» (1854): 525-526; FER 3, «О некоторых пунктах магнитной философии» (1855): # 3309 (цитата), 3310-2. См. также Tyndall 1870: XVIII-XVIII. У Фарадея было два заметных сторонника: Карло Маттеуччи в Италии и Фабиан фон Фейлици в Германии (см. Tyndall 1870: 156-158).

<sup>74</sup> Weber 1852: 486 (его акцент); Фарадей в Ампере, 3 сентября 1822 года, SCMF 1.

<sup>75</sup> Faraday to Matteucci, 2 ноября 55, SCMF 2. 76 FER 3: 323

### 3.4.8 Уточнение определения силовых линий

После открытия "эффекта Фарадея" Фарадей все чаще и чаще использовал магнитные силовые линии и все больше и больше убеждался в их физической реальности. Он мог "освещать" силовые линии, "касаться" их диамагнитными телами и проводить их через "проводники". В исследовании об атмосферном магнетизме, опубликованном в 1850 году, он высказался об этом спорном вопросе:<sup>76</sup>

*"Концентрации вне магнита, называемые полюсами, могут рассматриваться как связанные с так называемыми магнитными кривыми или линиями магнитной силы, существующими в окружающем пространстве. Эти фразы имеют большой смысл и отражают идеальность"*

магнетизма. Они подразумевают не только направления силы, которые проявляются, когда между ними помещается маленький магнит, кристалл, или другой объект магнитного действия, но и эти силовые линии, которые соединяют и поддерживают полярности и существуют столько же, когда нет магнитной иглы или кристалла, сколько и когда она есть; имея независимое существование, аналогичное (хотя и очень отличное по природе) лучу света или тепла, который, хотя и присутствует в данном пространстве и даже занимает время при его передаче, абсолютно нечувствителен для нас любыми средствами, пока оно остается лучом и становится известным только благодаря его эффектам, когда он перестает существовать."

Две свои следующие серии Фарадей посвятил линиям магнитной силы. Там он воздержался от онтологических обязательств:

*"Я хочу ограничить значение термина "силовая линия", чтобы он означал не более чем состояние силы в любом данном пространстве, в отношении силы и направления: и не включать (в настоящее время) никаких идей о природе или физической причине явлений".*

Он дал уточненное определение линий и предложил их использование в представлении различных явлений. Он дал три определения линий: через ориентацию стрелки компаса, через токи, индуцированные в движущейся проволоке и через магнитокристаллический эффект висмута и предоставил рисунки с железными опилками (рис. 3.18).

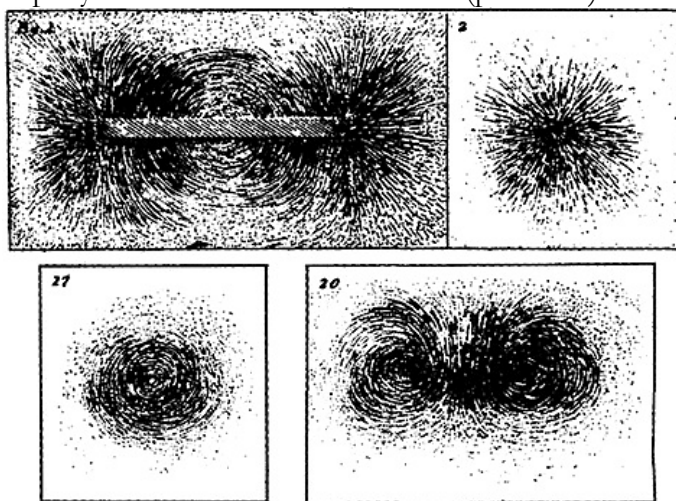


Рис. 3.18. Расположение железных опилок вокруг магнитов и проводящих проводов (FER 3: плита 3).

Совпадение трех определений и наглядность рисунков железных опилок, должно быть, способствовали его убеждению, что силовые линии *"соответствовали природе"*.<sup>77</sup>

В предыдущих магнитных исследованиях Фарадей часто использовал количественные значения силовых линий: он неявно предполагал, что

параллельные равноотстоящие линии представляют однородное поле, и измерял интенсивность силы в данном месте по концентрации линий. Теперь он сделал это предположение совершенно явным и назвал "единичные силовые линии" те линии, которые соответствовали ему.

В этих терминах он смог дать количественную формулировку своего закона электромагнитной индукции:

*"Количество электричества в токе прямо пропорционально количеству пересеченных силовых линий".*

Единичные силовые линии также отражали основное свойство магнитного поля, которое Максвелл позже назвал сохранением магнитного потока.<sup>78</sup>

Среди различных способов определения силовых линий Фарадей отдавал предпочтение движущейся проволоке, поскольку ее можно было использовать для проверки сохранения потока внутри и снаружи вещества. Он экспериментировал с стержневым магнитом, который мог вращаться вокруг своей оси, и с проволочной петлей, соединенной с гальванометром, часть которой проходила через массу магнита (с соответствующей изоляцией). Для различных форм петли он поворачивал магнит или внешнюю проволоку. **Принимая как данность, что (внешние) силовые линии не следуют за движением магнита**, он сделал следующие выводы: эти линии силы проходили через вещество магнита, они всегда были замкнуты, а магнитный поток сохранялся при входе в магнитное вещество или выходе из него.<sup>79</sup>

<sup>76</sup> FER 3: 323.

<sup>77</sup> FER 3, серия 28: # 3075 (цитаты); серия 29: ## 3234-3240 (заявки).

<sup>78</sup> FER 3, серия 28: # 3122, # 3115, # 3073: 'Сумма мощности, содержащаяся в любом участке данной части линий, точно равна сумме мощности в любом другом участке тех же линий', или, в соответствии с Максвеллом  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

<sup>79</sup> FER 3: ## 3090-3121.

### 3.4.9 Физические силовые линии

В следующем году Фарадей опубликовал работу *"О физическом характере магнитных силовых линий"*. Рассуждения о глубинной природе сил, как он теперь утверждал, были *"прекрасным подспорьем в руках экспериментатора и математика"*. В своем рассуждении он сравнил четыре известных вида сил: гравитацию, свет, электричество и магнетизм. Все они могут быть представлены силовыми линиями, но эти линии могут иметь разное значение в каждом случае. Силовые линии гравитации не обязательно должны быть физическими, потому что они прямые, не подвержены влиянию промежуточной материи и действуют мгновенно. В отличие от них, силовые линии света имели множество причин быть физическими: они могли испускаться, искривляться, поглощаться и поляризоваться, и им требовалось время для распространения. В случае с электричеством факты разложения, индуктивной способности и индукции в изогнутых



линиях подтверждают физический характер линий: они представляют собой действие между смежными частицами, по крайней мере, при наличии вещества.<sup>80</sup>

С магнетизмом ситуация, к сожалению, была менее ясной. Фарадей признал, что у него нет строгих доказательств физического существования линий. Конечно, на них влияло присутствие вещества. Но влияние промежуточного вещества было противоположным для диамагнитных и парамагнитных тел, так что силовые линии не могли представлять единственный вид действия между смежными частицами вещества.<sup>81</sup> Выходом из затруднения было введение, как это уже сделал Эдмонд Беккерель, поляризуемого эфира с поляризуемостью, промежуточной между поляризуемостью диамагнитных и парамагнитных тел. Сам Фарадей упоминал возможность того, что

*"вся проводимость магнитной силы [осуществляется] круговыми электрическими токами вокруг линии магнитной силы на всем ее протяжении, и в этом случае они должны существовать в вакууме"*.

Однако такие взгляды были слишком грубо механистичны, чтобы понравиться ему. Он предпочитал прямой перенос магнитных силовых линий через чистое пространство, как он уже предполагал для гравитации и для электрической индукции через пространство между диэлектрическими частицами.<sup>82</sup>

Фарадей сожалел об отсутствии убедительных доказательств искривления магнитных силовых линий. Доказательство, аналогичное тому, которое он привел в случае с электричеством, потребовало бы существования магнитного аналога электрических проводников.<sup>83</sup> Железные опилки или иглы компаса не доказывали кривизну, поскольку их присутствие могло изменить распределение сил. С самого начала своих исследований Фарадей использовал сущности, определенные виртуальными экспериментами. Однако он не принимал не подтвержденные экспериментами определения за доказательства физического существования.<sup>84</sup>

Исчерпав возможности для четкой демонстрации физического существования линий магнитной силы, Фарадей обратился к более умозрительным и несколько неясным аргументам. В некоторых из них он настаивал на двойственном характере магнитной силы: если полюс не может быть создан без одновременного создания противоположного полюса, то между двумя полюсами должна быть какая-то физическая связь. В частности, он связал существование силовых линий магнита с существованием внутренней поляризации (доказанное, например, сломенными магнитами): нельзя отрицать внешнюю связь между полюсами магнита, полагал он, не отрицая их внутренней связи.<sup>85</sup>

В другом наглядном аргументе он связал поведение магнитных силовых

линий с существованием электродинамических сил. С одной стороны, все механические действия между магнитами могут быть сведены к притяжению вдоль линий магнитной силы и взаимному отталкиванию этих линий (на это указывает форма линий и аналогия с магнитными иглами, расположенными рядом). С другой стороны, электрические токи имеют тенденцию к растяжению, а расположенные рядом параллельные токи притягиваются друг к другу. Используя связь "ось-петля" между линиями тока и линиями силы, Фарадей показал полное соответствие между этими двумя видами сил.

На рис. 3.19(a) отталкивание между круговыми силовыми линиями  $C$  и  $C'$  стремится удлинить ток  $i$ , в то время как на рис. 3.19(b) растяжение силовой линии  $L$  приводит к притяжению контуров тока  $i$  и  $i'$ . Таким образом, магнитные силовые линии, похоже,

*"имеют физическое существование, соответствующее существованию их аналога - электрических линий".<sup>86</sup>*

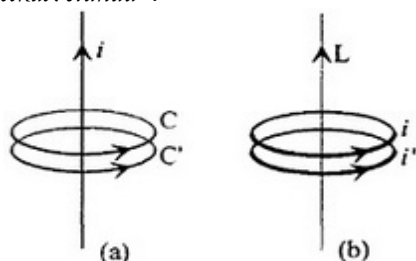


Рис. 3.19. Диаграммы для связи электродинамических сил с напряженностью магнитного поля.

Фарадей, однако, не имел определенного представления о физическом состоянии, представленном магнитными силовыми линиями. Это может быть динамическое состояние, в соответствии с динамической природой электрического тока и с гипотезой об амперовских токах. В этом случае, утверждал Фарадей, должен существовать магнитный эквивалент статическому электричеству, и такого никогда не наблюдалось. Поэтому он предпочел представить статическое состояние, "состояние натяжения (эфира?)", которое обеспечило бы долгожданное электротоническое состояние. Фарадей знал, что в 1835 году Уэвелл предложил динамическую интерпретацию тонического состояния как импульса движения, связанного с электрическим током. Но Фарадей твердо придерживался своей старой интуиции состояния напряженности в магнитном поле.<sup>87</sup>

Эта точка зрения поднимала вопрос о том, что находилось в состоянии напряженности. Это не всегда могло быть материей, поскольку магнетизм действовал через вакуум. Это может быть оптический эфир. Однако Фарадею не нравилась идея ассимиляции пустого пространства с более тонким видом материи. В большинстве своих работ он поддерживал четкое различие между вакуумом и веществом. В 1850 г. он предупреждал:

*"Смешивать их вместе - значит смешивать пространство с веществом и нарушать все концепции, с помощью которых мы стремимся понять и выработать более четкое представление о режим действия и законы природных сил".<sup>88</sup>*

Ранее в динамических рассуждениях Фарадея напряженность, сила и способность существовали сами по себе. В работе 1844 года он свел материю к концентрации способности. В "Мыслях о лучевых вибрациях" 1846 года он предложил естественное продолжение этой точки зрения: более тонкий вид материи, называемый эфиром, не существует; есть только гравитационные, электрические и магнитные силовые линии, пересекающие пустое пространство. Тогда свет - это поперечная вибрация силовых линий. С этой точки зрения физический характер силовых линий стал необходимостью, поскольку и материя, и свет происходят от них. Без физических силовых линий ничто в мире не было бы физическим.<sup>89</sup>

<sup>80</sup> FER 3 (июнь 1852 г.): # 3244; ## 3245-51. Под гравитационными силовыми линиями Фарадей не мог иметь в виду линии, касательные к силе, действующей на точечную массу (в общем случае они будут изогнуты). Кажется, имелись в виду линии, представляющие силу, исходящую из данной точечной массы в присутствии других тел, то есть чистая сила минус силы, которые другие тела будут оказывать, если точечной массы там не было. Эти линии прямые, потому что сила гравитации, действующая на другие тела, не зависит от существования точечной массы. В случае электростатики, аналогично определенные линии сила, как правило, изогнута, потому что сила, оказываемая другими телами (обычно нейтральные поляризуемые тела) зависит от наличия данного точечного заряда. Это толкование соответствует словам Фарадея # 3245: *«Одна частица, тяготеющая к другой частице, имеет точно такую же силу в том же направлении, независимо от того, притягивается ли она к этой одной или к множеству других подобных частиц, прилагая в последнем случае к каждой из них силу, равную той, что она может воздействовать на одного в одиночку: результат, конечно, может сочетаться, но направление и величина силы между любыми двумя данными частицами остаются неизменными.*

<sup>81</sup> Отсюда трудность Фарадея выбирать между одним или двумя "магнитными списками": FD 4: ## 8398-9 (22 ноября 1845 г.), № 8514 (6 декабря 1845 г.), FD 5: ## 10806-10807 (4 апреля 1850 г.), см также Gooding 1981: 249-253.

<sup>82</sup> FD 5: # 10834 (8 апреля 1850 года); FER 3: # 3075; FER 1, серия 25: # 2787, # 2788; FD 5: # 10374: *«Это магнитное воздействие через пространство, воздух, воду, вакуум. и т. д., но между смежными частицами в железе, никеле. и т. д.», #10837: "Разве это не вероятно, и, скорее всего, линии магнитной силы могут быть переданы через пространство в виде силы гравитации и статического электричества. и без этих круговых токов (или их эквивалентов), которые, как предполагается, существуют в железе, когда оно находится в магнитном поле?"; FER 3: серия 21. ## 2445-2446; Там же. # 3258: "Физические силовые линии".*

<sup>83</sup> То есть тела, неспособные выдержать магнитную индукцию: ничего общего с проводимостью магнитных силовых линий.

<sup>84</sup> FER 3: # 3254.

<sup>85</sup> FER 3: ## 3257-3264. ## 3282-3298.

<sup>86</sup> FER 3: ## 3264-3269. Это объяснение притяжения двух токов аналогично тому, которое Фарадей дал в 1821 году в терминах магнитных сил

<sup>87</sup> FER 3: # 3269; От Уилла Фарадея, 25 апреля 1834 года, от Фарадея Уэвеллу, 3 мая

1834 года, *СМФ* 1. О последнем обмене, ср. Андерсон, 1994. В контексте магнитооптического эффекта Фарадей представил круговые токи в намагниченном стекле (*FD* 4: № 7569, 18 сентября 1845 г.); он не опубликовал эту идею, потому что искал состояние напряженности: *FER* 3: # 2229.

<sup>88</sup> *FER* 3, серия 25: # 2787.

### 3.5 Потенциал Томсона

#### 3.5.1 Британские реформаторы

В середине 1840-х годов теоретические взгляды Фарадея привлекли внимание молодого математического вундеркинда Уильяма Томсона. Эту невероятную встречу двух совершенно разных умов невозможно понять, не ознакомившись сначала с некоторыми особенностями образования Томсона. Первая интеллектуальная любовь и вдохновение Томсона - "Аналитическая теория теплоты" Фурье. В годы его студенчества в Глазго и Кембридже французская математика и математическая физика, как правило, считались лучшими и наиболее перспективными. С 1810-х годов прогрессивные люди, такие как Джон Гершель, Чарльз Бэббидж, Уильям Уэвелл и Джордж Эйри, осуждали вырождение британской традиции математической физики. Для Гершеля "последние двадцать лет восемнадцатого века не были более примечательны триумфами чистой и прикладной математики за рубежом, чем их упадком и, более того, полным исчезновением у себя дома". Предполагаемой причиной было рабское следование методам Ньютона. Предлагаемое средство - тщательное изучение французской классики.<sup>90</sup>

Первоначально британские реформаторы приняли понятие строгости Лапласа. Они отказались от интуитивной, геометрической концепции исчисления, унаследованной от Ньютона, и основывали математический анализ на алгебраических определениях и манипуляциях. Они определили производные в манере Лагранжа, как последовательные коэффициенты в рядах Тейлора. Они решали дифференциальные уравнения с помощью степенных рядов. Для математизации физики они приняли предположение Лапласа о точечных молекулах весомой материи и невесомых флюидах, действующих непосредственно на расстоянии. Эта модель поддавалась совершенно определенным математическим выводам: нужно было только объединить силы, действующие на данную молекулу со стороны всех других молекул, вывести дифференциальное уравнение из полученного интегрального уравнения и найти решения для заданных границ. И в заключение, эти решения сравнивались с результатами количественных экспериментов.<sup>91</sup>

Однако интерес англичан к лапласианскому молекуляризму и алгебраизму вскоре угас. Когда они стали доступны, внимание привлекли мемуары Фурье и Френеля о тепле и свете. Будучи менее умообразными и более геометрическими, чем работы Лапласа, они удовлетворяли прагматическим и иллюстративным наклонностям британских натурфилософов. Особенно привлекательной была теория тепла Фурье:

она воздерживалась от специальных предположений о природе тепла и строении материи; ее основные уравнения имели прямое эмпирическое значение; в ней центральное место занимало геометрическое понятие потока через поверхность. Первые британские работы Джорджа Грина и методологии Джеймса Маккаллаха по оптике и электричеству, действительно вышедшие за рамки прежних французских теорий, сознательно приняли и усовершенствовали методологию Фурье.<sup>92</sup>

Молодой Уильям Томсон мог оценить достоинства французской математики. Его отец Джеймс Томсон преподавал математику в Академическом институте Белфаста, а затем в Университете Глазго. В своих лекциях и многочисленных учебниках он пропагандировал французские методы, дополненные геометрическими иллюстрациями и практическими приложениями. То же самое делали его коллеги из Глазго Джон Прингл Никол и Уильям Мейклхем, который обучал натурфилософии своего сына Уильяма. Акцент на геометрии и разумных движениях был особенно силен в Шотландии. Никол учил, что

*"качество формы - самое простое из всех качеств материи, и поэтому геометрия, которая рассматривает ее, стоит во главе натурфилософии"*.

Как и доктор Томсон, он следовал другому шотландскому принципу - единству искусства и науки, а также антидогматизму. Как и У.Томсон, оба они боролись с метафизикой и абстракцией, до конца своей жизни..<sup>93</sup>

Среди французских авторов Фурье лучше всего воплотил шотландские ценности. Похвала Никола "Аналитической теории теплоты" была настолько высокой, что Уильям Томсон в возрасте 16 лет поглотил толстый том за две недели в мае 1840 года. В течение нескольких месяцев он смог исправить локальные неверные интерпретации этой "великой математической поэмы" и завершить некоторые из ее доказательств. В первую очередь, он использовал аналогию между электростатикой и распространением тепла, чтобы доказать новые электростатические теоремы. Он отправил очень плотный и сжатый отчет об этой работе в "Кембриджский математический журнал" в сентябре 1841 года, незадолго до своего отъезда в Кембридж.<sup>94</sup>

### **3.5.2 Электростатика и тепловой поток**

Как Томсон знал от Пуассона, электростатические силы в воздухе возникали из функции  $V$ , которая удовлетворяет тому же частному дифференциальному уравнению, что и уравнение Фурье для стационарного распределения температуры в однородном твердом теле:  $\Delta V = 0$ . Однако Фурье рассматривал источники тепла как поверхностные условия, тогда как Пуассон включал в дифференциальное уравнение источники электричества. Томсон впервые расширил аналогию, введя точечные источники тепла. В этом случае уравнение Фурье давало температуру, пропорциональную обратному расстоянию от источника.

Томсон наложил такие источники на поверхность  $S$  с плотностью  $\sigma$ , чтобы получить идентичное выражению  $V$  следующее выражение температуры  $\theta$ .<sup>95</sup>

$$\theta = \int \sigma dS / r, \quad (3.1)$$

Затем Томсон представил источники тепла на замкнутой поверхности, причем их распределение было таким, что поверхность была изотермической. Он рассуждал следующим образом. Температура внутри поверхности должна быть постоянной, потому что в противном случае вокруг небольшой замкнутой поверхности, окружающей любой внутренний температурный экстремум, возник бы поток тепла, что противоречит отсутствию внутренних источников. Аналогично, если твердое тело имеет такой поверхностный заряд, что соответствующее  $V$  является константой на поверхности, то  $V$  является константой внутри тела, и электрическая сила там исчезает. Следовательно, достаточным условием равновесия для проводника является то, что электрическая сила, создаваемая поверхностным зарядом, должна быть перпендикулярна поверхности.<sup>96</sup>

Теперь Томсон перевернул аналогию. Он доказал, как это сделал до него Кулон, что электрическая сила непосредственно за пределами замкнутой поверхности нормальна к поверхности и равна плотности поверхности в  $4\pi$  раз. Следовательно, плотность источников тепла, поддерживающих постоянную температуру на поверхности, равна тепловому потоку по всей поверхности, деленному на  $4\pi$ . Теперь температура вне любой изотермической поверхности зависит только от температуры на поверхности и от теплового потока в каждой точке поверхности, пока все источники находятся внутри или на поверхности. Это свойство является очевидным следствием того, что Фурье рассматривал распространение тепла как действие между смежными элементами объема. Его электростатическим аналогом является гораздо менее очевидная теорема о замещении поверхности: электрическая сила, обусловленная любым распределением электрического заряда, равна силе, обусловленной фиктивным распределением заряда на поверхности с постоянным  $V$ , содержащей все реальные заряды; поверхностная плотность равна электрической силе, создаваемой на поверхности реальными зарядами, деленной на  $4\pi$ .<sup>97</sup>

Неизвестные Томсону новые теоремы уже трижды публиковались: Грином в 1828 г., Гауссом и Чэзлесом в 1839 г. Грин и Гаусс, как и Томсон, центральную роль отводили функции  $V$ . Однако их чисто аналитические методы основывались на частичном интегрировании и квадратичных формах. Существенным новшеством Томсона был метод нахождения теорем по формальной аналогии между двумя физическими теориями. В своих рассуждениях он перемещался "назад и вперед" между двумя физическими теориями, перенося понятия и теоремы из одной

теории в другую. Отправная точка одной теории (закон Кулона), становилась новым результатом другой (распределение температуры точечных источников). Очевидное следствие физической картины одной теории (локальный перенос тепла Фурье) стало важнейшей теоремой другой (теорема о замещении поверхностей)<sup>98</sup>.

Аналогия Томсона предполагает, что электростатическое воздействие может быть непрерывным действием в среде между источниками, как и распространение тепла. Однако Томсон не сказал этого, и он не упомянул Фарадея. Для электрической плотности он использовал название "плотность электрической материи", которое относится к концепции флюида, а также "электрическая интенсивность", что повторяло мнение одного из его профессоров из Глазго о том, что электричество - это состояние тел. Такая либеральность, вероятно, свидетельствовала о недостатке твердости в вопросе о природе электричества. В любом случае, Томсон избегал физической сути аналогии между теплом и электричеством. Он даже не дал названия аналогу температуры - функции  $V$ .<sup>99</sup>

<sup>90</sup> Herschel 1832 :9-31.См. также Herivel. 1973; Smith and Wise 1989: 151-5; Crosland and Smith 1978; Grattan-Guinness 1985.

<sup>91</sup> см. также Smith and Wise 1989: 151-155.

<sup>92</sup> см. Также Smith and Wise 1989: 151-155.1989: 155-68; Wise 1981A: 23-32. О методе Фурье см. также Dhombres and Robert 1998: гл. 8

<sup>93</sup> Томсон, «Тетрадь естественной философии», 1839–40, цитируется в Smith and Wise 1989: 210. См. также там же: главы 1,2; п. 40 (по Николу).

<sup>94</sup> Thomson 1841a, 1841b; *ТМПП* 3: 296 (стихотворение); Thomson 1842. Cp. Smith and Wise 1989: 167, 203-204.

<sup>95</sup> Thomson 1842: № 3. # 4. Эта аналогия содержит то, что в современных учебниках называется «теорема Гаусса»: поток электрического поля через закрытую поверхность должен быть равен суммарному включенному заряду, поскольку соответствующий тепловой поток равен теплу, обеспечиваемому включенными источниками.

<sup>97</sup> Thomson 1842: ## 6-9. См. также Wise 1981a: 33-9; Smith and Wise 1989: 205-212.

<sup>98</sup> Green 1828; Часлес 1839; Гаусс 1839. См. также Thomson 1845b: 17-18n. О Green, см. Также GrattanGuinness 1995.

<sup>99</sup> Thomson 1842: # 5, # 7: Томсон, заметки о лекциях Мейкалхэма, 1839-40, цитируемых в Smith and Wise 1989, p. 210: "Магнетизм легкой тепловой энергии и т. д. называются невесомыми. Это неправильно, как мы их знаем, не как вещества, а как состояния тел". См. также Smith and Wise 1989: 208-209.

### 3.5.3 Открытие Фарадея

В 1843 году отношение Томсона как-то изменилось, как видно из его дневника:

*"...не могут ли гравитация и электрическое притяжение быть результатом действия смежных частиц, передаваемых от одной поверхности [равной  $V$ ] на другую. Будет ли притяжение шаров в эксперименте Кавендиша вообще зависеть от промежуточной среды?"*

"Смежные частицы" и "промежуточная среда" - это выражения Фарадея;

поверхности с равным  $V$  относятся к тепловой аналогии Томсона. Скорее всего, Томсон понял физические последствия этой аналогии, читая Фарадея. Тем не менее, ему *"очень не нравится способ [Фарадея] говорить о явлениях, ибо эту теорию нельзя назвать иначе"*.<sup>100</sup>

Томсон изменил свое мнение в Париже, когда рассказ Лиувилля о поздних волнениях Пуассона побудил его пересмотреть опровержение Фарадеем кулоновской электростатики. Разрабатывая математическую теорию влияния диэлектриков на электростатическое действие, он постепенно понял последовательность и точность идей Фарадея. Самое поразительное, что он обнаружил, что рассуждения Фарадея в терминах электрических силовых линий были похожи на его собственные рассуждения в терминах теплового потока:<sup>101</sup>

*"Все взгляды, выдвинутые Фарадеем и проиллюстрированные или продемонстрированные экспериментом, приводят к [моему] методу создания математической теории, и в том, что касается анализа, он, в большинстве общих положений, будет даже более простым, если это возможно, чем анализ Кулона [...]. Таким образом, Фарадей приходит к некоторым из наиболее важных общих теорем, которые по своей природе, казалось, никогда не будут восприняты иначе как математические истины."*

Например, продолжает Томсон, Фарадей знал, что трубки линий, везде касательных к электрической силе и соединяющих один проводник с другим, определяют равные и противоположные заряды на соответствующих участках поверхности проводников (рис. 3.20).

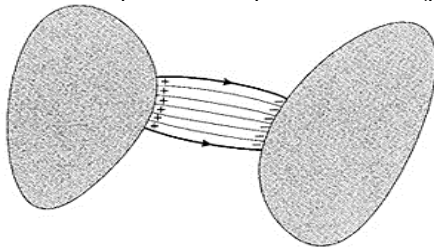


Рис. 3.20. Силовые линии и соответствующие поверхностные элементы двух проводников.

Для Фарадея теорема была непосредственным следствием определения электрического заряда в терминах появления или исчезновения силовых линий. Для Томсона она вытекала из сохранения теплового потока. Силовые линии Фарадея были точным аналогом линий теплового потока, везде перпендикулярных изотермическим поверхностям.<sup>102</sup>

На этом этапе аналогия Томсона с тепловым потоком уже не ограничивалась поиском новых математических теорем. Ее можно было использовать чтобы соединить две разные физические гипотезы о природе электричества, кулоновскую и фарадеевскую. В печати Томсон отказался выбирать между этими двумя гипотезами, поскольку ни один известный наблюдаемый механический эффект не мог их различить.<sup>103</sup>



Основной целью его исследования было показать, что одно из предполагаемых доказательств Фарадея непрерывного действия - наличие специфической индуктивной способности - может быть истолковано в терминах прямого действия на расстоянии.

Томсон показал, что вещественный диэлектрик можно рассматривать аналогично теории индуцированного магнетизма Пуассона. Пуассон, как и Кулон, представлял себе микроскопические проводящие ячейки (для магнитных флюидов), распределенные по массе железа. Прямой эффект внешней магнитной силы заключался в разделении флюидов в каждой ячейке. Затем возникающие диполи генерировали вторичные магнитные силы, которые накладывались на внешние. В результате возникал разрыв в чистой магнитной силе на поверхности магнитных тел: нормальная составляющая силы внутри тела составляла определенную долю от ее значения вне тела. Последний результат, который больше не зависел от микроскопических предположений, лег в основу теории диэлектрических эффектов Томсона. В электрическом случае поверхностный разрыв силы определяется удельной индуктивной способностью диэлектрика. Этот разрыв можно рассматривать как результат "воображаемого" поверхностного заряда, который должен быть включен в число источников электрической силы. В случае лейденской банки, заполненной материальным диэлектриком с индуктивной емкостью  $\epsilon$ , Томсон добавил потенциал, созданный воображаемыми поверхностными зарядами, к потенциалу реальных зарядов. Поверхностными зарядами к потенциалу реальных зарядов на проводниках, и показал, что для данного заряда банки ее потенциал в  $\epsilon$  раз меньше, чем он был бы в газообразном диэлектрике.<sup>104</sup>

Этот результат был необходим Томсону для объяснения экспериментов Фарадея по "разделению заряда" между идентичными лейденскими банками, наполненными различными диэлектриками. То, что Фарадей назвал "силой или напряжением", соответствует потенциалу, а разделение заряда соответствует выравниванию потенциалов внешних шариков банок. Томсон заключил:

*"Общепринятые представления о притяжении и отталкивании, осуществляемых на расстоянии, независимо от какой-либо промежуточной среды, вполне согласуются со всеми явлениями электрического воздействия, приведенными здесь"*<sup>105</sup>

и признал, что аналогично с тепловым потоком можно распространить на диэлектрики. Аналогом диэлектрика будет твердое тело с теплопроводностью в  $\epsilon$  раз больше, чем у окружающей среды. Это делало прерывность силы Пуассона следствием непрерывности потока -  $\epsilon \nabla \theta$  по поверхности твердого тела. Томсон указал эту точность только в сноске. В отличие от Фарадея или Максвелла, он не вводил особого

понятия потока для электростатики. Он ограничил умозрительное использование аналогий до минимума и старался избегать смысловых различий, не имевших известного эмпирического аналога.<sup>106</sup>

<sup>100</sup> Thomson, Кембриджский дневник: 24 февраля, 16-17 марта 1843 года, цитируется в Smith and Wise 1989: 203 213.

<sup>101</sup> Thomson 1845b: 29-30. См. также Smith and Wise 1989: 213-8.

<sup>102</sup> Thomson 1845b: 30.

<sup>103</sup> Thomson 1845b: 29.

<sup>104</sup> Thomson 1845b: 32-5. См. также Wise 1981: 44-49; Smith and Wise 1989: 223-226.

Оттавиано Моссотти позже развил ту же аналогию, более рабски и менее эффективно (Моссотти 1847, 1850).

<sup>105</sup> FER 1: # 1258; Томсон 1845b: 37.

<sup>106</sup> Thomson 1845b: 33n. См. также Wise 1981a: 50-51; Smith and Wise 1989: 228-229.

### 3.5.4 Физический потенциал

Анализируя эксперименты Фарадея по изучению индуктивной способности, Томсон обнаружил, что "сила или напряжение", измеренная Фарадеем с помощью шарика и кулоновских весов, была ничем иным, как потенциалом Грина. Это было очень важным открытием, поскольку до этого потенциал был абстрактным математическим понятием, не имеющим прямого практического значения.<sup>107</sup>

Другой абстракцией теории потенциала был интеграл  $1/2 \oint \rho V d\tau$ . Томсон узнал от Гаусса, что электричество на поверхности проводника находится в равновесии тогда и только тогда, когда этот интеграл минимален. В августе 1844 года он интерпретировал это условие в терминах принципа виртуальных скоростей д'Аламбера: для виртуальных перемещений  $\delta \mathbf{r}_i$  электрических частиц на поверхности, изменение дискретной варианта интеграла Гаусса имеет вид

$$\delta \sum_{ij} \frac{1}{2} \frac{q_i q_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} = -\frac{1}{2} \sum_{ij} q_i q_j \frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot (\delta \mathbf{r}_i - \delta \mathbf{r}_j)}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} = \sum_i \mathbf{f}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i, \quad (3.2)$$

который должен исчезнуть согласно Даламберту.<sup>108</sup>

Несколькими днями ранее Томсон получил письмо от своего брата Джеймса, инженера, касающееся эффективности паровых двигателей и "механического эффекта", который они могут произвести. Это выражение было у французских инженеров синонимом "работы" и означало высоту, на которую машина может поднять заданный вес. В случае гидравлических двигателей механический эффект возникал от падения воды. В случае идеального двигателя Карно, который Джеймс и Уильям часто обсуждали вместе, источником механического эффекта было падение тепла от высокой до низкой "интенсивности". Аналогично Уильям Томсон увидел, что интеграл Гаусса - это не что иное, как механический эффект, необходимый для получения распределения  $\rho$ .<sup>109</sup>

Примерно в это же время Томсон вычислял силу, действующую между двумя наэлектризованными сферами, в связи с электростатическими

экспериментами, с помощью которых Сноу Харрис пытался опровергнуть закон Кулона.<sup>110</sup> По аналогии с двигателем, выполняющим работу, Томсон рассудил, что изменение механической величины двух изолированных заряженных сфер во время их разделения измеряет работу, затраченную на это разделение. Следовательно, силу между двумя сферами можно рассчитать, взяв производную интеграла Гаусса по расстоянию между ними. Эта процедура была намного проще, чем прямое вычисление силы между поверхностными распределениями электричества<sup>111</sup>.

В своих экспериментах Сноу Харрис заземлил одну из сфер, а другую соединил с шаром заряженной лейденской банки. Таким образом, сила между сферами зависела от расстояния между ними, их радиуса и разности потенциалов, создаваемой банкой, что Томсон мог рассчитать. Томсон быстро понял возможность абсолютного измерения потенциалов.<sup>112</sup> Он был знаком с мемуарами Гаусса о геомагнетизме, в которых ввелось понятие абсолютного измерения. Кроме того, часть 1845 года он провел, работая в лаборатории французского чемпиона по точным измерениям Виктора Регно.<sup>113</sup>

Погруженный в многообразный контекст паровых двигателей, электростатических экспериментов и расчетов, геомагнитных измерений и измерений французского пара, Томсон придал физический смысл абстрактным понятиям французской электростатики. Все его новаторские идеи появились в записной книжке от 8 апреля 1845 года:<sup>114</sup>

*"Сегодня в лаборатории (Physique at Coll. De France, M. Regnault, prof.), у меня появилась идея, дающая механический эффект для производства любого заданного количества свободного электричества на проводящем или непроводящем теле [...] Это позволяет нам найти притяжение или отталкивание двух влияющих сфер, без двойных интегралов. Также теорема Гаусса о том, что  $\oint \rho V d\tau$  минимальна, когда  $V$  - константа, показывает, как двойной интеграл, возникающий, когда мы хотим выразить действие непосредственно, может быть преобразован в дифференциальный коэффициент простого интеграла по расстоянию между двумя сферами [...]. Это подтвердило мое решение начать экспериментальные исследования, если я когда-нибудь их проведу, с изучения абсолютной силы, статического электричества. До сих пор каждый экспериментатор сравнивал интенсивность [поверхностных зарядов] только по отклонениям своих электрометров. Они должны измеряться в фунтах на квадратный дюйм или в "атмосферах" [единицы измерения давления]".<sup>115</sup>*

В этом невероятно плотном высказывании мы находим зародыши энергетического анализа электростатических систем, энергетического определения силы и связанного с ним понятия абсолютного измерения.

Как заметил Гаусс, абсолютное измерение предполагает полную

вычислимость измерительного прибора в механических терминах. Томсон выполнил это требование с помощью инженерного понятия уравнивания механических величин и эффектов. В этом процессе разность потенциалов стала аналогом разности высот воды в гидравлических двигателях или разности температур в тепловых двигателях. В 1853 году Томсон определил потенциал непосредственно в терминах соответствующего механического эффекта:

*"Потенциал в любой точке по соседству или внутри наэлектризованного тела равен количеству работы, которая потребуетя для того, чтобы доставить единицу положительного электричества с бесконечного расстояния в эту точку, если бы данное распределение электричества оставалось неизменным".*<sup>116</sup>

<sup>107</sup> Thomson 1845b: 35.

<sup>108</sup> Thomson, «Журнал и исследовательская тетрадь»: 14 августа 1844 г., цит. в Smith and Wise 1989: 241.

<sup>109</sup> Джеймс Томсон Уильяму Томсону, 4 августа 1844 года, обсуждается в книге Smith and Wise 1989: 242-3. Thomson, записная книжка от 8 апреля 1845 года, цитата там же: 245.

<sup>110</sup> Thomson 1845b; Harris 1834. Сноу Харрис работал с двумя проводниками различной формы, один из которых был подвешен на весах и заземлен, а другой был закреплен и подключен к батарее или к большому электрифицированному проводнику. Сила притяжения оказалась пропорциональной квадрату заряда последнего проводника. Харрис сомневался, что полученные теории могут объяснить его закон (1834: 245). В ответ Whewell and Thomson (1845b: 18-21) утверждали, что его закон является следствием теории Кулона, поскольку заряд, индуцированный на заземленном теле, пропорционален заряду индуцирующего тела.

<sup>111</sup> Томсон, записная книжка от 8 апреля 1845 года. Цитируется в Smith and Wise 1989: 245; Thomson 1853c: 92-3. Томсон долго откладывал публикацию, вероятно, потому, что сначала хотел разработать метод электрических изображений (Thomson 1845a, 1848-50): см. также Smith and Wise 1989: 246-7.

<sup>112</sup> Для первого двухшарикового электрометра, см. Thomson 1853c: 96. В раннем наброске своего 1845b от 12 апреля 1845 года Томсон уже выразил силу электрометра Харриса в терминах разности потенциалов двух проводников: см. Smith and Wise 1989: 246, 251-2. Он отметил, что устройство Харриса не подходит для количественных измерений из-за отсутствия экранирования от индуктивных эффектов. Тем не менее, он мог легко представить улучшения, которые превратят устройство в абсолютный электрометр.

<sup>113</sup> Глава британского "магнитного крестового похода" полковник Сабина искал опыт Томсона с весны 1844 года: см. Smith and Wise 1989: 276-277. О лаборатории Томсона и Рено, см. там же: 106-108.

<sup>114</sup> Цитируется в Smith and Wise 1989: 245.

<sup>115</sup> Квадрат поверхностной плотности имеет размерность давления.

<sup>116</sup> Thomson 1853c: 87n; 1853a: 522n.

### 3.5.5 Абсолютная электрометрия

Решение Томсона начать экспериментальные исследования конкретизировалось после того, как в 1846 году он получил кафедру естественной философии в Глазго. Одним из первых его достижений в этой области стала разработка новых электрометров. В своей записке от апреля 1845 года Томсон намеревался *измерить "электрическую*

интенсивность", в современных терминах - поверхностный заряд проводников. Экспериментаторы обычно измеряли эту величину с помощью кулоновского "*plan d'epreuve*" или фарадеевского "*переносного шара*", приведенного в контакт с проводящей поверхностью, а затем с помощью электрометра. Однако представляется вероятным, что Томсон также имел в виду абсолютное измерение потенциалов. Он знал что электрометры Харриса, если их правильно усовершенствовать, будут измерять разность потенциалов, и он знал, что измерение поверхностного заряда может привести к косвенному измерению потенциала: в экспериментах Фарадея по определению удельной индуктивной емкости поверхностный заряд подключенного внешнего шара был пропорционален потенциалу внутренней проводящей сферы. Все последующие электрометры Томсона были предназначены для измерения потенциалов.<sup>117</sup>

Первым проектом Томсона был абсолютный электрометр, основанный на двух сферах Харриса. Вскоре он отдал предпочтение двум параллельным плоским дискам, которые создавали более мощные силы. В этом случае, как и рассчитывал Томсон в 1845 году, поверхностные заряды находятся в основном на обращенных сторонах дисков, и их плотность почти равна  $V/4\pi d$ , где  $V$  - разность потенциалов, а  $d$  - расстояние между сторонами. Суммарная сила притяжения между двумя дисками легко определяется как  $V^2 S/8\pi d^2$ , где  $S$  – площадь поверхности обращенных сторон.

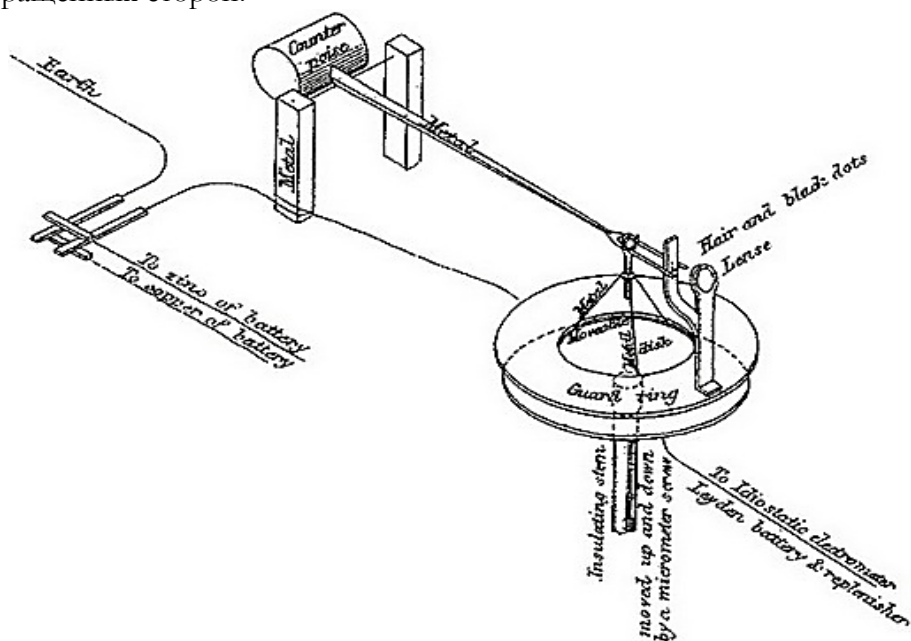


Рис. 3.21. Абсолютный электрометр Томсона (ТРЕМ: 280-281).

При создании своего устройства Томсон проявил веберовское терпение и тщательность. Его математические способности и практическое воображение позволили внести гениальные усовершенствования. Например, он придумал "защитное кольцо", окружающее подвижный диск и поддерживающее тот же потенциал, так что поле под подвижным диском оставалось однородным при больших значениях расстояния  $d$  (рис. 3.21).<sup>118</sup>

Существенным мотивом Томсона было определение отношения  $\epsilon$  электромагнитного и электростатического зарядов. Как он объяснил в 1853 году, электромагнитное значение данной электродвижущей силы можно сравнить со значением, измеренным абсолютным электрометром. В 1860 году он провел первое измерение такого рода с помощью батареи Даниэля и двухпластинчатого электрометра. Результат достаточно хорошо согласуется со значением  $\epsilon$ , которое Вебер и Кольрауш получили в 1856 году, измерив тот же электрический заряд с помощью кулоновских весов и электродинамометра. К тому времени знание  $\epsilon$  приобрело большое практическое значение, как мы увидим ниже.<sup>119</sup>

Теоретическая значимость этой константы также возрастала со временем. Согласно теории Максвелла 1862 года,  $\epsilon$  должна была быть равна скорости света. Несмотря на общую враждебность к этой теории, Томсон счел гипотезу заслуживающей проверки. В 1867 году он поставил перед своими студентами из Глазго задачу улучшить определение  $\epsilon$ , используя свой абсолютный электрометр и стандартное сопротивление известной абсолютной величины. Результат ( $2,82 \times 10^8$  м/с) не лучше согласуется с измерениями Фуко скорости света ( $2,98$  и  $3,08 \times 10^8$  м/с), чем старое значение Вебера и Кольрауша ( $3,11 \times 10^8$  м/с). Однако этот проект хорошо иллюстрировал растущую сложность абсолютной электрометрии Томсона.<sup>120</sup>

<sup>117</sup> О профессоре Томсоне см. Smith and Wise 1989: Ch. 5

<sup>118</sup> Thomson 1853c: 96 (построенный и проанализированный двухшариковый электрометр); 1845b: 19-20 (сила между двумя пластинами); 1853b: 553 и 1860a: 238 (описание двухпластинного электрометра, впервые представленного на встрече Глазго Британской ассоциации в 1855 году). Для истории и последующих улучшений см. Thomson 1867: 281-292. См. также Smith and Wise 1989: 250-252. Томсон также создал первые чувствительные электрометры, в том числе разделенное кольцо и квадрантный электрометр. См. там же: 694-697 и Hong 1994a: 284-285.

<sup>119</sup> Thomson 1853b: 553; Томсон 1860a. Обозначение Максвелла и Томсона для  $\epsilon$  было  $v$ . Константа  $C$  теории Вебера (которую Вебер обозначил  $\epsilon$ ) равна  $\sqrt{2}$  (см. Приложение 2). В 1855 году Томсон уже получил приблизительную оценку  $\epsilon$ , возвращаясь к результатам запаздывания в кабеле: см. Smith and Wise 1989: 456.

<sup>120</sup> VAR (1869): 434. Студенты из Глазго пропускали постоянный ток по сопротивлению известной абсолютной величины и электродинамический измеритель и измеряли потенциал на клеммах сопротивления с помощью абсолютного электрометра. См. Maxwell 1873a: # 772. На соревнованиях с Максвеллом по той же проблеме и возрастающей сложности соответствующих ресурсов, см. Schaffer 1995. О более

поздних методах и сходимости между  $c$  и скоростью света, см. также Rosa 1889.

### 3.5.6 Электродвижущая сила и механическое воздействие

В 1848 году Томсон распространил свои рассуждения о механическом эффекте на электродинамику. Сначала он рассмотрел

*"очень красивую теорему Неймана, согласно которой электродвижущая сила в проводнике, движущемся относительно магнита, равна производной по времени его электромагнитного потенциала".*

Томсон объявил:

*"Мне показалось, что очень простая априорная демонстрация теоремы может быть основана на аксиоме о том, что количество работы, затраченной на создание относительного движения, от которого зависит электромагнитная индукция, должно быть эквивалентно механическому эффекту, теряемому токами, индуцированными в проволоке".*

Томсон впервые определил механический эффект уменьшения тока путем следующих рассуждений.

*"Когда сила магнита умножается в  $n$  раз, в  $n$  раз увеличивается и индуцированный им ток, а электромагнитные силы действия этого тока и их механический эффект увеличиваются в  $n^2$  раз. Поэтому механический эффект уменьшения тока  $i$  за время  $dt$ , равен  $k i^2 dt$ , где  $k$  - константа, зависящая от схемы и от выбора единиц измерения. Теперь работа электромагнитных сил за это время равна  $i dP$ , где  $P$  обозначает потенциал единичного тока по отношению к магниту. Сбалансировав эту работу с уменьшением механического эффекта получим выражение  $(1/k) dP/dt$  для индуцированного тока, что соответствует закону потенциала Неймана".<sup>121</sup>*

Из мемуара Вебера об абсолютном измерении сопротивления (1850), Томсон понял, что его анализ ЭМ - индукции дает плодотворную альтернативу определениям Вебера. В абсолютных единицах Вебера ЭДС  $e$  в прямолинейном проводнике единичной длины, пересекающем под прямым углом силовые линии однородного магнитного поля единичной напряженности, равна скорости  $v$  проводника. Если этот проводник является единственной движущейся частью замкнутого контура, то в нем индуцируется ток, пропорциональный этой ЭДС. Электромагнитная сила, действующая на движущийся проводник, численно равна абсолютной электромагнитной мере тока  $i$ . Поэтому работа, необходимая в единицу времени для перемещения проводника, равна  $vi$ , или  $ei$  и согласно "принципу механического эффекта" должна быть равна механическому эффекту, потребляемому цепью. Для других видов источников механический эффект, производимый электродвижущей силой  $e$ , действующей на ток  $i$ , по-прежнему равен произведению  $ei$ , поскольку он не должен зависеть от природы источника. Напротив, Томсон предложил определять электродвижущие силы по механическому эффекту, который они производят на единицу тока.<sup>122</sup>

Эти соображения и более ранние размышления о потенциале можно рассматривать как электрическую грань продвижения Томсона к общей формулировке принципа энергии. В то же время они положили начало подведению физики под этот принцип, процесс, активизировавшийся в 1850-х годах под руководством Томсона, Гельмгольца и Ранкина. Понятие Томсона об абсолютном измерении сделало механический эффект - позже ставший "энергией" - мерой всех физических величин. Это несло на себе отпечаток инженерной культуры его брата Джеймса и предвосхитила определение сил в терминах энергетических функций, которое можно найти в "*Трактате по натуральной философии*" Томсона и Тэйта.<sup>123</sup>

<sup>121</sup> Thomson 1848b: 91. В то время Томсон еще не был убежден в кинетической природе тепла, что объясняет, почему он не отождествляет утраченный механический эффект с теплом Джоуля. Его рассуждения, аналогичные рассмотренным Гельмгольцем годом ранее (см. Главу 6), опускают самоиндукцию и предполагают, что внутренняя энергия системы магнитопровода не зависит от взаимного расположения магнита и цепи, что оказывается истинным (энергия поля в этом случае не меняется, потому что поля магнита и цепи ортогональны в пространстве Фурье). См. также Knudsen 1995.

<sup>122</sup> Thomson 1851 б. Томсон также предложил тепловое измерение абсолютного сопротивления.

<sup>123</sup> см. Smith and Wise 1989: 250. гл. II. О росте энергетической физики, см. Smith 1998

### **3.5.7 Трансатлантический телеграф и подразделения БА**

Практическая физика Томсона достигла впечатляющих успехов в подводной телеграфии. Примерно в 1850 году благодаря использованию гуттаперчи, превосходного изолятора, удалось проложить первые подземные и подводные телеграфные линии. Однако передача сигналов по таким линиям оказалась гораздо менее эффективной, чем по воздушным линиям. Обратившись за консультацией в компанию "*Electric Telegraph*", Фарадей провел эксперименты с новыми кабелями и в 1854 году опубликовал следующий диагноз. Однопроводный кабель действует как огромная лейденская банка, гуттаперча соответствует стеклу, поверхность медного провода - внутреннему покрытию, а морская вода или Земля - внешнему покрытию. Следовательно, (электростатическая) индукция в гуттаперче конкурировала с (электростатической) индукцией через провод, и разряд электричества занимал больше времени. Фарадей рассматривал это явление как сенсационное подтверждение своей идеи о том, что индукция, или диэлектрическая поляризация, является сущностью электричества и всегда предшествует проводимости.<sup>124</sup>

Из соображений Фарадея Томсон сохранил только идею о том, что необходимо учитывать электростатическую емкость кабеля. С уверенным чувством законных приближений он представил простые математические соотношения между непосредственно измеряемыми величинами и проигнорировал более глубокую природу процесса. Назвав  $C$  емкостью



на единицу длины провода,  $R$  - сопротивлением на единицу длины,  $V$  - электростатическим потенциалом, а  $i$  - током, он определил скорость изменения электрического заряда на элементе  $dx$  провода,  $Cdx\partial V/\partial t$ , равную уменьшению тока в этом элементе,  $-(\partial i/\partial x)dx$ . Использование закон Ома  $i = - (l/R) \partial V/\partial x$  приводит к уравнению диффузии:

$$RC (\partial V/\partial t) = \partial^2 V/\partial x^2 \quad (3.3)$$

Согласно решению Томсона для внезапного повышения потенциала в начале кабеля, "время, необходимое для достижения определенной доли максимальной силы тока на удаленном конце [кабеля длиной  $l$ ], будет пропорционально  $RCl^2$ ".<sup>125</sup>

Этот «закон квадратов» позволил Томсону предсказать эффективность передачи сигналов по длинным кабелям, зная характеристики более коротких кабелей. Вычислив емкость цилиндрического конденсатора по аналогии с потоком, он также мог указать, как минимизировать замедление. Такие теоретические знания были необходимы для проектируемого трансатлантического телеграфа. Томсон сделал больше. Он разработал и запатентовал высокоэффективную аппаратуру для излучения и приема сигналов. Он испытал различные компоненты кабеля в своей лаборатории. И он помог решить многочисленные трудности, возникшие при прокладке кабеля длиной 2000 миль по дну океана. Его методы удивили современных инженеров, привыкших к грубым эмпирическим процедурам. Тем не менее, вскоре он стал директором компании Electric Telegraph Company. Успех трансатлантического кабеля в 1866 году - после первого неудачного испытания в 1858 году - во многом был заслугой его советов. В качестве награды за этот крупный вклад в богатство Британской империи королева Виктория в ноябре того же года посвятила Томсона в рыцари.<sup>126</sup>

Участие Томсона в развитии британской телеграфии означало важный переход в отношениях между фундаментальной наукой и техникой. Благодаря его усилиям практические преимущества теоретических знаний стали очевидны, и точные измерения заменили прежние "правила большого пальца" британских инженеров. В последующие двадцать лет в нескольких академических институтах были созданы физические лаборатории, чтобы обучать томсоновским методам будущих инженеров и физиков. В 1861 году Томсон легко убедил Британскую ассоциацию содействия развитию науки (BAAS) создать комитет по стандартам электрического сопротивления. Точное измерение электрических величин имело большое коммерческое значение для телеграфной промышленности. Томсон ввел абсолютную систему электрических единиц, основанную на механических единицах работы, времени и длины.<sup>127</sup>

Комитет BAAS установил электромагнитную единицу сопротивления,

«омад», равной  $10^7$  м/с; измерил удельное сопротивление чистого серебра в этой единице, усовершенствовав метод Вебера; изготовил эталон серебряной проволоки с требуемым сопротивлением; и продал копии этого эталона по всей Британской империи. Когда в 1881 году в Париже состоялся первый международный конгресс по электрическим стандартам, Томсон выступал в качестве вице-президента и ввел значительную часть системы BAAS. Международные единицы были названы ом, вольт, фарад, кулон и ампер.<sup>128</sup>

Одной из основных обязанностей комитета BAAS было определение соотношения  $\epsilon$  между электромагнитной единицей и единицей электростатического заряда. Как знали Фарадей и Томсон, это соотношение было важно для анализа телеграфных кабелей, поскольку замедление сигналов зависело от сочетания электростатического эффекта (индуктивная емкость) с электродинамическим (омическое сопротивление). В уравнении Томсона (3.3) сопротивление  $R$  и емкость  $C$ , конечно, должны быть даны в одной и той же системе единиц. Однако сопротивление, естественно, измеряется в электромагнитных единицах, а емкость - в электростатических. Чтобы вычислить замедление  $RCI^2$ , Томсону нужно было знать коэффициент преобразования  $\epsilon$ . В 1855 году он сделал обратное, то есть использовал измерения замедления Фарадея для грубой (неопубликованной) оценки  $\epsilon$ . Позже, в 1860-х годах, со своими студентами в Глазго он измерил эту важную величину для комитета BAAS, как уже упоминалось<sup>129</sup>.

Подводя итог, можно сказать, что практические соображения сильно повлияли на работы Томсона по электричеству, как и на всю остальную физику. Это проявилось не только в его интересе к приборам, но и в его теоретическом подходе. Его концепция электростатического потенциала служила мостом между различными культурами, к которым он принадлежал. Она давала интересные теоремы для "Математического журнала" Лиувилля; она оправдывала электростатические манипуляции Фарадея; она интегрировала инженерное понятие механического эффекта; и она отвечала требованиям немецкого абсолютного измерения. Это понятие было точным, эффективным и конкретным, но при этом онтологически нейтральным. Теория электростатических флюидов Пуассона и рассуждения Фарадея о линиях электрической индукции могли быть переведены на язык потенциалов без потери эффективности.<sup>130</sup> Потенциал можно было измерить по его механическому эффекту, тогда как электрические флюиды или напряженность силовых линий оставались вне эмпирической досягаемости. Короче говоря, физический потенциал был образцом самых важных качеств Томсона: математической силы, универсальности, прагматизма и широты взглядов. Постепенно он стал незаменимым инструментом для любого, кто интересуется электричеством.<sup>131</sup>

- <sup>124</sup> Faraday 1854. Ср. Smith and Wise 1989: 446-7; Hunt 1991c. О ранней подводной телеграфии, см. также Bright 1898; Coates and Finn 1979; Smith and Wise 1989: гл. 19.
- <sup>125</sup> Томсон Стоксу. 28 октября 1854 года; Thomson 1855b. Whittaker 1951: 227-30; Smith and Wise 1989: 447-53. Томсон пренебрег электромагнитной индукцией и утечкой. Емкость действительно была основной причиной задержки для кабелей, которые он изучал. Более полное "уравнение телеграфии" впервые появилось у Хевисайда в 1876 году (без утечек), в 1881 году (с утечками).
- <sup>126</sup> см. также Smith and Wise 1989: 661-683.
- <sup>127</sup> О преподавании физики в лабораториях, ср. Gooday 1990. В комитете БААС. См. также Smith and Wise 1989: 684-90; Schaffer 1992; Smith 1998: гл. 13.
- <sup>128</sup> Smith and Wise 1989: 690-695; Hunt 1994. Для более тщательного анализа подразумеваемых социальных процессов. См. также Schaffer 1992. О конфликте между немецкими и британскими понятиями стандартов. См. также Olesko 1996.
- <sup>129</sup> Томсон - Эйри. 2 февраля 1855 г. (с от заторможенности). цитируется в Smith and Wise 1989: 456; Thomson 1860a; BAR 39 (1869): 434-8. См. также Smith and Wise 1989: 455-8, 694; Schaffer 1995.
- <sup>130</sup> См., например, Thomson 1860b: 254-258.
- <sup>131</sup> Томсон заменил потенциал более старые представления о напряженности в трех влиятельных текстах: Jenkin 1873, Maxwell 1873a, и Wiedemann 1874. Некоторые консервативные электрики боролись с этой эволюцией: см. Hong 1994a.

### **3.6 Магнитное поле Томсона**

#### **3.6.1 Напряженное тело**

Томсон преуспел в разработке онтологически нейтральных концепций, которые могли быть очень практичными для самых разных пользователей. Тем не менее, он не исключал более умозрительные представления об электричестве и магнетизме. Они могли предложить ценные аналогии и новые методы решения проблем, даже если их физический смысл был неопределенным. Со времени своей работы над диэлектриками. Томсон восхищался последовательностью теоретических взглядов Фарадея. Открытие магнитооптических вращений усилило его симпатию к концепции поля.

Фарадей считал, что электрические и магнитные силы распространяются благодаря напряжениям в промежуточной среде. Однако он не пытался объяснить эти напряжения с точки зрения конкретных механических деформаций. По его мнению, механика, особенно математическая динамика, не имела приоритета перед более широкими понятиями силы и мощности, на которых основывалась его физика. Томсон, шотландец по образованию, думал иначе. В его понимании напряжение можно было понять только по аналогии с напряженным упругим твердым телом. По счастливому совпадению, его друг Джордж Габриэль Стокс завершил изящное исследование упругости твердых тел во время открытия Фарадеем магнитооптического вращения. Исследование Стокса было основано на новом подходе к динамике сплошных сред, с помощью которого он вывел свое знаменитое уравнение вязких жидкостей. Пуассон и Навье уже получили

аналогичные уравнения, начав с лапласианской картины молекул, взаимодействующих под действием центральных сил. В соответствии с британской тенденцией иметь дело непосредственно с элементами континуума, Стокс *"исследовал природу наиболее общего мгновенного движения элемента жидкости"*. Разложив дифференциал скорости  $d\mathbf{v}$  на его симметричную и антисимметричную части (в ставшем уже классическим стиле), он обнаружил, что наиболее общее движение получается при наложении трех расширений или сокращений вокруг трех ортогональных осей (главных осей симметричной части  $d\mathbf{v}$ ) и поворота на угол  $(\nabla \times \mathbf{v})/2$ . Повороты не деформируют элемент. Растяжения и сжатия деформируют, и подразумевают три дополнительных давления (положительных или отрицательных) вдоль главных осей. Из этих замечаний Стокса вытекает система напряжений, действующих на произвольный элемент поверхности, и полученное уравнение движения<sup>132</sup>.

Эти рассуждения и их аналог для упругого твердого тела привели к кинематике сплошных сред, которая сыграла важную роль в полевой математике. В частности, выражения  $\partial v_x / \partial z - \partial v_z / \partial x$  и т.д., которые ранее использовались только для выражения условия существования потенциала, теперь указывали на локальное вращение или кручение среды, если  $\mathbf{v}$  означало скорость или перемещение. Максвелл имел в виду эту картину, когда в 1870 году ввел "curl" вектора. Так же поступил и Томсон в октябре 1846 года, когда описал три простых вида упругой деформации, аналогичных полям точечного заряда, магнитного диполя и элемента тока.<sup>133</sup>

Для смещения  $\mathbf{u}$  несжимаемого упругого твердого тела уравнения равновесия Стокса подразумевают, что  $\Delta \mathbf{u}$  должно быть градиентом (давления). Три следующие деформации удовлетворяют этому условию, а также условию несжимаемости ( $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ ):

$$\mathbf{u} = \mathbf{r}/r^3, \quad \mathbf{u} = (\mathbf{m} \times \mathbf{r})/r^3, \quad \mathbf{u} = id\mathbf{I}/r - 1/2 \nabla ((id\mathbf{I} \cdot \mathbf{r})/r) \quad (3.4)$$

Томсон отождествил первую деформацию с электрической силой единичного заряда, а curls второй и третьей деформаций - с магнитной силой, создаваемой соответственно магнитным моментом  $\mathbf{m}$  и элементом тока  $id\mathbf{I}$ . В магнитном случае его вдохновил эффект Фарадея, который предполагал вращательную деформацию среды. Так родился векторный потенциал, curl-ом которого является магнитная сила. Британская механическая аналогия породила эту концепцию на десять лет раньше, чем немецкий математический анализ.<sup>134</sup>

В письме к Фарадею Томсон определил границы своего исследования:

*"Я прилагаю статью, которую я упоминал вам как дающую аналогию для электрических и магнитных сил с деформацией, распространяющейся через упругое твердое тело. То, что я написал - лишь набросок математической аналогии. Я не рискнул даже намекнуть на возможность сделать ее основой*

*физической теории распространения электрических и магнитных сил, которая, если бы была создана, выразила бы в качестве необходимого результата связь между электрическими и магнитными силами.*

И снова Томсон уклонился от обязательств физического объяснения электрических и магнитных сил. И все же новая аналогия пошла немного дальше, чем аналогия с тепловым потоком. Последняя должна была предложить новые теоремы и восстановить некоторые геометрические особенности взглядов Фарадея, тогда как аналогия с деформацией предлагала "механическое представление электрических и магнитных сил", которое включало в себя понятие Фарадея о напряжениях в поле.<sup>135</sup> Она могла стать отправной точкой к более верным механическим аналогиям и в конечном итоге привести к "*физической теории распространения электрических и магнитных сил*". Это была первая легкая атака того, что Томсон позже назвал своим "эфирным алкоголизмом".<sup>136</sup>

<sup>132</sup> Stokes 1845a: 80. Конечно, Стокс использовал координаты Декарта, а не векторы.

<sup>133</sup> Maxwell 1870: 265; Thomson 1847a. О терминологии Максвелла см. также Crowe 1967: 117- 139.

<sup>134</sup> Thomson 1847a; О немецком векторном потенциале см. также Kirchhoff 1857b, обсуждается выше, стр. 38.

<sup>135</sup> Однако напряжения, описанные Томсоном, подразумевают напряжения, отличные от напряжений Фарадея, и они не дают правильного выражения для механических сил, действующих на заряды, магниты или токи.

<sup>136</sup> Томсон- Фарадею. 11 июня 1847 г., в Thomson, 1910, вып. 1: 203-204; Thomson 1847a: название; Лорд Кельвин Фицджеральду. 9 Апрель 1896 года, в Thompson 1910, Vol. 2: 1065. См. также Smith and Wise 1989: 256-260.

### 3.6.2 Диамагнитные силы

Томсон быстро вернулся к более трезвой физике. Его целью было вычисление механической силы  $\mathbf{f}$ , действующей на поляризуемые малые сферы в магнитном поле, в связи с недавними экспериментами Фарадея по диамагнетизму. Следуя Пуассону, Томсон заменил поляризованную сферу магнитным диполем  $\mathbf{M}$ . Тогда сила, действующая на сферу, равна сумме сил, действующих на два противоположных полюса. В символах мы имеем

$$\mathbf{f} = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H} = [\nabla(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H})]/2 = k \nabla(H^2)/2, \quad (3.5)$$

где второе и третье выражения следуют из невращательного характера внешней магнитной силы  $\mathbf{H}$  и из предположения о линейной поляризуемости  $k$  сферы. Следовательно, сфера стремится двигаться к областям с большей магнитной силой, если  $k$  положительно, и наоборот, если  $k$  отрицательно. Томсон пришел к выводу, что обратная поляризация полностью оправдывает закон Фарадея, согласно которому "часть [диамагнитного вещества], находясь под магнитным воздействием, стремится переместиться из более сильных в более слабые места или точки приложения силы".<sup>137</sup>

Томсон не стал размышлять о глубинном значении этого результата. Он не стал публично поддерживать мнение Фарадея о том, что этот эффект подтверждает физический характер магнитных силовых линий. В более позднем обсуждении того же эффекта, опубликованном в 1851 году, он отметил, что изменения  $\frac{1}{2} H^2$  представляют собой механический эффект, но не утверждал, что этот эффект (энергия) хранится в поле. Он принял терминологию поля Фарадея, но ввел ее лишь оперативным образом.<sup>138</sup>

### 3.6.3 Частная аналогия

В 1847 году Томсон попытался обобщить свою теорему о замене поверхности на магнитные силы. Одной из проблем, которую он исследовал, была следующая: есть ли такое распределение магнитной силы вне заданной замкнутой поверхности, чтобы нормальная составляющая силы  $\mathbf{H}$  непосредственно вне поверхности имела заданное значение (с нулевым интегралом, как того требует баланс северного и южного магнитного вещества)? Есть очевидный гидродинамический аналог этой проблемы, полученный отождествлением  $\mathbf{H}$  со скоростью идеальной несжимаемой жидкости (и обмена внутри и снаружи поверхности): есть ли невращательное движение массы жидкости, заключенной внутри замкнутой поверхности, движение которой задано? В обоих случаях математическим условием, определяющим  $\mathbf{H}$ , является то, что это должен быть градиент гармонической функции.<sup>139</sup>

Томсон использовал эту переформулировку магнитной проблемы, чтобы поставить вопрос перед Стоксом, экспертом по гидродинамике. Стокс сразу же дал положительный ответ. Параллельно Томсон обнаружил, что метод квадратичных форм Гаусса можно распространить на этот случай: решение существует, поскольку оно задается функцией  $H$ , для которой  $\int H^2 dt$  является минимальным при заданных граничных условиях. В гидродинамической задаче это означает, что кинетическая энергия невращательного движения минимальна. Томсон использовал это замечание для упрощения доказательства некоторых гидродинамических теорем.<sup>140</sup>

В более общем смысле Томсон нашел принцип минимума для всех существующих полезных теорем гидродинамики, теории тепла, электростатики и магнетизма. Эти проблемы допускают потенциал  $V$ , который удовлетворяет общему уравнению

$$\nabla \cdot (\alpha^2 \nabla V) = -4\pi\rho \quad (3.6)$$

Переменный параметр  $\alpha^2$  соответствует проводимости в теории тепла, диэлектрической постоянной в электростатике и проницаемости в случае магнетизма; в гидродинамике резкие изменения этого параметра могут быть использованы для моделирования границ жидкости. Это уравнение всегда имеет решение, показал Томсон, поскольку оно соответствует минимуму квадратичной формы

$$Q = \int (\alpha \nabla V - \nabla U / \alpha)^2 d\tau \quad (3.7)$$

где  $U$  - решение для  $\alpha = 1$  (которое уже известно)<sup>141</sup>.

Было бы заманчиво думать, что гидродинамическая аналогия заставила Томсона рассматривать  $1/2 H^2$  как реальное распределение энергии в магнитном поле. Однако он этого не сказал. В его глазах существенным преимуществом рассуждений о механическом эффекте было то, что они не зависели от внутреннего устройства физических систем. Они превращали любую систему в "черный ящик", двигатель с входом и выходом. Более того, Томсон не мог принять аналогию с жидкостью настолько серьезно, чтобы сделать  $\mathbf{H}$  линейной скоростью, поскольку это противоречило бы его интуиции эффекта Фарадея, согласно которой  $\mathbf{H}$  означало локальное искривление среды. И он еще не знал, как распространить аналогию на индуцированный магнетизм. По всем этим причинам он не обнаруживал гидродинамическую аналогию. Он опубликовал свои результаты либо как математические теоремы, либо как гидродинамические законы.<sup>142</sup>

Главный мемуар 1849 года Томсона о магнетизме был вполне позитивистским по тону. В нем он воздерживался от любых предположений о природе магнетизма и избегал как магнитных флюидов, так и амперовских токов. В основу своей теории он положил феноменологическое понятие элементарных магнитных моментов, а магнитную силу определил действием. Чтобы мысленно измерить магнитную силу внутри вещества магнита, он вырезал тонкую щель в направлении поляризации и вставил в нее пробный полюс. Магнитные заряды он вводил только в качестве математического пособия, определяя их как сходимость поляризации ( $-\nabla \cdot \mathbf{M}$ ). В частном порядке он также использовал эквивалентные токи, определяемые как  $\text{curl}$  намагниченности ( $\nabla \times \mathbf{M}$ ), но опубликовал их только в 1870-х годах (после того, как принял гипотезу Ампера).<sup>143</sup>

Основной задачей Томсона был геометрический анализ различных видов магнитной поляризации и возникающих магнитных полей. В этом контексте он ввел различие между соленоидальным и пластинчатым распределением. В первом случае магнит может быть разложен на бесконечно малые трубки ( $\sigma\omega\lambda\epsilon\nu$  по-гречески) с продольной поляризацией. Во втором случае магнит может быть разложен на пластинчатые листы с поперечной поляризацией. Соответствующие математические условия  $\nabla \cdot \mathbf{M} = 0$  и  $\nabla \times \mathbf{M} = 0$ . Конечно, в первом случае Томсон имел в виду несжимаемую жидкость и ее трубки потока. Но он низвел аналогию до упоминания в сноске.<sup>144</sup>

<sup>137</sup> Thomson 1847b: 493, 497 и Thomson 1850a; FER 3: # 2418. См. также Smith and Wise 1989: 261-262.

- <sup>138</sup> Thomson 1847b: 493. 497, и Thomson 850a; FER 3: #2418. См. Также Smith and Wise 1989: 261-2., Thomson 1851a: 475: там же: 467-468: "Общая магнитная сила в любой точке – это сила, которую N полюс единичного стержневого магнита будет испытывать от всех магнитов, оказываю на него ощутимое действие, если бы он не производил индуктивного действия ни на один магнит или другое тело. Любое пространство, в каждой точке которого существует конечная магнитная сила, называется "полем магнитной силы" [...]. "Линия силы" – это линия, проведенная через магнитное поле в направлении силы в каждой точке, через которую она проходит".
- <sup>139</sup> Записная книжка Томсона. 29 марта 1847 г. Цитируется в Smith and Wise 1989: 263-4; Томсон - Стоксу, 20 октября 1847 г., в Wilson 1990г.
- <sup>140</sup> Стокс Томсону. 10 апреля 1847 г. в Wilson 1990; Томсон Стоксу, 20 октября 1847 г; Thomson 1849. См. также Smith and Wise 1989: 263-2.
- <sup>141</sup> Thomson 1848с. См. также в Smith and Wise 1989: 271.
- <sup>142</sup> Thomson 1848с, 1849. Однако. Томсон опубликовал гидродинамическую аналогию в 1872a: 455-459. и обобщил его на индуцированный магнетизм в 1872a: 578-87 (магнитная «проницаемость» названа так по аналогии с проницаемостью пористой средой, в которой циркулирует жидкость: см. Thomson 1872a: 484).
- <sup>143</sup> Thomson 1849-50: 340. 361-2; Thomson 1872a: 424-5. См. также Smith and Wise 1989: 279-81. Томсон принял токи Ампера после анализа эффекта Фарадея в 1856 году (см. ниже): см. Thomson 1872a: 419n.
- <sup>144</sup> Thomson 1849-50:378-92.

### 3.6.4 Посредничество

Вследствие развития взглядов Фарадея на магнетизм, Томсон в итоге упустил важные аспекты аналогии с потоком. В письме, написанном в июне 1849 года, он объяснил Фарадею, почему вытянутое диамагнитное тело в однородном магнитном поле должно ориентироваться в направлении, параллельном магнитной силе, используя концепцию Фарадея о проводящей способности для линий силы. На собрании Британской ассоциации в 1852 году он показал красивые диаграммы силовых линий (рис. 3.22), которые он рассчитал по методу, ранее разработанному в рамках теории тепла. Он обратил внимание на удивительное сходство этих диаграмм с теми, которые Фарадей недавно демонстрировал в Королевском институте для объяснения своих взглядов на диамагнитное действие, и утверждал, что обосновал с помощью строгой математической аналогии такие выражения, как "проводящая способность для силовых линий". Он мог бы добавить, что его принцип минимума 1847 года (уравнение 3.7) можно интерпретировать как принцип наименьшего сопротивления, в соответствии с интуицией Фарадея: поток, соответствующий проводимости  $\alpha^2$ , действительно равен  $\alpha^2 \nabla V$ , тогда как поток для единицы проводимости равен  $\nabla U$ .<sup>145</sup>

Использование аналогии Томсоном было здесь очень похоже на его предыдущее использование аналогии с теплом для понимания электростатики Фарадея. Для любого магнитного явления он мог бы перевести объяснение в терминах элементарных поляризаций, действующих на расстоянии, в другое объяснение в терминах проводящей силы Фарадея для силовых линий. Там, где Фарадей видел



противоречие, он воспринимал точную математическую эквивалентность: *Все, что Тиндалл сделал при проверке Вебера [...], является простой иллюстрацией или проверкой заключения, в равной степени вытекающего из теории Фарадея или из произвольного предположения [...], что диамагнитный элемент испытывает обратный эффект (поляризацию) во всем своем веществе к тому, что испытал парамагнетик.*

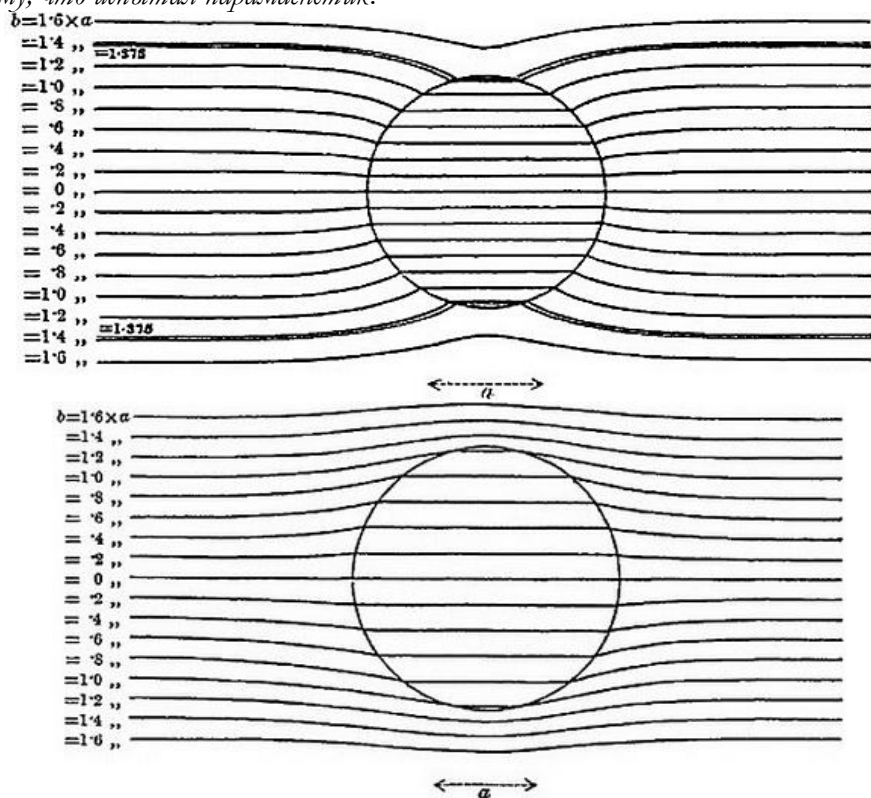


Рис. 3.22. Вычисленные Томсоном силовые линии вокруг парамагнетика (вверху) и диамагнитная (внизу) сфера (ТРЕМ: 490-491).

Совершенно свободно владея обоими языками, Томсон обратился к сторонникам противоположных взглядов в их собственных терминах. Фарадею он объяснил ориентацию диамагнитного стержня в однородном магнитном поле как эффект наименьшего сопротивления прохождению силовых линий; Тиндаллу он объяснил тот же эффект взаимным взаимодействием элементарных диамагнетиков.<sup>145</sup>

<sup>145</sup> Томсон - Фарадею. 19 июня 1849 года (или 1847 год; см. также Мудрый 1981: 59n), в Thompson 1910, том 1: 214; Thompson 1848a (равновесие диамагнитных тел); Thomson 1852 (ВА), 1847с (вычислены магнитные кривые), 1843 (тепловой поток); Thomson 1852: 515 (цитата).

<sup>146</sup> Томсон, тетрадь, 6 января 1858 г., воспроизведенная в Knudsen 1971: 50; см. Томсон Фарадею, 19 июня 1849 года, в Thompson 1910, Vol.1: 214; см. Томсон Тиндаллу, 12 марта 1855 г., в Thomson 1872a: 535-538.

### 3.6.5 Молекулярные вихри

Однако нейтралитет Томсона имел свои пределы. С тех пор как он обратился к кинетической теории тепла в 1850 году, он был более склонен к размышлениям об общей теории эфира и вещества. В 1856 году у него был серьезный рецидив «эфирной дипсомании». Причиной снова стал эффект Фарадея. Вращательная сила оптически активных веществ, таких как скипидар, может быть легко объяснена спиралевидной асимметрией молекул вещества: плоскость поляризации светового пучка должна затем вращаться в направлении, определяемом спиральностью (правая или левая) (Рис. 3.23 (а)).

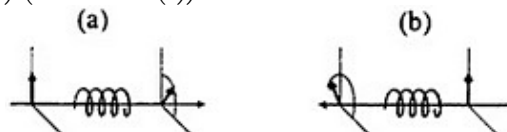


Рис. 3.23. Вращение плоскости поляризации света, проходящего через спираль за два противоположные направления распространения.

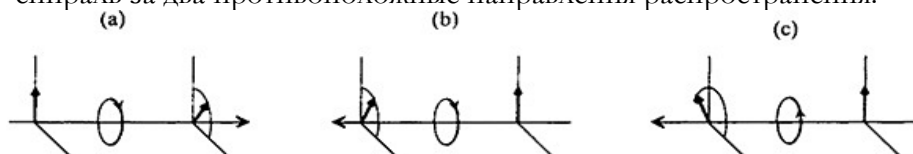


Рис. 3.24. Вращение плоскости поляризации света, проходящего через токовую петлю.

Случай (b) вытекает из (a) путем инвертирования направления распространения; (c) из (a) путем обращения времени. Это объяснение не может быть расширено до эффекта Фарадея, поскольку оно подразумевает, что оптическое вращение, если смотреть на источник света, не зависит от направления распространения (рис. 3.23 (б)). Как подчеркнул Фарадей, магнитоиндуцированное вращение было обратным, когда направление распространения света было обратным (рис. 3.24 (a), (б)). Следовательно, модификация среды, отвечающей за вращение, имела асимметрию ориентированной окружности. Фарадей представил некоторые микроскопические вращения в среде. Эти вращения могут быть статическими (поворот) или динамическими (непрерывное движение).<sup>147</sup>

В своем механическом представлении магнитных сил 1847 года Томсон заигрывал с первой возможностью. Тем не менее, к 1856 году он был убежден, что динамический вариант был единственным доступным. Используя общий аргумент и механическую модель, он объяснил, как микроскопическое вращательное движение среды может влиять на поляризацию света, и он утверждал, что не было никакого другого возможного объяснения свойств симметрии эффекта Фарадея. К сожалению, он не дал строгого доказательства этого важного момента. Широкое прочтение его неясного аргумента приводит к следующему

рассмотрению. При обращении времени (рис. 3.24 (в)) вращение поляризации луча света (по отношению к фиксированному наблюдателю) меняется на противоположное. Поэтому ответственное вращение в среде также должно быть обращено вспять, что доказывает его динамическую природу.<sup>148</sup>

В новом анализе Томсона эффект Фарадея продемонстрировал существование токов Ампера - которые он ранее отрицал - и это предполагало магнитную эксплуатацию кинетической теории тепла Ранкина. По словам шотландского инженера, тепло было не чем иным, как вращательным движением заполняющих пространство «молекулярных вихрей». Согласно Томсону, намагниченность может быть выравниванием вихрей, а общий момент импульса будет определять магнитный момент. Строго говоря, эти картины относятся только к веществу, нагретому и намагниченному. Однако у Томсона были причины распространить их на эфир.<sup>149</sup> В 1854 году он вывел нижний предел плотности эфира по механическому воздействию кубической мили солнечного света и предположил, что эфир является лишь «продолжением нашей атмосферы». В письме к Тиндаллу от марта 1855 года он утверждал, что, поскольку вакуум обладал «совершенно определенными механическими свойствами», он, вероятно, также обладал магнитными свойствами. Короче говоря, эфир был только разбавленной формой вещества. Соответственно, Томсон дополнил свое обсуждение эффекта Фарадея в 1856 году смутным, но смелым предложением.<sup>150</sup>

*"Объяснение всех явлений электромагнитного притяжения или отталкивания и электромагнитной индукции следует искать просто по инерции и давлению вещества [всего или нет], движения которого составляют тепло. Является ли это вещество электричеством или нет, является ли оно непрерывной жидкостью, пронизывающей пространство между молекулярными ядрами, или само по себе молекулярно сгруппировано: или все вещество непрерывно, а молекулярная неоднородность состоит в конечных вихревых или других относительных движениях смежных частей тело: невозможно решить, и, возможно, напрасно предположить, в нынешнем состоянии науки.*

В записной книжке 1858 г. Томсон размышлял об общей картине эфира и материи. Он представил себе универсальную жидкость с множеством вращающихся частиц, которая, возможно, в дальнейшем может быть уменьшена до постоянных вихрей. Гиросtatическая жесткость пятен или вихрей позволила бы идентифицировать поперечные колебания среды со светом. Тепло будет вращением вихрей. Электричество будет соответствовать менее нарушенным частям жидкости между пылинками. Тогда электрический ток изменил бы вращение вихрей, как веревка, натянутая между двумя сцепляющимися колесами. Эта связь объясняет эффект Джоуля и магнетизм, понимаемый как выравнивание осей вихрей. Магнитные притяжения возникают в результате центробежной силы вихрей

в сочетании с давлением жидкости. Электромагнитная индукция будет соответствовать хранению импульса в ориентированных вихревых движениях. Наконец, эффект Фарадея возник бы в результате влияния этих движений на поперечные колебания среды. Томсон закончил пророческим замечанием: «*Полная динамическая иллюстрация магнетизма и электромагнетизма кажется вовсе не трудной или далекой*».<sup>151</sup> Это была первая попытка Томсона понять всю физику в терминах жидких вихрей. Вскоре он нашел подтверждение в теоремах Гельмгольца о вихревом движении в идеальной несжимаемой жидкости. Многие годы он пытался смоделировать эфир и материю как массивы вихрей. Он, однако, не преследовал идею о вихревой иллюстрации электромагнетизма. Это было оставлено его наиболее одаренному поклоннику Джеймсу Клерку Максвеллу.<sup>152</sup>

<sup>147</sup> Thomson, 1856; *FER* 3. серия 19: ## 2231-2. См. также Knudsen 1976: 244-247, 273-276.

<sup>148</sup> Для более подробного анализа аргумента Томсона, см. Knudsen 1976.

<sup>149</sup> Thomson 1856: 571.

<sup>150</sup> Thomson, 1854: Томсон - Тиндаллу, 12 марта 1855 года, ТРЕМ: 535; Thomson, 1856: 571. См. Также Smith and Wise 1989: 397- 402 (эфир), 407-408 (эффект Фарадея).

<sup>151</sup> записная книжка Томсона. 6 января 1858 г., воспроизведено и прокомментировано в Кнудсен 1971 г. См. также Smith and Wise 1989: 410. Интерпретация индукции не содержится в записной книжке, но может быть выведена из приведенного выше замечания в Thomson 1856,

<sup>152</sup> см. Smith and Wise 1989: Гл. 12

### 3.7 Выводы

Фарадей и Томсон изобрели теорию поля: они ввели теоретические объекты в пространство между электрическими и магнитными источниками, и они разработали мощные методы для исследования свойств этих объектов. Они почувствовали сближение своих проектов и развили взаимное восхищение. Однако их интересы, методы и концепции были чрезвычайно разными. В главе I мы увидели, как первые электродинамические исследования Фарадея зависели от систематического экспериментального исследования «силы», исходящей от магнитных источников. Он отказался спекулировать на внутренней структуре источников и вместо этого сосредоточился на промежуточном пространстве, в котором наблюдаемые действия были расценены как проявление «магнитной силы». Его исследования связывали реальные и виртуальные действия и, таким образом, генерировали отображения силы, новых вызванных властью состояний материи и правил развития этих состояний. Ничего из этого не требовало продвинутой математики Томсона: достаточно обычного языка и интуитивной геометрии. Фактически, исследовательское безумие Фарадея отчасти вызвано его недоверием к устоявшимся математическим теориям. Эффективность его исследований во многом зависела от его качественной концепции *способности*.

В своих более поздних работах по электролизу, электростатике и диамагнетизму Фарадей расширил подход своих ранних исследований. В

каждом случае он собирал новые факты и формировал оригинальные взгляды на нематематическом языке. Его исключительное внимание к процессам в промежуточном пространстве или веществе между источниками привело к его открытию диэлектрических и диамагнитных эффектов. Он также проинструктировал его переопределение заряда и тока с точки зрения прекращения диэлектрической поляризации и его представления о проводящей мощности для магнитных силовых линий. С помощью этих полевых концепций он смог предсказать и объяснить эффекты, которые в полученных теориях нельзя было предвидеть без сложной математики. Приверженность Фарадея физическому существованию полевых образований развилась со временем. В начале своих экспериментальных исследований он иногда использовал формулировки и концепции, которые предполагали реальность силовых линий. Самым ранним примером является его концепция отталкивания между параллельными магнитными кривыми, предопределенная в статье о вращениях 1821 года.<sup>153</sup> Однако он долго сопротивлялся искушению закрыть вопрос. На публике он придерживался оперативного определения линий и не защищал их реальность, пока не собрал много благоприятных аргументов и не достиг возраста безусловной респектабельности.

Его аргументы середины 1830-х годов касались только влияния вещества на передачу силы: он полагал, что доказал, что электрическая сила от данной частицы вещества может достигать только ближайших частиц, причем более отдаленные действия косвенные, через цепи смежных частиц. Поскольку они ссылались на поляризацию в цепях, электрические силовые линии были реальными. Тем не менее, они также могли путешествовать через межмолекулярный вакуум, и в этом случае у Фарадея не было доказательств их физического характера.

Проблема передачи через вакуум стала более острой после открытия диамагнетизма. Что касается передачи магнитного воздействия, вакуум был промежуточным между диа- и парамагнитным веществом и, таким образом, казалось, находился в том же положении, что и вещество. Кроме того, доказательства действия смежных частиц плавно не переходили от электростатического к магнитному корпусу. И все же уверенность Фарадея в физической реальности магнитных силовых линий возросла, когда он умножил разнообразие их использования. Он мог «дотронуться» до них и «осветить» их, по крайней мере, в переносном смысле. Он мог изменить их курс с помощью лучших или худших «проводников». Таким образом, он имел в виду, что они существуют независимо от какой-либо весомой или невесомой среды. В его самых смелых динамических рассуждениях не было ничего, кроме силы, распределенной в пространстве с переменными качествами и интенсивностями.

Согласно широко распространенному заблуждению, с самого начала исследования Фарадея были мотивированы устранением прямого действия на расстоянии. В действительности, он рассматривал взаимодействие через

силовые линии как прямое действие на расстоянии, когда бы ни повлияло на передачу силы. Он ожидал, что взаимодействие займет время в таких случаях, но не потому, что была задействована тонкая среда или эфир. Причиной замедления была физическая природа силовых линий. Короче говоря, его понятие силы превзошло обычную дихотомию между прямым действием и действием через среду.

Согласно другому неверному истолкованию, исследования Фарадея с самого начала были направлены на подтверждение атомистского динамизма Босковича.<sup>154</sup> Следует признать, что «сила» и «сила» Фарадея были динамическими понятиями, которые отрицали различие между действием и агентом (ньютоновская сила и невесомая жидкость) и, в конечном счете, различие между силой и материей. Но нет никаких доказательств того, что Фарадей поддерживал определенную динамистическую философию, даже Босковича. Что касается его экспериментальной и концептуальной практики, то внимание к силе и силе означало лишь стремление выразить явления в терминах виртуальных действий в промежуточных пространствах. Фарадей свободно исследовал сферы действия и соотношения разных полномочия, и постепенно формируются его теоретические взгляды в этом процессе. Он приостановил свое мнение о физическом характере силовых линий, пока разведка не перестала его больше изучать.

У Фарадея не было математических или механических предубеждений, и его теория в основном отражала терпеливые экспериментальные исследования. Напротив, Томсон изначально был математиком с большим опытом аналитической механики. Его практическая склонность возникла не из-за знакомства с лабораторией, а из-за философии шотландского здравого смысла и взаимодействия с инженерами. Аналогия Томсона между электростатикой и тепловым потоком изначально предназначалась для переноса теорем. Неявно, это также обеспечило новые математические структуры в пространстве между проводниками. Однако Томсон не хотел брать на себя какую-либо конкретную физическую интерпретацию этих структур. Он только показал, как его аналогия может связать две возможные интерпретации, кулоновскую и фарадеевскую. Он вообще избегал метафорических понятий, которые не имели прямого эмпирического аналога. В значительной степени те же самые замечания применимы к его более поздним аналогиям между магнетизмом и гидродинамикой. Осознавая свою роль посредника в культурном комплексе математики, экспериментальной философии, инженерии и геофизики, Томсон создал многоцелевые концепции, которые превзошли культурные барьеры и индивидуальные теоретические предпочтения. Наиболее важная и успешная из этих концепций, физический потенциал, в равной степени принадлежала математической теории, электростатическому эксперименту, инженерным соображениям о механическом воздействии, гауссовой абсолютной измеримости и последующему промышленному проектированию вольтметров. Физики, знакомые с французской электростатикой, могут легко выразить потенциал с точки зрения плотности электрической жидкости.

Последователи взглядов Фарадея, если таковые имеются, могут рисовать линии, перпендикулярные эквипотенциальным поверхностям, и называть их силовыми линиями. Энергетики могут принять определение потенциала Томсона с точки зрения механического воздействия.

После его значительного вклада в термодинамику около 1850 года Томсон стал больше интересоваться предположениями об окончательной природе тепла, электричества и магнетизма. Он также начал поддерживать некоторые аспекты новой полевой физики Фарадея. Однако его подход все еще сильно отличался от подхода Фарадея. Он верил в механический эфир, а именно разбавленная форма материи, к которой применяется механика сплошных сред, и силовые линии Фарадея представляли собой локальные деформации или движения. Вдохновленный эффектом Фарадея, кинетической теорией газов Ранкина и гидродинамикой Стокса, он изобразил эфир как идеальную несжимаемую жидкость, в которой массивы молекулярных вихрей будут представлять магнитные поля. Все это было ориентировочно и показательно. И все же надежда Томсона сводить всю физику к движениям в конечной среде была хорошо закреплена. Он полагал, что динамическая иллюстрация электромагнетизма была под рукой.

<sup>153</sup> Точнее говоря, в 1821 году Фарадей говорил об отталкивании между одинаковыми магнитными силами в пространстве между двумя антипараллельными токами. См. выше. стр. 58.

<sup>154</sup> См. также Williams 1965 о диссертации и Spencer 1967 об опровержении. Levere 1968 отрицает интерес Дэви и Фарадея к умозрительной метафизике, но документирует их религиозную склонность к атомам центра силы.

## 4. Максвелл

### 4.1 Введение

*War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?*<sup>1</sup> Так спрашивает Больцман, цитируя Гете, в эпитафии к своим лекциям по теории Максвелла. В пантеоне физиков девятнадцатого века Максвелл занимает самое высокое место. Это признание вполне заслуженно. Максвелл написал уравнения поля, которые до сих пор составляют основу нашего понимания электромагнетизма. Он включил оптику в электромагнетизм, основал статистическую физику, создал новый стиль теоретической физики. Будучи первым директором Кавендишской лаборатории, он внес свой вклад в растущую утонченность британской экспериментальной физики.

Прославление, однако, имеет тенденцию затушевывать истинную природу достижений Максвелла. Эти знаки написал не бог, а человек, прошедший через два лучших британских университета и тщательно изучивший Фарадея и Томсона. Его электромагнетизм и его стиль физики, какими бы новаторскими они ни были, во многом обязаны Томсону, который уже преобразовал британскую физику еще более значительным образом и определил основные понятия и новые перспективы электромагнетизма. Героизация также искажает результаты

Максвелла. Его электродинамика отличалась от сегодняшней "теории Максвелла" в таких же основных аспектах, как различие между источником и полем. Она не была закрытой системой, и в ней содержались предложения для будущих электромагнитных исследований. В настоящей главе мы обратимся к этому более подлинному Максвеллу.

#### **4.1.1 Шотландец, отличник Кембриджа**

Джеймс Клерк Максвелл, как и Томсон, был выпускником Кембриджа, получившим первое образование в шотландском университете. Несмотря на семилетнюю разницу в возрасте, подходы этих двух людей к физике имели глубокое сходство. Они оба отводили геометрии центральную роль в выражении математических и физических идей. Следуя своим шотландским профессорами (Джону Николу - Томсон, Джеймсу Форбсу - Максвелл), они придерживались широкого взгляда на физику, включая в нее весь спектр экспериментальных предметов и технических, инженерных проблем. В то же время они разделяли математическую виртуозность, культивируемую в Кембриджском трипосе, и стремились к более глубокой теории, которую продвигали Джон Гершель и Уильям Уэвел. Проводя формальные аналогии между различными отраслями физики, они объединяли бэконовское разнообразие и ньютоновское единство.<sup>2</sup>

Однако между стилями исследований Томсона и Максвелла были ощутимые нюансы. Максвелл меньше, чем Томсон, занимался техническими, практическими вопросами, в то время как его интерес к геометрии был более устойчивым и разнообразным, чем у Томсона. Следуя художественным наклонностям семьи Клерков, Максвелл был очарован красотой геометрических фигур. Вслед за Уильямом Гамильтоном и Иммануилом Кантом он считал пространство и время необходимыми формами нашего понимания явлений. Его интересы и навыки в области философии и литературы были исключительно высоки для британского ученого. В отличие от Томсона, он сопровождал свое использование динамических аналогий сложными философскими комментариями. Он писал хорошие стихи и блестяще обсуждал моральную философию для общества Кембриджских Апостолов. Наконец, между Максвеллом и Томсоном было существенное психологическое различие. Будучи энтузиастом-вундеркиндом, Томсон изложил важные идеи в многочисленных кратких статьях, но редко находил время для их полного использования или для глобальных синтезов. Максвелл был медленнее и более зависим от инноваций других физиков, но он мог по несколько лет упорно работать над одной и той же темой и воздвигать *возвышенные памятники*.<sup>3</sup>

Максвелл впервые изучал электричество и магнетизм у Джеймса Форбса в Единбургском университете. Форбс придерживался эмпирического подхода и игнорировал французские или немецкие



математические теории флюидов. Максвелл все еще был свободен от теоретических предрассудков, когда в феврале 1854 года он спросил своего друга по переписке Уильяма Томсона:

*"Предположим, у человека есть общедоступные знания об экспериментах с электрическими зарядами и испытывает некоторую антипатию к "Электричеству Мерфи" [британская версия электростатики Пуассона], как он должен действовать в чтении и работе, чтобы получить некоторое представление о предмете, которое может быть полезным при дальнейшем чтении?"*

Ответ Томсона утерян, однако мы знаем, что Максвелл читал сначала Фарадея и Томсона, затем Ампера и Кирхгофа и, наконец, Неймана и Вебера. Так молодой Максвелл усвоил концепции поля Фарадея и проникся отвращением к континентальным теориям. Позже он объяснил Фарадею:

*"Именно потому, что я откладывал чтение об электричестве, пока не смог обойтись без предрассудков, мне кажется, я смог уловить некоторые из Ваших идей, такие как электротоническое состояние, действие смежных частей и т.д."*<sup>4</sup>

<sup>1</sup> «Ужели Бог мне эти знаки начертал?» из вводного монолога Фауста Гете. См. в Boltzmann 1891-1893 гт., вып. 1: 96,

<sup>2</sup> О биографии Максвелла, см Campbell and Garnett 1882; Everitt 1975. Об относительных эффектах шотландского и кембриджского фона Максвелла, см. Wilson 1985, Siegel 1991, и Harman 1998. О математическом трипосе Кембриджа, см. также Wilson 1982; Warwick [1999].

<sup>3</sup> О Максвелле и геометрии, см. Harman 1990: 2-3; Harman 1995a: 20-2, 28-9; Harman 1998: 13-15. О Максвелле, шотландском здравом смысле и Канте, см. Harman 1985b, 1998: 27-36, и Hendry 1986 г. Психологическое сравнение Максвелла и Томсона, см. Everitt 1975: 59 - 60.

<sup>4</sup> Максвелл Томсону, 20 февраля 1854 г., *SLPM* 1: 237; Максвелл Фарадею, 19 октября 1861 года, *SLPM* I: 688. Когда он писал Томсону 13 ноября 1854 года (*SLPM* 1: 262), Максвелл читал Ампера и Кирхгофа, но не Неймана и Вебера. Он прочитал Томсона 1849-1850 (математическая теория магнетизма) до своего письма в феврале 1854 года (см. Harman 1998: 72-73). Его интерес к электричеству был необычным для студента из Кембриджа, поскольку этот предмет ранее был исключен из учебного плана **Triplos**.

## 4.2 О силовых линиях Фарадея

### 4.2.1 Сетка поля

До конца 1854 года Максвелл сообщил Томсону о существенном прогрессе. Следуя Фарадею, он определил силовые линии как линии, везде касательные к силе, действующей на полюс или точечный заряд. Следуя Гауссу и Томсону, он также ввел поверхности, нормальные к этим линиям, то есть эквипотенциалы. Его первым нововведением было рассмотрение одновременно линий и поверхностей и регулирование расстояния между ними, чтобы обеспечить количественные геометрические обоснования (рис. 4.1). Несколько месяцев назад он использовал похожую пространственную пространственную сетку при

обсуждении складывания поверхностей, и все его предыдущие работы касались геометрии линий или поверхностей.<sup>5</sup>

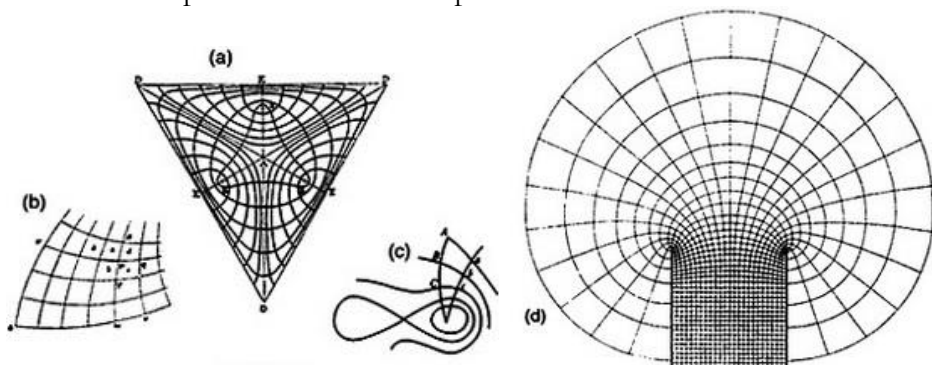


Рис. 4.1. Некоторые из геометрических сеток Максвелла:

- (a) линии сжатия и расширения стекла треугольник (Максвелл 1850: 68),
- (b) линии изгиба поверхности (Максвелл 1854b: 99),
- (c) электрический силовые линии и эквипотенциалы (Максвелл [1854]: 252, использовано с разрешения Cambridg University Press),
- (d) *то же* - для двухпластинчатого конденсатора (Максвелл 1873a: пл. 12)

В электрическом или магнитном контексте он требовал, чтобы разность потенциалов между двумя последовательными эквипотенциалами была постоянной. На данной эквипотенциальной поверхности он начертил две системы кривых, определяющих ячейки с размером, обратно пропорциональным интенсивности электрической или магнитной силы, а затем проследил прохождение трубок силы через эти ячейки. Эти трубки играли ту же роль, что и единичные силовые линии Фарадея.<sup>6</sup>

Максвелл выразил закон Фарадея об электромагнитной индукции в терминах трубок. В случае замкнутого контура *индуцированная электродвижущая сила зависит от уменьшения числа проходящих через него трубок. Говоря математически точным языком, индуцированная электродвижущая сила в контуре равна уменьшению поверхностного интеграла магнитной силы по любой поверхности, ограниченной контуром.* Максвелл сразу же применил этот закон к простому аналитическому случаю - индукции токов в проводящей сфере, вращающейся в магнитном поле Земли. Через двадцать лет после открытия электромагнитной индукции он стал первым теоретиком, который воспринял Фарадея настолько серьезно, что дал математическое выражение его закона индукции.<sup>7</sup>

Геометрическое представление Максвелла также помогло ему переформулировать связь между электрическим током и результирующим магнитным полем. В его представлении ток в замкнутой цепи определял ряд эквипотенциалов, ограниченных цепью (рис. 4.2). Число этих эквипотенциалов было естественной геометрической характеристикой, которая, очевидно, зависела от силы тока.<sup>8</sup>

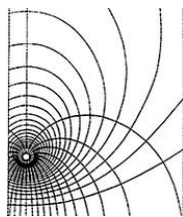


Рис. 4.2. Магнитные силовые линии и эквипотенциальные поверхности кругового тока, в полуплоскости, ограниченной осью круга (Максвелл 1873а: пластина 18).

Оно также имело энергетическое значение, как работа, совершаемая единичным магнитным полюсом на кривой  $\gamma$ , охватывающей контур.

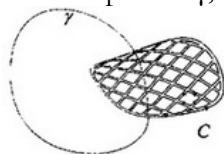


Рис. 4.3. Амперова сеть и взаимно охватывающие кривые для первого доказательства Максвеллом теоремы о магнитной циркуляции.<sup>8\*</sup>

Чтобы определить это число, Максвелл прибег к амперовской эквивалентности между контуром  $C$  и сетью непрерывных петель (рис. 4.3) и рассуждал следующим образом.

Если удалить маленькую петлю контура с сетью из петель, охватывающую кривую  $\gamma$ , то оставшиеся петли будут эквивалентны двойному магнитному листу с отверстием на месте заштрихованной контура. Соответствующий потенциал был бы однозначным, и его полное изменение на  $\gamma$  было бы равно нулю. Следовательно, линейный интеграл магнитной силы, или число эквипотенциалов, зависит только от тока, циркулирующего в контуре с сетью из петель, который равен току в  $C$ .<sup>9</sup> Максвелл с гауссовым взглядом на топологические отношения настаивал на том, что кривая интегрирования и кривая тока должны охватывать друг друга.

В общем случае *линейный интеграл магнитной силы на любой замкнутой кривой измеряется суммой интенсивностей охватывающих токов*.<sup>10</sup>

Максвелл был первым, кто изложил этот результат, который неправильно называют законом (или теоремой) Ампера.<sup>11</sup> Вместе с законом индукции он лег в основу его собственной теории магнетизма поля. Уильям Томсон, без сомнения, знал об этих двух законах,<sup>12</sup> однако в его работах они не были явными, центральными утверждениями. Начав с теории действия на расстоянии и энергетических соображений, он придал центральное значение потенциальной концепции. Напротив, Максвелл начинал с силовых линий Фарадея и выражал основные законы непосредственно через поле силы. Он рассматривал эквипотенциалы как производные конструкции, определяемые как поверхности,

ортогональные силовым линиям, хотя они сыграли роль в его выводе закона Ампера и в обсуждении энергии поля.

- <sup>5</sup> Максвелл Томсону, 13 ноября 1854 г., *SLPM* 1: 258; Maxwell [1854a]: 252. Максвелл знал о теории намагниченности Томсона (1849-50), которая ввела пластинчатый и трубчатый анализ распределений магнетизма в магнитах. В моей реконструкции я предполагаю, что у Максвелла была сетка линии поверхности, прежде чем он рассмотрел связь между током и магнитной силой. Однако существенным моментом является то, что он одновременно рассмотрел потенциальную теорию магнетизма и силовые линии Фарадея.
- <sup>6</sup> Первоначально Максвелл говорил о поляризационных линиях вместо силовых трубок. О происхождении и значении "силовых линий Фарадея" я нашел много вдохновения в проницательной статье Нортон Уайза о "взаимных объятиях" (Wise 1979). Особенно важны его комментарии к полемому геометрическому методу Максвелла и роли различия интенсивности/количества.
- <sup>7</sup> Максвелл - Томсону. 13 ноября 1854 года, *SLPM* 1: 260; там же: 260-261 и Maxwell 1862: 226-229 для вращающейся сферы. На этом этапе Максвелл еще не делал различия между силой и потоком (интенсивностью и количеством). Он использовал термин "поляризация" (который я заменил "магнитной силой"), "чтобы выразить тот факт, что в точке пространства южный полюс небольшого магнита притягивается в определенном направлении с определенной силой" (*SLPM* 1: 256).
- <sup>8</sup> Это число четко определено для правильного выбора потенциальной единицы.
- <sup>8\*</sup> см. также [https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема\\_о\\_циркуляции\\_магнитного\\_поля](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_о_циркуляции_магнитного_поля)
- <sup>9</sup> Числовой коэффициент определяется путем рассмотрения конкретного случая, например, окружности и ее оси, как кривую, замкнутую на себя
- <sup>10</sup> Максвелл Томсону. 13 ноября 1854 года. *SLPM* 1: 256-7. Максвелл также сформулировал другую теорему: **интеграл магнитной силы по поверхности, ограниченной контуром, зависит только от интенсивности тока (Максвелл должен был добавить и от формы кривизны, ), а не от формы поверхности** (*SLPM* 1: 257). Это вытекает из эквивалентности контура с двойным магнитным листом и из того факта, что интеграл магнитной силы, создаваемой магнитными массами, равен нулю по любой замкнутой поверхности, не содержащей масс, как Максвелл отметил немного ранее в своем письме. См. также Wise 1979 и Hendry 1986: 126-130
- <sup>11</sup> Я избегаю выражения "закон Ампера", которое еще больше вводит в заблуждение.
- <sup>12</sup> Томсон, безусловно, знал о законе Ампера, как следует из его обсуждения потенциала замкнутого тока (Thomson 1850b: 426n). Однако он не изложил его формально, предположительно потому, что истинная полевая формулировка электромагнетизма не стояла на его повестке дня. Что касается электромагнитной индукции, Томсон использовал закон Фарадея и дал его математическое выражение в конкретном случае (Thomson 1851 c: 484). Максвелл хорошо знал эти документы, поэтому он спросил Томсона, нет ли у него "всего черновика этой работы [Максвелла "О линиях силы Фарадея"]", лежащего в бумагах, не отнесенных к чему либо" (Максвелл Томсону. 13 сентября 1855 г. *SLPM* 1: 322).

#### 4.2.2. Аналогия с сопротивлением потоку

В том же письме к Томсону Максвелл применил свою геометрию линии-поверхности к токам проводимости: здесь линии относятся к электрическому движению, а поверхности - к равному напряжению. Он также предложил аналогичную трактовку индуцированного магнетизма, основываясь на понятии Фарадея о проводящей силе для магнитных

силовых линий. Однако в общем случае переменной проводимости Максвелл не знал, как доказать существование потенциала. В 1848 году Томсон опубликовал строгое, но загадочное доказательство, основанное на минимизации определенного положительного интеграла (см. стр. 160). Максвелл поинтересовался, нет ли у его корреспондента общей теории, основанной на этой теореме. Ответ утерян. Как бы то ни было, к весне 1855 года Максвелл развивал аналогию с потоком, которую Томсон так успешно применял к теоремам существования.

*"Вы запатентовали это понятие со всеми его приложениями ?, поскольку я намерен позаимствовать его на время", - писал он Томсону.*<sup>13</sup>

Полученная Максвеллом аналогия, опубликованная в первой части работы **О силовых линиях Фарадея**, отличалась от первоначальной аналогии Томсона с теплом по нескольким параметрам. Максвелл заменил тепло "воображаемой несжимаемой жидкостью", утверждая, что это обеспечит более конкретную аналогию, поскольку тепло больше не рассматривалось как вещество. Он рассмотрел наиболее общий случай неоднородной и анизотропной проводимости, в то время как Томсон ограничился однородным случаем. Самое главное, Максвелл включил в аналогию геометрию трубок и клеток и тем самым повысил ее интуитивную привлекательность и наглядность. Его целью было создать метод, который *"требует внимания и воображения, но не вычислений"*.<sup>14</sup>

Максвелл впервые описал равномерное движение несжимаемой и невесомой жидкости через сопротивляющуюся среду с источниками и стоками. Он разделил жидкость на трубки, в которых за единицу времени проходит одна единица объема. Конфигурация трубок полностью определяет поток, поскольку их направление соответствует направлению движения жидкости, а их обратное сечение определяет скорость. Максвелл также предположил, что сопротивление среды (пористого тела) пропорционально скорости жидкости. Поскольку движение равномерное и жидкость не имеет массы, это означает, что скорость пропорциональна градиенту давления, как тепловой поток Фурье пропорционален градиенту температуры.<sup>15</sup>

С помощью этой иллюстрации Максвелл доказал, по сути, те же теоремы, что доказал и Томсон на основе аналогии с тепловым потоком. Он не вполне достиг своей цели - доказать существование потенциала или давления в случае неоднородной среды.<sup>16</sup> Но его рассуждения, основанные на геометрии трубок потока, были более прямыми и яркими, чем у Томсона. Например, он получил теорему о замене поверхности следующим простым соображением: поток вне воображаемой замкнутой поверхности остается неизменным, если мы заменим жидкость внутри поверхности системой источников и стоков на поверхности, которые поддерживают поток в каждой пересекающейся трубке.<sup>17</sup>

Максвелл также ввел "поверхности равного давления", то есть разность давлений между двумя последовательными поверхностями равна единице. Он использовал ячейки, определяемые пересечением этих поверхностей с трубками потока, для выражения энергии, затрачиваемой жидкостью на преодоление сопротивления пористой среды. В данной ячейке единица массы жидкости испытывает уменьшение давления на одну единицу. Поэтому в каждой ячейке затрачивается одна единица энергии, а общее количество рассеянной энергии равно общему числу ячеек. Это количество должно быть равно работе, произведенной или полученной источниками и стками, которая представляет собой сумму произведений их скорости потока на давление, под которым они работают. Так Максвелл обосновал замену интеграла поля суммой по источникам, которую Гаусс и Томсон получили чисто аналитическим путем.<sup>18</sup>

Далее Максвелл объяснил аналогию воображаемого потока с различными областями электричества и магнетизма. Для электростатики трубки потока соответствуют линиям электрической индукции Фарадея, давление - потенциалу, а сопротивление среды - индуктивной способности диэлектрика. Для магнетизма трубки потока соответствуют магнитным силовым линиям Фарадея<sup>19</sup>, градиент давления - "*результатирующей силе магнетизма*", а сопротивление среды - обратной величине фарадеевской "*силы проводимости*" для силовых линий. Для электрокинетики трубки потока соответствуют линиям тока, давление - электростатическому потенциалу или напряжению, а сопротивление среды - электрическому сопротивлению.<sup>20</sup>

Общее число ячеек также имеет аналог в каждой из трех аналогий. Ясно, что оно равно электростатической энергии в электростатическом случае и теплоте Джоуля в электрокинетическом случае. Максвелл обсуждал только случай пара- и диамагнетизма, поскольку он оправдывал правило Фарадея о наименьшем сопротивлении прохождению силовых линий: общее число элементов, или сопротивление, преодолеваемое потоком, тогда равно общему магнитному потенциалу, из которого выводятся механические силы. Заметим, однако, что аналогия не могла помочь Максвеллу определить местонахождение магнитной энергии в поле: число ячеек жидкости (соответствующее впоследствии  $\int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \, d\tau$ ) измеряло не энергию, запасенную в пространстве, а энергию, рассеиваемую потоком.<sup>21</sup>

<sup>13</sup> Максвелл Томсону, 13 ноября 1854 г., *SLPM* 1: 259 -261; Максвелл Томсону, 15 мая 1855 г., *SLPM* I: 307. Максвелл также думал о том, чтобы связать работу электродинамических сил с числом ячеек в поле (*SLPM* 1: 259).

<sup>14</sup> Maxwell [1855]: 306; Максвелл Стоуксу, 22 февраля 1856 года, *SLMP* 1: 403; Maxwell 1856b: Часть 1. См. также Rosenfeld 1956: 1652-1655; Heimann 1970; Everitt 1975: 87- 93; Moyer 1978; Wise 1979; Hendry 1986: 133-138; Hannan 1990: 12-15; Siegel 1991: 30-33.

<sup>15</sup> Maxwell 1856b: 160-164.

<sup>16</sup> Он только доказал, что если потенциальный поток существует в гетерогенной среде, то он может рассматриваться как созданный воображаемой системой источников, распространяющихся в однородной среде (Maxwell 1856b: 168-171)

<sup>17</sup> Maxwell 1856b: 168 (№ 20).

<sup>18</sup> Maxwell 1856b: 161-2. 173-175. В электростатических символах обмен означает:  $\int \rho V d\tau = \int \epsilon E^2 d\tau$ .

<sup>19</sup> Это не совсем верно, потому что магнитные силовые линии Фарадея не имеют источника, в то время как трубки Максвелла имеют источники, соответствующие магнитным массам.

<sup>20</sup> Maxwell 1856b: 175-183. В проекте за декабрь 1855 года (SLPM I: 364) Максвелл не вводил электростатический потенциал как аналог давления. Он сделал в окончательном варианте, как следствие его чтения Кирхгофа 1849b

<sup>21</sup> Maxwell 1856b: 178-180. Максвелл также объединил эту аналогию с эквивалентностью между замкнутыми токами и двойными магнитными листами, чтобы вывести правило: контуры стремятся двигаться таким образом, чтобы максимизировать магнитную величину (поток) через них (там же: 185).

### 4.2.3 Интенсивность/количество

Более важным аспектом аналогии было различие между силой и потоком, подразумеваемое идеей сопротивления потоку. Максвелл знал, что для электрической проводимости и электростатической индукции Фарадей различал электрическую интенсивность и количество. Интенсивность означала напряжение, вызывающее ток или электрический эффект. Количество относится к силе электрического тока или к интегральному току, который может произвести заряженный конденсатор. Фарадей решительно отставив это использование, хотя оно и отличалось от теории Ампера и Томсона. Незадолго до разработки Максвеллом своих силовых линий он писал:

*"Идея интенсивности или силы преодоления сопротивления [индукции или проводимости] так же необходима для электричества, статического или токового, как идея давления для пара в котле или воздуха, проходящего через отверстия или трубы; и у нас должен быть язык, способный выразить эти условия и эти идеи".*

Максвелл использовал аналогию потока для систематизации этого различия.<sup>22</sup> В системе трубок и поверхностей Максвелла количество относится к числу трубок, пересекающих поверхность, а интенсивность - к числу поверхностей, пересекаемых данной трубкой. В терминах, напоминающих термины Фарадея, Максвелл писал:

*"Количество жидкости, проходящей через любую область в единицу времени, измеряет количество действия на этой области; а движущая сила, действующая на любой элемент, чтобы преодолеть сопротивление, представляет собой общую интенсивность действия внутри элемента."*

Это различие сразу же стало центральным для теории поля Максвелла. Существенным достоинством формальных аналогий, по Максвеллу, было предоставление классификации физико-математических величин, на

основе которой строилась теория.<sup>23</sup>

Первое использование Максвеллом различия между количеством и интенсивностью было неудачным. Он полагал, что определенной интенсивности должна соответствовать одна и только одна величина.

Поэтому количество, соответствующее разности электрических потенциалов, должно быть одинаковым в электростатике и в электрокинетике, а диэлектрик должен быть не чем иным, как очень плохим проводником, в котором количество электричества или ток слишком малы, чтобы их можно было обнаружить. Максвелл считал, что может найти поддержку этой идеи в утверждении Фарадея о том, что

*"изоляция и обычная проводимость не могут быть правильно разделены, когда мы исследуем их природу",*

тогда как Фарадей имел в виду только то, что проводимость всегда связана с нарастанием и спадом электростатической индукции.<sup>24</sup>

Максвелл более удачно использовал величины и интенсивности в дальнейших размышлениях об электромагнитной индукции. Он уже смог выразить закон Фарадея в математических терминах и научился у Гельмгольца, как вывести его с помощью энергетической аргументации. Тем не менее, он был удовлетворен формой закона Фарадея не больше, чем сам Фарадей:

*"Этот закон, хотя и является достаточно простым и общим, чтобы сделать понятными все явления индукции в замкнутых контурах, содержит несколько искусственное представление о числе линий, проходящих через контур и оказывающих на него физическое влияние. Было бы лучше, если бы мы могли избежать в формулировке закона, зависимости электродвижущей силы в проводнике зависела от внешних по отношению к проводнику силовых линий."*

Максвелл хотел выразить ЭДС как изменение "интенсивности", представляющей электротоническое состояние проводника. Различие между количеством и интенсивностью, производная символика и некоторые теоремы Томсона и Стокса дали ответ.<sup>25</sup>

В символах количество флюидов через элемент поверхности  $d\mathbf{S}$  равно  $\mathbf{a} \cdot d\mathbf{S}$ , где  $\mathbf{a}$  обозначает ток флюидов. Интенсивность (разность давлений) вдоль элемента длины  $d\mathbf{l}$  равна  $\boldsymbol{\alpha} \cdot d\mathbf{l}$ , где  $\boldsymbol{\alpha}$  обозначает движущую силу. Несжимаемость жидкости дает  $\nabla \cdot \mathbf{a} = 0$  (в отсутствие источников). Сопротивление среды  $k$  предполагает  $\boldsymbol{\alpha} = k\mathbf{a}$ . Чтобы уточнить магнитный и электрический случаи, Максвелл вставил суффиксы 1 и 2. Тогда закон Ампера, примененный к бесконечно малой замкнутой кривой, дает

$$\nabla \times \boldsymbol{\alpha}_1 = \mathbf{a}_2 \quad (\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}) \quad (4.1)$$

И наоборот, из этого соотношения следует закон Ампера, поскольку, как Максвелл узнал от Стокса,

$$\oint \boldsymbol{\alpha} \cdot d\mathbf{l} = \iint (\nabla \times \boldsymbol{\alpha}) \cdot d\mathbf{S}, \quad (4.2)$$



если первое интегрирование выполняется по кривой, ограничивающей поверхность второго.<sup>26</sup>

В той же записи закон Фарадея гласит:

$$\int \mathbf{a}_2 \cdot d\mathbf{l} = (d \iint \mathbf{a}_1 \cdot d\mathbf{S})/dt \quad (\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - (d \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S})) \quad (4.3)$$

Максвелл хотел переформулировать этот закон в терминах состояния самой цепи. От Томсона он знал, что любой бездивергентный вектор можно рассматривать как curl другого вектора. Поэтому он ввел такую интенсивность  $\alpha_0$ :<sup>27</sup>

$$\mathbf{a}_1 = \nabla \times \alpha_0 \quad (\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}). \quad (4.4)$$

Согласно теореме (4.2), линейный интеграл этой интенсивности равен магнитной величине, проходящей через кривую. Следовательно, индуцированная электродвижущая сила определяется как

Согласно теореме (4.2) линейный интеграл этой интенсивности равен магнитной величине, проходящей через кривую. Следовательно, индуцированная электродвижущая сила просто определяется

$$\mathbf{a}_2 = - \partial \alpha_0 / \partial t \quad (\mathbf{E} = - \partial \mathbf{A} / \partial t) \quad (4.5)$$

Максвелл назвал  $\alpha_0$  "электротонической интенсивностью", поскольку полагал что нашел математическое выражение давно искомого Фарадеем электротонического состояния.<sup>28</sup>

В целом, Максвелл утверждал, что достиг

*"математической основы способов мышления, указанных в экспериментальных исследованиях"*.

Его успех зависел от геометрического развертывания аналогии с сопротивляющимся потоком, за которым последовал более символический подход, в котором различие между количеством и интенсивностью играло решающую направляющую роль. В отличие от Томсона, Максвелл сопровождал свое использование аналогии философскими комментариями. Он объяснил, что "физические аналогии" предлагают

*"метод исследования, который позволяет уму на каждом шагу опираться на ясную физическую концепцию, не будучи приверженным какой-либо теории, основанной на физической науке, из которой эта концепция заимствована, так что он никогда не отвлекается от предмета в погоне за аналитическими тонкостями и не выходит за пределы истины из-за любимой гипотезы"*.

Теория Вебера, какой бы элегантной она ни была, зависела от сомнительной физической гипотезы. В отличие от нее, теория Максвелла не содержала "даже тени истинной физической теории; на самом деле, - продолжал Максвелл, - ее главное достоинство как временного инструмента исследования состоит в том, что она, даже внешне, ничего не объясняет".

Гидравлическая аналогия безразлично применялась к отдельным разделам науки об электричестве; она не учитывала механические силы между заряженными телами, токи или магниты; она игнорировала связь

между электричеством и магнетизмом. Несжимаемая жидкость была чисто воображаемой, а интенсивность электротока - чисто символической. Тем не менее, *"путем тщательного изучения законов упругого твердого тела и движения вязких жидкостей"* Максвелл надеялся *"открыть метод формирования механической концепции электротонического состояния, адаптированной к общим рассуждениям"*.<sup>29</sup>

<sup>22</sup> Faraday 1854: 519

<sup>23</sup> Maxwell 1856a: 371; Maxwell 1856b: 182, 189-92. Там же. На стр. 182 Максвелл сослался на различие Faraday 1854: 519. См. также в Wise 1979; Everitt 1975: 89-90; Moyer 1978; Hendry 1986: 136-142.

<sup>24</sup> Maxwell 1856b: 181., включая ссылку Faraday 1854: 513n

<sup>25</sup> Maxwell 1856a: 373. О ссылке Максвелла на электротоническое состояние Фарадея, см. также в Doncel and Lorenzo 1996.

<sup>26</sup> Maxwell 1856b: 203-5; там же: 206, с доказательством теоремы Стокса, основанной на эквивалентности между кривыми и сетью бесконечно малых петель. Эта теорема была впервые сформулирована Томсоном в письме к Стоксу от 2 июля 1850 года (Wilson 1990: 96-97; Stokes 1880-1905, Vol. 5: 320-321) и опубликована Стоксом в ходе конкурса за приз Смита 1854 года, который получил Максвелл.

<sup>27</sup> Когда есть магнитные массы (магниты), все не бездивергентно; Максвелл извлек бездивергентную часть способом, найденным в мемуаре Стокса о дифракции (Stokes 1849: 254-7): Maxwell 1856b: 200-201, 203-204.

<sup>28</sup> Maxwell 1856a: 374. В заключительной статье (1856b), вместо того чтобы принять закон Фарадея, Максвелл использовал несовершенный энергетический метод, вдохновленный "выведением" электромагнитной индукции Гельмгольца: см. Knudsen 1995.

<sup>29</sup> Maxwell 1856b: 207, 156, 207, 188. О реакции Максвелла на теорию Вебера см. также в письме Максвелла Томсону, 15 мая 1855 года. *SLPM* 1: 305-6. Об аналогиях в статье **"О линиях силы Фарадея"** см. Moyer 1978; Wise 1979, 1981a; Hendry 1986: 143-155; Siegel 1991: 30-33, 38-39. Об использовании Максвеллом аналогии в целом см. Turner 1955; Hesse 1961, 1966, 1973; Kargon 1969; Chalmers 1973a; Hendry 1986; Siegel 1991; Cat 1995.

### 4.3 О физических силовых линиях

#### 4.3.1 Молекулярные вихри

В мае 1857 года, прочитав "новые открытия" Томсона об эффекте Фарадея и молекулярных вихрях, Максвелл написал своему другу Сесилу Монро:

*"Сегодня был промозглый день, и я много над чем корпел, а во время этого письма, над вихревой теорией магнетизма и электричества, которая очень незрела, но имеет некоторые достоинства, поэтому я кручусь и кручусь"*.

В написанном несколько месяцев спустя письме к Томсону, он описал гиромангнитное устройство, которое подтвердило бы существование вихрей в намагниченном железе, если бы только вращающаяся жидкость обладала достаточной инерцией. Три года спустя в первой части работы "О физических линиях силы" он предложил теорию магнетизма, основанную на молекулярных вихрях.<sup>30</sup>

В своей работе 1856 года об эффекте Фарадея Томсон писал:

*"Объяснение всех явлений электромагнитного притяжения или отталкивания,*

*а также электромагнитной индукции, следует искать просто в инерции и давлении материи, движения которой представляют собой тепло".*

Затем он предположил, что тепло состоит из молекулярных вихрей Ранкина, а магнетизм - в выравнивании этих вихрей. В 1860 году Максвелл поддержал кинетическую теорию Клаузиуса и поэтому не мог следовать всем предположениям Томсона. Однако он не сомневался, что магнетизм связан с вихревым движением, как следствие анализа Томсоном эффекта Фарадея. И он смог точно понять, почему Томсон считал, что давление и инерция вращающейся материи определяют магнитные силы и электромагнитную индукцию.<sup>31</sup>

Если вдоль линий силы существуют вихри жидкости, рассуждал он, то центробежная сила вихрей подразумевает большее давление в направлениях, перпендикулярных силовым линиям, чем вдоль силовых линий. Это эквивалентно изотропному давлению в сочетании с напряжением вдоль силовых. Таким образом, Максвелл подтвердил предположение Фарадея о взаимном отталкивании силовых линий и натяжений вдоль них. Ему оставалось только убедиться, что эта система напряжений подразумевает известные магнитные притяжения и отталкивания.<sup>32</sup>

Если назвать  $p$  изотропным давлением,  $\mu$  - плотностью среды, а  $\mathbf{H}$  - вектором, задающим направление вихрей и среднюю линейную скорость жидкости, то в анахроничных тензорных обозначениях система напряжений примет вид

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu H_i H_j, \quad (4.6)$$

Из результирующего влияния этих напряжений на стороны бесконечно малого куба Максвелл вывел силу

$$f_i = \partial_j \sigma_{ij} = -\partial_i p + H_i \partial_j (\mu H_j) + \mu H_j (\partial_j H_i - \partial_i H_j) + \mu \partial_i (H^2/2), \quad (4.7)$$

или

$$\mathbf{f} = (\nabla \cdot \mu \mathbf{H}) \mathbf{H} + (\nabla \times \mathbf{H}) \times \mu \mathbf{H} + \mu \nabla (H^2/2) - \nabla p \quad (4.8)$$

Теперь Максвелл обосновал свою работу "О силовых линиях Фарадея". Отождествив  $\mathbf{H}$  и  $\mu \mathbf{H}$  с магнитной силой и количеством, определенным там, в последовательных членах уравнения (4.8) он узнал силу, действующую на воображаемые магнитные массы  $\nabla \cdot \mu \mathbf{H}$ , силу, действующую на ток  $\nabla \times \mathbf{H}$ , и силу, ответственную за тенденцию парамагнитных (диамагнитных) тел двигаться к местам с более сильной (слабой) магнитной силой. Таким образом, молекулярные вихри Томсона и возникающие напряжения объясняют все известные магнитные и электромагнитные силы с поразительной математической точностью.<sup>33</sup>

<sup>30</sup> Максвелл Фарадею, 9. 11 1857 года, *SLPM* 1: 552: "Но есть вопросы, касающиеся связи междумагнитноэлектричеством и возможным подтверждением физической природы магнитных силовых линий. Похоже, у профессора В. Томсона появилось несколько новых идей по этому вопросу"; Максвелл- Монро, 20. 05 1857 года, *MSLP* I: 507:

Максвелл Томсону, 30. 01. 1858 года, *SLPM* 1: 579-80. Cp Siegel 1991: 33-7; Siegel 1991: 33-37; Harman 1990: 30-31; Everitt 1975: 93-5; Everitt 1983: 132-134.

<sup>31</sup> Thomson 1856: 571. См. также Глава 3, с. 133.

<sup>32</sup> Maxwell 1861: Thomson 1856: 452-455. Cp Siegel 1991: 56-65.

<sup>33</sup> Maxwell 1861: 456-464. Обратите внимание, что "количество"  $\mu\mathbf{H}$  отличается от  $\mathbf{B}$  в *Трактате* Максвелла, когда есть магниты.

### 4.3.2 Холостые колеса

Затем Максвелл задался вопросом, почему распределение вихрей, для которых  $\nabla \times \mathbf{H}$  не исчезает, указывает на наличие электрического тока. Его ответ пришел с решением следующей загадки:

*Мне было очень трудно представить себе существование в среде вихрей, расположенных рядом друг с другом и вращающихся в одном направлении вокруг параллельных осей. Смежные части последовательных вихрей должны двигаться в противоположных направлениях; и трудно понять, как движение одной части среды может сосуществовать с противоположным движением части, находящейся в контакте с ней, и даже вызывать такое движение.*

Зная об электромагнитной индукции, Максвелл ожидал, что система вихрей будет действовать как связанный механизм, способный передавать электрическое движение от одного проводника к другому. Как и его отец и его шотландские профессора, он проявлял большой интерес к практической механике. Он прочитал несколько трактатов на эту тему и преподавал своим студентам зачатки кинематики с помощью зубчатых колес и кривошипов. Он, несомненно, был знаком с использованием "холостых колес" для передачи вращения между двумя зубчатыми колесами без изменения направления вращения. Соответственно, он несколько упростил свои вихри жидкости и ввел между ними слой мелких круглых ячеек, которые катились без скольжения (рис. 4.4(a)).<sup>34</sup>

Когда два смежных вихря не вращаются с одинаковой скоростью, частицы между ними должны сдвигаться в поперечном направлении (рис. 4.4(b)). Например, если вихри параллельны оси  $Oz$ , а скорость вращения  $H_z$  растет в направлении  $Ox$ , то сдвиг происходит в направлении  $Oy$  со скоростью  $-\partial_x H_z$ . В общем случае сдвиг дается величиной  $\nabla \times \mathbf{H}$ , которая равна электрическому току. Поэтому Максвелл отождествил поток частиц с электрическим током.<sup>35</sup>

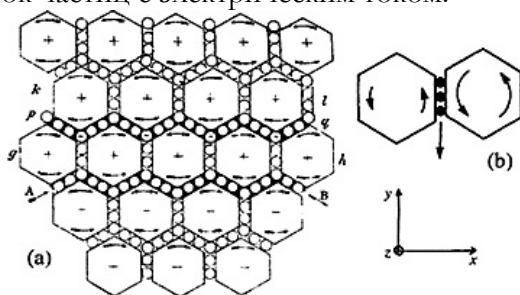


Рис. 4.4. Ячейки Максвелла и холостые колеса (Maxwell 1861: 488 для (a) с ошибками в стрелках из перепечатки MCP; Siegel 1991: 69 для (b))

После этого чисто кинематического анализа Максвелл рассмотрел динамику новой модели. В результате тангенциального действия  $\mathbf{T}$  частиц на ячейки возникает вращающий момент, действующий на каждую ячейку. Например, вращающий момент вокруг  $Oz$  пропорционален  $\partial_x T_y - \partial_y T_x$ , (см. рис. 4.5).

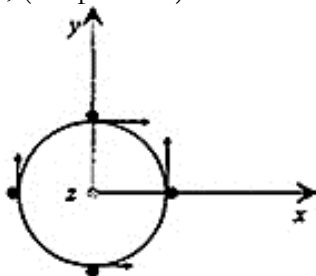


Рис. 4.5. Тангенциальные действия четырех холостых колес на ячейку

Согласно известной теореме динамики, этот крутящий момент должен быть равен производной по времени от углового момента (момента импульса) ячейки, который пропорционален  $\mu \mathbf{H}$ . Согласно равенству действия и реакции, сила  $\mathbf{T}$  должна быть равна и противоположна тангенциальному действию ячейки на частицы. Максвелл интерпретировал последнее действие как электродвижущую силу  $\mathbf{E}$  магнитного происхождения, действующую на ток. В итоге оказалось, что  $\text{curl } \mathbf{E}$  пропорционален производной по времени от  $\mu \mathbf{H}$ . Её знак определяется из условия, что работа силы  $\mathbf{E}$  над частицами в целом должна быть равна уменьшению кинетической энергии ячеек. Окончательное уравнение движения в соответствии с более ранним выражением Максвеллом закона индукции Фарадея имеет вид <sup>36</sup>

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mu \mathbf{H} / \partial t \quad (4.9)$$

Максвелл сопровождал свой вывод фундаментальных уравнений поля интуитивным объяснением электромагнитной индукции. Рассмотрим два проводящих контура, разделенных изолятором, и пусть ток в один из контуров. Соответствующий поток частиц вызывает вращение ячеек непосредственно за пределами проводника. Поскольку частицы не могут циркулировать в изоляторе, они передают вращение следующему слою клеток, и так далее, пока не будет достигнута поверхность второго проводящего контура. На этой поверхности частицы снова могут циркулировать. Если бы не было электрического сопротивления, они бы циркулировали вечно, а клетки внутри проводника оставались бы в покое. В реальных проводниках сила трения постепенно сдерживает циркуляцию частиц, и ячейки проводника приходят во вращение. Следовательно, индуцированный ток является лишь временным, а магнитное поле во втором проводнике вскоре становится таким же, каким оно было бы в изоляторе.<sup>37</sup>

С помощью своей замечательной модели Максвелл показал возможность сведения электромагнитных действий к сопряженным механическим воздействиям. Он опубликовал свои рассуждения весной 1861 года с несколькими комментариями о неуклюжести модели и о своем незнании истинной природы электричества. В то время он, похоже, не предполагал никакого расширения модели. Очевидное ограничение на замкнутые токи не могло его сильно беспокоить, поскольку электродинамические свойства незамкнутых токов были экспериментально недоступны.<sup>38</sup>

<sup>34</sup> Maxwell 1861: 468. Максвелл посещал лекции Роберта Уиллиса о механизме: ср. Maxwell Джону Клерку Максвеллу, 12 ноября 1855 года, *SLPM* 1: 333; и он прочитал несколько книг на эту тему, в том числе «Элементы механизма» Гудеа и «Прикладная механика» Ранкина, на которые он ссылался в Maxwell 1861: 469n, 458n. Учение Максвелла о кинематике, ср. Максвелл Уильяму Томсону, 30 января 1858 г., *SLPM* 1: 580. О кинематике вихревой модели, см. Siegel 1991: 65-69.

<sup>35</sup> Maxwell 1861: 469-471.

<sup>36</sup> Maxwell 1861: 472-476. Вместо использования теоремы об угловом моменте Максвелл использовал несовершенные энергетические рассуждения (см. Darrigol 1993b: примечание 47). На стр. 479-482 он рассматривал случай с движущимся проводником (см. Darrigol 1993b: 277-279).

<sup>37</sup> Maxwell 1861: 477-478. См. также Everitt 1975: 96-97.

<sup>38</sup> см. Siegel 1991: 75-77; Bromberg 1967: 227; Harman 1970: 191; Everitt 1975: 98-99.

### 4.3.3 Электростатика и свет!

Через несколько месяцев Максвелл понял, что упругость вихрей, необходимая для их механической связи, дает возможность связать электродинамику с оптикой и электростатикой. Возможно, поперечная вибрация вещества ячеек может представлять свет. Возможно, упругая податливость клеток под давлением частиц могла бы представлять диэлектрическую поляризацию. В частности, Максвелл представил, что тангенциальное воздействие частиц на ячейки, которое по третьему закону Ньютона противоположно электродвижущей силе, вызывает упругую деформацию, как показано на рис. 4.6.

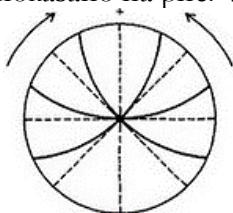


Рис. 4.6. Тангенциальное искажение сферической ячейки (Максвелл Фарадею, 19 октября 1861 *SLPM* 1: 684)

Вследствие этой деформации частицы, контактирующие с ячейками, смещаются в направлении, противоположном электродвижущей силе. Называя  $\delta$  средним смещением, мы имеем

$$\delta = -\epsilon E, \quad (4.10)$$

где  $\epsilon$  - константа, зависящая от упругих постоянных и от формы ячеек.

Кинематическая связь между потоком частиц и вращением ячеек имеет вид:

$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{H} + \partial \boldsymbol{\delta} / \partial t \quad (4.11)$$

Следовательно, дивергенция тока

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \partial \nabla \cdot \boldsymbol{\delta} / \partial t \quad (4.12)$$

Это уравнение согласуется с сохранением электричества, если плотность заряда дана в виде

$$\rho = -\nabla \cdot \boldsymbol{\delta}. \quad (4.13)$$

Хотя Максвелл прямо не говорит об этом, мы можем заметить, что  $\rho$  также представляет собой избыток частиц, возникающий, как правило, на границе между проводником и непроводником.<sup>39</sup>

Затем Максвелл приступил к выведению обычных электростатических сил. Для этого он рассмотрел упругую энергию среды.

$$U = \frac{1}{2} \int (-\mathbf{E}) \cdot \boldsymbol{\delta} d\tau = \frac{1}{2} \int \varepsilon \mathbf{E}^2 d\tau, \quad (4.14)$$

вычислил ее для двух точечных зарядов  $q$  и  $q'$  и вывел эту величину в зависимости от расстояния  $d$  между зарядами. Результат,  $qq'/4\pi\epsilon d^2$ , соответствовал закону Кулона и дал значение абсолютной электростатической единицы электрического заряда как  $(4\pi\epsilon_0)^{1/2}$  (индекс 0 означает вакуум). Следовательно, отношение электромагнитной и электростатической единиц заряда должно составлять  $(\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$ <sup>40</sup>

На этом этапе у Максвелла была последовательная механическая модель, объединяющая электростатику и электродинамику, и он мог написать соответствующую систему уравнений поля, которые теперь называются "уравнениями Максвелла". Это еще не все. Он рассмотрел поперечные волны в упругой среде. Их скорость равна  $(k/m)^{1/2}$ , если  $k$  обозначает поперечную упругость, а  $m$  - плотность среды. Константа  $k$  обратно пропорциональна  $\epsilon$ , а  $m$  пропорциональна  $\mu$ . Чтобы определить коэффициенты пропорциональности, Максвелл предположил, что клетки сферические и что их упругость обусловлена силами между парами молекул. Он нашел  $k = 1/4\pi^2\epsilon$ , а  $m = \mu/4\pi^2$ . Тогда скорость поперечных волн в вакууме должна была быть равна отношению  $c$ <sup>41</sup>

Сравнивая значение скорости света, полученное Физо, и значение  $c$ , полученное Вебером и Кольраушем, Максвелл нашел согласие в пределах 1% и заключил:

*"Мы едва ли можем избежать вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений".*

Таким же образом Максвелл объяснил странную близость электромагнитной постоянной  $\epsilon$  к скорости света и осуществил мечту Фарадея об объединении оптики и электромагнетизма. Однако качество численного согласия было случайным. Как отметил Duhem много лет спустя, Максвелл упустил из виду коэффициент 2 в поперечной

упругости вещества ячеек. В любом случае, ячейки не могли быть сферическими. Более того, измерения Вебера и Кольрауша и Физо позже оказались ошибочными на 3%. Что действительно было у Максвелла, так это грубая магнитомеханическая теория света, основанная на упругости вещества, вращение которого представляло собой магнитное поле.<sup>42</sup>

В последней части своих мемуаров Максвелл вернулся к тому самому явлению, которое вдохновило его модель вихря, - к эффекту Фарадея. Вращение ячеек предполагало вращение поляризации света в том же направлении на величину, пропорциональную радиусу ячеек. Наблюдения Фарадея можно было бы объяснить, если бы ячейки были намного меньше в вакууме, чем в прозрачном веществе, и если бы их размер зависел от вида вещества. Однако модель Максвелла предполагала, что оптическое вращение всегда должно происходить в направлении, определяемом магнитным полем, тогда как Эмиль Верде недавно наблюдал противоположное вращение для растворов солей железа. Максвелл вкратце предположил, что правильное сочетание его ячейистой модели с молекулярными токами Вебера объяснит эту аномалию.<sup>43</sup>

<sup>39</sup> Maxwell 1862: 489-96. Подробный анализ работы модели см. в Boltzmann 1898 и Siegel 1986. 1991: 77-119. Большинство других комментаторов неправильно понимали механику модели и рассматривали отрицательный знак Максвелла в связи со смещением и электродвижущей силой как ошибку. Зигель показывает, как модель учитывает основные электростатические эффекты. Некоторые фразы Максвелла наводят на мысль, что он хотел интерпретировать  $\delta$  как поляризацию в смысле Пуассона-Моссотти. Однако в изоляторе смещение частиц из-за деформации ячеек должно точно компенсироваться разным вращением этих ячеек так, что бы суммарный ток был  $j$  равен нулю. По утверждению Больцмана и Зигеля, неподвижность частиц необходима для передачи деформации от ячейки к ячейке.

<sup>40</sup> Maxwell 1862: 497- 499 Напряжение ячеек, которое линейно в  $E$ , не может непосредственно отвечать за электростатические силы, для которых требуется квадратичное напряжение (см. Приложение 6). Максвелл не нашел механического представления электрических напряжений Фарадея (см. Siegel 1991 : 83). Максвелл обозначил  $\epsilon$  как  $v$ . Эта константа связана с константой теории Вебера через  $\epsilon = C/\sqrt{2}$ .

<sup>41</sup> Максвелл 1862: 499.

<sup>42</sup> Максвелл 1862: 500 (выделено Максвеллом): Duhem 1902: 208-9, 211-212. См. также Siegel 1991: 136-141. Bromberg 1967 назвал теорию света Максвелла 1862 года "электромагнитической". Я предпочитаю "магнитомеханическая", поскольку отправной точкой теории были магнитные вихри.

<sup>43</sup> Maxwell 1862: 502-513; Verdet 1854-1863. См. также. Knudsen 1976: 255-258.

#### 4.3.4 Планетарий

Максвеллу было что сказать о своих механических предположениях. Он напомнил, что его предыдущие аналогии с сопротивляющимся потоком были призваны обеспечить четкую геометрическую концепцию силовых линий, не предполагая никаких гипотез о глубинной природе электрических и магнитных воздействий. Напротив, его новый подход предполагал существование напряжений, из которых проистекают



наблюдаемые механические действия. Силовые линии теперь относились к этим напряжениям и поэтому были настолько физическими, насколько Фарадей хотел их видеть. Максвелл также принял предположение Томсона о том, что напряжения в магнитном поле обусловлены молекулярными вихрями. Эти физические гипотезы позволили создать единое, динамическое понимание магнетизма и электромагнетизма; они были закреплены на скале аргументов Томсона об эффекте Фарадея. Они оставались в основе теории Максвелла вплоть до его смерти.<sup>44</sup>

Однако Максвелл не верил в буквальную истинность своих более конкретных предположений относительно строения и взаимосвязи молекулярных вихрей:

*"Представление о том, что движение частицы связано с движением вихря с помощью идеального контакта качения, может показаться несколько неуклюжим. Я не выдвигаю его как способ связи, существующий в природе, или даже как способ, который я был бы готов принять как электрическую гипотезу. Это, однако, механически мыслимый способ связи, который и легко исследуем, и он служит для выявления фактических механических связей между известными электромагнитными явлениями: так что я рискну сказать, что любой, кто понимает предварительный и временный характер этой гипотезы, скорее поможет, чем помешает ей в своём поиске истинной интерпретации явлений."*

Максвелл не сомневался в истинности полученных им соотношений между электрическим и магнитным полями и считал, что эти соотношения вытекают из законов механики. Но своеобразное сочетание вихрей и холостых колес не соответствовало его представлению о простоте природы. Он писал Таунту:

*"Природа этого механизма является для истинного механизма тем же, чем планетарий является для солнечной системы".<sup>45</sup>*

#### **4.4 Динамическое поле**

После публикации работы "О физических линиях силы" в планы Максвелла входила экспериментальная проверка трех предсказаний его теории. Он планировал возобновить свои попытки обнаружить гиромангнитные эффекты. Он планировал провести точные измерения индуктивной ёмкости  $\epsilon$  различных прозрачных веществ, чтобы проверить теоретическую связь с оптическим индексом ( $\epsilon = n^2$ ). Самое главное, он намеревался проверить идентичность скорости света с отношением абсолютных единиц электромагнитного и электростатического заряда, усовершенствовав измерения Вебера и Кольрауша. Его участие в британском проекте по созданию электрических стандартов облегчило эту задачу. В 1864 году он предоставил схему, основанную на прямом сравнении электродинамической и электростатической силы. Четыре

года спустя он опубликовал результаты более сложного эксперимента, основанного на том же принципе.<sup>46</sup>

Считая, что электромагнитный вывод скорости света был его самым важным результатом, Максвелл пытался "очистить электромагнитную теорию света от всех необоснованных предположений". Скорость света не могла зависеть от формы вихрей или от их упругости. В 1864 году Максвеллу удалось переформулировать свою теорию без какого-либо конкретного механизма и описать распространение волн в чисто электромагнитных терминах. Чтобы понять, как он этого добился, мы должны вернуться к электротоническому состоянию.<sup>47</sup>

<sup>44</sup> Maxwell 1862: 451-453. См. также Knudsen 1976: 248-55; Siegel 1991: 39-55.

<sup>45</sup> Maxwell 1861: 486; Максвелл Тайту, 23 декабря 1867 года, *SLPM* 2: 337.

<sup>46</sup> Maxwell Томсону, 10 декабря 1861 года, *SLPM* 1: 694-698; Максвелл Томсону, 15 октября 1864 года, *SLPM* 2: 176; Maxwell 1868a. О гиромагнитных экспериментах, см. также Максвелла Фарадею, 19 октября 1861 года, *SLPM* 1: 688-689; Maxwell 1861: 485n - 6n; Maxwell 1873a: ## 574-575; и Galison 1982 для более поздней истории таких эффектов. Классификацию устройств для измерения отношения единиц, см. в Jenkin and Maxwell 1863. В приборе Maxwell 1864 отталкивание двух катушек с током уравновешено притяжением между двумя дисками, наэлектризованными следующим образом: питающий катушки ток проходит через сопротивление с известной абсолютной величиной, и разность потенциалов на концах этого сопротивления прикладывается к дискам. О следующем проекте см. Schaffer 1995; d'Agostino 1996: 31-36; Simpson 1997: 347-363; Harman 1998: 65-68.

<sup>47</sup> Максвелл Хокину, 7 сентября 1864 года, *SLPM* 2: 164; Максвелл 1865.

#### 4.4.1 Приведенный импульс

Когда Максвелл создал модель вихря, он все еще искал механическую интерпретацию электротонического состояния. Он нашел неожиданную интерпретацию. Переписав закон индукции (4.9) в виде

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t \quad \text{с} \quad \mu \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.15)$$

он отметил, что  $\mathbf{A}$  играет роль

*"приведенного импульса" для механизма, приводимого в движение потоком частиц. Тем самым он имел в виду обобщение второго закона Ньютона, где сила  $-\mathbf{E}$  служит увеличению уменьшенного импульса. Более конкретно он сравнил  $\mathbf{A}$  с "импульсом, который подействует на ось ведущего колеса неподвижной машины, если вдруг ему будет придана скорость".*

Импульс и момент были важными понятиями в трактатах о механизмах, которые Максвелл читал, особенно у Ранкина. Кроме того, импульсивные силы играли центральную роль в рассуждениях Стокса и Томсона о невращающемся потоке<sup>48</sup>.

Два простых примера показывают, что имел в виду Максвелл. В случае одиночной линейной цепи ток  $i$  приводит окружающие элементы во вращательное движение, как рейка, протаскиваемая между зубчатыми колесами (рис. 4.7).

Если масса оси пренебрежимо мала, для приведения ее в движение все равно требуется конечная сила из-за инерции связанных колес. По

определению Максвелла, приведенный импульс - это импульс, необходимый для получения заданной скорости  $i$ . Он пропорционален скорости и инерции колес. На электрическом языке он равен  $Li$ , где  $L$  - индуктивность цепи, и является мерой электротонического состояния.



Рис. 4.7. Иллюстрация самоиндукции в линейной цепи (Лодж, 1889: 186).  
Знаки + и - указывают направление вращения

В случае двух линейных цепей вращение ячеек находится в взаимно-однозначном соответствии с двумя токами  $i_1$  и  $i_2$ . Эта ситуация аналогична механизму на рис. 4.8, в котором вращения колес  $P$  и  $Q$  играют роль двух токов, а вращение маховичков - вращения вихря в магнитном поле. Колеса  $P$  и  $Q$  имеют пренебрежимо малую инерцию. Однако для приведения их в движение, в общем случае, необходима конечная сила из-за инерции маховичков. Уменьшенные моменты  $P$  и  $Q$  - это импульсы, необходимые для придания им скоростей  $i_1$  и  $i_2$ . Эти импульсы имеют линейную форму

$$p_1 = L_1 i_1 + M i_2, \quad p_2 = L_2 i_2 \quad (4.16)$$

Они измеряют электротонические состояния двух контуров. Обобщая на трехмерное распределение тока  $\mathbf{J}$ , электродвижущая сила, необходимая для импульсного запуска этого тока, должна быть определенной линейной функцией  $\mathbf{J}$ , чтобы быть отождествленной с электротоническим состоянием  $\mathbf{A}$ .<sup>49</sup>

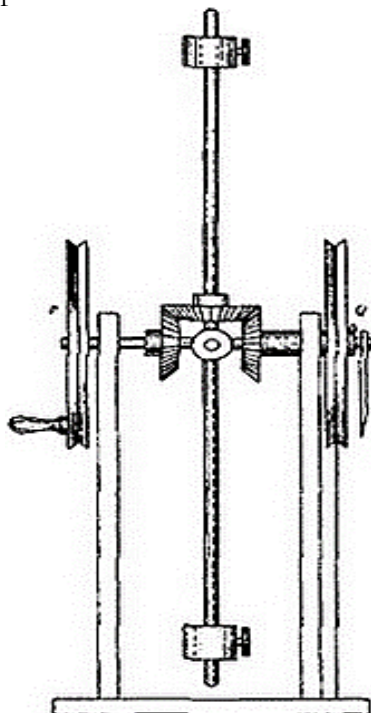


Рис. 4.8. Модель Максвелла для взаимной индукции. (Maxwell 1891, Vol. 2: 228).

#### 4.4.2 Скрытый механизм

Максвелл пришел к механической интерпретации электротонического состояния в 1861 году на основе вихревой модели. Три года спустя он понял, что эта интерпретация не зависит от какого-либо конкретного механизма и может служить более абстрактной основой для динамики магнитного поля. Он просто признал, что благодаря неопределенному связанному механизму существование электрического тока подразумевает движение в окружающем поле. Тогда сила, необходимая для передачи этого движения, должна быть производной по времени от обобщенного импульса  $\mathbf{A}$ , который он теперь называл "электромагнитным импульсом". В случае двух контуров это дает обычные уравнения для индуктивной связи (уравнения Неймана)

$$\begin{aligned} e_1' - R_1 i_1 &= d(L_{11} i_1 + M i_2)/dt \\ e_2' - R_2 i_2 &= d(L_{22} i_2 + M i_1)/dt \end{aligned} \quad (4.17)$$

где  $e_1$  и  $e_2$  - приложенные электродвижущие силы, а  $R_1$  и  $R_2$  - сопротивления.<sup>50</sup>

Далее Максвелл рассмотрел энергию, приносимую источниками электродвижущей силы, согласно Томсону:

$$\begin{aligned} e_1' i_1 + e_2' i_2 &= R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + d(L_{11} i_1^2/2 + L_{22} i_2^2/2 + M i_1 i_2)/dt \\ &+ (dL_{11}/d\lambda)(i_1^2/2) + (dL_{22}/d\lambda)(i_2^2/2) + (dM/d\lambda) i_1 i_2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Два первых слагаемых – джоулево тепло. Третий представляет собой изменение энергии, хранящейся в скрытом механизме

$$T = (p_1 i_1 + p_2 i_2) \quad (4.19).$$

Три последних члена существуют только при изменении геометрической конфигурации контуров: они представляют работу электродинамических сил при этом движении. Таким образом, Максвелл перевернул процедуру, которой следовали Гельмгольц и Томсон; то есть он вывел выражение электродинамических сил из законов индукции<sup>51</sup>.

#### 4.4.3 Лагранжева динамика

Рассуждения Максвелла появились в его "динамической теории электромагнитного поля", опубликованной в 1865 году. Этим названием он хотел объявить о сведении электродинамики к скрытому движению в поле. В "Трактате", опубликованном в 1873 году, он улучшил свое изложение, обратившись к уравнениям Лагранжа. Система двух токов, согласно Максвеллу, - это связанная система, движение которой полностью определяется двумя обобщенными скоростями  $\dot{i}_1$  и  $\dot{i}_2$ . Следуя Лагранжу, движение этой системы полностью определяется формой ее кинетической энергии, для электродинамической части имеющей вид

$$T = L_{11} \dot{i}_1^2/2 + L_{22} \dot{i}_2^2/2 + M \dot{i}_1 \dot{i}_2 \quad (4.20)$$

Уравнения Лагранжа относительно обобщенных скоростей  $\dot{i}_1$  и  $\dot{i}_2$  дают

$$e_1' - R_1 \dot{i}_1 = d(\partial T/\partial \dot{i}_1)/dt, \quad e_2' - R_2 \dot{i}_2 = d(\partial T/\partial \dot{i}_2)/dt \quad (4.21)$$

в соответствии с уравнениями (4.17). Если геометрическая конфигурация контуров зависит от координаты  $\xi$ , то соответствующее уравнение

Лагранжа дает электродинамическую силу  $\partial T / \partial \xi$  (более поздние трехмерные обобщения см. в Приложении 9).<sup>52</sup>

Первоначально Лагранж разработал свой аналитический метод как способ устранения величин, относящихся к внутренним связям связанной механической системы. Лапласианские физики мало использовали этот метод, поскольку они всегда начинали с молекулярных сил. Британские физики первыми оценили огромную силу метода: он давал уравнения движения механической системы по автоматическому рецепту, непосредственно в терминах управляемых элементов. Например, в 1837 году Джордж Грин вывел уравнения движения упругого твердого тела, выразив его кинетическую и потенциальную энергию в терминах локальных смещений и написав соответствующие уравнения Лагранжа. Уильям Томсон принял этот метод, поскольку он обладал достоинствами энергетического принципа работы с управляемыми входами и выходами. Он попытался сделать метод менее абстрактным, объединив его с более физическими понятиями работы и импульса. В **«Трактате естественной философии»** Томсона и Тейта (известном как "ТТ"), опубликованном в 1867 году и вычитаном Максвеллом, Томсон определил обобщенные силы через работу, которую они совершают над системой ( $\sum L f dq_i$ , для вариации  $dq_i$  обобщенной координаты), а обобщенные "моменты"  $p_i$  как импульсы, необходимые для внезапного начала движения системы из состояния покоя. Таким образом, уравнения Лагранжа,  $f_i = dp_i/dt - \partial T / \partial q_i$  приняли физически прозрачную форму.<sup>53</sup>

Максвелл с пониманием отнесся к презентации Томсона и Тейта. Он развил это в одной из глав своего **Трактата** с комментарием:

*"Мы пользуемся трудами математиков [Лагранжа и Гамильтона] и переводим их результаты с языка исчисления на язык динамики, так что наши слова могут вызывать мысленный образ не какого-то алгебраического процесса, а какого-то свойства движущихся тел".*

В этом процессе Максвелл был менее осторожен, чем Томсон и Тейт и допустил ошибку при псевдо-выводе уравнений Лагранжа, основанных на сохранении энергии. Однако благодаря новому динамическому языку он понял существенное преимущество метода Лагранжа: то, что движение движущих точек связанного механизма можно изучать без каких-либо знаний о внутренних связях, как некий черный ящик. Максвелл использовал метафору колокольни, механизм которой управляется несколькими веревками. Изначально механизм находится в состоянии покоя, но конечные скорости импульсно воздействуют на канаты. Если измерить необходимые импульсы для всех возможных значений положений и конечных скоростей канатов, то кинетическая энергия системы может быть вычислена как функция обобщенных координат и скоростей (однородность  $T$  подразумевает, что  $2T = \sum$

$p dq_i/dt$ ). Тогда движение канатов для любой приложенной силы задается соответствующими уравнениями Лагранжа<sup>54</sup>

<sup>48</sup> Maxwell 1861: 478.1 изменили знак  $A$  для согласованности с более поздними работами Максвелла. Ссылку на "Прикладную механику" Ранкина можно найти там же: 458n (для определения напряжений). Об импульсивных силах см. Moyer 1977: 257-8.

<sup>49</sup> Максвелл построил эту модель в 1874 году. См. также Maxwell 1891: 228, и Everitt 1975: 103-4.

<sup>50</sup> Maxwell 1865: 536-40. См. также Simpson 1970; Topper 1971; Chalmers 1973; Moyer 1977; Siegel 1981; Buchwald 1985a: 20-3; Hendry 1986: 191-206; Siegel 1991.

<sup>51</sup> Maxwell 1865: 541-542

<sup>52</sup> Maxwell 1873a: ##578-83, за исключением их лагранжева обоснования. Уравнения цепи Максвелла в точности идентичны уравнениям теории индукции Неймана.

<sup>53</sup> Green 1838: 246: *"Одно из больших преимуществ этого метода [Mecanique analytique], имеющее огромное значение, заключается в том, что мы обязательно приходим к уравнениям и условиям, необходимым и достаточным для полного решения любой проблемы, к которой он может быть применен"*; Томсон - Стоксу, 20 октября 1847 г., в Wilson 1990: 32 (о наименьшем действии в случае импульсного движения жидкости); Thomson and Tait 1867: 217-235. См. также Siegel 1981: 259-263; Everitt 1975: 105-106; Everitt 1983: 128-9; Buchwald 1985: 60-61; Harman 1987: 287-88; Smith and Wise 1989: 270-273, 390-5 (о TT').

<sup>54</sup> Maxwell 1873a: #554; Maxwell 1879: 783-784 о метафоре колокольни (для простоты я исключил потенциальную энергию). См. также Moyer 1977; Siegel 1981; Simpson 1970; Topper 1971; Buchwald 1985: 20-23.

#### 4.4.4 Электромагнитный импульс

С интерпретацией импульса векторный потенциал стал центральной динамической концепцией теории Максвелла. Индуцированная в цепи ЭДС просто была производной по времени от её уменьшенного импульса. Максвелл также предположил, что момент цепи является интегралом от "электромагнитного импульса"  $A$ . Это дает

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - d\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} / dt \quad (4.22)$$

или

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \phi \quad (4.23)$$

для электродвижущей силы  $\mathbf{E}$  в точке проводника, движущегося со скоростью  $\mathbf{v}$ . Максвелл назвал  $\phi$  "электрическим потенциалом" и упомянул, что он определяется другими условиями задачи.<sup>55</sup>

Чтобы связать  $A$  с магнитным полем, Максвелл последовал предложению Фарадея определить магнитные линии по ЭДС, индуцированной при их пересечении линейным проводником. Следовательно, магнитная величина  $\mathbf{B}$  должна быть отождествлена с curl электромагнитного импульса  $\mathbf{A}$ . Для определения  $\mathbf{B}$  в терминах тока  $\mathbf{J}$  Максвелл использовал рассуждения из работы "О силовых линиях Фарадея", которые для напряженности  $\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$  приводят к следующему виду:<sup>56</sup>

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.24)$$

Затем Максвелл обобщил выражение (4.20) для кинетической энергии двух токов, что дает

$$T = \oint \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d\tau / 2 \quad (4.25)$$

Это выражение было наиболее важным в новой динамической теории, поскольку  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d\tau / 2$  означало энергию, обусловленную током в элементе объема  $d\tau$ . Используя  $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}$  и частичное интегрирование, его можно преобразовать обратно в выражение, даваемое вихревой моделью,

$$T = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} d\tau / 2 \quad (4.26)$$

в которой  $\mathbf{B} \cdot \mathbf{H} d\tau / 2$  относится к энергии, запасенной в элементе  $d\tau$ .<sup>57</sup>

<sup>55</sup> Maxwell 1865: 555-560.

<sup>56</sup> Maxwell 1865: 562-563.

<sup>57</sup> Maxwell 1865: 550-554, 556-557.

#### 4.4.5 Замкнутые цепи

Закон Ампера (4.24) применим только к бездивергентному или замкнутому току. Более фундаментально, динамические рассуждения Максвелла ограничиваются замкнутыми токами, потому что только в этом случае движение магнитного поля полностью определяется токами. Если существует упругая податливость механизма поля, как Максвелл предполагал в своей вихревой модели, то движение также зависит от деформации этого механизма. Максвелл решил эту проблему, изменив определение электрического тока. В вихревой модели он определял ток как поток частиц между вихрями. В своей "динамической теории" он попытался следовать представлению Фарадея о том, что электрический ток является изменением или передачей поляризации.<sup>58</sup>

Максвелл впервые определил поляризацию или "электрическое смещение"  $\mathbf{D}$  как смещение электричества в молекулах диэлектрика, ссылаясь здесь на теорию электростатической индукции Моссотти. Будучи упруго сопротивляющимся, смещение требует электродвижущей силы  $\mathbf{E} = \mathbf{D} / \epsilon$  и подразумевает потенциальную энергию среды

$$U = \int \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} d\tau / 2 \quad (4.27)$$

Изменение смещения подразумевает электрический ток  $\partial \mathbf{D} / \partial t$ . Электрическая проводимость возникает, когда электричество переходит от одной молекулы к другой со скоростью  $\mathbf{j}$ . Следовательно, в среде, обладающей одновременно индуктивностью и проводимостью, общий ток составляет

$$\mathbf{J} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{j} \quad (4.28)$$

Полученное выражение закона Ампера совпадает с выражением, приведенным в разделе "О физических силовых линиях":

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \epsilon \mathbf{E} / \partial t \quad (4.29)$$

Мы должны отметить, однако, важное различие в интерпретации. В старой теории то, что Максвелл называл "током смещения", было  $-\partial \epsilon \mathbf{E} / \partial t$  и вносило вклад в ток проводимости. В новой теории ток смещения стал вкладом бездивергентный полный ток.<sup>59</sup>

В соответствии с картиной поляризации Моссотти, у Максвелла

$$\rho = -\nabla \cdot \mathbf{D} \quad (4.30)$$

представляет плотность «свободного электричества». Это привело его к серьезным трудностям, часть из которых он решил, изменив знак в законе Ома (он взял  $j = -\sigma E$ ). На самом деле его уравнения были несовместимы с сохранением электричества, что легко увидеть, взяв дивергенцию уравнения (4.28). Здесь он стал жертвой своей хорошо известной плюс-минус дислексии. Он был склонен расставлять знаки в своих уравнениях в соответствии с лежащей в их основе физической идеей, а не в соответствии с алгебраической совместимостью. Позже Максвелл понял несовместимость физической идеи уравнения (4.30) с концепцией электрического заряда Фарадея.<sup>60</sup>

<sup>58</sup> Maxwell 1865: 531.

<sup>59</sup> Maxwell 1865: 554, 560. Ср Siegel 1991: 145-152.

<sup>60</sup> Maxwell 1865: 561. Максвелл полностью изменил закон Ома, предположительно, чтобы исправить свою теорию электрического поглощения (там же: 573-576); но он сохранил знак плюс в своем исследовании поглощения волн проводниками «К вопросу о знаке заряда», ср. Siegel 1991: 148-152.

#### 4.4.6 Электромагнитные световые волны

К счастью, наиболее важное применение новой теории, вывод уравнения электромагнитных возмущений в непроводящей среде, не зависело от знака электрического заряда. Максвелл объединил уравнения (4.23), (4.24) и (4.28) и получил для магнитной индукции,

$$\epsilon\mu\partial^2 B/\partial t^2 = \Delta B \quad (4.31)$$

Это уравнение волны со скоростью распространения  $(\epsilon\mu)^{-1/2}$ . Максвелл также рассмотрел случай кристаллической среды и определил, как проводимость влияет на прозрачность. Теперь у него была электромагнитная теория света *sensu stricto*, поскольку он мог описывать волны непосредственно в терминах электрического и магнитного полей. Более того, его вывод скорости волн стал независимым от каких-либо предположений о лежащем в основе механизме.<sup>61</sup>

Максвелл пытался определить, как распространяется электромагнитный импульс **A**, бывший центральным в его новом подходе. Современный физик знает, что **A** неоднозначен: при выполнении компенсирующего изменения скалярного потенциала к нему можно добавить любой градиент без изменения измеряемых полей **E** и **H**. В 1862 г. Максвелл думал иначе. Он считал, что **A** однозначно определяется как импульс, необходимый для начала данного тока. Кроме того, он полагал, что он сохранит общую справедливость уравнения Пуассона ( $\Delta\phi + \rho = 0$ ). Исходя из этого ошибочного предположения, он обнаружил, что продольная часть **A** не может распространяться как волна, что соответствует поперечному характеру световых волн.<sup>62</sup>

Подводя итог, можно сказать, что к 1865 году Максвелл располагал всеми элементами мощной динамической теории электромагнитного поля, основанной на следующих принципах:



1. Замкнутые токи управляют скрытым движением в поле.
2. Все токи являются замкнутыми.
3. Заряд и ток вытекают из поляризации - упругой деформацией среды под действием электродвижущей силы.

Однако теория все еще была затруднена из-за путаницы в понятиях электромагнитного момента и поляризации диэлектрика.

<sup>61</sup> Максвелл 1865: 577-588. См. также Bork 1966a; Bromberg 1967; Chalmers 1973; Siegel 1991: 152-7.

<sup>62</sup> Максвелл 1865: 580-582. Максвелл не знал, что в качестве сопряженного импульса «скорости»  $\mathbf{J}$  потенциал  $\mathbf{A}$  неоднозначен из-за ограничения  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$  (см. Приложение 9). О путанице Максвелла по поводу потенциалов, см. Bork 1966a: 847-8; Bork 1967; Anderson 1991; Hunt 1991a: 116-17; Cat 1995.

#### 4.4.7 Пересмотр электромагнитного импульса

Когда в 1868 году Максвелл опубликовал результаты своего нового измерения  $c$  - отношения единицы электромагнитного и электростатического зарядов, он изложил электромагнитную теорию света "в самой простой форме, выводя ее из общепризнанных фактов и показывая связь между уже описанными экспериментами [для измерения  $c$ ] и теми, которые определяют скорость света". "Общепризнанными фактами" были электромагнетизм Эрстеда, закон электромагнитной индукции и доктрина поляризации Фарадея. Из них Максвелл извлек четыре простые "теоремы", выражающие словами интегралы магнитной и электрической интенсивностей на замкнутых кривых, связь между электрической интенсивностью и смещением, а также ток смещения. Все ссылки на электромагнитный импульс исчезли, и выведение электромагнитных плоских волн стало довольно простым.<sup>63</sup>

Однако, Максвелл не мог отказаться от динамического основания своей теории. Она стала существенной частью его более позднего *Трактата*, в уже описанной лагранжевой форме. Там он признал пробел в определении электромагнитного импульса  $\mathbf{A}$  и ввел условие  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$  как удобный способ устранения неоднозначности. При таком выборе импульс заданного тока в среде с равномерной проницаемостью  $\mu$  стал выглядеть следующим образом

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = (\mu/4\pi) \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') d\tau' / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad (4.32)$$

Аналогия со скалярным потенциалом в однородном диэлектрике,

$$\phi(\mathbf{r}) = (1/4\pi\epsilon) \int \rho(\mathbf{r}') d\tau' / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \quad (4.33)$$

обосновывала альтернативное название "векторный потенциал" для  $\mathbf{A}$ .<sup>64</sup>

К сожалению, в своем выводе уравнения для распространения электромагнитных возмущений Максвелл повторил ошибку, считая формулу скалярного потенциала (4.33) общепринятой, независимо от выбора  $\nabla \cdot \mathbf{A}$ . На самом деле нет никаких свидетельств того, что он когда-либо объединял уравнение  $\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \rho$  с формулой электродвижущей силы

(4.23), за исключением электростатического случая. Похоже, Максвелл не до конца осознавал, что его предположения об электромагнитном поле предполагали гораздо более глубокую взаимосвязь электростатических и электродинамических действий, чем континентальные теории.<sup>65</sup>

<sup>63</sup> Maxwell 1868: 138. См. также Everitt 1975: 108-9; Hendry 1986: 220-6; Siegel 1991: 153-4. Эта простая формулировка теории Максвелла была в значительной степени незамеченной до ее представления Niven в *MSP* в 1890 году (я благодарю Брюса Ханта за это замечание).

<sup>64</sup> Maxwell, 1873a: # 617.

<sup>65</sup> Maxwell, 1873a: # 783. Несколько ранних читателей Максвелла, в том числе Ланнор и Дж. Дж. Томсон, унаследовали путаницу Максвелла в определении  $\phi$ . В том же духе Максвелл дал  $-\rho \nabla \phi$  для силы, действующей на электризованное вещество (# 619), что могло быть справедливо только в электростатическом случае и противоречило его выражению электрических напряжений (# 108) (см. Приложение 6). Эта ошибка исправлена в FitzGerald 1883b и в третьем издании "*Трактата*".

#### 4.4.8 Пересмотр смещения

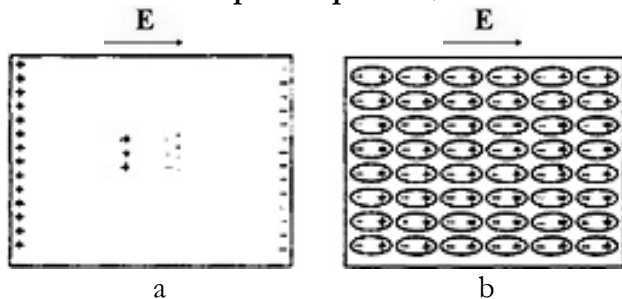


Рис. 4.9. Поляризация: (а) по Максвеллу, (б) по Моссотти.

Максвеллу удалось прояснить свою концепцию поляризации. В *Трактате* он принял положительный знак в отношении  $\rho = \nabla \cdot \mathbf{D}$ , что означает, что часть поляризованного диэлектрика заряжается положительно там, где начинается поляризация, и отрицательно там, где поляризация заканчивается (рис. 4.9(а)). Это согласуется с определением Фарадеем положительного заряда как начальной точки электрических силовых линий, но противоречит картине Моссотти смещенного электрического заряда (рис. 4.9(б)). Максвелл, как и Фарадей, избежал противоречия, считая понятие поляризации более простым, чем понятие заряда. Если в элементах поляризованного диэлектрика что-либо смещается, то это не может быть электрическим зарядом. Это очень важный момент, который необходимо всегда иметь в виду при чтении трудных разделов Максвелла о заряде и токе.<sup>66</sup>

В этом случае взгляды Максвелла оказываются очень похожими на взгляды Фарадея. Поляризация (фарадеевская "индукция") определяется как такое состояние ограничения диэлектрика, что каждая его часть приобретает равные и противоположные свойства на двух противоположных сторонах. По определению, электрический заряд является пространственным разрывом поляризации. Как правило, заряд

возникает на границе между поляризованным диэлектриком и проводником, поскольку по определению проводник - это тело, которое не может поддерживать поляризацию. Как объясняет Максвелл,

*"электризация на граничной поверхности проводника и окружающей диэлектрика, которая в старой теории называлась электризацией проводника, в теории индукции должна называться поверхностной электризацией окружающей диэлектрика".<sup>67</sup>*

Проводники не могут поддерживать поляризацию. Однако они могут передавать поляризацию. Эта передача, согласно Фарадею и Максвеллу, происходит в результате конкуренции между нарастанием и спадом поляризации в проводнике. Таким образом, проводник оказывается уступчивым диэлектриком:

*"Если среда не является совершенным изолятором, - пишет Максвелл, - то состояние ограниченности, которое мы называли электрической поляризацией, постоянно уступает. Среда уступает электродвижущей силе, электрическое напряжение ослабевает, и потенциальная энергия состояния ограниченности преобразуется в тепло".*

По определению, электрический ток - это скорость передачи поляризации. В диэлектрике он просто измеряется производной поляризации по времени. В проводнике он также зависит от механизма распада, микроскопические детали которого неизвестны. Поэтому его выражение должно быть определено эмпирически (по закону Ома). При таком определении электрический ток всегда является замкнутым, поскольку ток в разомкнутой проводящей цепи продолжается через диэлектрик.<sup>68</sup>

Все это вполне согласуется и не предполагает каких-либо нелепостей, которые впоследствии осудили континентальные читатели Максвелла. Однако терминология Максвелла действительно вводила в заблуждение. Он назвал поляризацию части диэлектрика "смещением электричества". Под этой фразой он подразумевал только то, что часть диэлектрика, если ее мысленно отделить от остальной части диэлектрика, будет представлять противоположные заряды на двух противоположных концах. Он, конечно, не имел в виду, что электрически заряженное вещество вытесняется. Однако многие из его читателей поняли именно это. Что еще хуже, Максвелл утверждал, что "движения электричества подобны движениям несжимаемой жидкости". Здесь он имел в виду только то, что замкнутый характер полного тока делает его аналогичным движению несжимаемой жидкости. Но ему часто приходило в голову, что электричество - несжимаемая жидкость.<sup>69</sup>

При осторожном использовании аналогия с жидкостью полезна для иллюстрации отношений между смещением, зарядом и проводимостью. Предположим, что несжимаемая жидкость пронизывает пространство, в

котором возведены жесткие строительные леса. В "изолирующих" частях этого пространства порции жидкости упруго связаны со строительными лесами. В "проводящей" части такие связи также существуют, но при растяжении они разрушаются и рассеивают свою энергию в тепло; каждое разрушенное звено немедленно заменяется свежим, расслабленным звеном. На этом рисунке удлинение звеньев соответствует максвелловскому смещению (или поляризации); градиент давления жидкости - электродвижущей силе; поток жидкости - электрическому току; а прерывистость среднего удлинения звеньев при переходе границы между проводником и изолятором - электрическому заряду. Аналогия правильно иллюстрирует уравнения  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ ,  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ,  $\mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t$ , и  $\rho = \nabla \cdot \mathbf{D}$ . Однако, как мы увидим позже, это вводит в заблуждение, когда речь идет о проблемах распространения и потоке энергии.

<sup>66</sup> Maxwell, 1873a: ## 60-62, # 111. См. также Максвелл Томсону, 5 июня 1869 года, *SLPM* 2: 485-486. Ясный отчет см. в Buchwald 1985: 23-34; также Knudsen 1978

<sup>67</sup> Maxwell, 1873a: № 60. # 111.

<sup>68</sup> Maxwell, 1873a: # 111. См. также Buchwald 1985a: 28-29.

<sup>69</sup> Maxwell, 1873a: № 61. См. также иллюстрацию диэлектрика жидкостным поршнем там же, в # 334.

#### 4.5 Я воздвиг памятник

Примерно в 1867 году Максвелл взялся за работу над большим трактатом об электричестве и магнетизме, отчасти намереваясь продвинуть свою новую теорию и основополагающие взгляды Фарадея. В такого рода книге существовала настоятельная потребность. Хотя область электричества и магнетизма чрезвычайно расширилась со времен Эрстеда и Ампера, пока еще не было единого представления всех ее экспериментальных, технических и математических аспектов. Увеличился разрыв между практическим электричеством телеграфистов и математическим электричеством профессоров. Увеличивалось количество терминов, условностей и теорий, а попыток унификации и сравнения было мало, несмотря на высокие интеллектуальные и экономические ставки.<sup>70</sup>

Максвелл считал нетерпимым пренебрежение количественными аспектами предмета, полагая, что математические теории электричества и магнетизма уже созрели для преподавания в университете, и призвал власти Кембриджа ввести их в "Математический Трипос". Не хватало только подходящего справочника, как считал сам Максвелл:<sup>71</sup>

*"Существует несколько трудов, в которых электрические и магнитные явления описаны популярно. Однако это не то, что нужно тем, кто столкнулся лицом к лицу с величинами, которые нужно измерять, и чьи умы не удовлетворяются экспериментами в лекционном зале. - Существует также значительная масса математических мемуаров, которые имеют большое значение для электротехники, но они скрыты в громоздких изданиях научных обществ; они*

*не образуют связанной системы; они очень неравноценны по достоинству, и по большей части непонятны никому, кроме признанных математиков. — поэтому я решил, что будет полезен трактат, в котором также показывалось бы, как каждая часть предмета оказывается доступной для методов проверки путем фактического измерения."*

Книг по электричеству было очень мало, и они не давали полного, систематического введения в предмет. Книга Огюста де ла Рива *"Traite d'electricite"* 1853 года была эмпирической, почти не содержала математики и игнорировала или искажала теоретические взгляды Фарадея. Книга Густава Видеманна *"Lehre vom Galvanismus"* 1863 года давала точное и ясное изложение почти всех работ, опубликованных по этому вопросу, с изрядной долей британских взглядов; но ее энциклопедический объем и структура делали ее непригодной для обучения студентов. *Трактат* Максвелла, опубликованный в 1873 году, заполнил большой пробел в существующей литературе.<sup>72</sup>

<sup>70</sup> О разрыве между практическим и академическим электричеством. см. Jenkin 1873 : введение.

<sup>71</sup> Maxwell, 1873a: IX. О реформе Кембриджского математического экзамена в 1867 году и редакционных обстоятельствах проекта Максвелла. см. также Achard 1998.

<sup>72</sup> О проронсждении трактата. см. Harman 1995a: 26-33

#### **4.5.1 Математические и эмпирические основы**

Задача Максвелла состояла в том, чтобы изложить новую доктрину и в то же время установить новые стандарты в рассмотрении текущих проблем. Для того чтобы удовлетворить эти два противоречивых требования, он тщательно отделил основные математические и эмпирические основы предмета от более спекулятивной теории. В предварительной работе "Об об измерении величин" он изложил учение Фурье об измерениях. Гамильтон проводит различие между скаляром и вектором, понятия силы и потока, соответствующие его более старым "интенсивности" и "количеству", различные теоремы, относящиеся к интегралам силы и потока, и связанные с ними топологические вопросы. Он рассматривал классификацию физико-математических величин как способ замыкания формальных аналогий и организации области знаний:

*"Очевидно, что [...] если бы у нас была настоящая математическая классификация величин,"- объяснял он ранее. "мы должны быть в состоянии сразу же обнаружить аналогию между любой системой величин, представленной нам, и другими системами величин в известных науках, и мы должны воспользоваться математическими трудами тех, кто уже решил по существу, те же самые проблемы".<sup>73</sup>*

Затем Максвелл дал определение основным физическим величинам в нейтральной манере, которая могла быть принята как теоретиками флюидов, так и теоретиками поля. Например, он ввел величину

электрического заряда тела с помощью полых проводников Фарадея: два заряда можно сложить, поместив их носители в полый проводящий сосуд и отметив заряд сосуда. Он определил электрический потенциал по методу Томсона как работу, совершаемую над единичным точечным зарядом для приведения его в указанное место. Наконец, он определил магнитную силу **H** и поток **B** в поляризуемом веществе как силы, действующие на полюс магнитного блока (конец равномерно намагниченной иглы), помещенный в небольшую цилиндрическую полость, продолговатую для **H** и уплощенную для **B**.<sup>74</sup>

С этими нейтральными определениями Максвелл мог проводить большую часть математического анализа, не решая вопроса о природе электричества и магнетизма. Это видно из его томсоновского изложения потенциальных теорий электростатики и магнетизма. Отчасти *"Трактат"* был задуман как источник вычислительных и экспериментальных методов для компетентных электриков, что бы они ни думали о сущности электричества. Создатели этих методов были столь же разнообразны, как и их потенциальные пользователи. Это мог быть Лаплас со сферическими гармониками, Гаусс с геомагнетизмом, Вебер гальванометрическими измерениями, Кирхгоф с теорией цепей, Томсон с электрометрами или сам Максвелл с расчете индуктивности. Эти методы могли бы послужить Математическому Трипосу, немецким семинарам и телеграфистам во всем промышленно развитом мире.<sup>75</sup>

<sup>73</sup> Maxwell 1873a: ## 1-26; Maxwell 1870: 258 (цитата). См. также Harman 1987: 278-287. О размерности, см. Jenkin and Maxwell 1863; Everitt 1975: 100-1; d' Agostino 1996: 37-41. О топологии, см. Epple 1998; Harman 1998: 153-156.153-156.

<sup>74</sup> Maxwell 1873a: #34 и #63 (для заряда). #70 (для потенциала), ##398-400 (для **B** и **H**). Максвелл и Томсон не согласились с определением электростатического потенциала, при контакте между различными металлами: см. также Hong 1994a Максвелловские **B** и **H** соответствовала томсоновским "электромагнитному" и "полярному" определениям магнитного поля (см. главу 3, стр. 130); однако они обозначали два разных физических понятия (поток и сила), тогда как Томсон имел в виду два разных способа характеристики одной и той же физической сущности: см. Wise 1981a.

<sup>75</sup> см. Maxwell 1873a: том 1, часть 1, гл. 4 ("Общие теоремы" теории потенциала); 2.3.3 (о "Магнитных соленоидах и оболочках" Томсона); 1.1.9 ("Сферические гармоники"); 2.3.8 ("Земной магнетизм"); 2. 4.15 ("Электромагнитные приборы"); 1.2.6 ("Математическая теория распределения электрических токов"); 1.1.13 ("Электростатические приборы"); 2.4.13 ("Параллельные токи").

#### 4.5.2 Терпимость

Вооружившись операциональными определениями и феноменолого-математическими теориями, читатель *"Трактата"* мог вступить в сферу высшей теории. Максвелл представил взгляд на поле, взгляд на флюиды и отношения между ними. Конечно, он предпочитал концепцию поля Фарадея, т.к. в сравнении с флюидной концепцией, она

*"не менее пригодна для объяснения явлений, и [...] хотя в некоторых частях она может показаться менее определенной, она точнее соответствует нашим*

*фактическим знаниям, как в том, что она утверждает, так и в том, что она оставляет нерешенным".*

В частном порядке он высмеивал "ученых немцев", "тяжеловесных немецких писателей" или "демонстрации очевидного" Ампера.<sup>76</sup>

Тем не менее, **"Трактат"** выразил должное уважение "Ньютону электричества" (Амперу) и "выдающимся" немцам, культивировавшим действие на расстоянии; и достаточно подробно изложил их теории. Это была не только дипломатия: как мы увидим позже, Максвелл включил некоторые положения атомистики Ампера и Вебера в свою собственную теорию. Кроме того, он считал, что многое можно узнать из сравнения двух видов теории:

*"С философской точки зрения, кроме того, чрезвычайно важно сравнение двух методов, оба из которых преуспели в объяснении основных электромагнитных явлений, оба из которых пытались объяснить распространение света как электромагнитное явление [подробнее об этом позже] и фактически вычислили его скорость, и в то же время фундаментальные представления о том, что происходит на самом деле, а также большинство вторичных представлений о соответствующих величинах, радикально различаются".<sup>77</sup>*

#### 4.5.3 Основы теории поля

В основных положениях теории поля Максвелл следовал за Фарадеем ближе, чем когда-либо. Он принял основанные на поле определения электрического заряда и тока, понятие проводимости как конкуренции между нарастанием и спадом поляризации и сведение всех электрических и магнитных действий к напряжениям в поле. Даже идея о том, что все токи являются замкнутыми, восходит к идее Фарадея о неделимости электрического тока (см. главу 3, стр. 117). Наконец, Максвелл отказался от своей прежней теории магнетизма, в которой "количество" **В** имело источники в магнитных массах магнитов, как электрическое количество **Д** имело источники в заряженных телах. В его новой теории **В** всегда было без дивергенции, в соответствии с понятием Фарадея о магнитных силовых линиях и с определением Томсона плоской цилиндрической полости.<sup>78</sup>

В уравнениях поля Максвелл также опирался на математику поля Томсона, на различие между силой и потоком, а также на интерпретацию уравнений Лагранжа в терминах энергии, силы и импульса. Из понятия Фарадея о поляризации диэлектрика Максвелл вывел уравнения

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (4.34)$$

для электрической силы **E**, электрического смещения **D**, полного тока **J** и тока проводимости **j**.

Из своей собственной теории намагничивания и из эквивалентности между бесконечно малой петлей тока и магнитным диполем, он вывел

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{I}, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.35)$$

для магнитной силы **H**, магнитной индукции **B** и интенсивности намагничивания **I**.

Из лагранжевой динамики замкнутых токов он получил

$$\mathbf{E} = \partial \mathbf{A} / \partial t + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \phi, \mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (4.36)$$

где **A** - электромагнитный импульс;

**v** - скорость носителя тока;

**f** - электродинамическая сила, действующая на носитель тока.

Первая формула дает закон индукции Фарадея, если **A** - векторный потенциал, такой, что **B** =  $\nabla \times \mathbf{A}$ . Максвелл далее ввел  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ , чтобы упростить связь между **A** и полным током. Наконец, в отсутствие конкретного механизма затухания смещения он принял закон Ома  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ .

В отдельной главе он привел формулу

$$w = \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} / 2 + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} / 2 \quad (4.37)$$

для плотности энергии поля (в отсутствие постоянного магнетизма) и выражение

$$\sigma_{ij} = D_i E_j - \delta_{ij} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} / 2 + B_i H_j - \delta_{ij} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} / 2 \quad (4.38)$$

для напряжений в поле. В принципе, все механические силы электрического или магнитного происхождения могут быть получены из этих напряжений (см. Приложение 6)<sup>79</sup>.

<sup>76</sup> Maxwell 1873a, Vol. 1: XII; Maxwell Джону Клерку Максвеллу, 5 мая 1855 года, *SLPM* 1: 294; Томсон Тантау. 1 декабря 1873 года, *SLPM* 2: 947; Максвелл Томсону, 13 ноября 1854 г., *SLPM* 1: 255.

<sup>77</sup> Maxwell 1873a: # 528; там же. Том I: XII; Том 2, часть 4, гл. 2 ("Расследование Ампера ..."); Том 2, часть 4, гл. 13 ("Теории действия на расстоянии"); Том 1: xii

<sup>78</sup> . Maxwell 1873a: часть 3, гл. 2: " «Магнитная сила и магнитная индукция»".

<sup>79</sup> . Maxwell 1873a: № 68. # 83, # 610 (для уравнения 4.34); № 400, № 403. # 607 (для уравнения 4.35); № 598, № 603 (для уравнения 4.36); # 24J (для закона Ома); # 630. # 634 (для уравнения 4.37); # 108. # 641 (для уравнения 4.38). Максвелл резюмировал уравнения поля в ## 237-238.

#### 4.5.4 Физические идеи и уравнения

Огромное количество уравнений (особенно в декартовой системе счисления) могло напугать читателя Максвелла. Чтобы угодить "главному музыканту Наблы" (его другу Тантау), а также ради математической мощи и красоты, Максвелл также написал свои уравнения в кватернионной форме.<sup>80</sup> Это вряд ли могло помочь обычному читателю, как подозревал и сам Максвелл. Более педагогичным шагом было бы устранение потенциалов. Максвелл отказался сделать это в *Трактате*, утверждая, что "исключение величины, выражающей полезную идею, было бы скорее потерей, чем приобретением на данном этапе нашего исследования". Он хотел поставить электромагнитный момент во главу угла своей теории<sup>81</sup>.

В целом, использование Максвеллом математической символики существенно отличалось от континентальной или современной практики. Для него уравнения всегда были подчинены физической картине. Он искал последовательность, полноту и простоту в картине, а



не обязательно в уравнениях. Последние были символической расшифровкой частичных аспектов картины, и поэтому их нельзя было безопасно использовать, не помня об основной картине. Это хорошо видно на примере того, как Максвелл относился к электродинамике движущихся тел. Его уравнения включали электромагнитную индукцию в движущихся телах, но не другие эффекты движения, которые вытекали из его картины заряда и тока. Например, он знал, что конвекция наэлектризованных тел представляет собой электрический ток из-за соответствующего изменения смещения; но в его уравнениях не было конвекционного тока.

<sup>80</sup> Maxwell 1873a: #17, #25, #619. "Набла" - ассирийская арфа, той же формы, что и  $\nabla$  Гамильтона; на собрании БА в сентябре 1871 года Максвелл посвятил стихотворение Таиту, "главному музыканту на Набле": см. также Campbell and Garnett 1882: 634-6. К истории кватернионов. см. Crowe 1967. Об их использовании Максвеллом, см. Harman 1987: 279-82. 1994: 29-30; 1998: 145-153; McDonald 1965; и соответствующие рукописи и письма в *SLPM* 2.

#### 4.5.5 Микрофизика

У Максвелла была еще одна причина не стремиться к алгебраической полноте. Он осознавал, что его теория по существу неполна в своем рассмотрении отношений между эфиром и веществом. Общие картины диэлектрической и магнитной поляризации, а также идея токов, управляющих скрытым движением, предполагали, что эфир и вещество ведут себя как единая среда с переменной индуктивной способностью, проницаемостью и проводимостью. Однако Максвелл признавал, что некоторые явления требуют более тщательного изучения взаимодействия между эфиром и веществом. Прежде всего, его картина электрической проводимости оставляла в тени механизм распада поляризации. Как и Фарадей, он надеялся, что изучение электрического свечения, и особенно электролиза, прольет свет на глубинную природу электричества:

*"Из всех электрических явлений, электролиз, по-видимому, наиболее способен дать нам реальное представление об истинной природе электрического тока, поскольку мы видим, что токи обычного вещества и токи электричества составляют существенные части одного и того же феномена".<sup>82</sup>*

В своих главах об электролизе Максвелл не следовал феноменологическому подходу Фарадея. Будучи приверженцем атомистики, он считал

*"Очень естественным предположить, что токи ионов являются конвекционными токами электричества, и, в частности, что каждая молекула катиона заряжена определенным фиксированным количеством положительного электричества, которое одинаково для молекул всех катионов, и что каждая молекула аниона заряжена равным количеством отрицательного электричества".*

Это предположение объясняет закон Фарадея и может быть усовершенствовано для объяснения поляризации электродов. Но квантование заряда озадачило Максвелла. Казалось, оно предполагает существование "молекул электричества", как если бы электричество было дискретной жидкостью. Максвелл смирился с этим противоречием, хотя и не молча:

*"Эта фраза, не гармонирующая с остальной частью этого трактата, позволит нам, по крайней мере, четко изложить то, что известно об электролизе, и оценить нерешенные трудности".*

Он считал выдвинутую теорию временным мнемоническим пособием:

*"Крайне маловероятно, что когда мы поймем истинную природу электролиза, мы сохраним в какой-либо форме теорию молекулярных зарядов, поскольку тогда мы получим надежную основу для формирования истинной теории электрических токов и станем независимыми от этих временных теорий".<sup>83</sup>*

Однако Максвелл не сомневался, что молекулярная структура играет определенную роль в проводимости. Он также одобрил теорию Вебера об индуцированном магнетизме, которая требовала существования постоянно намагниченных молекул. И он вполне серьезно относился к молекулярным токам Ампера и Вебера. По его мнению, вывод Верде о том, что магнитооптическое вращение имеет противоположные знаки в диамагнитных и ферромагнитных телах, исключал доктрину Фарадея о том, что диамагнетик - это не что иное, как меньший проводник магнетизма, чем вакуум. В *Трактате* была глава, посвященная усовершенствованию теории ферромагнетизма Вебера, а другая - "электрическим теориям магнетизма", включая индуцированные молекулярные токи Вебера. Максвелл подчеркивал упрощение уравнений магнитного поля, когда весь магнетизм свелся к электромагнетизму: молекулярные токи становились единственными источниками, а поля **В** и **Н** становились одинаковыми и бездивергентными.<sup>84</sup>

Максвелл также считал, что молекулярная структура вещества играет определенную роль в распространении света. Он не доверял своим уравнениям поля для высокочастотных колебаний в вещественных телах. В диэлектриках эти уравнения не учитывали оптическую дисперсию и предполагали связь между оптическим индексом и индуктивной емкостью ( $n = \epsilon^{1/2}$ ), которая казалась очень приблизительной. В проводниках они предсказывали поглощение света гораздо большее, чем измеренное на листиках из золота. В таких случаях, по мнению Максвелла,

*"наши теории строения тел должны быть усовершенствованы, прежде чем мы сможем вывести их оптические свойства из их электрических свойств".<sup>85</sup>*

Уравнения Максвелла также не содержали эффекта Фарадея: их линейность исключала любое действие внешнего магнитного поля на распространение света. Помните, однако, что Максвелл ранее дал теорию

эффекта Фарадея, основанную на его вихревой модели магнитного поля. В *Трактате* он извлек из этой модели основную идею движения магнитного вихря, возмущающего оптические колебания, и облек ее в лагранжеву форму. Он заимствовал невозмущенную часть лагранжиана из теории упругого твердого тела света и принял простое выражение  $k(\nabla \times \partial \xi / \partial t) \cdot \mathbf{H}$  для плотности энергии магнитооптического взаимодействия;  $\xi$  представляет собой упругое смещение среды,  $\nabla \times \xi$  в два раза больше соответствующего вращения, а  $k\mathbf{H}$  - вихревое движение, обусловленное магнитной силой  $\mathbf{H}$ . Последняя отличается от приложенной магнитной силы  $\mathbf{H}_0$  на величину  $(\mathbf{H}_0 \times \nabla) \xi$  если вихревая сила зависит от смещения в соответствии с теорией вихревого движения Гельмгольца (инвариант  $\mathbf{H} \cdot d\mathbf{S}$ ). Тогда оптический лагранжиан включает новый член, объединяющий  $\xi$  и  $\partial \xi / \partial t$ , из которого легко вывести магнитооптическое вращение. С помощью этих полуфеноменологических рассуждений Максвелл избежал атомистических спекуляций и подобрал все влияние материи в одну константу связи, значение и знак которой должны были быть получены из измерений Верде. Максвелл избегал атомистических спекуляций и объединил весь эффект вещества в одну константу связи, а её значение и знак должны были быть получены из измерений Верде.<sup>86</sup>

Эта теория эффекта Фарадея, как и все попытки Максвелла уточнить связь между эфиром и веществом, должны были быть предварительными. Макроскопический характер его объединения электродинамики, электростатики и оптики противоречил эмпирической необходимости введения молекулярной структуры вещества. Максвелл не знал, в какой степени его электромагнитные концепции применимы на молекулярном уровне. Он избегал микрофизических соображений всякий раз, когда макроскопический подход оказывался достаточным.

<sup>80</sup> Maxwell 1873a: # 615.

<sup>82</sup> Maxwell 1873a: # 55 (свечение). № 255 (электролиз).

<sup>83</sup> Maxwell 1873a: # 255. # 260.

<sup>84</sup> Maxwell 1873a: Vol. 2. Часть 3. Гл. 6 («Теория магнитной индукции Вебера» с модификацией, объясняющей остаточную намагниченность); Maxwell to Tail 23 декабря 1867 г. в *SLPM* 2: 336. и Maxwell 1873a: # 809 (Верде, исключая Фарадея); Том 2. Часть 4. Гл. 22 («Электрическая теория магнетизма»); # 835 (простота амперовского взгляда).

<sup>85</sup> Maxwell 1873a: ##788-9 ( $\epsilon \sim n^2$  и дисперсия); #800 (золотые листики), а также прозрачность электролитов в #799; #789 (цитата). Максвелл дал молекулярную теорию аномальной дисперсии в вопросе Триппса 1868 года (*SLPM* 2: 419-21, и Rayleigh 1899), также в рукописи 1873 года (*SLPM* 2: 461-2): см. Whittaker 1951: 262; Buchwald 1985a: 236; Harman 1994: 11-12.

<sup>86</sup> Maxwell 1873a: #822-7 (Максвелл также включил дисперсионные понятия Коши). См. также Knudsen 1976: 278-81.

## 4.6 Выводы

Исходя из трудов Фарадея и Томсона, Максвелл поэтапно пришел к

основам своей теории электромагнитного поля в трех больших мемуарах.

В работе *"О силовых линиях Фарадея"* его целью было получить математическое выражение концепции поля Фарадея. Он нашел методы математики поля Томсона особенно полезными, но существенно изменил их. Томсон отвел электрическим и магнитным (скалярным) потенциалам центральную роль, как нейтральным посредникам между математикой действия на расстоянии и полевыми рассуждениями Фарадея. Вместо этого Максвелл сделал силовые центральным понятием своей теории. Он набросил геометрическую сеть из силовых линий и ортогональных поверхностей на поле Фарадея и уловил математические законы поля непосредственно в терминах величин поля. Он также использовал аналогию потока Томсона и извлек из нее важный структурный компонент своей теории: различие между интенсивностью и количеством (силой и потоком). С помощью этих модификаций методов Томсона Максвелл изобрел мощную геометрию сетки поля и получил два закона циркуляции  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$  и  $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$ , отразившие интуицию Фарадея о взаимоотношениях между электричеством и магнетизмом.

В первой части работы *"О физических силовых линиях"* Максвелл представил механическую модель магнитного поля, которая близко соответствовала представлениям Томсона о вихревой природе магнетизма. В отличие от предыдущей аналогии с потоком, эта модель учитывала механические силы магнитного происхождения и электромагнитную индукцию. Вскоре Максвелл модифицировал ее, включив электростатику и оптику, совершенно непредусмотренную Томсоном. Это дало ток смещения, полный набор уравнений Максвелла и выражение скорости света в терминах электромагнитных величин. Хотя Максвелл признавал искусственность своей модели, он твердо верил в реальность двух особенностей: взаимосвязанных вихревых вращений и упругой деформации соединительного механизма. Вращения представляли собой магнитное поле, а упругие деформации-электрическое поле (смещение).

В своей *"динамической теории электромагнитного поля"* Максвелл заменил свою модель вихря динамическим обоснованием уравнений поля. Он рассматривал магнитное поле как скрытый механизм, движение которого контролируется электрическим током. Таким образом, потенциал  $\mathbf{A}$  приобрел центральное значение как уменьшенный импульс механизма поля, увлекаемого электрическим током. Максвелл объединил свои уравнения поля, чтобы получить волновое уравнение, и достиг истинно электромагнитной оптики, в которой свет стал волновым электромагнитным полем.

Динамический подход требовал, чтобы магнитное движение определялось только токами. Соответственно, Максвелл сделал ток

смещения частью полного тока. Этот шаг приблизил его к понятиям Фарадея о заряде и токе. В вихревой модели электрический ток соответствовал движению частиц между вихрями, а заряд - их накоплению. В новой динамической теории, и более определенно в *Трактате*, Максвелл определил электрический ток как перенос поляризации, а заряд - как разрыв поляризации. Здесь поляризация была примитивным понятием: любая попытка интерпретировать ее как микроскопическое смещение электрического заряда приводила к абсурду. Теория Максвелла была чистой теорией поля, игнорируя современную дихотомию между электричеством и полем.

В зрелой форме *Трактата* теория Максвелла имела центральное ядро - обоснование общей теории электромагнитного поля, и периферию, касающуюся менее понятных явлений. Ядро содержало полевую теорию электричества с полевыми представлениями заряда и тока, вывод уравнений движения методом Лагранжа и основы электромагнитной теории света. Периферия включала фрагментарные механизмы различных видов электрической проводимости, а также специальные теории намагничивания и магнитооптического вращения.

Ядро *Трактата* было по существу макроскопическим, в том смысле, что основные понятия поля, заряда и тока имели макроскопический смысл. Он рассматривал вещество и эфир как единую сплошную среду с переменными макроскопическими свойствами (удельная индуктивность, магнитная проницаемость и проводимость) и избегал рассуждений о моделях эфира и молекулах вещества. В периферийной части Максвелл показал необходимость более детального представления о связи между эфиром и веществом. Он попробовал три различные стратегии. Для намагничивания он изменил свою теорию, включив в нее молекулярные предположения; для электролиза он предложил временную ионную теорию, которая противоречила его общей концепции электрического тока; для эффекта Фарадея его метод был основан, по сути, на феноменологической модификации оптического лагранжиана, хотя он ссылался на более глубокий молекулярный механизм.

Отвергая прямое действие на расстоянии и электрические флюиды, Максвелл дистанцировался от континентальной физики. Был ли он так последователен - главный вопрос для комментаторов Максвелла. Недавние исследования показали, что Максвелл был более последовательным, чем это обычно признается. Зигель подробно показал, что вихревая модель Максвелла очень хорошо согласуется друг с другом и объясняет все электродинамические и электростатические явления, известные Максвеллу. Большинство несоответствий, замеченных более ранними комментаторами этой модели, можно проследить по их неспособности отличить соответствующие концепции заряда и тока от концепций,

предложенных в *Трактате*.<sup>87</sup> Следует признать, что в мемуарах по динамической теории были подлинные несоответствия из-за необоснованного смешения понятий поляризации Фарадея и Моссотти. Однако в форме, приведенной в *Трактате*, понятия Максвелла о заряде и токе были вполне последовательны, что наиболее четко показал Бухвальд. Здесь читателей Максвелла часто вводила в заблуждение метафора "смещения электричества", которая, как кажется, указывает на смещение электрического заряда (как это происходит в континентальной концепции поляризации), тогда как Максвелл имел в виду нечто аналогичное смещению *нейтральной* несжимаемой жидкости. Заряд - это не то, что смещается, это пространственный разрыв в деформации, подразумеваемой в "смещении". Как будет показано в следующей главе, последовательность взглядов Максвелла отчетливо проявляется в более педагогических презентациях, предложенных последователями Максвелла.

Другой проблемой максвелловского учения является вопрос о происхождении тока смещения. Чрезмерное внимание к этому вопросу привело к искажению общего представления о начинаниях и достижениях Максвелла в электрической тематике. Как отметил Уайз, первыми крупными нововведениями Максвелла были принципиально новая геометризация концепций поля Фарадея и Томсона, а также важное различие между количеством и интенсивностью. Первое привело Максвелла к форме закона Ампера ( $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$ ), а второе подготовило почву для динамической теории. Что касается пути Максвелла к току смещения, то его можно подытожить следующим образом.

Когда Максвелл разработал представление Томсона о вихревом движении в магнитном поле, он представил холостые колеса как прямую иллюстрацию того, что ток — это *curl* магнитной силы. Первоначальное назначение этого механизма было чисто электродинамическим. Однако Максвелл знал, что и электростатика Фарадея, и волновая теория света требуют упругой среды. Он также знал, что механическая согласованность его модели требует упругости вращающихся ячеек. Когда он принял во внимание эту упругость, то обнаружил, что она подразумевает новый вклад -  $\partial \epsilon \mathbf{E} / \partial t$  в ток  $\mathbf{j}$  холостых колес. Соответствующая модификация закона Ампера позволила учитывать незамкнутые токи.

При таком веском аргументе было бы напрасно выделять конкретную причину введения Максвеллом тока смещения. Он искал наиболее полную и последовательную теорию, которая удовлетворяла бы ряду запутанных условий: выражение в терминах силовых линий Фарадея и связанных с ними пар интенсивность/количество ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ) и ( $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{B}$ ), существование вихревого движения в магнитном поле, интеграция вихревого движения в механическую модель эфира, возможность

диэлектрической поляризации, идентичность электромагнитного и оптического эфиров.<sup>88</sup> Чтобы еще больше усложнить историю, в своей более поздней динамической теории и в *Трактате* Максвелл дал другое обоснование тока смещения, основанное на фарадеевских понятиях заряда и тока. Любой ток стал замкнутым, и закон Ампера больше не нуждался в изменении.

Электромагнитная теория Максвелла - пример мощной методологии. Важные аспекты этой методологии можно проследить у других британских авторов. Максвелл высоко оценил

*"метод развития науки Томсона и Тэйта, в котором каждый отдел рассматривается не просто как набор фактов, которые должны быть согласованы с помощью формул, хранящихся у математиков, но как новая математика, с помощью которой могут быть разработаны новые идеи"*.

Этот подход включал динамические идеи, с помощью которых "два северных волшебника" проводили свои математические рассуждения. Он также обеспечил иллюстрации и аналогии, которыми Максвелл поделился с Томсоном. Основы полевой математики не родились в мозгу чистых математиков. Им потребовались наводящие образы текучих флюидов и напряженных тел.<sup>89</sup>

Методология Максвелла имела более оригинальные компоненты. Он разработал классификацию математических величин как сокращенный метод формальных аналогий. Он придавал большее, чем Томсон, значение геометрическим рассуждениям, и наполнил свои работы красивыми фигурами изогнутых линий и поверхностей. Он следил за топологическими отношениями, как это делают сегодняшние теоретики поля. Наконец, он положил начало умеренному механическому редукционизму, в котором связующий механизм больше не выставлялся напоказ. Простое предположение о существовании такого механизма подразумевало существование лагранжиана, из которого можно было вывести эволюцию эмпирически контролируемых величин. Однако Максвелл все еще надеялся на более детальное механическое понимание полевых процессов. На данный момент он позаботился о том, чтобы лагранжева динамика не была слишком абстрактной. Он дополнил ее метафорами, иллюстрациями и энергетикой.<sup>90</sup>

Что касается последовательности, экономии и педагогики, *Трактат* Максвелла был несовершенен даже в своей основе. Например, Максвелл не до конца осознал двусмысленность своих потенциалов; он отказался исключить их из окончательных уравнений; и он ввел в заблуждение многих своих читателей своей метафорой смещения. На *периферии* он мирился с противоречием квантованного электрического заряда и время от времени возвращался к упруго-твердой теории света.

Однако система *Трактата* была достаточно определенной, чтобы

направлять дальнейшие улучшения. Максвелл определил новый вид теоретической физики, в котором классификация математических величин, векторный символизм и лагранжева динамика стали основными строительными инструментами. Он также выявил противоречие между макрофизикой поля и атомной структурой вещества и открыл способы решения этого противоречия. Его физика была незавершенным поиском, а предложенные методы поддерживали теорию открытой и живой.

<sup>87</sup> Кроме того, некоторые из них не смогли понять механику модели.

<sup>88</sup> ср. Siegel 1975.

<sup>89</sup> Максвелл 1873с: 325.

<sup>90</sup> ср. проникающий анализ в Harman 1987.

## 5. Британские максвелловцы

### 5.1 Введение

Электромагнитная теория Максвелла оставалась частным предприятием до начала 1870-х годов. Ситуация начала меняться после назначения Максвелла руководителем новой Кавендишской лаборатории в 1871 году и публикации *Трактата* в 1873 году. Это был медленный процесс, потому что *Трактат* был "очень крепким орешком" даже для кембриджских отличников, и потому что в своем новом качестве Максвелл не мог эффективно руководить теоретическими исследованиями. Тем не менее, некоторые англоязычные студенты, изучающие электромагнетизм в Кембридже и других местах, теперь были ознакомлены с новой доктриной. Некоторые из них стали учениками и апостолами Максвелла.<sup>1</sup>

То, что максвелловские исследования не расцвели раньше, не должно быть слишком удивительным. В формах, представленных в 1862 и 1865 годах, теория Максвелла была слишком предварительной, чтобы эффективно бросить вызов устоявшимся представлениям. Кроме того, человек, который обладал бы наибольшей силой для популяризации идей Максвелла, сэр Уильям Томсон, не сделал этого. Его молчание даже переросло в открытую враждебность после смерти Максвелла в 1879 году. Прежде чем изучать последующее восприятие электродинамики Максвелла, мы рассмотрим, почему ее главный вдохновитель не поддержал ее. Это поможет определить оригинальность Максвелла и развеять миф об очевидном превосходстве его теории.

### 5.2 Антипатия Томсона

В своих Балтиморских лекциях, прочитанных осенью 1884 года, сэр У. Томсон выразил свое "огромное восхищение" вихревой моделью Максвелла и свой интерес к связи скорости света с электромагнитными измерениями. Однако он считал электромагнитную теорию света Максвелла "шагом назад по сравнению с абсолютно определенным механическим движением", которое давали Френель и его последователи. Томсон настаивал на том, что



*"простая динамика и истинное упругое твердое тело дают, как мне кажется, единственное надежное основание для волновой теории света при нынешнем состоянии наших знаний".*

Он не принял отход Максвелла от механических моделей и не считал лагранжеву трактовку скрытых механизмов достаточным механическим основанием:<sup>2</sup>

*Я никогда не удовлетворяюсь, пока не смогу сделать механическую модель вещи. Если я могу сделать механическую модель, я могу ее понять. Пока я не могу сделать механическую модель до конца, я не могу понять; и именно поэтому я не могу получить электромагнитную теорию. Я твердо верю в электромагнитную теорию света, и что когда мы поймем электричество, магнетизм и свет, мы увидим их все вместе как части единого целого. Но я хочу понять свет настолько хорошо, насколько это возможно, без введения вещей, которые мы понимаем еще меньше. Вот почему я беру простую динамику: я могу взять модель в простой динамике, но не в электромагнетизме*

Заметит, что сам Максвелл считал более абстрактные динамические методы лишь временными и сожалел о своей неспособности

*"сделать следующий шаг, а именно, объяснить механическими соображениями эти напряжения в диэлектрике".*

Кроме того, его первые работы по электромагнитной теории зависели от конкретных механических моделей. Однако даже в этом Максвелл отличался от Томсона. Из своих аналогий Максвелл извлекал различия и понятия, которые были чужды основной области исследования, и считал, что они выходят за рамки конкретных геометрических или механических моделей. Таким образом были получены существенные компоненты его теории: различие между потоком и силой, ток смещения и выражение напряжений. Томсон с недоверием относился к такому авантюрному использованию аналогий.<sup>3</sup>

Точно так же Томсон, должно быть, чувствовал, что электростатика Фарадея превосходит аналогию между вакуумом и вещественным диэлектриком. Не было никаких эмпирических доказательств того, что вакуум может быть поляризован, а собственная теория диэлектриков Томсона указывала на то, что поляризационные заряды в вещественных диэлектриках и стандартная электростатика были достаточны для объяснения всех результатов Фарадея. Поэтому для Томсона не было поляризации вакуума или воздуха и тока смещения. Он считал, что передача электростатической силы не связана с электрическими токами, что она происходит гораздо быстрее, чем распространение света, и что она, вероятно, связана с отсутствующими волнами сжатия в упруго-твердой теории света. Он осудил идею Максвелла о поперечных электрических волнах как чистую фантазию.<sup>4</sup>

С эмпирической точки зрения, закрепленной Томсоном в исследованиях телеграфных линий, электростатические и электродинамические взаимодействия были принципиально разными. Электростатический потенциал сам по себе был физическим объектом, распространение которого из-за переменных электростатических зарядов можно обсудить отдельно.<sup>5</sup>

Напротив, для Максвелла любое изменение электрического потенциала подразумевало диэлектрический ток и, следовательно, электродинамическую связь с другими токами. Когда в 1888 году Томсон столкнулся с открытием электромагнитных волн и последующим волнением британских максвелловцев, его первая реакция была оборонительной. Он по-прежнему считал, что электростатический потенциал распространяется отдельно, и пытался доказать, что *"гениальная [...], но не вполне обоснованная гипотеза Максвелла"* о токе смещения имеет абсурдные последствия для замкнутых токов проводимости телеграфа.<sup>6</sup>

Внутри однородного проводника без изменяющейся электризации ( $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ ) уравнения Максвелла приводят к уравнению  $\mu(\sigma + \epsilon \partial/\partial t) \partial \mathbf{j} / \partial t = \Delta \mathbf{j}$  для тока проводимости  $\mathbf{j}$ , что отличается от предсказаний предыдущих электродинамических теорий на  $\epsilon$ -член. Томсон решил, что это не может быть правильным

*"согласно любой мыслимой гипотезе относительно электропроводности, будь то металлов, или камней, или камедей, или смол, или воска, или шеллака, или индийского каучука, или гуттаперчи, или стекла, или твердых или жидких электролитов".*

Максвелловец ответил бы, что новый термин не имеет отношения к проводимости: это была небольшая поправка, связанная с излучением электромагнитной энергии переменным током. Но Томсон, похоже, исключил любое соображение, которое могло бы изменить структуру его теории телеграфа.<sup>7</sup>

Конечно, Томсон не отрицал необходимости распространения электродинамики на неполные цепи. Однако это можно было сделать без тока смещения, как уже показал Гельмгольц (см. главу 6). Томсон предложил обобщение, которое давало простейшие уравнения для потенциалов и, таким образом,

*"простые и естественные решения, не содержащие ничего неясного или трудного для понимания, или для веры, когда они поняты, путем их применения к практическим задачам или к мыслимым идеальным задачам, таким как передача обычных телефонных сигналов по подводным телеграфным проводам и наземным линиям, электрические колебания в конечном изолированном проводнике любой формы, передача электричества через бесконечное твердое тело, и т.д. и т.п."*

Практические потребности современности доминировали в его подходе к электрическим проблемам. Он не стал бы принимать спорные

теории, не подкрепленные простым динамическим эфиром, упругим твердым телом или чем-то лучшим.<sup>8</sup>

Некоторое время Томсон не мог полностью противостоять волне энтузиазма, последовавшей за "проверкой" Герцем теории Максвелла. В январе 1889 года он заявил, что теория Максвелла ознаменовала "этап огромной важности в электромагнитной доктрине". В своем предисловии к книге Герца "Электрические волны" в 1893 году он высоко оценил "великолепно разработанную теорию Максвелла".<sup>9</sup> Однако он продолжал рассуждать об альтернативных теориях и дал понять Фицджеральду, насколько сильна его неприязнь к новой максвелловской символике (Герца и Хевисайда):

*"Это просто нигилизм, не имеющий места в натурфилософии, довольствоваться двумя формулами электромагнитной и электростатической энергии, быть довольным вектором и восхищаться страницей симметричных формул".<sup>10</sup>*

<sup>1</sup> Нэнсон-Максвеллу, 5 декабря 1873 г., цитируется в Warwick [1999], раздел 6.3. О глубоком изучении использования *Трактата* Максвелла в Кембридже, см. Warwick, там же: гл. 6.

<sup>2</sup> Thomson 1884: 132, 6, 270-271. См. также Smith and Wise 1989: 463-1; Harman 1987: 267-268, 290-291; Knudsen 1985: 177-178; Siegel 1991: 159-160.

<sup>3</sup> Maxwell 1873a: # 111. См. также Wise 1981: 19-21.

<sup>4</sup> О диэлектриках см. записи лекций Томсона в Глазго, сделанные Уильямом Джеком в 1852-53 годах, цитируемые и обсуждаемые в Wise and Smith 1987: 332-3, Smith and Wise 1989: 226-7, 451. Об электростатической задержке см. Thomson 1884: 6, 42.

К сожалению, Томсон так и не объяснил свою неприязнь к току смещения. Настоящая интерпретация предполагает глубокую взаимосвязь между его взглядами на диэлектрики (в лекциях в Глазго), его гораздо более поздними идеями о задержке потенциала и его теорией телеграфных кабелей.

<sup>5</sup> Thomson 1884: 5-6. 41-3. Томсон считал, что сферический проводник, находящийся под действием периодического потенциала, будет излучать сферические продольные волны, распространяющиеся намного быстрее света (там же: 41-2, и Thomson 1896). Он также рассмотрел случай периодического движения наэлектризованного проводника и утверждал, что фазовая задержка соответствующего потенциала в принципе измерима (Томсон - Хевисайду, 6 ноября 1888 года, цитируется в HEP 2: 490. и обсуждается в Hunt 1991a: 186-187). См. Wise and Smith 1987: 340-1; Smith and Wise 1989: 461-463, которые настаивают на телеграфном контексте взглядов Томсона.

<sup>6</sup> Томсон, 1888: 543. См. также Knudsen: 172-3; Smith and Wise 1989: 477-478 Hunt 1991a: 162-164

<sup>7</sup> Thomson 1888: 543.

<sup>8</sup> Thomson 1888: 544. См. также Smith and Wise 1989: 480. Уравнения Томсона были идентичны случаю Неймана ( $k = 1$ ) в уравнениях Гельмгольца.

<sup>9</sup> Thomson 1889: 490; Hertz 1893: XIII. См. также Hunt 1991a: 167.

<sup>10</sup> Thomson to FitzGerald, 9 апреля 1896 года, цитируется в Thompson 1910, Vol. 2: 1065.

После 1888 года Томсон все еще не понимал, что теория Максвелла не допускает мгновенного распространения физических эффектов. См. его полемику 1896 года с FitzGerald, обсуждаемую в Wise and Smith 1987: 340-342.

## 5.3 Теория Максвелла в изображениях

### 5.3.1 Шнур и бусы Лоджа

Представления Максвелла о заряде и токе было трудно понять даже британским физикам. Первым человеком, объяснившим и уточнившим эти концепции Максвелла для более широкой аудитории, был Оливер Лодж, сын торговца глиной, из всех сил пытавшийся избежать бизнеса своего отца и стать физиком. У Лоджа не было больших математических навыков и образования в Кембридже (он получил докторскую степень в Университетском колледже Лондона). Главным образом экспериментатор, он рассуждал с точки зрения сложных моделей и картин, которые объясняли или предлагали различные явления без каких-либо расчетов.<sup>11</sup>

В 1876 году его усилия по пониманию *Трактата* Максвелла привели к созданию первой модели максвелловского заряда и тока. Он придумал и построил устройство на рис. 5.1, в котором нерастяжимый шнур циркулирует по шкивам ABCD. Груз  $W$  соответствует электродвижущей силе, зажим  $S$  - выключателю (с бесконечным сопротивлением), а восемь бусин представляют собой атомы вещества.

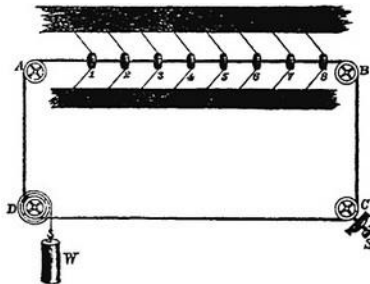


Рис. 5.1. Модель Лоджа со шнуром и бусинами для частично диэлектрической схемы.

Движение шнура соответствует полному току Максвелла. В диэлектрике бусины прочно прикреплены к шнуру, и их упругие связи с жесткими опорами растягиваются при натяжении шнура. Это растяжение представляет собой электрическое смещение. Избыток шнура в точке А представляет собой "+" заряд, а недостаток шнура в точке В "-" заряд. В проводнике бусины могут скользить по шнуру. Поэтому растяжение несущих нитей меньше и исчезает при отсутствии тока. Вязкое трение между бусинами и шнуром представляет собой электрическое сопротивление.<sup>12</sup>

Лодж распространил объяснение своим устройством на пробойный разряд, на поглощение электричества, на заряд посредством индукции и даже на электролитическую проводимость. Модель ясно показала, что максвелловский заряд - это разрыв в напряженном состоянии, и что электричество в максвелловском понимании не может накапливаться нигде. Это помогло многим физикам и инженерам понять Максвелла,<sup>13</sup> однако усилило метафору Максвелла о несжимаемой жидкости и предположило, что смещение - это фактический сдвиг какого-то

вещества в направлении электродвижущей силы, что нечто течет вдоль электрических токов.

<sup>11</sup> см. Hunt 1991a: 25-26; Lodge 1931.

<sup>12</sup> Lodge 1876, и более сложная форма в Lodge 1889: 32-62. См. также Hunt 1991a: 88-89.

<sup>13</sup> Г. Роуланд извлек выгоду из чтения статьи Лоджа: см. также Buchwald, 1985a: 78-79. *Modern Views* (Lodge 1889) был бестселлером.

### 5.3.2 Поток энергии Пойнтинга

В 1884 году Джон Генри Пойнтинг, третий студент-отличник Кембриджа, профессор физики в Бирмингеме, оспорил представление об электрическом токе как о потоке. В отличие от Лоджа, Пойнтинг скептически относился к любому механическому представлению теории Максвелла и сосредоточился на более непосредственно наблюдаемых аспектах теории: силовых линиях Фарадея и распределение энергии в поле. С Кембриджской беглостью в дифференциальных уравнениях и геометрических представлениях он без труда ответил на вопрос:

*"Как энергия электрического тока переходит из точки в точку - то есть, какими путями и по какому закону она перемещается от той части цепи, где она впервые распознается как электрическая и магнитная, к тем частям, где она превращается в тепло или другие формы?"*<sup>14</sup>

Современному читателю этот вопрос кажется очевидным но для современников Максвелла и Пойнтинга это было не так. Энергетические соображения обычно касались глобального входа и выхода в пространственно протяженной системе. Когда Максвелл локализовал энергию в электромагнитном поле, или когда теоретики упругого твердого тела выражали упругую энергию, они не обсуждали локальные потоки энергии. Единственным исключением был случай со светом, возможно, как выживание старых существенных теорий. Сам Максвелл ограничил свое обсуждение потока энергии случаем плоских электромагнитных световых волн. Именно Рэлей впервые рассмотрел поток энергии в континууме в своей *"Теории звука"* в 1877-1878 годах. Пойнтинг знал об этом источнике, когда рассматривал вопрос о потоке энергии в электромагнитном поле.<sup>15</sup>

Взяв производную по времени от интеграла  $U$  плотности энергии  $(\epsilon E^2 + \mu H^2)/2$  по объему  $V$ , ограниченному поверхностью  $S$ , используя уравнения Максвелла и интегрируя по частям, Пойнтинг нашел

$$\frac{dU}{dt} = - \int_V \sigma E^2 d\tau - \int_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S} \quad (5.1)$$

для тел в состоянии покоя. Поскольку первый член представляет собой энергию, потерянную в виде тепла Джоуля, второй должен быть отождествлен с потоком энергии через поверхность. Пойнтинг принял  $(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{S}$  за поток энергии через элемент поверхности  $d\mathbf{S}$ . Последствия для путей энергии в обычных электрических цепях были поразительны.<sup>16</sup>

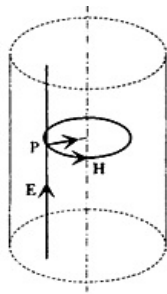


Рис. 5.2. Электрическая и магнитная силовые линии проходят через точку Р цилиндрического проводника. Стрелка в точке Р указывает направление потока энергии.

Сначала рассмотрим случай длинного цилиндрического проводника (рис. 5.2), по которому течет постоянный ток. Силовые магнитные линии представляют собой окружности с центром на оси цилиндра, а силовые электрические линии внутри проводника параллельны этой оси. Поэтому поток энергии в проводнике направлен радиально внутрь, что означает, что энергия поступает из окружающего диэлектрика и постепенно преобразуется в тепло.

Теперь рассмотрим случай конденсатора с обкладками AL и BN, медленно разряжающегося через тонкий провод LMN (рис. 5.3).

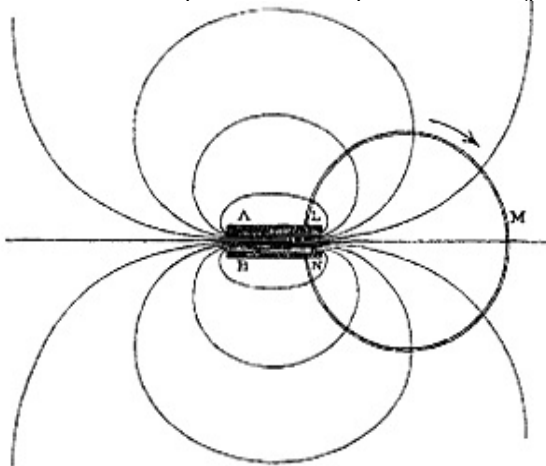


Рис. 5.3. Линии потока энергии для медленно разряжающегося конденсатора (Пойнтинг 1884: 183).

Если провод проходит вдоль силовой линии и если ток мал, то поверхности отключенного конденсатора остаются эквипотенциальными. Поскольку энергия перпендикулярна электрической силе, она должна течь по этим поверхностям. Точнее, энергия течет от конденсатора через диэлектрик к проводу, в который она входит перпендикулярно. По проводнику энергия не течет, вопреки общепринятому представлению.<sup>17</sup>

<sup>14</sup> 16 Poynting, 1884: 176. Ср. некрологи Дж. Дж. Томсона и Дж. Ланнора о Пойнтинге 1920: IV-XXII, XXIV-XXVI.

- <sup>15</sup> Maxwell 1865: 587-588; Poynting 1885a (прочитано 8 ноября 1883 г.), где скорость звука согласно Рэлею получается из рассмотрения потока энергии. О новизне идей Пойнтинга, ср. Buchwald, 1985a: 41-43. О связи с физикой Рэлея и Кембриджа, см. Warwick [1999]: гл. 6. В своих лекциях по механике, опубликованных в 1876 г. (Kirchhoff 1876: 311), Кирхгоф показал, что производная по времени энергии звука в данном объеме является суммой поверхностного интеграла и интеграла объема в зависимости от включенных источников (его целью было дать гауссово доказательство существования и единственности потенциала скорости). В своей *"Теории звука"* (Rayleigh 1877-1878: № 295) Рэлей воспроизвел этот вывод и интерпретировал поверхностный термин как поток энергии через поверхность.
- <sup>16</sup> Poynting 1884: 176-81. Ср. Buchwald 1985a: 44. Пойнтинг включил в свой баланс движение текущих работников.
- <sup>17</sup> 16 Poynting, 1884: 181-84. Ср. Buchwald 1985a: 44.

### 5.3.3 Движущиеся силовые трубки

В своей позитивистской манере Пойнтинг рассматривал силовые линии Фарадея, распределение и поток энергии как основные свойства электромагнитного поля. Во второй статье он попытался связать поток энергии с поведением силовых линий. Фарадей уже показал, что ЭДС, индуцированная в покое лежащем линейном проводнике, обусловлена пересечением проводника магнитными силовыми линиями. В более общем смысле Пойнтинг предположил, что каждая круговая ЭДС обусловлена движением трубок магнитной индукции, а также что каждая "магнитодвижущая сила" (МДС) обусловлена движением трубок электрической индукции.<sup>18</sup>

Рассмотрим в этом свете цилиндрический проводник (рис. 5.2.) Круговая магнитная сила вокруг провода соответствует боковому движению трубок электрической индукции к проводу. Это движение и аналогичное движение магнитных трубок индукции объясняют поток энергии в провод. Затем Пойнтинг предложил подходящую картину электрического тока:

*"Провод не в состоянии выдержать постоянно возрастающую индукцию, и она разрушает трубки, как бы разрывает их, а их энергия в конечном итоге проявляется в виде тепла".*

Таким образом, он сохранил идею Фарадея и Максвелла о проводимости как уменьшение напряжения поляризации, с существенным отличием: поляризация теперь распространялась вбок и исходила от окружающего диэлектрика.<sup>19</sup>

На простом примере двух конденсаторов (рис. 5.4) Пойнтинг показал, как пара проводов может передавать энергию через пространство. Первоначально конденсатор АВ заряжен, а конденсатор CD разряжен.

Когда вводятся соединительные провода, индукционные трубки первого конденсатора движутся вбок, ко второму конденсатору, удерживая свои концы на обращенных друг к другу сторонах двух проводов.

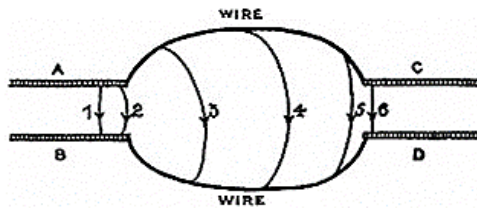


Рис. 5.4. Движение трубки электрической силы при разряде конденсатора АВ в конденсатор CD (Poynting 1885b: 225).

При этом соответствующие этим концам противоположные электрические заряды перемещаются вдоль двух проводов (по их поверхности), пока не распределятся равномерно между двумя конденсаторами. В этом процессе трубки частично распадаются в проводах, что приводит к потере энергии в джоулевом тепле. Однако основная роль проводов - разрешать и направлять движение индукционных трубок. Опять же, в проводах не перемещается ни энергия, ни электрический заряд. В случае воздушного телеграфного провода, объяснял Пойнтинг, энергия перемещается в пространстве между проводом и Землей, с противоположными электрическими зарядами на их обращенных друг к другу поверхностях. В подводном телеграфном кабеле энергия перемещается в изоляторе между центральным медным проводом и окружающей его железной оболочкой.<sup>20</sup>

Для воплощения своих идей в уравнения, Пойнтинг ввел вектор  $\mathbf{A}$ , чтобы  $\mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$  дало общее число трубок магнитной индукции, пересекающих длину  $d\mathbf{l}$  с начала отсчета времени, и аналогичный вектор  $\mathbf{Z}$  в электрическом случае. Магнитная индукция  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$  на поверхности  $d\mathbf{S}$  равна общему числу трубок, пересекающих ее границу. Следовательно,  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ . Электрическая индукция  $\mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$  через поверхность  $d\mathbf{S}$  равна числу  $(\nabla \times \mathbf{Z}) \cdot d\mathbf{S}$  электрических трубок, пересекающих ее границу, минус  $(\int j dt) \cdot d\mathbf{S}$ , так как по определению электрический ток - это число трубок, распавшихся в единицу времени. Поэтому  $\partial(\nabla \times \mathbf{Z})/\partial t = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D}/\partial t$ . Согласно принципам Пойнтинга для движения трубки, электрические и магнитные силы, соответствующие движению магнитной и электрической трубок индуктивности, равны  $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A}/\partial t$  и  $\mathbf{H} = \partial \mathbf{Z}/\partial t$ . Первое уравнение, вплоть до градиентного члена, совпадает с законом индукции Максвелла для тел, находящихся в покое, с новым значением для векторного потенциала. The curl второго уравнения вместе с приведенным выше соотношением между  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{j}$  позволяет получить максвелловскую форму закона Ампера, включая ток смещения.<sup>21</sup>

В общем случае векторы  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{Z}$  зависят от предыдущего состояния системы, поэтому для силовых трубок нельзя дать общий закон движения. Пойнтинг, похоже, не знал об этой трудности. В простых случаях он мог указать движение трубок, и этого было достаточно, чтобы убедить себя и



своего друга Дж. Дж. Томсона в эвристической силе этой картины электромагнитного поля.<sup>22</sup>

Не все последователи Максвелла приняли представление Пойнтинга о движущихся силовых трубках. Однако выражение потока энергии быстро стало частью максвелловского корпуса. Кроме того, Пойнтинг навязал свой взгляд на ток проводимости, "состоящий в основном из схождения электрической и магнитной энергии из среды в проводник и ее преобразования там в другие формы". Наконец, он внес свой вклад в разъяснение Максвелловского смещения. Термин "смещение", объяснил Пойнтинг, был выбран неудачно, поскольку он благоприятствовал ошибочному мнению, что энергия передается по проводнику. Даже если за деформацию диэлектрика действительно отвечает смещение чего-либо,  $\mathbf{D}$  Максвелла не обязательно должно быть идентична этому смещению; оно должна быть лишь функцией этого смещения.<sup>23</sup>

<sup>18</sup> Poynting 1885b. См. также Buchwald, 1985a: 45-49.

<sup>19</sup> Poynting 1885b: 199. Позднее Дж. Дж. Томсон рассматривал боковое давление Фарадея как причину движение трубок: см. например, J. J. Thomson 1895a: 277.

<sup>20</sup> Poynting 1885c: 225-257; Poynting 1895: 270-271 (телеграф).

<sup>21</sup> Это упрощенный перевод Poynting 1885b: 212-223.

<sup>22</sup> О Дж. Дж. Томсоне. См. главы 7, стр. 295-300; Buchwald 1985a: 49-53.

<sup>23</sup> Poynting, 1884: 192; там же. со ссылкой на Glazebrook 1881 г., для которого  $\mathbf{D}$  было лапласианом фактического упругого смещения.

#### **5.3.4 Колеса и резиновые ленты Фитцджеральда**

Среди сразу же поддержавших взгляды Пойнтинга был ирландский последователь Максвелла, Джордж Фрэнсис Фицджеральд. Этот высокий, юморной человек обладал "самым быстрым и оригинальным мозгом из всех", как позже оценил Хевисайд. Он окончил и получил профессорскую степень в Тринити-колледже в Дублине, который был столь же престижным математическим учебным заведением, как и Кембридж. Его первый вклад в теорию Максвелла, который будет обсуждаться позже, представлял собой удивительное сочетание математической виртуозности и физической проницательности. В отличие от Пойнтинга, Фицджеральд был очень философичен. Его личный синтез идеализма Беркли и практического материализма заставлял его ожидать сведения электромагнетизма к веществу и движению. Он в целом симпатизировал моделям своего друга Оливера Лоджа: приблизительные и предварительные, они могли указывать на истинные отношения конечного механического эфира.<sup>24</sup>

По прочтении Пойнтинга, Фицджеральд искал новую модель электромагнитного эфира, которая проиллюстрировала бы новые идеи о потоке энергии, электропроводности и смещении. Старая вихревая модель Максвелла и более современные модели Лоджа не подходили,

поскольку в них речь шла о потоке электричества. Однако Фицджеральд сохранил два основных компонента модели Максвелла: магнитная сила соответствовала локальному вращению, а деформация диэлектрика - упругой деформации механизма, соединяющего вращения. В двухмерном варианте его модель представляла собой множество колес, установленных на неподвижных осях и попарно соединенных эластичными резиновыми лентами (рис. 5.5). Построенная модель была "довольно красивой на красном дереве с яркими латунными колесами". Фицджеральд использовал ее как в педагогических, так и в исследовательских целях.<sup>25</sup>

В этой модели скорость вращения колес представляет магнитную силу, а разность деформаций между двумя сторонами резиновой ленты представляет электрическое смещение в перпендикулярном направлении.

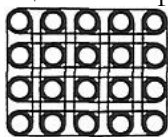


Рис.5.5. Моделирование Фитцджеральдом электромагнитного поля резиновыми лентами (из Hunt 1991a: 79)

В проводнике резиновые ленты могут скользить по колесам, создавая таким образом тепло от трения. Область идеальной проводимости может быть проиллюстрирована удалением всех упругих полос в этой области. Чтобы понять работу модели, мы можем рассмотреть заряд и разряд конденсатора. Пластины конденсатора и соединительного проводника образуют H-образную область без эластичных полос. Заряд получается вращением колес, граничащих с каналом, и возвращением резинок в канал. Результирующая самоблокирующаяся деформация в области между двумя пластинами соответствует диэлектрической поляризации. Теперь предположим, что резинки в канале могут скользить по колесам, правда, с большим трением. Деформация будет постепенно освобождаться, а ее энергия будет превращаться в тепло трения в канале. В этом процессе энергия распространяется по длине напряженных эластичных полос, то есть в направлении, перпендикулярном каналу. В более общем смысле поток энергии, передаваемый полосами, перпендикулярен смещению в соответствии с доктриной Пойнтинга.<sup>26</sup>

Фитцджеральд также обсудил колебательные и искровые разряды, электростатическую и электромагнитную индукцию. В каждом случае модель точно воспроизводит предсказания теории Максвелла. На самом деле основные уравнения движения одинаковы. Различное вращение двух последовательных колес подразумевает различную деформацию двух сторон соединительной полосы, или на электромагнитном языке  $\nabla \times (\mathbf{H} d\mathbf{l}) = \mathbf{D}$ . Если  $\epsilon$  измеряет упругость полос и угловую инерцию колес, полосы на данном колесе создают чистый крутящий момент  $\nabla \times (\mathbf{D}/\epsilon)$ , который  $\mathbf{d}$  в соответствии с законами динамики должен быть равен изменению во времени углового момента  $\mu \mathbf{H}$ . Таким образом, получены две

закономерности теории Максвелла.<sup>27</sup>

Модель Фитцджеральда послужила отличной иллюстрацией центральных особенностей теории Максвелла, как ее поняли последователи Максвелла. Это показало, что смещение было локальным изменением структуры, что ничто не циркулировало вдоль электрического тока, что электрический заряд предполагал проводимость, а эта энергия циркулировала в направлении, перпендикулярном электрической силе. Однако, как подчеркнул сам Фитцджеральд, модель не представляла связь между эфиром и материей. Материя была обязана «овладеть эфиром, чтобы напрячь его». Также было необходимо создавать электростатические притяжения, потому что напряжение резиновых лент было линейным, а не квадратичным. Это, безусловно, сыграло роль в намагниченных телах и в эффекте Фарадея. Это подняло сложный вопрос: может ли быть простое механическое представление системы Максвелла, которое объединяет эффекты материи? <sup>28</sup>

<sup>24</sup> Хевисайд к Перри [февраль 1901 г.], цитируется в Hunt 1991a: 8. См. также Вклад Лоджа, Лармора и Трутона в «Введение и биография» Фитцджеральда 1902: xix-ixiv; Hunt 1991a: 6-11.

<sup>25</sup> FitzGerald 1885a, 1885b; FitzGerald to Lodge, 3 марта 1894 г, цитируется в Hunt 1991a: 78-9. набросок для расширения модели до трехмерной см. в FitzGerald 1885b: 160-1.

<sup>26</sup> FitzGerald 1885a: 143, 145; 1885b: 157-9. Для ясного, иллюстрированного объяснения, см. также Hunt 1991a: 78-83

<sup>27</sup> FitzGerald 1885a: 147-8. Вместо максвелловских D и B Фитцджеральд использовал их аналоги в среде МакКаллага, как он это сделал в 1879 году (см. ниже).

<sup>28</sup> Фитцджеральд 1885a: 142-143: *"Я не собираюсь показывать, что модель вообще иллюстрирует связь между эфиром и веществом, и действительно считаю, что одним из преимуществ, которые можно извлечь из изучения этой модели, является то, что она так отчетливо подчеркивает различие между явления в зависимости от общих свойств самого эфира и тех, которые зависят от его связи с веществом"*. Там же: 144, Фитцджеральд добавил к своей модели хитроумную систему нитей, чтобы представить электростатические притяжения и дать примерное представление о соответствующей связи между эфиром и веществом.

### 5.3.5 Зубчатые колеса Лоджа

Лодж был уверен, что сможет изобрести полевой механизм для всех электромагнитных процессов. В 1879 году он уже предположил, что эфир состоит из колес положительного и отрицательного электричества, направленных друг к другу, как на рис. 5.6. Вращение положительных колес (или противоположное вращение отрицательных) представляло собой магнитную силу, а их упругая подача соответствовала электрическому смещению, как в более ранней модели Максвелла. Нововведением Лоджа было введение двух электричеств вместо одного, что, по его мнению, было необходимо для объяснения двойного электролитического движения, отсутствия собственного момента электрического тока и существования как положительных, так и отрицательных электрических ветров, среди прочего. Десять лет спустя он опубликовал улучшенную версию этой модели в своем бестселлере *"Современные взгляды на электричество"*. Приняв представление

Фицджеральда о проводимости как о скольжении в механических соединениях, он заменил зубчатые колеса на гладкие колеса внутри проводника (рис. 5.7). Его изображения основных полевых процессов были похожи на изображения Фицджеральда, несмотря на усложнение, внесенное двумя видами колес.<sup>29</sup>

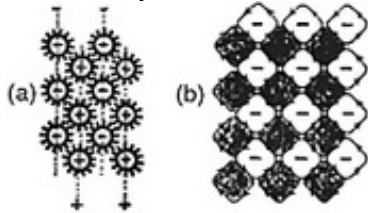


Рис. 5.6. Плоская модель эфира в виде зубчатых колес (a) и её улучшенная версия (b) (Lodge 1889: 179,180)

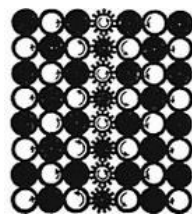


Рис. 5.7. Иллюстрация Лоджа прямого и обратного токов в двух проводниках, (круглые колеса), разделенных тонким изолирующим слоем. (зубчатые колеса) (Lodge 1889:189)

К сожалению, Лодж умножил модели, не указав четко их пределы и взаимосвязь. Только для конденсатора он предложил три различные модели: шнур и бусы, гидропневматическое устройство и зубчатые колеса. Несмотря на то, что он стремился охватить всю область электричества и магнетизма одной последовательной моделью, в итоге он проиллюстрировал различные явления множеством несовместимых моделей. Его "современные взгляды" послужили поводом для знаменитого высказывания Пьера Дюэма:<sup>30</sup>

*"Перед вами книга, призванная объяснить современные теории электричества и изложить новую теорию. В ней нет ничего, кроме струн, бегающих по шкивам, наматывающихся на барабаны, проходящих через бусы и несущих грузы; трубок, качающих воду, в то время как другие набухают и сжимаются; колес, зацепляющихся друг с другом и образующих шестерни для реек. Думая, что попадаем в спокойную и аккуратно упорядоченную обитель разума, мы оказались на фабрике".*

Дюэм воспринял книгу Лоджа как типичную для британцев склонность к механическим моделям. В действительности это был крайний случай, даже с британской точки зрения. Пойнтинг, который вообще с подозрением относился к механическим моделям, заявил, что объяснения Лоджа были "просто гипотетическими" и имели

*"ценность только как подмости, позволяющие нам построить постоянную структуру фактов, то есть явлений, воздействующих на наши органы чувств".*

Он также обнаружил, что модель зубчатого колеса противоречит существенной особенности теории Максвелла - тесной связи между проводимостью и перемещением. В модели зубчатого колеса Лоджа ток смещения подразумевал фактическое смещение двух электричеств, тогда как ток проводимости не подразумевал никакого смещения. Пойнтинг любезно предложил модификацию модели Лоджа, в которой ток

проводимости представлял собой двойную процессию зубчатых колес. Тем не менее, он нашел, что с его движущимися силовыми трубками "гораздо легче иметь дело" и что они с большей вероятностью будут направлять будущие исследования:

*"Я считаю, что мы можем отобразить электрические и магнитные действия с помощью силовых линий и их движений образом, позволяющим нам ясно мыслить об этих явлениях, и хотя конечная природа силовых линий неизвестна, мы можем сказать то же самое об эфире".<sup>31</sup>*

<sup>29</sup> BAR 1879: 258. и Лодж - Фицджеральду, 29.02. 1880 года, цитируется в Hunt 1991a: 31; Lodge 1889: гл. 10-11. См. также Hunt 1991 a: 30-1, 89-92.

<sup>30</sup> Duhem 1914: 101. См. также Hunt 1991a: 87-88.

<sup>31</sup> Poynting, 1893: 264.267.267-268. См. также Hunt 1991a: 94-95.

### 5.3.6 Вихревая губка

Даже близкому другу Лоджа, Фицджеральду, не понравились зубчатые колеса. Выделяя "+" и "-" колеса, Лодж нарушил центральную догму Максвелла о том, что электрический заряд - это не более чем прерывистость напряжения. Фицджеральд воскликнул: *"О! Я думаю, что ваша модель ужасна!"*. В его философии эфир мог быть только чем-то очень простым: непрерывной жидкостью в движении. Уильям Томсон в 1880 году показал, что масса идеальной жидкости может существовать в состоянии, плотно заполненном случайно ориентированными вихревыми нитями. Из-за гиросtatической инерции вихрей жидкость приобретает некоторую жесткость и может распространять поперечные волны. В 1885 году, вскоре после разработки модели резиновой ленты, Фицджеральд предположил, что эфир является такой "вихревой губкой". Свобода в расположении вихрей открывала дополнительные возможности для восстановления известных свойств эфира. До конца своей недолгой жизни (он умер в 1901 году). Фицджеральд и несколько его единомышленников из всех сил пытались построить убедительный эфир из вихревой губки. Они столкнулись с непреодолимыми математическими трудностями. Вихревая губка была теорией струн тех дней: ее основа была проста, ее нельзя было опровергнуть, но ее нельзя было и развить достаточно далеко, чтобы проверить.<sup>32</sup>

<sup>32</sup> Фицджеральд - Лоджу, конец сентября 1889 года, цитируется и датируется Hunt 1991a: 92-93; Thomson 1880; FitzGerald 1885a: 154-6: 1888: 236-240: 1889: 1899. См. также Whittaker 1951: 295-303; Hunt 1991a: 96-104. Попытка Фицджеральда принадлежала сильному разнообразию британского механического редукционизма, в котором вся энергия должна была быть кинетической: ср. Torper 1971, и Klein 1972a.

### 5.4. Модификация уравнений Максвелла

Уравнения электромагнитного поля, приведенные в *Трактате*, не могут быть общепризнанными, какой бы ни была лежащая в их основе картина. Самой явной дырой в их следствиях был эффект Фарадея. Для

этого особого вмешательства намагниченной материи Максвеллу пришлось вернуться к теории упруго-твёрдого тела эфира. Однако этот эффект указывал на вращательный характер магнетизма - существенную особенность концепции магнитного поля Томсона и Максвелла. Осознавая эту странную ситуацию, последователи Максвелла проявляли большой интерес к магнитооптике. Когда в 1876 году физик из Глазго Джон Керр объявил о новом явлении такого рода, Фитцджеральд немедленно принялся за работу.

#### 5.4.1 «Очень важный шаг» Фитцджеральда.

Керр считал, что магнитооптические вращения были бы намного больше, если бы их можно было получить в сильно магнитном веществе, таком как железо. Единственным препятствием была непрозрачность железа, которую он обошел, используя отражение вместо передачи поляризованного света. Он заметил, что поляризация света, отраженного от полированного полюса магнита, изменяется намагниченностью.<sup>33</sup> Фитцджеральд быстро объяснил наблюдения Керра, разложив падающий свет на два компонента с круговой поляризацией и сославшись на разный коэффициент преломления намагниченного железа для этих двух компонентов. Более фундаментальная теория требовала расширения теории Максвелла об эффекте Фарадея, включая граничные условия между двумя различными средами. Именно это и было получено Фитцджеральдом в 1879 году.<sup>34</sup>

Проблема граничных условий в оптике считалась сложной. Почти все теории упругого твёрдого тела требовали специального исключения некоторых динамически необходимых условий.<sup>35</sup> Источник трудности заключался в том, что поперечные колебания не остаются таковыми после пересечения границы между двумя средами. Если искусственно потребовать, чтобы преломленные колебания были поперечными, то не все граничные условия могут быть выполнены. Современные физики знают, что электромагнитная теория света обеспечивает правильные граничные условия очень простым способом, и таким образом, устраняет исключительную сложность теории упругих твёрдых тел. Максвелл этого не сделал. Остановленный очевидной сложностью проблемы и не доверяя своим уравнениям в применении к быстро меняющимся явлениям, он отказался от выведения законов преломления.<sup>36</sup>

Свет пришел к Фитцджеральду от его земляка Джеймса Маккаллаха. В 1839 году этот блестящий математик разрубил гордиев узел оптической теории, выбрав потенциальную энергию упругой среды так, чтобы истинные граничные условия этой среды давали формулы Френеля для интенсивностей отраженных и преломленных лучей. Если  $\xi$  обозначает локальное смещение среды, а  $\varepsilon$  - константу её упругости, то потенциал Маккаллаха дается просто как  $(\varepsilon/2)(\nabla \times \xi)^2$ . Затем Маккаллах использовал принцип действия другого известного ирландского математика, Роуэна

Гамильтона, чтобы вывести уравнение движения

$$\mu \partial^2 \xi / \partial t^2 = - \nabla \times (\varepsilon^{-1} \nabla \times \xi) \quad (5.2)$$

( $\mu$  - плотность среды), а также два граничных условия: непрерывность  $\xi$  и непрерывность тангенциальной составляющей  $\varepsilon^{-1} \nabla \times \xi$ . Само по себе это уравнение движения исключает продольные волны.<sup>37</sup>

Маккаллах был знаком с работой Грина от 1838 года, давшей наиболее общую форму потенциала упругого твердого тела в терминах двух модулей жесткости и сжатия. В терминах Грина потенциал Маккаллаха соответствует отрицательной сжимаемости, которую Грин, естественно, исключил. Осознавая этот парадокс, Маккаллах просто признал, что эфир сильно отличается от любого природного вещества. Другие физики думали иначе, особенно после того, как в 1862 году Стокс доказал, что среда Маккаллаха нарушает принцип действия и реакции: абсолютное вращение элемента среды вызывает восстанавливающий упругий момент. Никто не воспринимал гениальную теорию Маккаллаха всерьез, пока Фицджеральд не воскресил ее в 1879 году.<sup>38</sup>

Фицджеральд обнаружил, что уравнение Маккаллаха для движения эфира вытекает из теории Максвелла, если максвелловское смещение отождествить с  $\text{curl } \xi$ : из закона Ампера  $\nabla \times \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t$  следует  $\mathbf{H} = \partial \xi / \partial t$ , тогда уравнение Маккаллаха (5.2) становится идентичным  $\partial \mathbf{B} / \partial t = - \nabla \times \mathbf{E}$ , что соответствует закону индукции Фарадея-Максвелла.

Эта эквивалентность позволила Фицджеральду выписать граничные условия в электромагнитной теории света и дать электромагнитную интерпретацию максвелловской теории эффекта Фарадея,<sup>39</sup> основанной на связи между оптическим движением эфира и вихревым движением, создаваемым внешним магнитным полем. Как объяснял Максвелл, это был гибридный подход, поскольку оптическое движение эфира не имело электромагнитной интерпретации.<sup>40</sup> В отличие от этого, в версии теории Фицджеральда все величины получили двойную интерпретацию: электромагнитную и в терминах среды Маккаллаха. Добавив магнитооптический член Максвелла к лагранжиану Маккаллаха, Фицджеральд вывел уравнения движения и эффект Фарадея в элегантной кватернионной форме: настоящее гамильтоновское пиршество. Затем он использовал граничные условия Маккаллаха<sup>41</sup>, чтобы вывести влияние внешнего магнитного поля на отражение поляризованной световой волны. Таким образом, он извлек те наблюдения Керра, которые не зависели от металлического характера второй среды.<sup>42</sup>

Рецензент статьи Фицджеральда Максвелл заметил:

*"Если ему удалось объяснить явления Керра и Фарадея электромагнитной гипотезой, то этот факт должен быть четко описан и заявлен, так как это будет очень важным шагом в науке".*

Фицджеральд последовал этому совету в напечатанном заключении, до которого Максвелл не дожил:

*"Исследование выдвигается как подтверждение электромагнитной теории света профессора Максвелла [...], если оно побудит освободит наши умы от оков материального эфира, [то] возможно, приведет к важнейшим результатам в теоретическом объяснении природы.*

Это заявление не следует воспринимать как отказ от механического эфира. Фицджеральд лишь хотел подтвердить представление Маккаллаха о том, что эфир не похож ни на одно из веществ, встречающихся в нашем материальном мире. Эфир не был ни упругим твердым телом, ни желе, ни пеной, что бы там ни думали Стокса и Томсон; но он мог быть механической средой совершенно иного рода, например, вихревой губкой, которая впоследствии поглотила надежды Фицджеральда.<sup>43</sup>

Статья Фицджеральда не только перенаправила поиски окончательной механической среды, но и открыла мощную стратегию интеграции магнитооптических явлений в теорию Максвелла без вхождения в микрофизические предположения. Основная идея заключалась в изменении уравнений поля в соответствии с динамическим фундаментом теории. Фицджеральд сделал это, сначала написав лагранжиан, дающий уравнения поля Максвелла, а затем добавив небольшие новые члены к этому лагранжиану. Первый шаг сам по себе был важным новшеством, поскольку Максвелл написал лагранжиан только для системы линейных токов, не включая упругую энергию, запасенную в электрическом смещении<sup>44</sup>

<sup>33</sup> Kerr 1876-1877. Если падающий свет линейно поляризован, отраженный свет становится эллиптически поляризованным, и большая ось эллипса поворачивается от первоначальной плоскости поляризации: см. Buchwald, 1985a: 102н. 109-110.

<sup>34</sup> FitzGerald 1876. Керр и Томсон придерживались той же идеи: см. там же: 14.

<sup>35</sup> Это было верно для теорий Пуассона, Коши, Грина, Неймана и Кирхгофа, но не для лабильного эфира Коши и для среды Маккаллаха: см. также Whittaker 1851: гл. 5; Schaffner 1972.

<sup>36</sup> Максвелл - Стоксу. 15 октября 1864 г., *SLPM* 2: 186-8; Рукописные заметки об отражении и преломлении света, *SLPM* 2: 182-5. См. также Harman 1995b: 79-80, 85-6. Решение этой проблемы было впервые озвучено Гельмгольцем в 1870 году и дано Лоренцем в 1875 году.

<sup>37</sup> MacCullagh 1839. См. также Whittaker 1951: 142-4; Schaffner 1972: 59-68, 187-93; Stein 1981: 310-15; Buchwald 1985a: 283-4; Hunt 1991 a: 9-10.

<sup>38</sup> Green 1838; Stokes 1862 года. Ср. Schaffner 1972: 66, 71-74.

<sup>39</sup> FitzGerald 1879a. Условия Маккаллаха - это непрерывность  $\xi$  и непрерывность тангенциальной составляющей момента  $\varepsilon^{-1}\nabla \times \xi$ . В электромагнитной интерпретации Фицджеральда они подразумевают непрерывность тангенциальных составляющих **E** и **H** и непрерывность нормальных составляющих **B** и **D**, как дано в современных электромагнитных рассуждениях, Фицджеральд исключил альтернативную электромагнитную интерпретацию, где  $\xi$  отождествляется с **A**: см. Приложение 9.

<sup>40</sup> Максвелл Стоксу, 6 февраля 1879 года, в Stokes 1907 г. 2: 43. См. главу 4, стр. 172,

<sup>41</sup> Однако он отказался от непрерывности нормальной составляющей  $\xi$ , поскольку она



не согласовывалась с магнитооптическим членом. См. объяснение Лармором этой трудности в FitzGerald 1880: 66n.

<sup>42</sup> FitzGerald 1879a. См. также Hunt 1991 a: 15-21.

<sup>43</sup> Максвелл - Стоксу. 6 февраля 1879 г. в Stokes 1907: 43; FitzGerald 1879a: 73. Cp. Siein 1981; Hunt 1991 a: 20-3.

<sup>44</sup> Для Фитцджеральда обобщенной скоростью является магнитная индукция  $\mathbf{B}$ , а не ток  $\mathbf{J}$ , (см. Приложение 9). Этот динамический метод не включает ток проводимости. Heaviside 1893-1912, Vol. 1: ## 146-159 показал, что ток проводимости не может быть получен путем введения диссипации в среде Маккаллаха: см. также Buchwald 1985a: 68- 70. Об общей проблеме применения принципа Гамильтона к полю см. также Buchwald, 1985a: гл. 6-7.

### 5.4.2 Эффект Холла

Одна из слабостей теории Фицджеральда об эффектах Фарадея и Керра заключалась в том, что новый член в лагранжиан был добавлен чисто ситуативно, без независимого электромагнитного обоснования. Год спустя молодой американский физик Эдвин Холл обнаружил, что сильное магнитное поле, приложенное перпендикулярно к электрическому току, приводит к возникновению ЭДС в направлении, перпендикулярном как полю, так и току. Эффект был очень мал и требовал тонкой гальванометрии, что объясняет, почему он не был обнаружен раньше. Варьируя условия эксперимента, Холл обнаружил, что новая ЭДС выражается как  $h \mathbf{H}_0 \times \mathbf{j}$ , где  $h$  - небольшая постоянная,  $\mathbf{H}_0$  - внешняя магнитная сила, а  $\mathbf{j}$  - электрический ток.<sup>45</sup>

Как отметил Больцман в 1886 году, этот эффект легко обосновать, предположив, что электромагнитная сила, действующая на проводник, является результатом силы, действующей на сам ток. Однако. Максвелл настаивал на том, что электродвижущие силы и электродинамические силы - это по сути разные вещи, поскольку в его системе токи не являются потоком электрического заряда. Как хороший максвелловец, Холл не смог рассмотреть объяснение Больцмана. Вместо этого он приписал новую ЭДС фундаментальному изменению уравнений Максвелла для поля. Так же поступил и его наставник Генри Роулэнд, который вскоре представил себе связь между эффектом Фарадея эффектом Холла,<sup>46</sup> рассматривая его как искривление тока проводимости под действием внешней магнитной силы: поскольку в теории Максвелла токи проводимости и смещения имеют одинаковое динамическое основание, последний также должен искривляться под действием внешней магнитной силы. В частности, Роулэнд добавил член  $h \mathbf{H}_0 \times \partial \mathbf{D} / \partial t$  к выражению ЭДС Максвелла в магнитном поле и обнаружил, что эта модификация подразумевает магнитооптическое вращение, рассчитанное Максвеллом. Его теория, превосходила теорию Максвелла, т.к. была полностью электромагнитной, не требовала ссылок на эфирные вихри и связывала эффект Фарадея с чисто электромагнитным явлением. Он с гордостью утверждал, что дал

"демонстрацию истинности теории света Максвелла", и в целом считал, что теория Максвелла была "возведена в ранг факта".<sup>47</sup>

Роулэнд не сравнивал свою теорию с теорией Фицджеральда, но кембриджский максвелловец Ричард Глейзбрук вскоре сделал это за него. Дополнение Максвелла-Фитцджеральда к лагранжиану поля,  $(k\nabla \times \partial \xi / \partial t)(\mathbf{H}_0 \cdot \nabla) \xi$ , подразумевает корректирующий член  $-2k(\mathbf{H}_0 \cdot \nabla)\mathbf{H}$  в выражении ЭДС Максвелла. Он отличается от  $2k\mathbf{H}_0 \times (\nabla \times \mathbf{H})$  градиентом, который может быть поглощен в скалярном потенциале. Поэтому новый термин Фицджеральда - это как раз то, что нужно, чтобы подчинить ток смещения эффекту Холла. Для кантабрианских физиков, отученных от лагранжианства, аргумент Глазбрука стал важным шагом в объединении физики, а также большой победой теории Максвелла.<sup>48</sup>

Магнитооптика оставалась главной максвелловской темой вплоть до 1890-х годов как в Англии, так и на континенте. В 1884 году Хендрик Лоренц и его ученик У. ван Логем исследовали связь Роуланда между эффектом Холла и магнитооптическим вращением и впервые учли металличность в эффекте Керра. Однако их теория не объясняла, почему железо и никель имеют сходные эффекты Керра, несмотря на противоположный знак их эффектов Холла. По этой причине в 1893 г. Дж. Дж. Томсон и Поль Друде отказались от идеи Холла о том, что эффект Холла подразумевает новый вид электрического поля как для проводимости, так и для диэлектрических токов. Несмотря на это, их теории оказались несовместимыми с превосходными данными Реммельта Сиссинга об эффекте Керра, опубликованными в 1891 году. Как показал в 1898 году ученик Лоренца Корнелиус Винд, эта трудность могла быть решена только путем замены неанализируемого макроскопического смещения Максвелла на поперечную поляризацию Лоренца.

Магнитооптические исследования превратились из главного доказательства теории Максвелла, в один из её основных недостатков. Это изменение было частью более общего исторического перехода, который будет объяснен в главе 8.<sup>49</sup>

<sup>45</sup> Hall, 1879 - 1880a. См. также Buchwald 1985a: главы. 9 -10

<sup>46</sup> Boltzmann 1886b (использование эффекта для определения скорости электричества); Maxwell 1873a: #501; Hall 1880b. Незначительный максвелловец Джон Хопкинсон, предпочел модифицировать закон Ома (Hopkinson (880). Сам Максвелл предполагал возможность вращающейся части матрицы сопротивления в магнитах (Maxwell 1873a: #297): см. также Buchwald 1985a: 96. Современное объяснение похоже на объяснение Больцмана.

<sup>47</sup> Rowland 1880a. 1880b. 1881: 261. См. также Buchwald 1985a: 102-6. Rowland 1880b включил странную переформулировку теории Максвелла, вызвавшую публичное опровержение J. J. Thomson (1881b).

<sup>48</sup> Glazebrook 1881. См. также J. J. Thomson 1888: #43, и Larmor 1893a. См. также Buchwald 1985a: 111-9. Основной целью статьи Глазбрука было довести до конца вихревую интерпретацию магнетизма Томсона и Максвелла: он отождествил  $\mathbf{H}$  с завихренностью  $\nabla \times \partial \xi / \partial t$  в упругом твердом теле. Эта попытка не имела

продолжения. Возможно, потому, что она привела к распределению энергии поля, отличному от максвелловского.

<sup>49</sup> Lorentz 1884: van Loghem (Лоренц и ван Логем использовали версию Гельмгольца теории Максвелла); J. J. Thomson 1893a: Drude 1893: Sissmgh 1891: Wind 1898, 1898~1899. Кроме того, идея Роуланда о модификации выражения Максвелла для ЭДС должна быть заменена идеей модификации соотношений, включающих конститутивные параметры  $\epsilon'$  и  $\sigma$ . Ср. подробное исследование в Buchwald 1985a: 205-209 (Lorentz-van Loghem); 123-9 U. J. Thomson); 215-217 (Drude); 210-214 (Sissingh): 242-2477 (Wind).

## 5.5 Максвелл для телеграфа

В толпе последователей Максвелла был один человек, который игнорировал магнитооптику, подвергал сомнению попытки найти механическую структуру эфира, считал, что "так называемые модели" "труднее понять, чем уравнения движения", и высмеивал кембриджскую моду на лагранжианы. И все же изменения, которые он внес в формулировку теории Максвелла, имели самое долговременное значение. Этим человеком был Оливер Хевисайд, сын гравера по дереву, племянник британского изобретателя электрического телеграфа (Чарльза Уитстона) - и "в первую очередь странным" даже для своих близких друзей. После непродолжительной попытки заняться творчеством (включая эссе под названием "Мускулистые характеры"), он полностью посвятил себя науке об электричестве. Большую часть своей жизни он провел как виртуальный отшельник. Он избегал общества других ученых и любил обличать некомпетентность авторитетов. Его саркастическое остроумие снискало ему сильных врагов и иногда ставило под угрозу распространение его работ.<sup>50</sup>

### 5.5.1 Телеграфные цепи.

С научной точки зрения, большая часть оригинальности Хевисайда была обусловлена его семилетним опытом работы телеграфистом. В отличие от других максвелловцев, большинство его исследований было направлено на решение или облегчение решения практических проблем телеграфии и телефонии. В области физики и математики он не имел академической подготовки и приобрел свои обширные знания благодаря чтению. Большое впечатление на него произвели труды рыцаря телеграфа - сэра Уильяма Томсона. Благодаря своему опыту работы над проектом атлантического кабеля Томсон не только поставил искусство электрической связи на прочную теоретическую основу, но и обогатил науку об электричестве надежными стандартами и методами измерения. Хевисайд позже высоко оценил "выдающиеся труды Томсона в науке, его неисчерпаемую плодовитость и огромную отдачу".<sup>51</sup>

Первые работы Хевисайда были посвящены теории электрических цепей и аппаратуры, используемых телеграфистами. Как Томсон и Кирхгоф, он работал непосредственно в терминах измеряемых ЭДС,

тока, сопротивления, "емкости" и "индуктивности" и избегал рассуждений о глубинной природе электричества. Его математические решения были чрезвычайно тщательными и элегантно сопровождалось постоянным возвращением к физической проблеме. Он обладал британской нетерпимостью к сухим математическим разработкам и требовал физической интерпретации для каждого шага рассуждений. И наоборот, физический смысл математических операций мог подсказать ему новые математические методы. Например, он рассматривал сопротивление в цепи и такие операторы, как  $Ld/dt$  ( $L$  - индуктивность), как часть операционного "импеданса": эта практика привела к "операционному исчислению": нестрогому предвосхищению современной теории распределения.<sup>52</sup>

С помощью своей "электрической математики" Хевисайд решил многочисленные проблемы распространения сигналов. С практической точки зрения, его самым важным результатом было выведение возможности телефонии без искажений путем индуктивной нагрузки линий. Если бы он не позволил американскому инженеру запатентовать это открытие раньше него, он стал бы богат.<sup>53</sup>

### 5.5.2 Принцип действия

Динамические соображения играли важную роль в физике Хевисайда: Заявляя, что "все физические науки со временем должны стать ветвями динамики, и все, что противоречит принципам динамики, должно быть безоговорочно отвергнуто" он, однако мало использовал аналогию Томсона с потоком в телеграфных проводах и не пытался конкретизировать скрытые механизмы. Вместо этого он опирался на общие динамические понятия энергии, силы и импульса, разработанные в некоторых ранних работах Томсона, *"Натурфилософии"* Томсона и Тейта и *Трактате* Максвелла. У раннего Томсона он позаимствовал энергетическое определение ЭДС, у ТТ - более общий "принцип действия", а у Максвелла - понятие "электромагнитного момента" электрического тока.<sup>54</sup>

Под "принципом действия" Хевисайд понимал интерпретацию Томсоном и Тейтом комментария Ньютона к его третьему закону:

*"Если действие [переведенное как **actio** во втором издании "ТТ", чтобы избежать путаницы с действием Мопертюи] агента, измеренное совместно его количеством и его скоростью, и если противодействие сопротивления также измеряется скоростями его отдельных частей и их нескольких элементов вместе, независимо от того, возникают ли они из-за трения, сцепления, веса или ускорения: - **действие и противодействие** во всех комбинациях механизмов будут равны и противоположны".*

Томсон и Тейт истолковали это утверждение как предварительную формулировку механики Д'Аламбера и Лагранжа и сохранения энергии. Хевисайд сохранил идею уравнивания "действий", т. е. скоростей,

с которыми различные силы, действующие в системе и на систему, совершают работу. Он также принял обобщенную концепцию силы Томсона и Тэйта, для которой основное уравнение

**"сила × скорость = деятельность"** остается верным, даже когда "скорость" больше не относится к движению вещества.<sup>55</sup>

<sup>50</sup> ср. Yavetz 1995: 276 (без магнитооптики); Heaviside to Hertz, 14 августа 1889 года.

Цитата из Hunt 1991a: 105 (без моделей); Buchwald 1985c (без лагранжианов):

Searle 1950: 96 (странность); Appleyard 1930 (мышцы). Биографию Хевисайда см. в Whittaker 1929; Appleyard 1930: 212-20; Nahin 1988: Hunt 1991a; Yavetz 1995: 5-28.

<sup>51</sup> Heaviside 1885: 418. См. также Hunt 1991a: 58. О Томсоне и телеграфе см. выше стр. 152 - 155, а также Smith and Wise 1989.

<sup>52</sup> О теории цепей Хевисайда см. Yavetz 1995: Гл. 2 (стр. 39 об "электромагнетических рассуждениях"). Об операционном исчислении см. там же: 306-20. и Hunt 1991b.

<sup>53</sup> О передаче без искажений см. Jordan 1982a; Yavetz 1995: 209-18.

<sup>54</sup> Heaviside 1885: 419; 1878: 95-7 (об использовании аналогии с водопроводной трубой); 1885-1887: 451: *"Энергетическое определение внешних сил, первоначально данное сэром Уильямом Томсоном, если не явно, то, по крайней мере, существенно, уже давно признано большинством пишущих на электрические темы"*; Heaviside 1876: 54,59, и 1878: 97 об электромагнитном импульсе.

### 5.5.3 Максвелл для многих

Хотя в своих ранних работах по теории цепей Хевисайд избегал обсуждения природы электричества, использование им понятия электрического импульса говорит о его симпатии к системе Максвелла. Он также разделял убеждение Максвелла и Томсона о том, что движение, ответственное за этот импульс, находится в магнитном поле. Однако Хевисайд ничего не сказал о природе электрического тока, хотя позже вспоминал, что никогда не принимал картину флюидов:

*Так случилось, что мое первое знакомство с электричеством произошло с динамическими явлениями, и после того, как я с увлечением прочитал эту поучительную книгу Тиндалла "Теплота как способ движения". Этим можно объяснить, почему, когда позже я стал изучать книги по электричеству, я испытывал сильнейшее отвращение ко всем объяснениям и не мог принять электрический ток за движение электричества (статического) по проводу, а считал его чем-то совершенно иным.*

Хевисайд тогда считал, что электричество - это способ движения, а электрический ток - нечто подобное тепловому потоку. Он был готов принять другую, не субстанциональную точку зрения: максвелловскую.<sup>56</sup>

В 1882 году Хевисайд начал серию статей в журнале The Electrician о "соотношениях между магнитной силой и электрическим током" согласно Максвеллу. Он хотел лишить "высшие представления" "выдающихся ученых-математиков их обычной символической одежды" и заставить их "обратиться к симпатиям многих".

Чтобы сделать Максвелла более доступным для интеллигентного

телеграфиста, Хейсайд изобрел современную векторную нотацию, дал геометрические определения операторов закручивания и дивергенции и доказал соответствующие интегральные теоремы. Его метод во многом напоминал метод Максвелла "**О силовых линиях Фарадея**". Например, он доказал теорему Стокса с помощью сети бесконечно малых петель; он ввел ряд векторов **A**, **B**, **C** (и даже четвертый), выводимых друг из друга путем "закручивания" и представляющих векторный потенциал, магнитную силу и ток; он использовал аргументы симметрии для определения конкретных распределений магнитной силы. В манере Томсона и Максвелла Хейсайд придал жизнь своим символам, связав их с простыми геометрическими операциями или физическими процессами. Его векторные обозначения, а также максвелловские "curl" и "сходимость" укорачивали написание и обеспечивали наглядность в математических дебрях максвелловского электромагнетизма.<sup>57</sup>

В следующей серии работ Хейсайд привел аргументы в пользу максвелловского способа распределения магнитной и электрической энергий в поле. В этом контексте его самое решающее открытие произошло в 1884 году во время исследования токов, индуцированных в проводящем сердечнике внутри соленоида. Имея в виду применение электромагнитов, трансформаторов и катушек индуктивности, он сосредоточился на энергетических процессах в сердечнике. Объединив закон Ампера, закон индукции Фарадея и закон Ома, он вычислил изменение во времени плотности магнитной энергии и обнаружил, что

$$\partial(\mu H^2/2)/\partial t = -\sigma E^2 - \sigma^1 \nabla \cdot (\mathbf{j} \times \mathbf{H}). \quad (5.3)$$

Первый член представляет собой джоулево тепло, а второй - поток энергии, направленный к оси сердечника. Год спустя Хейсайд включил в этот результат токи смещения и независимо от Пойнтинга получил общее выражение  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  для потока энергии. Он описал перенос энергии в простых электрических системах и предсказал, что быстро меняющиеся токи, такие как участвующие в быстрой передаче сигналов, будут ограничены поверхностью проводников, поскольку энергия, исходящая из внешнего диэлектрика, не успевает проникнуть в массу проводника до изменения электродвижущей силы на противоположную. Вскоре он обнаружил, что соответствующее нарушение закона Ома объясняет измерения, проведенные изобретателем электротехники Дэвидом Хьюзом, и заявил о своем приоритете на это открытие. В действительности, скин-эффект не требует ни потока Пойнтинга, ни даже теории Максвелла, и он был предвосхищен несколькими другими авторами, включая Рэля, Лармора и Лэмба.<sup>58</sup>

<sup>55</sup> Heaviside 1893-1912. Том 3: 178; Thomson and Tait 1879-1883, Vol. 1: 247; Heaviside 1883-1884: 291; 1885-1887: 435. См. Также Hunt 1991a: 122-3; Yavetz 1995: 131-136, 269-71. О ссылке на Ньютона в TT" см. Smith 1998: Гл. 10.

<sup>56</sup> Heaviside 1885-1887: 435.436. См. также Yavetz 1995: 143-144.

<sup>57</sup> Heaviside 1882~1883: 195: там же: 211-12. и Maxwell 1856b: 206 для теоремы Стокса (в *Трактате* Максвелл использовал частичное интегрирование, вероятно, для строгости); Heaviside 1882-1883: 205 для **A, B, C, D**; там же: 200- 201, 224-228, и Maxwell 1878: 140 для объединения аргументов симметрии и теоремы Ампера. См. также Yavetz 1995: 66-112. О векторной нотации Хевисайда см. Crowe 1967: Hunt 1991a: 105-7; Yavetz 1995: 85-7.

<sup>58</sup> Heaviside 1883-1884: 1884--1885: 378; 1885-1887: 440-441. О потоке энергии см. Hunt 1991a: 120-121: О скин-эффекте см. Jordan 1982b: Yavetz 1995: 191-208: а также Глава 6, стр. 221,226, о подобном эффекте Гельмгольца.

#### 5.5.4 Предварительный набросок

Предсказание Хевисайдом скин-эффекта было частью серьезной переформулировки теории Максвелла, скромно названной "Предварительный набросок". Хевисайд начал с закона Ома ( $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ ), электрического смещения Максвелла ( $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ ) и магнитной индукции ( $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ ), из которых он построил выражения энергий, рассеиваемых и сохраняемых в элементе объема  $d\tau$  среды:  $\sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}$  и  $(\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} d\mathbf{r})/2 + (\mathbf{E} \cdot \mathbf{H} d\mathbf{r})/2$ , соответственно. Он пренебрег максвелловскими картинками заряда и тока, но восстановил основное различие между силой и потоком, как сопряженными факторами плотности энергии. Затем он обратился к деятельности (скорости производства работы) сил  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ . Они получаются путем умножения на соответствующий ток. В электрическом случае Хевисайд принял выражение Максвелла для тока ( $\mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t$ ), что дает:

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = \sigma E^2 + \partial (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} / 2) / \partial t, \quad (5.4)$$

Таким образом, электрическая деятельность равна джоулевому теплу плюс электрическая энергия, запасенная в среде. Хевисайд хотел получить аналогичный результат в магнитном случае. Поэтому он определил "магнитный ток"  $\mathbf{G} = g \mathbf{H} + \partial \mathbf{B} / \partial t$ , причем магнитная проводимость  $g$  присутствует только для большей симметрии. Тогда магнитная деятельность

$$\mathbf{H} \cdot \mathbf{G} = g H^2 + (\partial / \partial t) (\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}), \quad (5.5)$$

в полной аналогии с электрическим случаем.<sup>59</sup>

Для перекрестной связи между электрической и магнитной силой Хевисайд написал Максвелловскую форму закона Ампера и аналогичную зависимость между электрической силой и магнитным током:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}, \\ -\nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{G}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Это современная форма уравнений Максвелла, если забыть о токе магнитной проводимости. Хевисайд гордился тем, что "убил" потенциалы, которые он считал ответственными за различные физические заблуждения. Конечно, он знал максвелловскую интерпретацию **A** как электромагнитного импульса. Но он принимал это понятие только для полных контуров и отвергал его лагранжево

обоснование. По его мнению, принцип наименьшего действия был "золотым или наглым идолом" Кембриджского университета, и он мешал лучшему физическому пониманию, которое давал принцип действия.<sup>60</sup>

Для "динамической полноты" Хевисайд дополнительно ввел электродвижущие источники химического и термоэлектрического происхождения, а также постоянный магнетизм. Он сделал это с помощью движущих сил  $\mathbf{e}$  и  $\mathbf{h}$ , действия которых  $\mathbf{e} \cdot \mathbf{J}$  и  $\mathbf{h} \cdot \mathbf{G}$  измеряют энергию, подводимую к электромагнитной системе в единицу времени.

Хевисайд рассматривал это определение как очевидное обобщение соответствующего определения Томсона для линейных цепей и отмечал, что оно давно признано большинством авторов по электрическим вопросам, особенно после практического внедрения динамомашин, машин, аккумуляторов и т.д., превратившего преобразования энергии, связанные с электрическими явлениями, из вопросов научного интереса в вопросы чрезвычайной коммерческой важности.

Импульсные силы добавляются к силам, определяемым электромагнитной связью, так что полные "двойные уравнения" гласят:<sup>61</sup>

$$\begin{aligned}\nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{h}) &= \mathbf{J}, \\ \nabla \times (\mathbf{e} - \mathbf{E}) &= \mathbf{G}.\end{aligned}\tag{5.7}$$

Используя эти уравнения, действие вынуждающих сил может быть переформулировано как

$$\mathbf{e} \cdot \mathbf{J} + \mathbf{h} \cdot \mathbf{G} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{G} + \nabla \cdot [(\mathbf{E} - \mathbf{e}) \times (\mathbf{H} - \mathbf{h})].\tag{5.8}$$

Согласно уравнениям (5.4) и (5.5), два первых слагаемых соответствуют джоулеву теплу и энергии, запасенной в поле. Поэтому вектор  $(\mathbf{E} - \mathbf{e}) \times (\mathbf{H} - \mathbf{h})$  должен представлять поток энергии. Этим обобщением теоремы Пойнтинга Хевисайд выполнил свой собственный критерий понятности:

*"Для рационально понятой схемы (пусть даже только на бумаге) необходимо, чтобы передача энергии была однозначно определяемой".<sup>62</sup>*

<sup>59</sup> Heaviside 1885-1887: 429-34, 441. См. также Yavetz 1995: 142-162.

<sup>60</sup> Heaviside 1885-1887: 447-448; 1889b: 468 («Таким образом,  $\Psi$  и  $\mathbf{A}$  уничтожены»), 483-485 («О метафизической природе потенциалов»); Heaviside 1893-1912, Vol. 3: 175 («золотой или наглый идол»). См. также Buchwald, 1985c; Yavetz 1995: 268 - 269. Два круговых уравнения или закона уже сыграли центральную роль в работах Maxwell 1861, 1862 и Maxwell 1868

<sup>61</sup> Heaviside 1885-1887: 449, 451. Ср. Yavetz 1995: 154-62. Максвелл ввел внешние силы только на уровне линейных цепей. В позднейшей формулировке теории Максвелла, сделанной Герцем, вынуждающие силы были включены в закон Ома, а не в круговые уравнения.

<sup>62</sup> Heaviside 1885-1887: 450; 1886-1887: 172.

### 5.5.5 Движущиеся тела

Первоначальная форма дуплексных уравнений не включала движущиеся тела, поскольку Хевисайд в основном интересовался проблемами распространения вдоль проводящих линий. Однако он хорошо понимал необходимость членов, зависящих от скорости



вещества. Он даже был первым физиком-максвелловцем, давшим исчерпывающий список этих членов. В 1885 году он отметил вклад  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  в электрическую силу  $\mathbf{E}$ , как следствие закона Фарадея, применяемого к движущимся цепям. Аналогично он ввел вклад  $\mathbf{D} \times \mathbf{v}$  в магнитную силу  $\mathbf{H}$ : если ток смещения может намагнитить тело, находящееся в состоянии покоя, то движение тела относительно постоянного поля смещения также должно оказывать намагничивающее действие. Затем Хевисайд исследовал действие этих "движущих сил". Для электрической силы действие  $\mathbf{J} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  в точности уравнивает работу  $\mathbf{v} \cdot (\mathbf{J} \times \mathbf{B})$  электродинамической силы  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ . Чтобы получить аналогичный баланс в для магнетизма, Хевисайд ввел новую "магнитоэлектрическую силу"  $\mathbf{D} \times \mathbf{G}$  (с  $\mathbf{G} = \partial \mathbf{B} / \partial t$ ), которая из-за малости ускользала от наблюдения.<sup>63</sup>

Хевисайд также включил в свою схему конвекционные токи. И Фарадей, и Максвелл признали магнитное действие таких токов, а Роуланд доказал это экспериментально в 1875 году, проверив действие быстро вращающегося заряженного диска на иглу компаса. Однако в теории Максвелла не было математической трактовки эффектов конвекции заряда, пока в 1881 году молодой Дж. Дж. Томсон не опубликовал вдохновенную, но несовершенную работу на эту тему (см. Приложение 10). Мотивацией Дж. Дж. Томсона было определение электромагнитного поведения заряженных частиц, составляющих, по Круксу, катодные лучи. Приняв смещение Максвелла, он рассудил, что конвекция заряда подразумевает изменяющееся смещение и соответствующее магнитное поле. Пока движение частицы достаточно медленное, единственное изменение в электрическом поле - это равномерное перемещение его силовых линий. Напряженность соответствующего магнитного поля пропорциональна скорости заряда, и поэтому его энергия пропорциональна квадрату скорости, что означает увеличение эффективной массы заряженной частицы. Во внешнем магнитном поле возникает энергия взаимодействия, пропорциональная скорости и внешнему полю, и соответствующая отклоняющая сила (наша сила Лоренца). Это были важнейшие результаты, на которые часто ссылались последующие электродинамики.<sup>64</sup>

К сожалению, соответствующие расчеты пострадали от осуждавшегося Хевисайдом рабского следования Максвеллу,. Дж. Дж. Томсон не критически поддерживал максвелловское выражение тока смещения и хитро обходил возникающие противоречия. К счастью, он пришел к правильному виду окончательных формул; но числовые коэффициенты были неверны. Фицджеральд вскоре показал необходимость нового вклада  $\rho \mathbf{v}$  в диэлектрический ток Максвелла, где  $\rho$  - плотность заряда, а  $\mathbf{v}$  - скорость наэлектризованного вещества. Хевисайду оставалось дать в 1885 и 1889 годах правильное выражение силы Лоренца ( $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ) и

правильную формулу электромагнитной массы для равномерно заряженной сферической оболочки ( $q^2/6\pi a$  в рационализированных электромагнитных единицах, где  $q$  - заряд, а  $a$  - радиус). Хевисайд дал наиболее четкое обоснование члена  $\rho \mathbf{v}$ : он удовлетворяет требованию Максвелла о том, что все токи должны быть замкнутыми. Действительно, дивергенция полного тока,

$$\nabla \cdot (\partial \mathbf{D} / \partial t + \rho \mathbf{v}) = \partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}), \quad (5.9)$$

тождественно нулю, поскольку заряд сохраняется во время конвекции (см. Приложение 10).<sup>65</sup>

В своей наиболее полной форме, включающей все случаи движения, дууплексные (двойные) уравнения Хевисайда имеют вид

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{D} \times \mathbf{v} - \mathbf{h}) &= \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t + \rho \mathbf{v}, \\ \nabla \times (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B} - \mathbf{e}) &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \end{aligned} \quad (5.10)$$

Эти уравнения определяют только электрические и магнитные силы. Для определения механических сил Хевисайд использовал принцип действия. Результат в целом неоднозначен, поскольку существует множество различных способов записи энергетического баланса. Позже мы увидим, как Хевисайд нашел у Герца решение этой проблемы.<sup>66</sup>

<sup>63</sup> Heaviside 1885-1887: 448, 446 (с числовой оценкой магнитной движущей силы), 545-546); 1886-1887: 175.

<sup>64</sup> Faraday, *FER* 1: # 1644. # 1654; Максвелл 1873а: # 769-770; Гельмгольц, 1876 (доклад о Роуланде); Роуленд, 1878; Дж. Дж. Томсон 1881а. Ср Buchwald 1985а: 74-77 (по Роуланду); 269-276 (по теориям конвекции); Darrigol 1993а: 287-8 (по Максвеллу), 303-306 (по Дж. Дж. Томсону).

<sup>65</sup> J. J. Thomson 1881а: FitzGerald 1881; Heaviside 1885-1887: 446; 1889. См. также Buchwald 1985а: 272-273

<sup>66</sup> Heaviside 1886-1887: 174-175 (без конвекционного тока); 1888-1889: 497 (с током конвекции).

### 5.5.6 Урожай

С помощью своей обычной вычислительной мощности и "исправленного" Максвелла Хевисайд решил множество проблем распространения волн, которые впоследствии оказались очень полезными, и ответил на фундаментальные вопросы, поднятые другими теоретиками электричества. Одним из самых впечатляющих его достижений было общее решение, которое он дал в 1888 году Дж. Дж. Томсону проблемы точечного заряда в равномерном прямолинейном движении. Он обнаружил, что электрическое поле остается радиальным, но сжимается к плоскости меридиана в степени, определяемой  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  (см. Приложение 10). Когда скорость частицы увеличивается от нуля до  $c$ , поле превращается из электростатического в электромагнитную, плоскую волну, ограниченную меридианной плоскостью. Хевисайд использовал этот результат, чтобы показать "физическую бессмысленность" электростатического потенциала и отвергнуть предложение Уильяма Томсона об измерении его распространения.<sup>67</sup>

Первоначально никто не обращал особого внимания на сложные и длинные серии Хевисайда, кроме оскорбленного телеграфного начальства, которому удалось добиться их приостановки. Однако в 1887 г. Хевисайд убедил Уильяма Томсона в актуальности своей теории передачи без искажений. В следующем году он имел удовольствие читать Лоджа, который отмечал,

*"какое необычное понимание тонкостей предмета и какое мастерское владение сложнейшей теорией можно найти среди эксцентричных и в некоторых отношениях отталкивающих трудов мистера Оливера Хевисайда"*.

Вскоре Хевисайд присоединился к эпистолярному кругу Лоджа, Фицджеральда и Герца и убедил их в превосходстве своего изложения Максвелла. Фицджеральд был наиболее красноречив в своих похвалах.<sup>68</sup>

*Максвелл, как и каждый первопроходец, который не доживает до исследования открытой им страны, не успел изучить наиболее прямые пути доступа к ней или наиболее систематический способ ее исследования. Это было поручено сделать Оливеру Хевисайду. Трактат Максвелла завален обломками его блестящих линий наступления, его укрепленных лагерей, его сражений. Оливер Хевисайд расчистил их, открыл прямой путь, проложил широкую дорогу и исследовал значительную территорию страны.*

## **5.6 Электромагнитные волны**

Британские максвелловцы пропустили открытие электромагнитных волн, сегодня считающееся самым окончательным доказательством системы Максвелла. Сам Максвелл был поразительно молчалив в отношении производства электромагнитных волн. Он обсуждал характерный спектр вещества в терминах *"возмущения светонесущей среды, передаваемого ей вибрирующими молекулами"*, не упоминая ничего электромагнитного. Возможно, он не верил, что чисто электромагнитные процессы могут порождать волны. Его учение о замкнутых токах действительно затушевывало распространение взаимодействий. Ставя токи проводимости и смещения на одну ступень, он путал источники и их эффекты. Его векторный потенциал, рассматриваемый как функция полного тока, не распространялся.<sup>69</sup>

<sup>67</sup> Heaviside 1888-] 889: 490-9; 1889c: 510-11. См. Hunt 1991a: 186-7; Darrion 1993b: 313, 316-318. О предложении Томсона. см. выше, стр. 211, примечание 5.

<sup>68</sup> Lodge 2888a: 236; FitzGerald 1893: 299. О трудностях Хевисайда с публикациями и их связи с его ссорой с Уильямом Присом, см. также Hunt 1991a: 137-43; Yavetz 1995: 242-256. О его признании см. Hunt 1991a: 143-51; Yavetz 1995: 259-63 (о поддержке У. Томсона). Интерес Лоджа к работам Хевисайда был связан с его недавними экспериментами с молниями: см. ниже, стр. 238.

### **5.6.1 Вопрос**

Оливер Лодж, первый человек, который предвидел электрическое производство электромагнитных волн, не рассуждал с точки зрения вводящей в заблуждение формы уравнений Максвелла. Его вдохновение

пришло от примитивной версии модели зубчатого колеса, которую он описал на заседании Британской ассоциации в 1879 году, предположил, что эфир представляет собой положительное и отрицательное электричество, связанные вместе (два вида колес), и интерпретировал свет как периодическое смещение двух электричеств с электростатической восстанавливающей силой. Эта точка зрения была противоположна Максвелловской, поскольку в ней смещение зависело от электрических сил, а не наоборот. Тем не менее, он предполагал, что свет может быть возбужден электрическим путем. Лодж предположил несколько экспериментальных устройств, ни одно из которых не сработало бы, как мы теперь можем судить. Его лучшим предположением было использование колебательного разряда конденсатора, хотя частота световых волн никогда не могла быть достигнута таким образом.<sup>70</sup>

Вскоре Лодж отказался от своего проекта, поскольку Фицджеральд убедил его, что теория Максвелла запрещает электрическое получение электромагнитных волн. В первой работе Фицджеральд привел два различных доказательства невозможности, одно из которых основывалось на нераспространении векторного потенциала Максвелла как функции полного тока, а другое - на консервативном характере системы замкнутых токов. Во второй работе он подтвердил отсутствие распространения с помощью решения волнового уравнения для векторного потенциала с помощью стоячей волны. Три года спустя он обнаружил, что аналогичная проблема рассматривалась в *"Теории звука"* Рэлея, причем с прогрессивными решениями, показавшими излучение волн! Фицджеральду пришлось извиниться *"за то, что он решился исследовать эти вопросы, когда [он] был настолько не осведомлен о уже сделанном, что допустил ошибки, требующие таких серьезных исправлений, которые содержатся в этой работе"*. Он признал, что ошибся в своих доказательствах невозможности, включив ток смещения в источники поля.<sup>71</sup>

Затем, Фицджеральд предположил, что электромагнитные волны могут быть получены в измеримом количестве путем разряда конденсатора через цепь с малым сопротивлением. В следующем году он опубликовал формулу записывающего векторного потенциала с обескураживающе малой оценкой энергии, излучаемой колеблющимся контуром тока. В своих записных книжках он рассчитал частоту колебаний простых контуров и обсудил различные способы обнаружения излучаемых волн. Но он не стал упорствовать. Как сожалел Хевисайд, *"Фицджеральд видел слишком много открытий. Его мозг был слишком плодovit и изобретателен"*. Хуже того, никто не последовал этой идее, даже его друг Лодж, у которого в этот период жизни было мало времени для исследований. Если бы были предприняты последовательные усилия по созданию и обнаружению волн, они не обязательно увенчались бы успехом. Ни одна из процедур обнаружения, придуманных Фицджеральдом, не сработала

бы; а та, которую позже использовал Герц, была основана на неожиданном свойстве электрической искры, как мы увидим позже.<sup>72</sup>

<sup>69</sup> Maxwell 1875. Chalmers 1873b; Hunt 1991a: 28-30. Однако Максвелл ссылался на *"Мысли о лучевых колебаниях"* Фарадея (Faraday 1846: 450), согласно которым внезапное движение наэлектризованного или намагниченного тела вызовет поперечные колебания возникающих силовых линий (Maxwell 1864: 194). О ранних, не интерпретированных наблюдениях электромагнитного излучения см. Susskind 1964.

<sup>70</sup> Это основано на реконструкции Ханта на основе следующих неопубликованных документов: Лодж - Фицджеральду, 26 и 29 февраля 1880 года, цитируется в Hunt 1991a: 31-2; Лодж - Лармору, 1 января 1902 года, где содержатся выдержки из записных книжек Лоджа за 1879-80 годы. См. также Hunt 1991a: 30-33.

<sup>71</sup> FitzGerald, 1879b; 1880; 1882: 101. См. также Hunt 1991a: 33-32.

<sup>72</sup> FitzGerald 1882: 100; 1883a; Хевисайд, в FitzGerald 1902: xxvi. Ср. Hunt 1991a: 46-7. Запаздывающие потенциалы уже появлялись у Лоренца (в Lorenz, 1867), но в другом контексте: см. главу 6, стр. 212-13. Воображаемый осциллятор Фицджеральда был дипольным магнитным и сильно уступал электрическому дипольному осциллятору Герца. В 1884 году Дж. Дж. Томсон обсуждал излучение электромагнитных волн идеально проводящей сферической оболочкой, возвращающейся в электрическое равновесие (J. J. Thomson 1884c). Он решил, что эти волны невозможно обнаружить, поскольку они испускаются слишком внезапно (всего за несколько периодов, с длиной волны, сравнимой с радиусом сферы). Это может объяснить, почему эксперименты такого рода не были предприняты в Кавендишской лаборатории.

### 5.6.2 Волны по проводам

В начале 1888 года Лоджа, чьи способности научного оратора были хорошо известны, попросили прочитать лекцию о молниезащите. Для имитации удара молнии, он разряжал лейденские банки через искровой промежуток, для наглядности непрерывно питая лейденские банки, стоящие на деревянном столе с помощью мощной электростатической машины. Перед началом опыта проводника L нету. (рис. 5. 8).

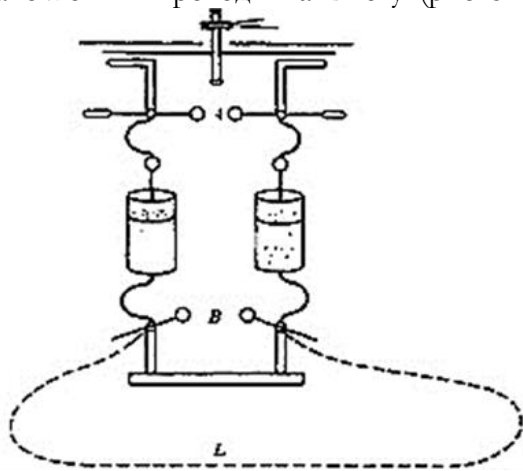


Рис. 5.8. Эксперимент Лоджа с альтернативным путем (Лодж 1888а: 234).

В начале цикла машина Восс (на рис. 5.8 - вверху) медленно заряжает

две лейденские банки до напряжение пробоя зазора А. Возникающая искра замыкает зазор А, а на зазоре В возникает разность потенциалов. Пока этот зазор невелик, банки разряжаются через него. По окончании этого процесса искрение прекращается, и можно начинать новый цикл.<sup>73</sup>

С помощью этого имитатора молнии Лодж приступил к сравнению различных молниеотводов. Он вводил проводники L (см. рис. 5.8) различной формы и конфигурации и определял минимальный размер промежутка В, при котором разряд происходил через альтернативный путь L. Для аудитории, привыкшей рассуждать исключительно в терминах омического сопротивления, результаты оказались совершенно неожиданными. Даже когда сопротивление L составляло малую долю ома, а зазор В был таким же широким, как А, разряд предпочитал зазор. Лодж объяснил это индуктивностью проводника L, препятствовала быстро меняющимся токам. Он был еще больше удивлен, обнаружив, что железный проводник ведет разряд лучше, чем аналогичный медный. Его предварительное объяснение было двояким. Во-первых, высокая магнитная проницаемость железа, увеличивавшая индуктивность провода не существовала для быстро меняющихся токов. Во-вторых, железо было лучше меди, потому что скин-эффект Хевисайда, который увеличивает сопротивление, был более важен для лучшего проводника - меди. Затем Лодж представил яркое доказательство скин-эффекта, показав, что плоские проводники проводят разряд лучше, чем круглые.<sup>74</sup>

Лодж хорошо знал, что разряд лейденской банки через небольшое сопротивление имеет колебательный характер, и он ожидал, что то же самое будет справедливо и для разряда облаков через молнию. Его выводы во многом зависели от высокой частоты колебаний, которая усиливала эффект самоиндукции. На собрании в Бате в 1888 году Уильям Прис, *bete noire* максвелловцев, выступил против Лоджа, поддержав общепринятую позицию по молниезащите. На этот раз Прис оказался прав: более поздние исследования доказали неосцилляторный характер молнии и тем самым разрушили большую часть выводов Лоджа.<sup>75</sup>

Помимо проблемы с молнией, внимание Лоджа к колебательным разрядам принесло интересные плоды.

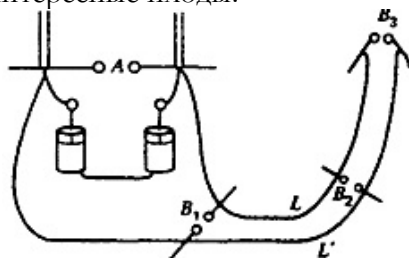


Рис. 5.9. Эксперимент Лоджа с «ударной отдачей» (Лодж 1888а: 275).

В варианте эксперимента с альтернативным путем (рис. 5.9) банки одновременно разряжались через зазор А и через разрядник В,

соединяющий два длинных провода, прикрепленных к полюсам машины. Лодж ожидал, что искрение в В будет прекращаться всякий раз, когда зазор В будет больше зазора А. Эксперимент решил иначе. Более того, искрение усиливалось, когда разрядник В находился дальше от источника. Лодж заподозрил явление резонанса. По его предположению, сильное искрение в В соответствовало "ударной отдаче" отраженных волн и увеличивалось, когда длина выводов приближалась к длине полуволны. В дальнейших экспериментах, демонстрирующих узлы и антиузлы на более длинных проводах, Лодж оценил длину волны в 30 ярдов. Это число совпадало с его собственной оценкой частоты осциллятора на основе его емкости и самоиндукции.<sup>76</sup>

Для континентальных физиков эксперименты Лоджа не имели большого теоретического значения, поскольку их можно было интерпретировать в терминах волн Кирхгофа в электрических проводах. Напротив, с максвелловской точки зрения Лодж сделал не что иное, как создал электромагнитные волны с помощью электричества. Он опубликовал свои прекрасные результаты в начале лета 1888 года и отправился в отпуск в Тироле. Во время поездки на поезде в Альпы он прочитал последний номер "Анналов" Видеманна и узнал, что молодой немецкий физик Генрих Герц получил *"гораздо лучшее и более поразительное доказательство этих электромагнитных волн"*. Лодж проглотил свою горечь и вскоре провозгласил свою радость по поводу этого великолепного достижения.<sup>77</sup>

---

<sup>73</sup> Lodge 1888a: 234.

<sup>74</sup> Lodge 1888a: 235-236.

<sup>75</sup> ср. Hunt 1991a: 146-151; Yavetz 1996 (для более поздней эволюции предмета).

<sup>76</sup> Lodge 1888a: 275; Lodge 1888b. 1888c. Ср. Aitken 1985: 89-95; Hunt 1991a: 148-9. Этот вариант альтернативного пути был наиболее очевидным для реализации, потому что коммерческая машина Восса поставлялась с двумя лейденскими банками, уже присоединенными к ней (для хранения электричества).

<sup>77</sup> Lodge 1888c: приложение, написанное в Тироле, датировано 24 июля 1888 года. См. также Hunt 1991a: 153.

## 5.7 Выводы

Максвелл оставил свою электромагнитную теорию в состоянии, полном недостатков и неясностей. Превосходство его взглядов не было самоочевидным для его современников. Высший британский авторитет в области электричества, сэр Уильям Томсон, не одобрял теорию Максвелла, поскольку она отходила далеко от эмпирических фактов, не предлагая механического представления основных полевых процессов. По мнению Томсона, понятие заряда Фарадея и ток смещения Максвелла были неоправданным расширением частичной аналогии между вакуумом и диэлектриками; кроме того, существовали другие способы иметь дело с незамкнутыми токами, не покидая понятий линий передачи. Между

практическими задачами телеграфа и идеалом простого упругого твердого эфира. Томсон не терпел никаких промежуточных сред. Следовательно, он осуждал новый стиль теоретической физики Максвелла.

Все же благодаря своему не допускающему исключений *трактату об электричестве и магнетизме* Максвеллу удалось передать свои и фарадеевские взгляды нескольким британским физикам. Некоторые из них усердно совершенствовались и расширяли его систему, пока в конце 1880-х годов она не завоевала предпочтение большинства англоязычных электриков. В ходе этого процесса теория Максвелла была значительно преобразована и приобрела ряд особенностей, которые сегодня считаются центральными, например, формулировка из четырех уравнений, поток Пойнтинга и электрическое получение ЭМ волн.

Существовало несколько видов максвелловских работ. В наиболее консервативном варианте уравнения Максвелла слепо применялись к вычислимым версиям старых задач, например, к диску Араго или вращающимся проводящим сферам. Это включало решение систем дифференциальных уравнений с простыми граничными условиями, и поэтому вызвало большую активность в Кембриджском *Tripes*. Чтобы избежать технических подробностей, последующие публикации не обсуждаются в этой главе, однако, они способствовали установлению максвелловской парадигмы и помогли прояснить некоторые вопросы. Например, в 1887 году Хорас Лэмб объяснил, что скалярный потенциал Максвелла полностью определяется только уравнениями Максвелла и в целом отличается от электростатического потенциала, задаваемого уравнением Пуассона. Максвелл, Лармор и Дж. Дж. Томсон ранее упустили этот важный момент.<sup>78</sup>

Наиболее важные пояснения к системе Максвелла были получены либо с помощью механических картин, либо с помощью динамических, энергетических соображений. С помощью модели шнура и бус Лодж проиллюстрировал максвелловскую концепцию заряда и тока, а также различные процессы в простых электрических системах. С помощью колес и резиновых лент Фицджеральд показал, что Максвелловское смещение не обязательно должно быть линейным смещением некоторого вещества. Более вероятно, что эта величина соответствует локальным деформациям другого рода. Тогда электрический ток больше не напоминал течение несжимаемой жидкости. Ток смещения означал изменение деформации механизма, передающего вращательное движение в поле; ток проводимости означал скольжение этого механизма.

Модели Лоджа и Фицджеральда были хороши для иллюстрации некоторых аспектов теории Максвелла, но они не объясняли электростатическое притяжение. Тем не менее, амбиции двух друзей



были направлены на определение конечной структуры эфира. Лодж полагал, что система зубчатых колес, или что-то подобное, была полезным шагом в этом направлении. Более философски настроенный Фицджеральд надеялся свести электромагнетизм и оптику к движениям идеальной жидкости. Однако его математических способностей и редкой физической интуиции не хватило, чтобы довести проект до конца.

Не все британские физики разделяли доверие Лоджа и Фицджеральда к механическим моделям и картинкам. Вместо этого Пойнтинг и Хевисайд полагались на динамические концепции, которые имели более прямое эмпирическое значение. Они оба определили поток энергии в электромагнитном поле как необходимое следствие уравнений Максвелла и распределения энергии поля. Они описывали проводники как поглотители и проводники энергии, перемещающейся в окружающем диэлектрике. Для Пойнтинга примитивным динамическим понятием было движение силовых трубок, что обеспечивало интуитивное понимание основных полевых процессов, несмотря на отсутствие механической основы. Роль проводника, например, заключалась в том, чтобы направлять и частично растворять силовые трубки, движущиеся в окружающем диэлектрике.

Для Хевисайда основными динамическими понятиями были обобщенные сила и скорость, управляемые "принципом действия", заимствованным у Томсона и Тэйта. Хевисайд требовал, чтобы действие сил **E** и **H** в данной точке - то есть их произведение на соответствующий ток - определяла энергию, накопленную и рассеянную в этой точке. Он непосредственно выразил уравнения поля в терминах сил и токов и дополнил их, чтобы включить все случаи движения тела. Максвелловские потенциалы исчезли, "как метафизика". В глазах Хевисайда потеря лагранжевой основы Максвелла была в значительной степени компенсирована лучшим пониманием практических проблем. Бывший телеграфист и гордо независимый мыслитель, он разработал свои собственные эффективные методы изучения распространения сигналов. Он изобрел векторную нотацию, наши импеданс, индуктивность и т.д., а также версию операционного исчисления. В его руках теория Максвелла стала более прозрачной, более полной и готовой к использованию.

Другие максвелловцы изучали связи между светом и магнетизмом. Старые и новые эффекты такого рода давали возможность исследовать вихревое вращение в магнитном поле и в конечном итоге подтвердить электромагнитную теорию света Максвелла. Фицджеральд начал эту тенденцию с замечательной теории магнитооптических эффектов Фарадея и Керра. Его работа может быть прочитана в различных поучительных аспектах: как указание на то, что странная вращающаяся среда Маккаллаха была единственной правдоподобной концепцией

механического эфира, как доказательство того, что отражение и преломление света можно рассматривать чисто электромагнитным способом, и как общая стратегия модификации уравнений Максвелла для интеграции новых нелинейных эффектов. В третьем регистре рецепт Фицджеральда заключался в добавлении новых членов в лагранжиан электромагнитного поля, так что динамические принципы автоматически выполнялись. У этого метода были мощные адепты в Кембридже, где абстрактная динамика Томсона, Тейта и Максвелла оказывала растущее влияние. Кульминацией стало замечание Глазebroука в 1881 году, что магнитооптический термин лагранжиана Фицджеральда может быть обоснован чисто электромагнитным образом в связи с эффектом Холла. Для максвелловских физиков это замечание означало важное подтверждение максвелловской теории света Максвелла.

Теория Глазebroука не пережила дальнейших магнитооптических исследований в 1890-х годах. По существу макроскопический подход с полевыми лагранжианами и уравнениями эффективного поля оказался недостаточным, и его пришлось заменить микрофизическими соображениями. Это не значит, что максвелловские теоретики 1880-х годов всегда избегали атомистики. Напротив, Оливер Лодж и Дж. Дж. Томсон посвятили много времени атомистической периферии системы Максвелла. Эта максвелловская микрофизика и ее эволюция в другой вид микрофизики будут рассмотрены в главе 7.

К концу 1880-х годов Фицджеральд, Пойнтинг, Лодж, Хевисайд и другие британские максвелловцы убедили большое число англоязычных физиков и электриков, что электрические флюиды и прямое действие на расстоянии должны быть заменены более философскими и действительно динамическими представлениями о поле. Совпадение соотношения единиц электростатического и электромагнитного заряда со скоростью света и успех полученных магнитооптических теорий увеличили правдоподобность теории Максвелла. Однако прямых электромагнитных доказательств ее превосходства не хватало. Возможно, максвелловцы были слишком убеждены в истинности системы Максвелла, чтобы проводить такие важные эксперименты. Лучшее, что удалось сделать Лоджу, это продемонстрировать электрические волны на проводах, которые теория Кирхгофа предсказывала так же хорошо, как и теория Максвелла.

<sup>78</sup> Lamb, 1887 год; Maxwell, 1873a: # 783; Larmor, 1884a; J. J. Thomson, 1884a. См. также Darrigol 1993b: 294-297.

## **6. Токи в незамкнутых цепях**

### **6.1 Введение**

Системы Неймана и Вебера доминировали в континентальной электродинамике до конца 1880-х годов. Экспериментальные исследования Фарадея не оказали дестабилизирующего эффекта, а

теория поля Максвелла в основном игнорировалась.<sup>1</sup> Диэлектрики понимались в терминах Моссотти как электричество, вытесняемое действующими на расстоянии силами. Диамагнетизм сводился к амперовским токам, взаимодействующим в соответствии с силами Вебера, или к обычному магнетизму в соответствии с представлениями Беккереля. Силовые линии использовались редко и только как описательный инструмент, оставляя более глубокую математику Нейману, Веберу и Кирхгофу. Даже эффект Фарадея был подведен под веберовские понятия: в 1858 году сын Франца Неймана Карл вывел основные свойства магнитооптического вращения из взаимодействия частиц оптического эфира с амперовскими токами в соответствии с обобщенной силой Вебера.<sup>2</sup> В целом, каждый известный экспериментальный факт казался совместимым с принятыми взглядами.

Недостатком такой широты немецкой электродинамики была определенная стагнация ее концепций и методов. В первом разделе этой главы показано, насколько слабыми и недолговечными были немногие немецкие попытки реформировать основы электродинамики. Во втором разделе рассматривается выдающееся исключение: общая схема исследования незамкнутых токов, разработанной Гельмгольцем. Своей электродинамикой Гельмгольц хотел бороться с упадком, который он ощущал в немецкой физике, продемонстрировать новые методы и стимулировать новые исследования. Ему это вполне удалось, как мы увидим в двух последних разделах, посвященных главному открытию Герца и его влиянию.

В этой главе дается полное обсуждение исследований Гельмгольца о том, что мы сейчас называем  $RL$  и  $RLC$  цепями. Ранее исследователи Гельмгольца игнорировали эти работы, предположительно потому, что с современной точки зрения они кажутся тривиальными. Однако они сыграли решающую роль в сближении физиологических и физических исследований Гельмгольца, установили справедливость закона Ома для преходных токов и предоставили основные методы изучения быстрых электрических процессов. Другой особенностью этой главы является пошаговое изложение экспериментов Герца по изучению быстрых электрических колебаний. Это, конечно, оправдано необычным характером результатов, полученных Герцем, а также новым пониманием того, какие приборы и типы рассуждений были ему доступны.

<sup>1</sup> Были исключения: Stefan 1874; G. Wiedemann 1882-1885, Vol. 4: 1158-1188. 1203; Tumlriz 1883; Mascart и Joubert 1882-1886: гл. 6; и некоторые французские телеграфисты, как задокументировано в Atten 1988a. Самый важный случай, Гельмгольца, рассматривается в этой главе. Подробнее о французской трактовке - в Coelho Abrantes 1985, и Atten 1988a, 1992.

<sup>2</sup> C. Neumann 1858, 1863. См. также Knudsen 1976: 262-271.

## 6.2 Основы континентальной электродинамики

### 6.2.1. Аксиомы Ампера

Концептуальной основой континентальной электродинамики оставалось прямое действие между двумя элементами тока или двумя частицами электричества. Обычно закрепляли законы Ампера и Вебера или создавали подобные альтернативные законы. Во Франции комментировали амперовские случаи равновесия и усовершенствовали его выводы. В других странах теоретики чувствовали себя свободно, предлагая альтернативные выражения для сил между элементами тока до тех пор, пока действия между замкнутыми токами оставались неизменными. В 1845 году Герман Грассман отказался от равенства действия и реакции и получил формулу, более простую с точки зрения его *Ausdehnungslehre*. В 1869 году Йозеф Стефан признал наличие крутящих моментов между элементами. Позже Дидерик Кортевег и Хендрик Лоренц исследовали эту возможность более систематически.<sup>3</sup>

Немецкий теоретик электродинамики, Карл Нейман, аксиоматизировал различные континентальные теории, критиковал их основы и обсуждал их совместимость с принципом энергии в очень систематической манере. В начале 1870-х годов он вывел закон Ампера и ряд возможностей для закона индукции из принципа энергии, существования потенциала для замкнутых токов и нескольких предположений о форме взаимодействия между элементами тока. Он также доказывал совместимость закона Вебера с принципом энергии и защищал его от нападок Гельмгольца, как будет показано ниже. Его длинные и сильно математизированные мемуары, похоже, мало кто читал. Густав Видеманн пояснил в сноске:

*"Дальнейшее изложение весьма исчерпывающих мемуаров Карла Неймана [...] здесь невозможно; выдержки из них нелегко привести, и поэтому я должен отослать читателя к оригинальному тексту".<sup>4</sup>*

<sup>3</sup> Grassmann 1845; Stefan 1869; Korteweg 1880; Lorentz 1882. О французской ампер-мании. ср Atten 1992. Об альтернативах формуле Ампера, ср. J. J. Thomson 1885: 100-106; Kaiser 1981: 33-4, 56-60.

<sup>4</sup> C. Neumann 187 1a, 1873a. 1873c; Wiedemann 1885, вып. 4: 1104n. Самые основательные работы К. Неймана были по математике

### 6.2.2 Запаздывание

В большинстве своих работ Карл Нейман рассматривал силы Ампера или Вебера как основные и, как и другие континентальные теоретики, не искал более глубокого обоснования.. Однако были и интересные исключения. Великий математик Бернхард Риман изучал физику под руководством Вебера и разделял интерес Гаусса к механической основе электродинамики. В своих Геттингенских лекциях 1861 года Риман дал следующий простой лагранжиан для сил Вебера между двумя частицами электричества  $e$  и  $e'$ :

$$L = ee'/r(1 + r^2/C^2) \quad (6.1)$$

Он также предложил вариант

$$L = ee'/r[1 + (\mathbf{v}-\mathbf{v}')^2/C^2] \quad (6.2)$$

в котором  $\mathbf{v} - \mathbf{v}'$  - относительная скорость двух частиц.

Полученные силы вместе с дуалистическим взглядом Фехнера на электрический ток приводят к тем же законам для сил между замкнутыми токами, но с более простыми аналитическими манипуляциями. В этих лекциях Риман стал пионером более абстрактного вида механической редукции, в которой лагранжиан давался без знания механизма.<sup>5</sup>

В то же время Риман искал *'constituirbare Vorstellung'* (бесценную идею), как выразился Гаусс, более определенное механическое представление электродинамики. В 1853 году он в частном порядке размышлял над моделью универсального эфира. В рукописи 1858 года он попытался вывести силу между двумя движущимися частицами электричества из предположения, что электростатический потенциал распространяется в пространстве со скоростью света. Он имел в виду объединение оптики и электричества и надеялся, что оптические и электродинамические действия происходят через одну и ту же среду. Однако он отозвал свою рукопись до публикации, вероятно потому, что ему стало известно о фатальной математической ошибке, которую Клаузиус с удовольствием обнаружил в посмертной публикации 1867 года.<sup>6</sup>

Карл Нейман в 1868 году разработал внешне похожую идею. Он принял потенциал между двумя частицами электричества в момент времени  $t$  обратно пропорциональным их расстоянию в момент времени  $t - r/C$ , где  $r$  - их расстояние в момент времени  $t$ , а  $C$  ( $= c\sqrt{2}$ ) - удвоенное отношение между электродинамической и электростатической единицей заряда. Достоинство этого странного предположения заключалось в том, что закон Вебера был получен в первом приближении. Клаузиус сразу же заметил, что оно не означает истинного распространения через среду.

Затем Нейман признал, что его предположение сильно отличается от предположения Римана и имеет мало аналогии с распространением света. Не только скорости были разными, но и излучаемый потенциал зависел от движения принимающей частицы. Однако Нейман, заботясь больше о математической ясности, чем о физическом правдоподобии, сохранил свое предположение. Его немецкие коллеги проигнорировали его, а Максвелл высмеял "совершенно уникальную" теорию Карла Неймана о передаче потенциалов.<sup>7</sup>

Самая блестящая попытка ввести запаздывание в континентальную электродинамику содержится в работе Людвига Лоренца 1867 года. В отличие от большинства немецких электродинамиков, датский физик сомневался в том, что электрический ток является потоком, и считал преждевременными физические гипотезы о природе электричества. Он отделил уравнения Кирхгофа для движения электричества от их

веберовской основы и признал их математическим выражением эмпирических законов. Однако, разделяя стремление Эрстеда и Ампера к единству, он попытался объединить электричество и оптику в рамках одной теории. Его стратегия заключалась в изменении уравнений Кирхгофа таким образом, чтобы движение электричества стало аналогичным движению оптического эфира.<sup>8</sup>

Лоренц обнаружил, что, не нарушая справедливости уравнений Кирхгофа для медленно меняющихся замкнутых токов, он мог бы заменить соответствующие потенциалы на

$$\begin{aligned}\Phi_R(\mathbf{r}, t) &= \int [\rho(\mathbf{r}', t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|] d\tau' \\ \mathbf{A}_R(\mathbf{r}, t) &= \int [\mathbf{j}(\mathbf{r}', t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|] d\tau'\end{aligned}\quad (6.3)$$

Этими формулами он хотел выразить, что

*"каждое действие, исходящее от свободного электричества и электрических токов, требует времени для распространения - предположение, не чуждое науке и должно иметь определенную вероятность."*

Из своей предыдущей работы по оптике он знал, что запаздывающие потенциалы являются общими (физически значимыми) решениями волновых уравнений с источниками  $\rho$  и  $\mathbf{j}$  и скоростью распространения  $c$ . Применив волновой оператор к обеим сторонам закона Ома ( $\mathbf{j} = \sigma (-\nabla\phi - \partial\mathbf{A}/\partial t)$ ) и используя принцип сохранения электричества, он получил следующее уравнение для электрического тока:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{j}) + (1/c^2)(\partial^2 \mathbf{j} / \partial t^2) + (4\pi\sigma / c^2)(\partial \mathbf{j} / \partial t) = 0 \quad (6.4)$$

Это уравнение было идентично тому, которое он использовал для поперечных смещений эфира в своей оптике, вплоть до члена поглощения, включающего проводимость  $\sigma$ . Поэтому Лоренц отождествил оптический эфир с плохим проводником, а оптические колебания - с переменными электрическими токами.

Как отметил Максвелл в своем *"Трактате"*, уравнение Лоренца (6.4) для движения электричества совпадает с уравнением, которое дает теория Максвелла. Фактически, Лоренц ссылался на мнение Фарадея о том, что электрические действия должны быть "непрерывными". Но он не знал об электромагнитной теории света Максвелла, опубликованной двумя годами ранее, и его теория отличалась от теории Максвелла по существенным пунктам. Он связывал распространение света с токами проводимости, в то время как у Максвелла токи смещения возникали в идеальных изоляторах. Следовательно, Лоренц не смог распространить свою теорию дальше случая среды с однородной проводимостью. Его работа не имела большого влияния, хотя в 1884 году Герц ссылался на нее как на первое публикацию о запаздывающем потенциале в электродинамике (вместе с Риманом для скалярного потенциала).<sup>9</sup>

Заполнив вакуум токами проводимости, Лоренц продвинулся к полевой теории электродинамики так далеко, как только могли континентальные физики. Почти для всех них формула для действия

между двумя частицами электричества оставалась основой теории, даже если все чаще и чаще упоминалась возможность того, что действие происходит через среду. Типичной в этом отношении является теория электродинамики, которую Клаузиус разработал в конце 1870-х годов.

<sup>5</sup> Riemann 1875 [1861]: 318-25. См. также J. J. Thomson 1885: 111-114 (который, однако, ошибочно ставит Клаузиусу в заслугу форму лагранжиана Whittaker, 1951: 206; Kaiser 1981: 113-114.

<sup>6</sup> Riemann [1853]; 1867 [1858]; Clausius 1868. См. также Whittaker, 1951: 240-241; Kaiser 1981b: 148-157; Wise 1981b: 288-292 для философского контекста.

<sup>7</sup> C. Neumann 1868a, 1868b; Clausius 1868; C. Neumann 1869; Максвелл Томсону. 1. 10 1869 года. *SLPM* 2: 499. См. также Maxwell 1873a: # 863; Wiedemann 1885. Том 4: 1096-1097; Kaiser 1981: 163-164 (с обсуждением еще одной попытки Энрико Бетти); Wise 1981b: 294-295; Archibald 1986 для детального изучения.

<sup>8</sup> Lorenz 1867a. 1867b. Cp. Whittaker, 1951: 267-270; Kaiser 1981: 157-162; Wisr 1981b: 293 - 294; Kragh 1991.

<sup>9</sup> Maxwell 1873a: # 805; Lorenz 1867a: 211-212; Hertz 1884: 314.

### 6.2.3 Консервативная реформа Клаузиуса

Клаузиус заметил, что закон Вебера приводит к неверным предсказаниям, если электрический ток не состоит из симметричного потока положительного и отрицательного электричества Фехнера: замкнутый, постоянный ток будет действовать на заряженную частицу в состоянии покоя, что противоречит всем экспериментальным данным. Тем не менее, к тому времени Вебер и Карл Нейман использовали единое представление об электрическом токе, например, в своем описании амперовских токов. Клаузиус подчеркнул большую простоту этого взгляда в металлических проводниках, а также отметил, что в электролитических токах положительное и отрицательное электричество не может двигаться с одинаковой скоростью. Поэтому он решил заменить закон Вебера другим, который не давал бы нежелательной силы между зарядом и током.<sup>10</sup>

Для соответствия электродинамике замкнутых токов и энергетическому принципу, Клаузиус отказался от трех основных предположений Вебера: что силы между двумя электрическими частицами лежат на линии, соединяющей эти частицы, что эти силы равны и противоположны, что они зависят только от относительного движения частиц. Предположив, что силы зависят от движения частиц относительно среды и что среда может поглощать недостающие импульсы, он получил из лагранжиана  $ee'(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}'/c^2)/r$  окончательную формулу для силы действия на частицу  $e$  частицей  $e'$  на расстоянии  $r$  в простой векторной форме:<sup>11</sup>

$$\mathbf{f} = -ee'\nabla(1/r)(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}'/c^2) - (ee'/c^2) \partial(\mathbf{v}'/r)/\partial t \quad (6.5)$$

и выводится из лагранжиана  $(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}'/c^2)ee'/r$ .<sup>11</sup>

Клаузиус разработал следствия этой формулы с помощью устаревшей амперовской математики, изобилующей многочисленными

производными  $r$  по времени и криволинейными абсциссами  $s$  и  $s'$ . Признавая существование электромагнитного эфира, он всё же избегал математики поля, даже в онтологически нейтральной форме Кирхгофа. Оглядываясь назад, можно сказать, что формула Клаузиуса является лучшим приближением к истинному действию поля между двумя заряженными частицами. Современные ему физики судили по-другому. Для немцев Клаузиус нарушил дух господствующих теорий. Для англичан он был поработен устаревшими теориями. Его умная попытка консервативной реформации так и не увенчалась успехом.<sup>12</sup>

Подводя итог, можно сказать, что континентальные размышления об основах электродинамики имели ограниченный масштаб и влияние. Большинство из них были консервативны в отношении физических концепций и математических методов. Они часто вырождались в стерильную аксиоматизацию. Немногочисленные попытки принять во внимание среду были единичными или недостаточными, и они не были связаны с более мощными попытками Максвелла в Англии. Обсуждения основ были полностью теоретическими, и никто не стремился определить экспериментальные условия различия между разными возможностями. Однако из этого общего отношения было одно существенное исключение: Герман Гельмгольц и его ученики.<sup>13</sup>

<sup>10</sup> Clausius 1877a, 1877b, 1879: 232. В действительности сила Вебера между постоянным током и зарядом в состоянии покоя слишком мала, чтобы ее можно было обнаружить: см. Приложение 4. Riecke 1873 уже отметил, что теория Вебера подразумевает эту силу. Lorberg 1878 доказал, что ее отсутствие требует симметричного потока электричества (но все же предпочел закон Вебера). Потенциал Римана имеет тот же недостаток (Clausius 1877b: 18). Клаузиус также знал о критике Гельмгольцем закона Вебера (Clausius 1875: 658), но не полагался на неё.

<sup>11</sup> Clausius 1875, 1876, 1877a, 1877b, 1879. Форма, приведенная в Clausius 1875, сохраняет равенство действия и реакции, но нарушает принцип энергии для нефехнеровских токов, как отмечено в Clausius 1876. Для действия между двумя элементами тока закон Клаузиуса подразумевает формулу Грассмана (Clausius 1879: 285). Cp. J. I. Thomson 1885: 108-10; Wiedemann 1885, Vol. 4: 1106-09; Whittaker 1951: 234-235.

<sup>12</sup> Clausius 1877a, 1877b, 1879. О связи с теорией Лоренца см. Whittaker 1951: 234 (лагранжиан Клаузиуса является первым приближением члена взаимодействия в лагранжиане Шварцшильда, приведенном в Приложении 9). Немецкие возражения см. в Wiedemann 1885, Vol. 4: 1107--09. Типичный британский комментарий см. в J. J. Thomson 1885: 110.

<sup>13</sup> Небольшим исключением является Schatz 1880: диссертационная работа, выполненная под руководством Клаузиуса для анализа возможности различения законов Клаузиуса, Римана и Вебера.

### 6.3. Принципы Гельмгольца

Страсть к физике появилась у Германа Гельмгольца в раннем возрасте, когда он еще учился в гимназии Потсдама. В 1837 году он получил правительственную стипендию для изучения медицины, обязавшись отслужить восемь лет в качестве хирурга в прусской армии. В течение четырехлетнего периода обучения он посещал курсы по философии,



физике и физиологии в Берлинском университете. Он также проводил исследования в частной физической лаборатории Густава Магнуса и читал французских классиков математической физики с группой друзей.

В 1841-1842 годах он защитил диссертацию под руководством известного физиолога Иоганна Мюллера. Во время службы в армии он выполнил важную работу по изучению мышечной силы и тепла, которая принесла ему в 1848 году кафедру физиологии в Кенигсберге. Он занимал различные должности в области физиологии, пока не получил кафедру физики в Берлине в 1871 году. Его интерес к физике был постоянным, даже в его физиологических работах. Как и Мюллер, он сосредоточился на физических и химических процессах в живых организмах. Следуя за наиболее радикальными учениками Мюллера, он боролся за исключение *жизненной силы* из физиологии. Например, его исследование мышечных сокращений показало, что производимая ими работа и тепло объясняется потреблением химических веществ.<sup>14</sup>

### 6.3.1 Сохранение силы

В работах такого рода Гельмгольц размышлял о преобразованиях, происходящих между различными видами сил. В этом контексте были опубликованы его первые намеки на сохранение энергии, а в 1874 г. последовала капитальная работа **"О сохранении силы"**. В ней использовались механика французских инженеров, вибрационная теория теплоты Ампера, эксперименты Джоуля по преобразованию энергии, размышления Карноля о движущей силе тепла, лапласовское приведение к центральным силам и трансцендентальная философия.<sup>15</sup>

Гельмгольц предварил свою работу философскими рассуждениями, кажушимися далекими от физики даже для современных физиков, однако определившими важные аспекты его подхода к электродинамике и показывающими нам, как прямое действие на расстоянии могло быть столь же философским в Германии, сколь нефилософским в Англии.<sup>16</sup>

Сначала Гельмгольц определил "постижимость природы" как возможность найти конечные, неизменные причины природных процессов. Затем он ввел две "неразделимые абстракции" - силу и материю, причем материя - это то, что может измениться только в результате движения, а сила - причина движения. Постижимость природы подразумевает сводимость физики к силам, которые зависят только от пространственной конфигурации материи. Далее Гельмгольц применил принцип разложения, согласно которому *"сила, которую две целые массы оказывают друг на друга, должна быть разложена на силы, которые оказывают друг на друга их части"*. В полностью постижимом мире результирующие элементарные силы являются "центральными силами", действующими между двумя точками массы и стремящимися изменить расстояние между ними со скоростью, зависящей только от расстояния.<sup>17</sup>

Будучи центральными, элементарные силы происходят из потенциала и удовлетворяют теореме о живых силах и невозможности производства работы в цикле. Более того, сохраняется сумма "*общей живой силы*" (нашей кинетической энергии) и "*суммы сил натяжения*" (нашей потенциальной энергии). Если природа полностью постижима, то вечный двигатель невозможен, а "сила" (энергия) сохраняется. Для менее философски настроенных читателей Гельмгольц предложил альтернативный путь к сохранению энергии, основанный на принципе разложения и эмпирически известной невозможности вечного двигателя. По его мнению эта невозможность подразумевает центральный характер элементарных сил и, следовательно, сохранение силы.<sup>18</sup>

Первоначальный замысел Гельмгольца был двояким. На самом фундаментальном уровне он стремился свести явления к элементарным центральным силам. На феноменологическом уровне он хотел определить сохраняющиеся величины в различных известных преобразованиях силы, проверить, что известные законы соответствуют сохранению этих величин, или, наоборот, использовать сохранение для ограничения этих величин. этих величин или, наоборот, использовать сохранение для ограничения формы законов. Работа "*О сохранении силы*" объединила обе стратегии и применила их ко всему спектру физических и химических явлений.<sup>19</sup>

Немецкие физики сравнительно медленно оценивали важность работы Гельмгольца. Эмпирики с подозрением отнеслись к работе, в которой не было оригинальных экспериментов. Среди ведущих теоретиков Франц Нейман был настроен мягко, Вебер - безразлично, а Клаузиус - откровенно враждебно. Британские физики были более восприимчивы. Томсон выразил восхищение работой Гельмгольца и стал его близким другом. Между усилиями этих двух людей было очевидное совпадение: они оба признали, что физика сводится к механике без трения, оба ввели сохраняемую величину в преобразования между различными видами силы, оба измеряли эту величину эквивалентным количеством механической работы, и оба организовали свою физику в соответствии с полученным принципом сохранения. Однако были и важные различия. Для Томсона сводимость физики к консервативной динамике выражала неизменность божественных творений; для Гельмгольца это можно было доказать трансцендентальными рассуждениями, основанными на полной постижимости природы. Кроме того, Томсон имел более тесные связи с культурой инженеров. Его больше волновали практические аспекты сохранения энергии, а Гельмгольца - общее объединение физики.<sup>20</sup>

Философия познания Гельмгольца развивалась вместе с его пониманием физиологии зрения. В 1860-х годах он отказался от понятия постижимости природы с точки зрения конечных причин и заменил его более широким понятием закономерности, оправдывавшим успешное

использование опыта. Кроме того, он осознал трудности в двух своих доказательствах того, что все явления могут быть сведены к действию пар центральных сил. Индуктивное доказательство не удалось, поскольку электромагнитные силы, например, были консервативными, не будучи центральными. Трансцендентальное доказательство также было недостаточным, поскольку априори можно было получить только половину истины принципа разложения: чтобы движение протяженной массы было полностью известно, необходимо знать силы, действующие на каждую точку массы, но эти силы не обязательно являются суммой сил, исходящих из точек массы.<sup>21</sup>

Отказавшись от идеи окончательного сведения физики к игре центральных сил и высказываясь за более феноменологический тип физики, Гельмгольц, однако, утверждал, что механическое сведение к центральным силам *в принципе* возможно. Он также широко использовал принципы разложения и энергии как феноменологически значимые остатки потерпевшей крах метафизики его работы о сохранении силы.

<sup>14</sup> Биографию Гельмгольца см. в Königsberger 1902-1903; Turner 1972; Cahan 1993: xxi-xxix. О его ранних работах по физиологии см. Lenoir 1982: 197-215; Kremer 1990: 275-307; Olesko and Holmes 1993.

<sup>15</sup> Helmholtz 1847. О происхождении этой работы см. Bevilacqua 1993 и цитируемую там дальнейшую литературу.

<sup>16</sup> см. Wise 1981b: 295-7; Heimann 1974a для возможного отношения к Канту; Bevilacqua 1993: 304-309.

<sup>17</sup> Helmholtz 1847: 15, см. Heimann 1974a; Krüger 1994b; Darrigol 1994b. Название «принцип разложения» мое.

<sup>18</sup> Helmholtz 1847: 17-27.

<sup>19</sup> см. Bevilacqua 1993.

<sup>20</sup> О приеме работы Гельмгольца см. Jungnickel and MacCormmach 1986, Vol. I: 160-161; Bevilacqua 1994: 90-92; о полемике с Клаузицем см. Heimann 1974a: 234-235; Bevilacqua 1994; о разнице между Томсоном и Гельмгольцем, см. Heimann 1974a; Smith and Wise 1989: главы. 9-10, особенно стр. 306-307 (теологический аргумент Томсона); Smith 1998: 126-140.

<sup>21</sup> Helmholtz 1881b. См. также Bevilacqua 1994; Darrigol 1994b: 219-224.

### 6.3.2 Потенциалы

Треть работы "***О сохранении силы***" была посвящена электричеству и магнетизму. Для электростатики и магнитостатики Гельмгольц считал уже данным им сведение к центральным силам, поэтому сразу же отождествил общий потенциал с суммой сил натяжения (потенциальной энергией). Он также показал, что электрическое напряжение (*freie Spannung*)<sup>22</sup> проводника равно живой силе, приобретаемой единицей положительного электричества при движении от проводника к бесконечности. Он дал выражение  $CV^2/2$  для энергии конденсатора, где  $C$  - емкость, а  $V$  - приложенное напряжение, и использовал его для объяснения эмпирического закона Питера Рисса для тепла, выделяемого

при разряде лейденской банки. Сходство с физическим потенциалом Томсона очевидно: оба исследователя использовали энергетические соображения, чтобы объединить математический потенциал Гаусса и рабочие понятия электрического напряжения.<sup>23</sup>

Для гальванизма Гельмгольц объединил глобальное энергетическое равновесие и сведение контактного напряжения к центральным силам. Он вывел связь между ЭДС гальванического элемента и теплотой химических реакций на электродах. Для электромагнитных сил он применил чисто феноменологический подход, поскольку сведение к центральным силам еще не было доступно. В случае магнита, движущегося под действием гальванического тока, он утверждал, что *"живая сила, [кинетическая энергия] полученная магнитом, должна быть обеспечена силами натяжения [потенциальной энергия], расходуемыми в токе"*. В единицу времени потребление равно  $ei$  - произведению ЭДС батареи  $e$  и силы тока  $i$  и расходуется на выделение джоулева тепла  $Ri^2$  и на увеличение кинетической энергии магнита. Согласно Нейману, работа, совершаемая электромагнитными силами над магнитом, равна  $-(dx/dt)(dP/dx)$ , где  $x$  - перемещение магнита, а  $P$  - его потенциал относительно единичного тока в цепи. Таким образом, Гельмгольц получил равновесие

$$ei = ri^2 - idP/dt \quad (6.6)$$

что требует существования ЭДС индукции Неймана  $dP/dt$ . Рассуждения Гельмгольца были весьма похожи на рассуждения Томсона, но появились на несколько месяцев раньше.<sup>24</sup>

Формулировка Гельмгольца предполагала, что он вывел индукцию и ее количественные законы путем простого применения принципа энергии. Под критикой Клаузиуса и Карла Неймана он позже признал, что сделал не так уж много - необходимо было учесть самоиндукцию. Более проблематично то, что в рассуждениях Гельмгольца неявно предполагалось, что внутренняя энергия системы магнит-ток не зависит от положения магнита. Это, конечно, верно, но отнюдь не очевидно. Ситуация еще хуже в случае связи между двумя контурами, которую Гельмгольц рассматривал аналогичным образом, хотя здесь внутренняя энергия действительно зависит от взаимной конфигурации двух контуров. Несмотря на свои недостатки, эти аргументы убедили Гельмгольца в том, что потенциал Неймана должен быть центральной концепцией электродинамики, поскольку он был хорошо приспособлен к энергетическим соображениям.<sup>25</sup>

<sup>22</sup> Определяется как заряд, приобретаемый удаленной проводящей сферой единичного радиуса после соединения с проводником через провод.

<sup>23</sup> см. Helmholtz 1847: 41-46, 58-61. Гельмгольц не заявлял прямо, что его "напряжение" идентично потенциалу, обладающему теми же свойствами: см. Bevilacqua 1994: 94-98.

<sup>24</sup> Helmholtz 1847: 46-57 для гальванизма (также 57-58 для термоэлектрических токов); там же: 61-65 для электромагнитной индукции.

<sup>25</sup> Clausius 1853. 1854; C Neumann 1871 а. 1873b; Helmholtz 1854. 1873a: 677-9. Первые

правильные выражения баланса энергии в системе переменных токов содержатся в работах Helmholtz 1870a; C Neumann 1871a; Thomson 1872a: 441n-442n (рукописный меморандум 1851 года); C Neumann 1873b. Четкое обсуждение см. в Knudsen 1995.

### 6.3.3 Нервное возбуждение и RL цепь

В 1850 году Гельмгольц вернулся к электромагнитной индукции, но в другом контексте. В своей знаменитой серии экспериментов, которые привели к измерению скорости нервного возбуждения, он усовершенствовал метод, изобретенный Клодом Пуйе для измерения коротких промежутков времени при артиллерийской стрельбе. Идея заключалась в том, чтобы пропускать ток известной постоянной силы через баллистический гальванометр в течение времени, подлежащего измерению. Максимальное отклонение магнита, которое Гельмгольц измерял оптическим методом Гаусса и Вебера, давало количество электричества, пропущенного через цепь, из которого можно было вычислить продолжительность тока. Главная экспериментальная трудность заключалась в разработке переключателей, которые включали и выключали ток в начале и конце измеряемого интервала времени.

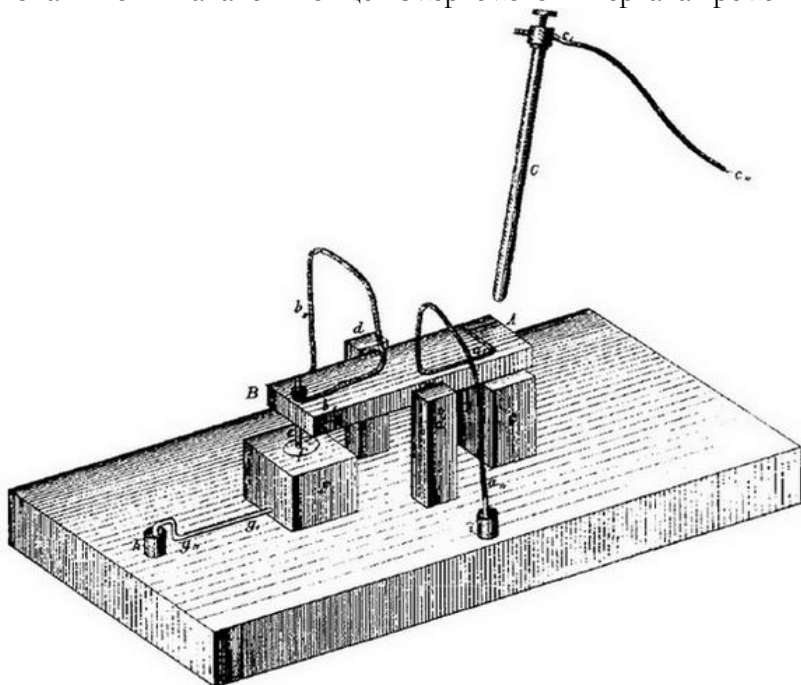


Рис. 6.1. Первые "качели" Гельмгольца (Helmholtz 1850a: лист 5).

На рисунке 6.1 представлены "качели" Гельмгольца: удар  $C$  по  $A$  включает измерительный ток через  $aa$  и размыкает  $ef$  первичную цепь индукционной катушки, которая возбуждает нерв.<sup>26</sup>

Однако имелось теоретическое сомнение в правильности метода: достиг ли ток в гальванометрической цепи всей своей интенсивности сразу после

замыкания цепи? Находясь в Кенигсберге, Гельмгольц, вероятно, консультировался с Нейманом по этому электрическому вопросу.

Самоиндукция должна была сыграть свою роль, но Нейман сомневался, что можно рассчитать переходный ток, потому что закон Ома был установлен только для постоянных или медленно меняющихся токов. Гельмгольц предположил, что если бы в цепи была катушка, для нарастания тока потребовалось бы достаточно времени, чтобы распределение тока в проводе было равномерным в любой момент времени и закон Ома был применим. Тогда ток будет расти по формуле

$$i = (e/R)(1 - e^{-(R/L)t}) \quad (6.7)$$

где  $e$  - электродвижущая сила батареи,

$R$  - суммарное сопротивление цепи,

$L$  - индуктивность катушки

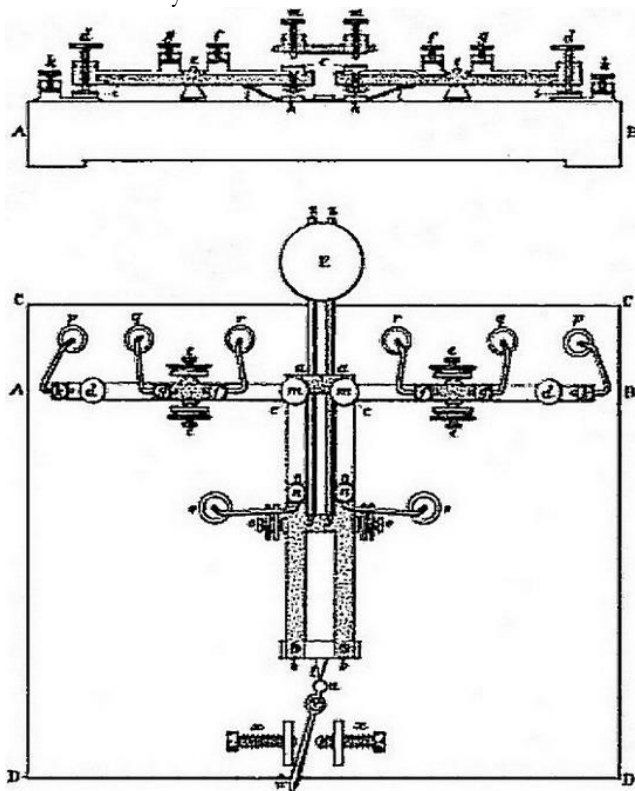


Рис. 6.2. Вторые "качели" Гельмгольца (Helmholtz 1851: пластина 3).

Под действием груза  $E$  главный рычаг  $aa\ bb$  вращается вокруг оси  $00$  и воздействует на меньшие рычаги  $cd$ , которые в свою очередь вращаются вокруг двух осей  $ee$ . Тогда в точке  $c$  контакты устанавливаются, а в точке  $i$  разрываются. Небольшая задержка между контактами с правой и левой стороны достигается установкой винтов  $m$  на разную высоту.

Чтобы постоянно не измерять время, Гельмгольц проверил этот закон косвенным путем. Для ряда априорно неизвестных, но вполне

определенных моментов времени, он определил отклонение магнита в моменты размыкания цепи, и отклонение при внезапной одновременной замене батареи на постоянное сопротивление, равное внутреннему сопротивлению батареи. Это достигалось с помощью "качелей" (рис. 6.2)

У катушки, используемой Гельмгольцем в его физиологических экспериментах, отношение  $L/R$  составляло около 0,001 секунды. Это означало незначительную поправку к измеряемому им физиологическому времени, порядка 0,01 секунды. Побочные результаты были еще более важными: Гельмгольц дал первое количественное описание самоиндукции, распространил закон Ома на переменные токи и представил сложные методы изучения таких токов.<sup>27</sup>

### 6.3.4 Электрошок и скин-эффект

Следующий важный вклад Гельмгольца в электродинамику произошел в 1869 году, после того как он завершил философское заключение своей "Физиологической оптики". Тогда он признался другу:

*"Я обнаружил, что слишком много философствования как-то деформирует меня и делает мои мысли вялыми и расплывчатыми; на некоторое время я снова дисциплинирую их с помощью экспериментов и математики, а затем, после этого, я вполне могу вернуться к теории восприятия".*

Он также считал, что немецкая физика находится в упадке, и верил, что сможет обратить эту тенденцию вспять своими работами.<sup>28</sup>

И снова вдохновение Гельмгольца пришло из физиологии. В ходе новых измерений распространения нервного возбуждения он заметил, что индукционная катушка не действует на более глубоко расположенные нервы человеческого тела, что уже было известно электротерапевтам. Он предполагал, что распространению быстро меняющихся токов через проводящие массы препятствует электромагнитная индукция. Для проверки он сравнил проникновение токов разной длительности. Его прибор использовал стандартные ресурсы электрофизиологической лаборатории: индукционную катушку Дю Буа-Реймона (без железного сердечника) для получения электрических импульсов и обнаженный нерв. импульсов, и обнаженный нерв мышцы лапки лягушки в качестве детектора тока. В то время не было лучшего детектора для коротких низкоэнергетических токов. Гельмгольц погрузил нерв лягушки в ванну с подсоленной водой на некотором расстоянии от пары платиновых электродов, подключенных к индукционной катушке напрямую или через лейденскую банку.<sup>29</sup>

Индукционная катушка Дю Буа-Реймона (рис. 6.3) состоит из двух цилиндрических катушек А и В, которые могут вставляться друг в друга (так можно регулировать сцепление). Внутренняя маловитковая катушка А подключена к батарее через электромагнитный "молоточек" Мп, периодически разрывающий цепь.

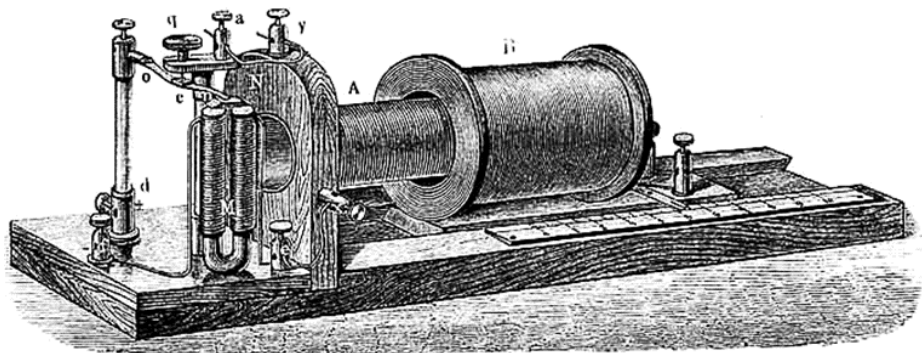


Рис. 6.3. Индукционная катушка Дю Буа-Реймонда  
(Wiedemann 1885, том 4: 8)

Внешняя катушка В - многovitковая, поэтому при каждом замыкании или размыкании первичной цепи на ее концах возникает интенсивная ЭДС индукции. Токи, возникающие в резистивной вторичной цепи при размыкании первичной (размыкающие удары), гораздо более внезапны и интенсивны, чем токи, возникающие при ее замыкании (замыкающие удары), поскольку для образования первичного тока требуется время.

Если во вторичном контуре имеется лейденская банка, то толчки при замыкании становятся колебательными с периодом, значительно меньшим, чем их общая продолжительность. Гельмгольц сравнил действие различных видов вторичных токов на нерв лягушки в зависимости от его расстояния от электродов. Он обнаружил, что чем быстрее изменялся ток, тем меньше он мог проникнуть в проводящий раствор. Это было первое экспериментальное доказательство существования своего рода скин- эффекта.

<sup>26</sup> Helmholtz 1850a. 1850b. См. также Olesko and Holmes1993: 74-105

<sup>27</sup> Helmholtz 1851 г.

<sup>28</sup> Гельмгольц Людвигу, 28 марта 1869 года, цитируется по Königsberger 1903, Vol. 2: 162; Гельмгольц Беселеру, 28 мая 1868 года, цитирует там же: 115: *«Я вижу, что молодое поколение в Германии не делает существенного прогресса в научной, и особенно в математической физике. Несколько великих имен в этой отрасли, являющейся истинной основой всей естественной науки, в возрасте или начинают переходить в старшее поколение, а новое поколение не поднимается на их место; и в связи с этим я должен сказать себе, что, если бы я мог влиять на своих учеников в этом отделе, я мог бы, возможно, выполнять более важную работу там, чем в физиологии, где сильная школа в настоящее время находится в полной и растущей активности».*

<sup>29</sup> Helmholtz 1869a.

### 6.3.5 RLC контур с лягушачьей лапкой

Интерпретация этих экспериментов требовала демонстрации колебаний в контуре с лейденской банкой. В 1847 году Гельмгольц уже утверждал, что разряд лейденской банки через провод имеет колебательный характер. Тогда он полагал, что колебания объясняют, почему тепло, выделяемое разрядом, одинаково для каждого соединительного провода. Более обоснованно он заметил, что Воластон и Фарадей получили симметричный электролиз с помощью



электростатического разряда.<sup>30</sup>

В 1853 году Томсон дал анализ  $RLC$ -цепи, ставший классическим: уменьшение электростатической энергии  $Q^2/2C$  конденсатора должно быть равно увеличению магнитной энергии  $Li^2/2$  плюс джоулево тепло, выделяемое в сопротивлении:

$$-d(Q^2/2C) = d(Li^2/2) + Ri^2 dt \quad (6.8)$$

что для малого сопротивления  $R$  подразумевает, колебания с периодом  $2\pi(LC)^{1/2}$  и временем затухания  $RC$ . В 1859 году Бернхард Феддерсен подтвердил колебательный характер искрового разряда в лейденской банке методом вращающегося зеркала. Однако никому не удавалось изучить ток разряда в отсутствие искрового промежутка. Гельмгольц смог сделать именно это с помощью лягушачьих лапок и катушки Дю Буа в устройстве, схематически показанном на рис. 6.4.<sup>31</sup>

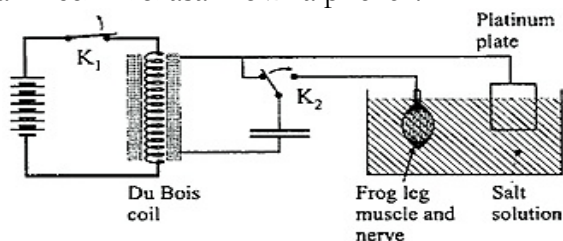


Рис. 6.4. Устройство Гельмгольца для изучения электрических колебаний.

Импульс тока запускается во вторичной цепи при размыкании прерывателя  $K_1$ . Через небольшое заданное время детектор тока "лягушачья лапка" включается во вторичную цепь переключателем  $K_2$ . Для определения времени Гельмгольц использовал прибор, который он уже применял для улучшенного измерения скорости нервных возбуждений: тяжелый второй маятник, воздействующий на  $K_1$  и  $K_2$  в двух различных, регулируемых точках его падения. Он обнаружил, что для периодического набора значений времени нерв лягушки не возбуждается, что означает, что ток периодически исчезает. Для катушки и банки, использованных в его предыдущем эксперименте, период составлял около  $1/2000$  секунды, а время затухания -  $1/50$  секунды.<sup>32</sup>

<sup>30</sup> Helmholtz 1847: 46. Несколько исследователей уже предполагали, что разряжение лейденской банки может быть колебательным, например, John Henry в 1842 году: см. Whittaker 1951: 226.

<sup>31</sup> Thomson 1853b; Feddersen 1857, 1858, 1859, 1908.

Kirchhoff 1864 вывел то же самое уравнение на основе теории Вебера, включая теоретические значения емкости и индуктивности в экспериментах Феддерсена. См. Wiedemann 1885, вып. 4:166-177, 1083-1087.

<sup>32</sup> Helmholtz 1869b. В 1871 году Гельмгольц выполнил более тонкий эксперимент с конденсатором Кольрауша, измеряя заряд этого конденсатора с помощью электрометра Томсона после внезапного прерывания тока (Helmholtz 1871, главной целью которого было опровергнуть малое значение Блаземы (Blasema's) для скорости распространения индуктивных воздействий).

### 6.3.6 Потенциальный закон

Гельмгольц теперь знал, как производить и измерять колебательные токи, и он показал, что высокая частота препятствует проникновению в большие проводящие массы. Последнее явление представляло особый теоретический интерес, поскольку оно априори затрагивало еще неизученную электродинамику незамкнутых токов: распространение тока скорее всего, подразумевало переменные заряды на поверхности и в массе проводника. Гельмгольц атаковал эту теоретическую проблему с огромной аналитической силой. Ему были известны три соответствующие теории: Общая теория Кирхгофа о движении электричества в трехмерных проводниках, расширение теории Неймана на этот случай, и совершенно другая теория Максвелла. "Перед лицом конфликтующих теорий", Гельмгольц предпочитал "оставаться как можно ближе к основанию фактов и оставлять неопределенными те части теории, которые не могут быть решены экспериментом". Он начал с установленных законов для замкнутых, линейных токов и искал общее расширение, согласующееся с энергетическим принципом.<sup>33</sup>

По аналогии со случаем замкнутых токов, Гельмгольц признал "закон потенциала", то есть существование потенциала, дающего механические силы при пространственной деривации и электродвижущие силы при временной деривации. Другими словами, он распространил концепцию Неймана об электродинамическом потенциале на незамкнутые токи.<sup>34</sup> Он знал, что это не был очевидный шаг. Электрический ток, будучи кинетическим явлением, не имел потенциальной энергии в смысле "напряжения" в его работе *"О сохранении силы."* Кроме того, амперовская эквивалентность электрических токов и двойных магнитных листов не распространялась на незамкнутые токи. Гельмгольц обосновал свое расширение потенциала Неймана, ссылаясь на мнение Томсона и Максвелла о том, что системе токов, независимо от того, замкнуты они или нет, соответствует определенная кинетическая энергия. Тогда потенциал Неймана, который является отрицательной величиной этой энергии, также должен существовать.<sup>35</sup>

Как позже понял Гельмгольц, эти рассуждения ошибочны: потенциал не должен существовать, даже если кинетическая энергия существует. Но у него были и другие причины отдать предпочтение закону потенциала: это был самый простой закон, который он мог себе представить, в гармонии с принципом энергии и принципом разложения. Как мы уже видели, эти принципы были мощными остатками прежнего представления о постижимости природы. И хотя Гельмгольц больше не хотел сводить электродинамику к центральным силам, действующим попарно, он все же разложил физические системы на пары бесконечно малых объектов, взаимодействие которых просто вытекает из взаимной энергии.<sup>36</sup>

Для замкнутых линейных токов Нейман задал потенциал (в электромагнитных единицах)

$$P = -i \oint \mathbf{dl}' \cdot \mathbf{I} / r \quad (6.9)$$

В прямом обобщении на замкнутые (бездивергентные) трехмерные токи потенциал имеет вид

$$P = - (1/2) \oint \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} d\tau, \quad (6.10)$$

где

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \oint \mathbf{j}(\mathbf{r}') d\tau' / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|. \quad (6.11)$$

Тогда электрический ток дается обобщением закона Ома Кирхгофом

$$\mathbf{j} = \sigma (-\nabla \phi - \partial \mathbf{A} / \partial t), \quad (6.12)$$

где  $\phi$  - электростатический потенциал, такой, что

$$\Delta \phi + 4\pi c^2 \rho = 0 \quad (6.13)$$

Для незамкнутых токов Гельмгольц показал, что наиболее общее выражение векторного потенциала, соответствующее выражению (6.11) для замкнутых токов и уменьшающееся как  $1/r$  при удалении от токов, имеет вид

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \oint \mathbf{j}'(\mathbf{r}') d\tau' / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| + [(1 - k)/2] \nabla \xi, \quad (6.14)$$

$c^{37}$

$$\xi(\mathbf{r}) = - \oint \nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}') |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| d\tau' \quad (6.15)$$

Различные варианты выбора константы  $k$  соответствуют различным теориям движения электричества в проводниках. Для  $k = 1$  получается простая формула потенциала Неймана. Гельмгольц приписывает полученные законы движения Нейману, который, однако, тщательно избегал высказываний об индукции, создаваемой незамкнутыми токами. В Случай  $k = -1$  дает уравнения, выведенные Кирхгофом из теории Вебера (см. стр. 95). Наконец, Гельмгольц бездоказательно утверждал, что  $k = 0$  дает теорию Максвелла. Это требует некоторого объяснения.<sup>38</sup>

При  $k = 0$  векторный потенциал становится бездивергентным. Взяв дивергенцию выражения (6.12) закона Ома, находим

$$(\partial \rho / \partial t) + 4\pi c^2 \rho = 0 \quad (6.16)$$

Это уравнение, имеющее место и в теории Максвелла, подразумевает, что никакой заряд не может осесть в медном проводнике более чем на ничтожную долю времени, около  $10^{-17}$  сек.<sup>39</sup> Следовательно,  $\xi$  обращается в нуль и выражение (6.14) векторного потенциала становится идентичным максвелловскому, пока ток смещения остается пренебрежимо малым по сравнению с током проводимости в проводнике. Это действительно так, если (неизвестная) диэлектрическая проницаемость металла не слишком велика и если поверхностные эффекты пренебрежимо малы (см. Приложение 7).<sup>40</sup> Поэтому Гельмгольц имел основания отождествлять случай  $k = 0$  с теорией Максвелла, поскольку он имел в виду только то, что эти две теории приводят к одинаковым уравнениям для движения

электричества в проводниках (см. также Приложение 7).

Гельмгольц обсуждал последствия теории Максвелла раньше всех британских физиков и до публикации *"Трактата"*. Он встречался с Максвеллом и в 1864 г. они проводили эксперименты на дальтонике. Он восхищался британской физикой и способствовал ее распространению в Германии, организовав перевод *"Естественной философии"* Томсона и Тайлса и *"Теплоты как способа движения"* Гиндалла. Он был более близким другом для Томсона, чем для любого немецкого физика, кроме, возможно, Кирхгофа. Гельмгольц был близок к британским энергетикам. Он хвалил Томсона за то, что тот *"избегал, насколько это возможно, гипотез на неизвестные темы"*, а Максвелла - за приведение электродинамики в гармонию с общими принципами динамики.<sup>41</sup>

<sup>33</sup> Helmholtz 1870b: 546. Об электродинамике Гельмгольца, см. также Rosenfeld 1956; Woodruff 1968; Hirose 1969: 161-7; Buchheim 1971; Wise 1981b: 295-301; Buchwald 1985a: 177-86; Darrigol 1993a: 223-39; Kaiser 1993; Buchwald 1994: 7-42.

<sup>34</sup> Нейман не допустил этого расширения: вместо этого он принял силы Ампера между существующими элементами, которые не вытекают из потенциала. Тем не менее, в 1870 году Гельмгольц представил потенциал закон для элементов тока, как у Неймана.

<sup>35</sup> Helmholtz 1870b: 562. См. также Darrigol 1994b: 228-229.

<sup>36</sup> Buchwald 1994 в 20-24 видит в законе потенциала пример более общей классификации взаимодействий: Гельмгольц и его ученики анализировали все физические процессы в терминах энергий взаимодействия между парами объектов различного рода (носители заряда, носители тока и т.д.).

<sup>37</sup> Helmholtz 1870b: 568-569. Гельмгольц использовал электростатические единицы измерения

<sup>38</sup> Helmholtz 1870b: 549.

<sup>39</sup> Helmholtz 1870b: 588, 578, 603.

<sup>40</sup> В своих исследованиях по распространению электричества Хевисайд предположил, что эта константа равна нулю.

<sup>41</sup> Helmholtz 1885: 588 (цитата); 1873c и 1881b: 56 (о Максвелле); о его встрече с Максвеллом см. Königsberger 1902-03, том 2: 53; о его поддержке британской физики см. Archibald 1989: 287; Cahan 1994: 332-3; Buchwald 1994: 401-402; о его дружбе с Томсоном см. Königsberger 1901-1903, том 2: 286; Smith and Wise 1989: 132,527.

### 6.3.7. Превзойти закон Вебера

Создав теорию, охватывающую все ранее известные теории, Гельмгольц применил ее к сферическому проводнику и к бесконечному проводнику, занимающему полупространство  $x > 0$ . В последнем случае и для периодического тока с частотой  $\nu$  он обнаружил, что ток убывает экспоненциально с расстоянием от поверхности, причем глубина проникновения равна  $(\sigma\nu)^{-1/2}$ . Этот закон он без доказательства (и без формулы) изложил в конце своей работы о проникновении электрических разрядов.<sup>42</sup>

Выполняя такого рода расчеты, Гельмгольц сделал очень интересное открытие: для отрицательных значений  $k$ , которые включает в себя теорию Вебера, равновесие электричества в (на) проводниках неустойчиво. Это легче всего понять, по аналогии с движением жидкости.

Из уравнений (6.12 - 6.15) следует дифференциальное уравнение для вектора-потенциала:

$$\partial \mathbf{A} / \partial t - \Delta \mathbf{A} / 4\pi\sigma - (1 - \kappa) / (4\pi\sigma \kappa) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) = \nabla \phi \quad (6.17)$$

Как специалист по органичным трубам, Гельмгольц сразу заметил сходство с уравнением для малых возмущений вязкой сжимаемой жидкости:

$$\partial \mathbf{v} / \partial t - \alpha \Delta \mathbf{v} - \beta \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) = - \nabla p / \mu, \quad (6.18)$$

где  $\mathbf{v}$  - скорость жидкости,

$\mu$  - ее плотность,

$p$  - давление,

$\alpha$  и  $\beta$  - два коэффициента вязкости.

В этой аналогии  $\mathbf{A}$  соответствует скорости, а  $\phi$  - давлению.

Следовательно, соотношение

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = - (\kappa / c^2) (\partial \phi / \partial t), \quad (6.19)$$

вытекающее из формулы потенциала Гельмгольца, означает сжимаемость  $\kappa / c^2$  жидкости. Отрицательное значение  $\kappa$  делает жидкость изменчивой.<sup>43</sup>

Неустойчивость можно увидеть непосредственно в выражении для электродинамической энергии, найденном Гельмгольцем:

$$P = - (1/8\pi) \int (\nabla \times \mathbf{A})^2 d\tau + (\kappa/4\pi c^4) \int (\partial \phi / \partial t)^2 d\tau \quad (6.20)$$

Когда  $\kappa$  отрицательно, существуют состояния движения с меньшей энергией, чем состояние равновесия. Изучая простой случай со сферической симметрией, Гельмгольц далее показал, что внешние возмущения могут вызвать неустойчивость.<sup>44</sup>

Гельмгольц проследил это абсурдное поведение до конфликта закона Вебера с принципом энергии. Как впервые показал Вебер в 1848 году, его силы проистекают из потенциала

$$V = (ee'/r) (1 - \dot{r}^2 / C^2) \quad (6.21)$$

( $\dot{r} \equiv dr/dt$  трактуется как неявная функция  $r$ ). Следовательно, они не позволяют производить работу в цикле. Однако, зависящий от скорости член в потенциале, действует как отрицательная поправка к кинетической энергии. Эффективная масса  $m$  заряженной частицы  $e$ , движущейся вокруг неподвижной заряженной частицы  $e'$ , равна  $m - 2ee'/rC^2$ . На критическом расстоянии  $2ee'/mC^2$  масса исчезает и меняет знак. Это подразумевает серьезные аномалии, включая возможность неограниченного увеличения скорости на конечном расстоянии. Гельмгольц никогда не считал силы Вебера фундаментальными, по его мнению таковыми могли быть только центральные силы. Теперь он мог показать, что закон Вебера подразумевает динамические абсурды.<sup>45</sup>

Исключив все отрицательные значения  $\kappa$ , Гельмгольц изучил возможности дальнейшего экспериментального определения этого параметра. Он решил задачу о движении для сферического проводника с центральным возбуждением и для бесконечного цилиндрического

проводника и пришел к неутешительному выводу: для частот, доступных в лаборатории, значение  $\kappa$  не оказывало заметного влияния на распространение электричества (см. Приложение 7). В этой неопределенной ситуации Гельмгольц рекомендовал "выбор Максвелла"  $\kappa = 0$ , что значительно упростило уравнения.<sup>46</sup>

<sup>42</sup> Рукопись Гельмгольца # 644: 'Индукционные токи в теле' ("Induktionsströme in Körper" Akademie der Wissenschaften, Berlin); Helmholtz 1869a: 530. Результат не зависит от  $\kappa$  до тех пор, пока длина волны намного больше глубины проникновения.

<sup>43</sup> Helmholtz 1870b: 589-91 (радиальные токи в проводящей сфере), 577-578 (аналогия). Кирхгоф уже знал об этой неустойчивости, но не опубликовал ее: см. там же: 543n.

<sup>44</sup> Helmholtz 1870b: 578-85, 591-599

<sup>45</sup> Helmholtz 1870b: 553-4. См. также Kaiser 1981: 100-08; Archibald 1989: 292-4; Assis 1994: 180-202, соглашаясь с Вебером.

<sup>46</sup> Helmholtz 1870b: 599 - 611.

### 6.3.8 Поляризация

В последнем разделе своей работы Гельмгольц изучал эффекты электрической и магнитной поляризации в пространстве между проводниками. Для диамагнетизма он проигнорировал теорию Вебера предпочтя ей теорию диамагнетизма Беккереля, согласно которой вакуум был более поляризуемым, чем диамагнетик. Гельмгольц также допускал, что вакуум обладает электрической поляризуемостью, как предполагали Фарадей и Максвелл. Он высоко оценил доказательство Максвелла, что поляризуемая среда может служить для распространения света, как *"результат исключительной важности"*. Однако он придерживался концепции зарядов и токов, прямо действующих на расстоянии. Подобно Пуассону и Моссотти, он рассматривал поляризацию как локальное перемещение электричества под действием электродвижущих сил. Затем он определил результирующие взаимодействия с помощью закона потенциала (см. Приложение 7).<sup>47</sup>

Для конечной электрической поляризуемости  $\kappa_0$  вакуума Гельмгольц доказал, что электрическая поляризация подчиняется волновому уравнению со скоростью распространения  $\omega_0(1 + \kappa_0)^{1/2}(\kappa \kappa_0)^{-1/2}$  для продольных волн и  $\omega_0\kappa_0^{-1/2}$  для поперечных волн. В этих выражениях  $\omega_0$  - это отношение между единицами электромагнитного и электростатического заряда в фиктивном неполяризуемом вакууме. В поляризуемом вакууме все электростатические заряды оказываются уменьшенными в  $(1 + \kappa_0)^{-1/2}$  раз. Поэтому измеренное отношение единиц равно  $c = \omega_0(1 + \kappa_0)^{-1/2}$ . С точки зрения этой величины, скорости распространения равны  $c(1 + \kappa_0)(\kappa \kappa_0)^{-1/2}$  для продольных волн и  $c(1 + \kappa_0)^{1/2}\kappa_0^{-1/2}$  для поперечных волн. В случае бесконечной поляризуемости вакуума продольные волны больше не существуют, а поперечные волны распространяются со скоростью  $c$ , которая, как известно, совпадает со скоростью света. Гельмгольц заключил.<sup>48</sup>

*Замечательная аналогия между движениями электричества в диэлектрике и*

*движениями светящегося эфира не зависит от особой формы Максвелловских гипотез; она может быть получена по существу аналогичным образом, если мы сохраним более старый взгляд на электрические действия на расстоянии.*

В более общем смысле Гельмгольц пришел к убеждению, что все результаты теории Максвелла можно получить, взяв предел бесконечной поляризуемости вакуума в его теории (для  $k = 0$ ). Другими словами, предельный случай теории Гельмгольца был эмпирически эквивалентен теории Максвелла, хотя и основывался на совершенно иной картине электричества. Позже Пуанкаре доказал правильность утверждения Гельмгольца (см. также Приложение 7). Интуитивно сближение двух теорий можно понять, если заметить, что в пределе бесконечной поляризуемости вакуума любой открытый ток проводимости продолжается равным током поляризации, который затем играет роль максвелловского тока смещения. Не должна ли, однако, бесконечная поляризуемость вакуума экранировать все электрические заряды? Ответ отрицательный, поскольку голые заряды Гельмгольца, будучи неизмеримыми, могут быть приняты бесконечными, чтобы получить конечные перенормированные заряды.<sup>49</sup>

Несмотря на эмпирическую эквивалентность, теория поля Максвелла и предельный случай Гельмгольца имели разную степень убежденности. Гельмгольц воспринимал уравнения Максвелла как предельный случай в непрерывном диапазоне возможностей, от нулевой до бесконечной поляризуемости вакуума. Он предпочитал нулевую поляризуемость, дававшую самые простые уравнения и простейшее взаимодействие. Кроме того, две версии теории Максвелла содержали разные эвристики, главным образом потому, что концепция поляризации Гельмгольца была электрической, а Максвелла - механической. Этот контраст лучше всего виден при сравнении более поздней гельмгольцевской и максвелловской микрофизики, что будет сделано в главах 7 и 8. Заметим, что Гельмгольц сразу же связал распространение поляризации с запаздыванием электродинамических воздействий, тогда как Максвелл в значительной степени игнорировал этот вопрос (см. главу 5, стр. 235).<sup>50</sup>

Гельмгольц опубликовал свою теорию движения электричества в 1870 году в виде весьма впечатляющей статьи объемом в сто страниц. Он считал, что создал общую теоретическую схему, включающую основные теории электричества для конкретных значений двух параметров ( $k$  и  $\kappa_0$ ). Он считал выбор между этими возможностями существенной проблемой современной электродинамики и способствовал ее решению, доказав энергетическую абсурдность теории Вебера и показав, что дальнейшее определение параметров находится за пределами доступных экспериментальных средств. Он видел ближайшее будущее электродинамики в дальнейшем вкладе в решение этой проблемы. Его

критики решили иначе.

<sup>47</sup> Helmholtz 1870b: 556 557 611-628.

<sup>48</sup> Helmholtz 1870b: 558 (цитата), 626.

<sup>49</sup> Helmholtz 1875a: 788. Фактически условие  $k = 0$  не является необходимым. См. Poincare 1891: гл. 5; Darrigol 1993a: 237-238. Существует очевидная аналогия между перенормировкой заряда Гельмгольца и соответствующей операцией в современной квантовой теории поля

<sup>50</sup> Helmholtz 1870b: 528 (запаздывание). О различных эвристиках см. Hirose 1969; Buchwald 1985a: 183-186.

### 6.3.9. Полемика с веберийцами

Гельмгольц с напускной объективностью атаковал хорошо охраняемую крепость. Он встретил энергичный отпор со стороны старого Вебера и его друзей. Мы помним, что когда Вебер впервые предложил свой закон силы в 1846 году, он придал ему лишь описательное значение и предвидел более фундаментальный уровень объяснения. Однако, после накопления успехов в микрофизических приложениях, он стал рассматривать этот закон как действительно фундаментальный. В 1869 году он выразил убеждение, что очень простая форма потенциала (6.21), из которого вытекают силы, имеет физический смысл. Два года спустя он нашел этот смысл в новой формулировке принципа энергии.<sup>51</sup>

Сначала Вебер переопределил потенциальную энергию  $U$  двух электрических частиц  $e$  и  $e'$  с относительной скоростью  $\dot{r}$  как работу сил между ними, когда расстояние  $r$  между ними увеличивается от критической длины  $\rho$  до бесконечности. Эта энергия, в отличие от потенциальной энергии, зависит только от скорости. Веберовская версия энергетического принципа требовала, чтобы полная энергия двух частиц, кинетическая плюс потенциальная, не зависела от их относительной скорости. Поскольку для нулевой скорости должно быть получено обычное электростатическое притяжение, это условие читается так

$$U + \mu \dot{r}^2 / 2 = ee' / \rho \quad (6.22)$$

где  $\mu$  - приведенная масса.

Если сила возникает из потенциала  $V(r, \dot{r})$ , который исчезает на бесконечности, то  $U = V(\rho, \dot{r})$ . Согласно Веберу, это условие может быть выполнено только  $\rho = 2ee' / \mu C^2$  (где  $C$  - универсальная постоянная) и

$$V = ee' / r (1 - \dot{r}^2 / C^2) \quad (6.23)$$

в соответствии с его основным законом. Вебер прокомментировал:<sup>52</sup>

*Гельмгольц имел право предварительно сформулировать энергетический принцип так, чтобы мой фундаментальный закон [...] противоречил ему; однако я имею равное право поступить наоборот, а именно, предварительно сформулировать энергетический принцип так, чтобы закон не только соответствовал ему, но даже вытекал из него.*

Новое веберовское определение энергетического принципа было настолько своеобразным и несовместимым с обычными представлениями



о сохранении - например, оно требовало, чтобы сохранялась энергия неизолированной системы зарядов - что Гельмгольц даже не считал нужным его комментировать. Однако Гельмгольцу пришлось отвечать на более конкретную критику Вебера и его лейпцигских друзей Карла Неймана и Фридриха Цольнера. На замечание Карла Неймана, о том, что электродинамические законы Кирхгофа, приведшие к разрушительной неустойчивости, зависят не только от закона Вебера, но и от вспомогательных молекулярных предположений, которые могут быть изменены, он возразил, что для достаточно больших проводников неустойчивость не зависит от молекулярных процессов. На утверждение Вебера, что динамические аномалии закона Вебера имеют место только для скоростей, превышающих  $C$ , и для чрезвычайно малых расстояний, на которых закон не должен быть строго действительным, он противопоставил новый пример, в котором эти ограничения не действуют. Наконец, он ссылаясь на вихревую модель электромагнитного поля Максвелла как на доказательство того, что электрические явления могут быть объяснены с помощью обычных механических сил, без особой веберовской зависимости от скорости.<sup>53</sup>

Гельмгольц сформулировал свои ответы в надменном стиле, что очень расстроило его оппонентов. Спор разгорелся, но постепенно угас в 1880-х годах без явного победителя. Гельмгольц, безусловно, продемонстрировал, что закон Вебера имеет аномальное динамическое поведение, и тем самым поставил под сомнение его фундаментальный статус. Однако ему не удалось убедить Вебера и его друзей в том, что эти аномалии фатальны. Это было бы трудно, учитывая достижения и распространение теории Вебера. Для Цольнера на карту были поставлены и национальные интересы: Гельмгольц был предателем, культивировавшим британские методы и очернявшим старые добрые немецкие методы.<sup>54</sup>

<sup>51</sup> Weber, 1869, 1871.

<sup>52</sup> Weber, 1871, 1874. 1875, 1878: 364. См. также Archibald 1989: 296-297, 303-304.

<sup>53</sup> C. Neumann 1871 a: 1871 b: 478; 1875: Helmholtz 1873a: 669-674; 1881e: 687; Weber 1871: 296-2968; 1874: 300-301; 1875 328-334; 1878: 405-11; Zöllner 1872: *Vorrede* (на стороне Вебера и К. Неймана); Helmholtz, 1872: 638-639; 1873a: 674 (о Максвелле). См. также Норре 1884: # 354, и Assis 1994: 180-202 (на стороне Вебера); Wiedemann 1885. Том 4: 1087- 1095 (на стороне Гельмгольца): 1087-1095: Archibald 1989

<sup>54</sup> О чувстве боли. см. C. Neumann 1877: Weber 1878: 412; Zollner 1876; Helmholtz 1881 c. О политике Цольнера, см. Molella 1972; Buchwald, 1994: 402-404; Cahan 1994.

### **6.3.10 Experimentum crucis**

Гельмгольц получил еще одну критику от своего верного врага, французского академика Жозефа Бертрана. Согласно теории Ампера, отметил Бертран, простое вращение элемента тока не производило никакой работы, тогда как потенциал Гельмгольца зависел от ориентации

элемента. Гельмгольц ответил, что согласно его закону потенциала взаимодействие двух элементов тока включает не только притяжение (или отталкивание), но и взаимно противоположные вращательные моменты. Его предсказания и предсказания Ампера совпадали только для замкнутых токов. Для незамкнутого линейного тока  $i$  изменение потенциала относительно пути токов давало силу  $i\mathbf{dl} \times (\nabla \times \mathbf{A})$ , действующую на элементы  $\mathbf{dl}$ , в соответствии с законом Ампера (когда действующие токи замкнуты), а также две силы  $-i\mathbf{A}(\mathbf{r}_1)$  и  $i\mathbf{A}(\mathbf{r}_2)$ , действующие в начальной и конечной точках  $\mathbf{r}_1$  и  $\mathbf{r}_2$  тока (см. Приложение 7). Последние силы были неизвестны Амперу.<sup>55</sup>

Согласно энергетическому принципу, дополнительные электродинамические силы должны вызывать дополнительные ЭДС в движущихся проводниках. Гельмгольц проверил эту взаимосвязь в общей электродинамике движущихся тел. Он назвал ЭДС в точке проводника, движущегося со скоростью  $\mathbf{v}$ , конвективным изменением векторного потенциала, которая имеет вид (см. Приложения 5 и 7):

$$\mathbf{E} = -\partial\mathbf{A}/\partial t + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}). \quad (6.24)$$

Градиентный член, если бы он действовал в проводнике, произвел бы джоулево тепло, равное работе сил, действующих на концах нитей тока. Теории Франца Неймана, Вебера и Максвелла не знают о последних силах; соответственно, они не включают градиентный член в закон индукции.<sup>56</sup>

Хотя первоначальным Гельмгольц намеревался провести различие между теориями Неймана, Вебера и Максвелла, теперь он полностью осознал, что его закон потенциала противоречит всем предыдущим электродинамическим теориям, независимо от значения постоянной  $k$ . Особые значения  $k$  восстанавливали предсказания этих теорий только для движения электричества в проводниках, находящихся в состоянии покоя. Когда речь шла о движущихся телах, теория Гельмгольца предполагала наличие новых пондеромоторных и электродвижущих сил. Это не нарушило веру Гельмгольца в потенциальный закон. Однако теперь он допускал возможность теорий, в которых электродинамические силы не вытекают из потенциала, и сам доказал, что сохранение энергии может быть выполнено более сложным образом без отказа от закона силы Ампера. В этой новой ситуации определение  $k$  стало второстепенным вопросом, и вместо этого Гельмгольц начал представлять себе эксперименты, которые позволили бы решить вопрос между законом потенциала и другими теориями.<sup>57</sup>

Вскоре Герман Гервиг и Цельнер при поддержке Карла Неймана заявили, что простые эксперименты по электромагнитному вращению исключают закон потенциала: жесткий провод с током может быть приведен во вращение цилиндрическим магнитом, хотя соответствующий потенциал не зависит от угла поворота. Гельмгольц

заранее знал, что ни один эксперимент на основе замкнутых токов не сможет опровергнуть его теорию, поскольку в этом случае исчезает разница между законом потенциала и законом Ампера. Он быстро и решительно отбил атаку, показав, что изменение потенциала жидкого проводника или скользящего контакта, через который ток подводился к вращающемуся проводнику, объясняет наблюдаемое вращение.<sup>58</sup>

По-настоящему важные эксперименты были не столь очевидны, т.к. в них обязательно использовались незамкнутые цепи. В 1874 году русский студент Гельмгольца Николай Шиллер проверил силу, действующую между подвешенным на нити кольцевым магнитом и металлической иглой, соединенной с электростатической машиной (рис. 6.5).

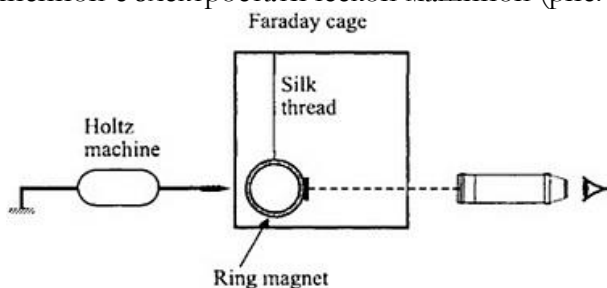


Рис. 6.5. Эксперимент Шиллера.

Согласно потенциальному закону конвекционный ток не оказывает электродинамического действия на конец иглы, и поэтому ток в игле действует как незамкнутый ток. Кольцевой магнит мог действовать только на крайний участок этого тока, так как соответствующий векторный потенциал был иррационален. Из отрицательного результата этого эксперимента Гельмгольц заключил:

*"Либо действия конечных точек тока, предсказанные потенциальным законом, не существуют, либо мы должны рассмотреть электродинамические действия электричества, передаваемого конвективно, помимо предсказанных потенциальным законом".<sup>59</sup>*

Немного позже Гельмгольц провел решающий эксперимент по электромагнитной индукции в незамкнутом движущемся проводнике. Согласно потенциальному закону, индукция зависит от изменения электродинамического потенциала. Гельмгольц предложил устройство, в котором проводник  $bb$  вращается в однородном магнитном поле (рис. 6.6.). Если магнитная сила параллельна оси, то электродинамический потенциал не меняется, и в соответствии с законом потенциала не должно быть индукционного тока. Другие же теории электромагнитной индукции и правило Фарадея о пересечении силовых линий предполагают индукционный ток вдоль  $bb$  и электрические заряды на изогнутых пластинах полосы  $b$ .<sup>60</sup> Для обнаружения этих небольших зарядов, Гельмгольц придумал хитрую процедуру их накопления.

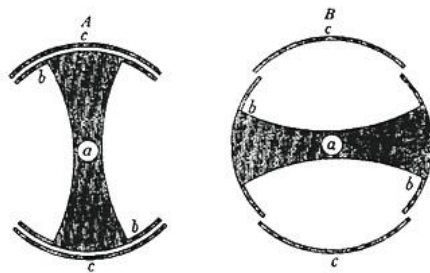


Рис. 6.6. Устройство Гельмгольца для проверки потенциального закона (Helmholtz 1875: 783).

Благодаря вращающемуся коммутатору неподвижные пластины  $c$  и  $c$  заземляются всякий раз, когда  $bb$  находится в положении  $A$ , и емкости  $cb$  заряжаются индуцированной ЭДС. В положении  $B$  эти пластины подсоединяются к конденсатору большой емкости, накапливающему заряды, развиваемые в положении  $A$ . После большого числа вращений заряд конденсатор измерялся с помощью квадрантного электрометра Томсона. Гельмгольц был неприятно удивлен обвинением в согласии с конкурирующими теориями. Он заключил:

*"Потенциальный закон не согласуется с фактами, поскольку он учитывает только электрические движения в проводниках и их действия на расстояний".*

Оставалось только две возможности: либо отказаться от потенциального закона в пользу закона Ампера, либо дополнить токи в проводниках поляризационными токами в изоляторах. Гельмгольц, естественно, предпочел вторую альтернативу, уже исследованную им в своей статье 1870 года. После описания своего решающего эксперимента, он объяснил, как высокая поляризуемость воздуха между полосами пластин  $c$  подразумевает такой же индуцированный заряд, как и теории, основанные на законе Ампера. В неопубликованных рукописях он разработал полную электродинамику движущихся тел, включая поляризуемую среду (см. Приложение 7).<sup>61</sup>

<sup>55</sup> Bertrand 1871; Helmholtz, 1873a: 679-680; 1873b. В 1868 году Бертран безуспешно пытался разрушить теорию Гельмгольца о вихревом движении. В 1872 году Бертран утверждал, что силы, подразумеваемые потенциальным законом Гельмгольца, уничтожат любой провод, несущий ток, что вызвало более продолжительную полемику: Bertrand 1872, 1873; Helmholtz, 1873b: 699-700; 1874a: 708, 714n, 720n, 721n, 726-728. См. также Buchwald 1994: 402, 405-406.

<sup>56</sup> Helmholtz 1874a. См. также Darrigol 1993b: 266-271.

<sup>57</sup> Helmholtz 1874a: 753-759 о теории, основанной на силах Ампера; 1873b: 700-701 о важных экспериментах.

<sup>58</sup> Herwig 1874; Zollner 1874; C. Neumann 1874: 145; Helmholtz 1874b. Золнер и Карл Неймат оценили решение Гельмгольца как искусственное, а его тон высокомерный: Zollner 1876; C. Neumann 1877. См. также Buchwald, 1994: 16-19.

<sup>59</sup> Schiller 1876; Helmholtz, 1875: 781. См. также Buchwald 1994: 33-36.

<sup>60</sup> Helmholtz 1875: 783-787. См. также Darrigol 1993b: 272-3; Buchwald 1994: 38-41.

<sup>61</sup> Helmholtz 1875: 787; Рукописи Гельмгольца # 609, #622 ((Akademie der Wissenschaften, Berlin)

### 6.3.11 Вопрос о берлинской премии 1879 года

Гельмгольц был удивлен результатом своего решающего эксперимента. Веберовцы увидели наглядное подтверждение формул индукции Вебера. Другие немцы были уверены, что старый закон индукции Франца Неймана без необоснованных изменений Гельмгольца дал правильный результат.<sup>62</sup> Что касается Максвелла, то у него были все основания верить в общую справедливость правила Фарадея о действии силовых линий. Удивление Гельмгольца, как и его последующее отношение, происходило из его гносеологического предубеждения в пользу потенциального закона. Решающим для Гельмгольца стал вопрос о том, вносит ли переменная поляризация изоляторов вклад в электродинамический потенциал. В июле 1879 года Берлинская академия опубликовала объявление о следующем призовом вопросе:<sup>63</sup>

*Теория электродинамики, выдвинутая Фарадеем и математически оформленная Кл. Максвеллом, предполагала, что образование и исчезновение диэлектрической поляризации в изолирующих средах, а также в пространстве — это процесс, имеющий те же электродинамические эффекты, что и электрический ток, и что этот процесс, как и ток, может быть возбужден электродинамически индуцированными силами. Согласно этой теории, сила упомянутого тока должна быть принята равной силе тока, заряжающего контактные поверхности проводника. Академия требует предоставления решающих доказательств:*

- [1] за или против существования электродинамических эффектов образования или исчезновения диэлектрической поляризации с интенсивностью, предполагаемой Максвеллом;*
- [2] за или против возбуждения диэлектрической поляризации в изолирующих средах магнитно или электродинамически индуцированными ЭДС.*

### 6.4 Ответ Герца

#### 6.4.1 Ассимиляция Гельмгольца

Вскоре Гельмгольц предложил своему звездному ученику Генриху Герцу заняться вопросами Академии. Герц уже продемонстрировал выдающиеся экспериментальные способности при решении другого вопроса, получившего премию, касающегося кинетической энергии электричества в движении. Последняя проблема касалась более глубокой природы электричества и уже была исследована Вебером и Максвеллом, среди прочих. Для Гельмгольца она была еще более важной по особой причине: он показал, что в теории Вебера равновесие электричества в проводящей сфере неустойчиво всякий раз, когда радиус сферы больше квадратного корня из массы единицы электромагнитного заряда. Если бы эта масса была достаточно мала, то неустойчивость возникала бы для маленьких сфер и, таким образом, наносила бы больший вред теории Вебера.<sup>64</sup>

Принцип определения Герцем массы электричества заключался в измерении его вклада в самоиндукцию катушки. Искусным сочетанием стандартные методы электрических измерений и после нескольких усовершенствований он обнаружил, что кинетическая энергия электрического потока в  $1 \text{ мм}^3$  медного провода составляет менее 0,008 мг·мм на одну электромагнитную единицу тока. Ради Гельмгольца Герц подсчитал, что если скорость электричества будет больше 1 мм/с, то антивиберовская неустойчивость возникнет для сфер радиусом не более 0,11 мм.<sup>65</sup>

Важные черты метода Герца как экспериментатора видны уже в этой ранней работе. Он уделял большое внимание источникам ошибок и разрабатывал свою аппаратуру так, чтобы свести их к минимуму. Он предпочитал простую геометрию своих схем, чтобы сделать их вычислимыми, и преуспел в соответствующих аналитических расчетах. Он никогда не считал успешное устройство окончательным и всегда был готов внести изменения, которые могли бы очистить исследуемый эффект. Эта гибкость впоследствии оказалась очень важной в его исследованиях новых, неожиданных эффектов. В итоге, он объединил в себе акцент Гаусса и Вебера на точности и вычислимости с необычайной способностью Фарадея к изменению и приспособлению приборов.

Летом 1879 года Герц провел длительные расчеты, чтобы определить наилучший способ решения новых призовых вопросов Академии, и передал полученную рукопись Гельмгольцу. Он предложил три возможных теста.

В первом, который уже тщетно пытался провести Шиллер, диэлектрик должен был изменить частоту колебаний  $LC$ -контура, при помещении его внутрь катушки вследствие индуцированной поляризации. Герц обнаружил, что этот эффект слишком мал, чтобы его можно было измерить для тех частот, которые он умел получать.<sup>66</sup>

Второй тест касался действия магнита на диэлектрик, когда последний подвергался воздействию колеблющейся электростатической силы конденсатора. Это казалось Герцу более осуществимым, но требовало больше работы и аппаратуры, чем он мог себе позволить.

Третьим и последним тестом было испытание электростатическим методом поляризацию, создаваемой ЭДС индуктивного происхождения, например, при вращении диэлектрической сферы в магнитном поле. В последнем случае Герц опасался, что трибоэлектричество будет маскировать исследуемый эффект.<sup>67</sup>

В целом Герц считал, что перспективы успешного ответа на вопросы академии будут слабы до тех пор, пока не будут доступны очень быстрые электрические колебания. Воспользовавшись тем, что Гельмгольц проигнорировал его рукопись, он занялся чисто теоретической работой: определением токов, индуцированных во вращающихся проводниках

или диэлектрических сферах. Он уже начал расчеты в своей рукописи о поляризации и знал, что сможет завершить их ко времени поступления на службу преподавателем в университет.<sup>68</sup>

В своих расчетах электродинамических эффектов незамкнутых токов в диэлектрике Герц использовал электродинамику Гельмгольца, в которой он быстро стал экспертом. Самое главное, он усвоил резкое различие, проводимое этой теорией между двумя видами ЭДС различного происхождения - электростатического и электродинамического. Согласно Гельмгольцу, эти два вида силы, имея разные причины, не обязательно имеют одинаковые последствия. По определению, они обладают равной способностью возбуждения токов в проводниках; но они не обязательно должны быть эквивалентными в отношении поляризации диэлектрика. В своей статье 1870 года Гельмгольц рассмотрел возможность того, что поляризация и проводимость, будучи одновременно движениями электричества по отношению к материи, реагируют на одни и те же причины. Но именно истинность этой возможности была вторым вопросом премии Академии.

<sup>62</sup> Согласно Францу Нейману, интегральная электродвижущая сила, обусловленная движением нехамкнутого линейного проводника, равна потенциалу четырехугольника, образованного начальным и конечным положениями проводника и следами его концов. Это эквивалентно правилу Фарадея о пересечении силовых линий.

<sup>63</sup> *Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Monatsberichte* (июль 1879 г.): 519, 528-529. Цитируется в Bryant 1988: 7.

<sup>64</sup> Hertz 1892a: 1; Weber 1864: 235-41; Maxwell 1873a: ##573-7; Helmholtz 1870b: 589-90. Биографию Герца см. в McCormach 1972; Buchwald 1994; Susskind 1995; Folsing 1997 (лучше всего задокументировано).

<sup>65</sup> Hertz 1880a. См. также Buchwald 1994: 59-74. Лоренц достиг подобной точности в работе Lorenz 1879: ср. Wiedemann 1885, Vol. 4: 1023-1024. Hertz 1881 получил гораздо более низкий предел с помощью другого метода, основанного на инерционном перегибе тока во вращающемся проводнике и сходного с предложением в Maxwell 1873a: #577.

<sup>66</sup> Schiller 1874. Эффект пропорционален  $R^2/\lambda^2$ , где  $R$  - радиус катушки, а  $\lambda$  - длина волны света на данной частоте.

<sup>67</sup> Hertz [1879]. См. также O'Hara and Pricha 1987: 121-128; Buchwald 1994: 75-92.

<sup>68</sup> Hertz 1880b. Cf. Darrigol 1993b: 293-4; Buchwald 1994: 95-9.

#### 6.4.2 Единство электрической силы

В течение трех лет после поступления на службу преподавателем в университет, Герц делил свое время между теорией упругости, испарением жидкостей и катодными лучами. Он вернулся к фундаментальным вопросам электродинамики только в 1884 году, когда его новое назначение в Киль оставило ему больше времени для теоретических размышлений, чем он хотел. В это время он размышлял о необычности проведенного Гельмгольцем различия между электродвижущими силами электростатического и электродинамического

происхождения. Согласно теориям Максвелла и Вебера, поляризация и проводимость должны были происходить под действием обоих типов сил, поскольку по сути это одно и то же: сдвиги электрических флюидов по Веберу, изменяющиеся деформации среды по Максвеллу. Герц заметил, что в целом электродинамика была бы намного проще, если бы *"электрические силы, возникающие в результате индуктивных воздействий [были] во всех отношениях эквивалентны равным и одинаково направленным силам электростатического происхождения"*. Это был его "принцип единства электрической силы", который он продолжил исследовать следующим образом. последствия следующим образом.<sup>69</sup>

Согласно этому принципу, электрическая сила индуктивного происхождения, например, сила переменного магнита, должна действовать на электрически заряженное тело подобно электростатическим силам (во времена Герца это действие было слишком слабым, чтобы его можно было наблюдать). Согласно принципу действия и реакции, это означает, что статический заряд должен действовать на переменный магнит. Применяв во второй раз единство электрической силы, можно заменить статический заряд переменным магнитом. Таким образом, мы получаем новый вид взаимодействия между двумя переменными магнитами. Чтобы отделить это взаимодействие от обычного магнитостатического, Герц рассматривал два замкнутых кольцевых магнита переменной силы или два замкнутых соленоида, питаемых переменными токами, для которых новая сила является единственной оставшейся силой. Называя вместе с Герцем производную магнитной поляризации по времени "магнитным током", новая сила является для "магнитных токов" тем же, чем силы Ампера являются для электрических токов.<sup>70</sup>

Герц не питал иллюзий относительно экспериментальной возможности обнаружения этой новой механической силы. Вместо этого он исследовал, какая модификация известной электродинамики замкнутых токов позволит интегрировать новую силу способом, совместимым с энергетическим принципом (см. Приложение 8). Следуя примеру Гельмгольца, он ввел потенциал, из которого вытекала новая механическая сила. Энергия сохраняется, если новая "сила магнитной индукции" соответствует производной по времени от нового потенциала. В свою очередь, это изменение магнитной силы влечет за собой изменение магнитного тока, и так далее. Суммируя бесконечную серию поправок, Герц обнаружил, что окончательные электрические и магнитные силы вытекают из векторного потенциала  $\mathbf{A}$ , такого, что (в электростатических единицах)

$$\Delta \mathbf{A} = -(4\pi/c)\mathbf{j} + (1/c^2)(\partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2) \quad (6.25)$$

Он заключил:

*"Вектор-потенциалы теперь показывают себя как величины, которые*



*распространяются с конечной скоростью - скоростью света".*

Он отметил, что Риман и Лоренц предложили то же уравнение, но утверждал, что только он показал его необходимость на правдоподобных этого уравнения на правдоподобных принципах.<sup>71</sup>

Единство электрической силы подразумевало формальную симметрию между электрическими и магнитными токами, и это разрушало физическое разделение между электростатической и электродинамической составляющими электрической силы. Вычисления в терминах потенциала  $\Lambda$  скрывали и симметрию, и неделимость. Поэтому Герц исключил потенциалы, чтобы написать совершенно симметричные уравнения (в электростатических единицах и при отсутствии источников):

$$(1/c)(\partial \mathbf{H} / \partial t) = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad (1/c)(\partial \mathbf{E} / \partial t) = \nabla \times \mathbf{H} \quad (6.26)$$

Герц отметил, что система сил, задаваемая этими уравнениями, точно такая же, как и у Максвелла. Начав с известной электродинамики для замкнутых токов и дополнив ее в соответствии с принципом единства электрической силы, принципом действия и реакции и принципом энергии, Герц пришел к уравнениям Максвелла в их современной форме. Поскольку, по его мнению, каждый электродинамик неявно признавал единство электрической силы, система Максвелла была признана превосходной, а другие теории "несли в себе доказательства своей неполноты".<sup>72</sup>

Аргументация была чрезвычайно изобретательной: возможно, нет более ослепительного сочетания мысленных экспериментов и общих принципов во всей физике девятнадцатого века. На работу Герца 1884 года часто ссылались и восхищались ею в последующей литературе по электродинамике, немецкой, французской и английской. Тем не менее, в рассуждениях Герца были некоторые слабые места. Герц отметил одну из них: нельзя вывести уравнения Максвелла из известной электродинамики замкнутых токов, как нельзя вывести электромагнитную индукцию из существования электродинамических сил, поскольку во взаимодействие сил могут быть вовлечены непредсказуемые формы энергии. Герц лишь утверждал, что применил энергетический принцип через расширение понятия потенциала Гельмгольца. В то же время он подчеркивал, что его вывод притяжения между магнитными токами "напрямую зависит от предпосылок" (единство электрической силы и равенство действия и реакции), и этого достаточно, чтобы показать превосходство теории Максвелла, поскольку последняя была единственной, содержащей это взаимодействие.<sup>73</sup>

Статья 1884 года имела и другие недостатки, о которых Герц не знал. То, что теория Максвелла содержит притяжение между магнитными токами, верно лишь наполовину. Даже в наиболее полной форме, позже

выведенной Герцем и Хевисайдом, теория Максвелла не предусматривает притяжения между переменными замкнутыми соленоидами. Причина в том, что принцип действия и реакции в этом случае не может быть применен только к веществу: сила Герца,  $D \times B$ , служит для увеличения импульса эфира внутри соленоидов. Однако в случае замкнутых кольцевых магнитов сила действует на вещество магнитов в соответствии с выводами Герца.<sup>74</sup>

Другая трудность, отмеченная Больцманом и его учеником Эдуардом Аулингером, касается кажущегося противоречия в работе Герца. В начале Герц предполагает, что теория Вебера соответствует единству электрической силы, поскольку она представляет электростатические и электродинамические действия *"частными случаями одного и того же действия на расстоянии, исходящего от электрических частиц"*. Однако позже он утверждает, что ни одна теория, кроме максвелловской, не содержит притяжения между магнитными токами. На самом деле, теория Вебера не содержит силы Герца, потому что она подразумевает действие закона силы Ампера даже для переменных токов. Поэтому она не может соответствовать единству электрической силы. Это можно наблюдать при взаимодействии двух заряженных частиц: согласно фундаментальному закону Вебера, действия движущейся частицы и частицы в состоянии покоя на другую частицу в состоянии покоя могут быть одинаковыми без того, чтобы их действия на другую движущуюся частицу были равны.<sup>75</sup>

Возможно, осознав эти трудности, Герц никогда не ссылался на свою статью 1884 года в своих последующих работах. Он даже уступил Хевисайду приоритет симметричной формы уравнений Максвелла. Более того, он задумал свои знаменитые эксперименты 1886-1887 годов в терминах теории Гельмгольца, а не Максвелла. Это замалчивание статьи 1884 года обычно интерпретируется как временный возврат к более скептическому отношению к Максвеллу. В действительности Герц никогда не переставал выступать за единство электрической силы и был убежден, что достоверность теории Максвелла наиболее вероятна.<sup>76</sup>

Герц вернулся к концепции Гельмгольца, поскольку разделял его убеждение в том, что даже самые вероятные теории требуют экспериментального подтверждения. В гельмгольцевской системе теория Максвелла представлялась как особый предельный случай, а основные экспериментальные объекты определялись без предположения о достоверности теории Максвелла. Поэтому можно было легко сформулировать решающие эксперименты для выбора между теорией Максвелла и другими вариантами, совместимыми с уже известными фактами и принципами. Такова была цель вопроса о Берлинской премии, который Герц все еще держал в уголке своего сознания.

---

<sup>69</sup> Hertz 1884. Cf. D'Agostino 1975: 284-96; Kaiser 1981: 164-75; Darrigol 1993a: 243-50;

Buchwald 1994: 177-202.<sup>70</sup> Герц 1884: 297-9.

<sup>71</sup> Hertz 1884: 301-310; 310 (цитата).

<sup>72</sup> Hertz 1884: 311-314; 314 (цитата)

<sup>73</sup> Hertz 1884: 313, 314.

<sup>74</sup> см. Darrigol 1993a: 247-248.

<sup>75</sup> Aulinger 1886; Boltzmann 1886a; Также Lorberg 1886, 1887. См. также Darrigol 1993a: 244-5; Buchwald 1994: 203-8. Последняя трудность: ряд, который Герц использовал для получения волнового уравнения для векторного потенциала, не существует для поступательных волн. Это, по-видимому, подрывает вывод Герца о задержке электродинамического действия: ср. Navas 1966. Однако этот недостаток можно исправить, предположив, что дифференциальное уравнение для потенциала должно быть в целом справедливым, даже если оно было выведено только для стационарных систем сил.

<sup>76</sup> О принятии Герцем гельмгольцевских рамок см. d'Agostino 1975; Cazenobe 1980, 1982, 1983; Doncel 1991; Buchwald 1994 1994.

### 6.4.3 Быстрые колебания

Осенью 1886 года Герц нашел пару спиралей Рисса в кабинете физики Высшей технической школы Карлсруэ и использовал их для показа своим студентам токов, индуцированных в одной спирали разрядом конденсатора через другую спираль. Это был стандартный эксперимент со времен систематических исследований токов электростатического разряда, проведенных Риссом и Кнохенхауэром в начале 1850-х годов. Как правило, батарея лейденских банок сначала заряжалась до высокого напряжения, а затем разряжалась через первичную спираль, при этом между клеммами вторичной спирали возникала искра. Спираль были плоскими и имели всего несколько витков, чтобы предотвратить паразитное искрение между последовательными витками (рис. 6.7).

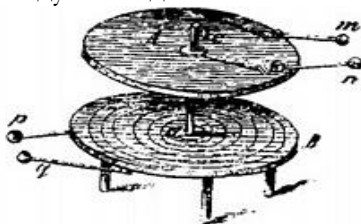


Рис. 6.7. Спиральи Рисса (из Eisenlohr 1870: 716).

Готовя демонстрацию лекции, Герц сделал удивительное наблюдение, которое ознаменовало начало большого научного приключения. Поскольку информации о природе стимулирующего сюрприза мало, я предлагаю реконструкцию, основанную на знаниях Герца об искровых разрядах.<sup>77</sup> Я предполагаю, что для наглядности Герц использовал для зарядки своей лейденской батареи катушку Румкорфа с несколькими витками в первичной обмотке, множеством витков во вторичной обмотке, сердечником из железных проволоочек и периодическим электромеханическим прерывателем в первичной обмотке (рис. 6.8).

При каждом прерывании тока в первичной обмотке возникает большая

импульсная ЭДС во вторичной обмотке. Вторичная обмотка обычно подключается к разряднику, в котором импульсы катушки вызывают эффектное искрение.<sup>78</sup>

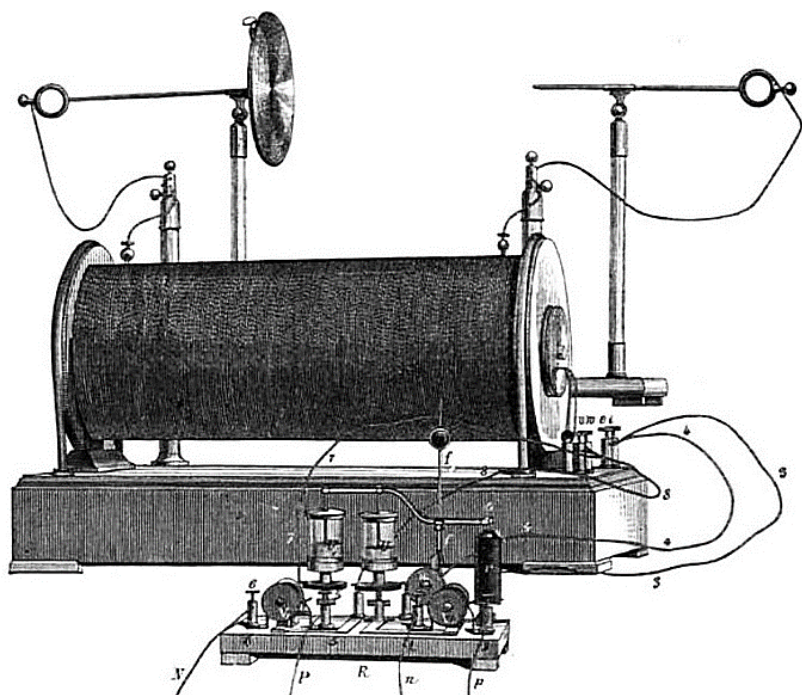


Рис. 6.8. Большая катушка Румкорфа с ртутным прерывателем перед ней и разрядником в виде диска и остроконечного штыря над ней (Eisenlohr 1870: 783).

<sup>77</sup> Hertz 1892a: 2. О спиральях Рисса, см. также Riess 1853, вып. 2: 277-280; Wiedemann 1985, Vol. 4: 187; Muller and Pouillet 1888-1890, Vol. 3: 853. Хронология этих экспериментов см. Hertz 1977: 212-14, начиная с: «4 октября. Эксперименты по индукции с помощью разряда [лейденской] банки».

<sup>78</sup> О катушках Румкорфа, см., например, Wiedemann 1885, Vol. 4: 338-359. Гельмгольц часто использовал индукционные катушки в его физиологических и электрических исследованиях. Герц использовал катушки Румкорфа в своих экспериментах по электрическому разряду в разреженных газах.

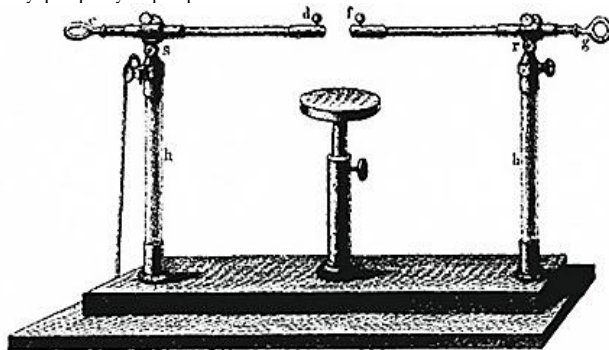


Рис. 6.9. Универсальный разрядник (от Wiedemann 1885, Vol. 1: 142).

Герц использовал распространенный тип разрядника, "универсальный разрядник" Хенли (рис. 6.9), состоящий из двух горизонтальных медных стержней, заканчивающихся медными ручками (среди прочих возможностей) на стороне зазора, и кольцами или сферами на внешней стороне. Стержни могли скользить горизонтально по трубкам, прикрепленным к вертикальным стеклянным колоннам и соединенным к источнику высокого напряжения (конденсатор, электростатическая машина, катушка Румкорфа и т.д.). Внешние кольца или сферы служили для лучшей фиксации стержней. Их округлая форма позволяла избежать бокового искрения.<sup>79</sup>

С помощью катушки Румкорфа и универсального разрядника Герц мог заряжать лейденскую батарею до потенциала, определяемого длиной зазора.<sup>80</sup> Схема показана на рис. 6.10(а). Как только возникает искра, батарея Лейдена разряжается через зазор и первичную спираль Рисса, а во вторичной спирали индуцируется ЭДС. Для большой емкости Герц ожидал, что сильное искрение в разрядном промежутке быстро уменьшит его электрическое сопротивление до малого значения. Тогда разряд был бы быстрым или колебательным, и между клеммами вторичной спирали возникало желаемое искрение. Однако Герц ожидал, что для небольшой лейденской банки сопротивление первичной искры будет препятствовать вторичному искрению и был удивлен, увидев, что это не так. Он даже получил вторичное искрение вообще без банки (рис. 6.10 (б)). Поскольку в этом случае количество электричества, обеспечиваемое катушкой, было очень мало, только чрезвычайно быстрый разряд мог объяснить искрение во вторичной спирали.<sup>81</sup>

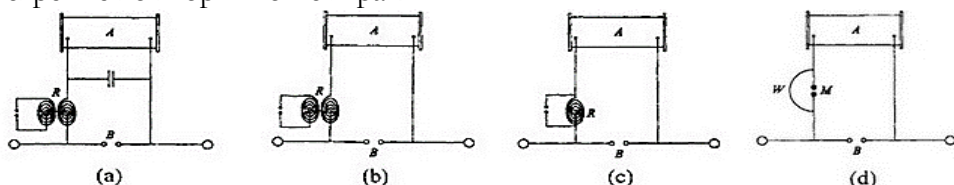


Рис. 6.10. (а), (б), (с), (d). *A* обозначает катушку Румкорфа, *B* - разрядник, *R* - спираль Рисса, *M* – микрометр Рисса

Искровой разряд, как и все визуально эффектное, был процветающей областью исследований, и несколько физиков уже наблюдали случаи бокового искрения. Однако Герц был единственным, кто систематически занимался изучением "необычного свойства" электрической искры. Он помнил, что для ответа на вопрос Берлинской премии ему нужны очень быстро меняющиеся токи. Соответственно, он изменил свою схему таким образом, чтобы более непосредственно продемонстрировать быстроту искрового разряда. Возможно, он перешел к схеме рис. 6.10(с), в которой ЭДС индукции в первичной спирали проверяется напрямую. Затем он заменил спираль проволокой *W* изменяемой длины, а вторичный

искровой промежуток - микрометром Рисса, то есть промежутком, длина которого может быть отрегулирована до очень малых значений - в этом случае искра должна наблюдаться в темноте (рис. 6.10(d)). Даже при использовании короткой и толстой медной проволоки в микрометре возникали небольшие искры. Этот эксперимент и был первым, описанным в статье Герца о быстрых электрических колебаниях.<sup>82</sup>

Герц считал, что сопротивление провода было недостаточным для объяснения разности потенциалов на его концах. Это должна была сделать индуктивность, что означало, что электрическое возмущение должно быть короче, чем время, необходимое ему для прохождения длины провода в соответствии с теорией распространения по проводам Кирхгофа или Томсона. Для подтверждения этой точки зрения Герц использовал устройство, показанное на рис. 6.10(e). В нем побочное искрение можно было интерпретировать только

*"в том смысле, что изменение потенциала, исходящее от индукционной катушки, достигало ручки 1 за заметно меньшее время, чем ручки 2".<sup>83</sup>*

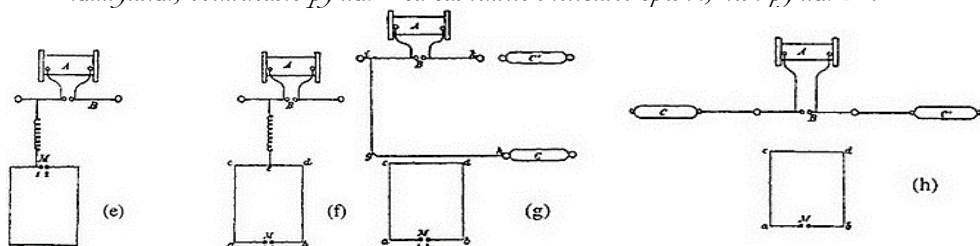


Рис. 6.10. (e), (f), (g), (h). Генератор Герца. (Hertz 1887a: 34, 37, 40, 43). *A* обозначает катушку Румкорфа, *B* - разрядник и *M* - микрометр Рисса.

Соответственно, искрение должно исчезнуть, если расстояния, пройденные возмущениями до ручек 1 и 2, равны. Герц проверил это с помощью схемы рис. 6.10(f). Затем он подсоединил кусок провода к одной из ручек и заметил, что искрение снова появилось. Это навело его на мысль, что возмущение отражается от конца провода и возвращается к ручке с задержкой. Если такие отражения происходят, рассуждал Герц, то побочная цепь действует как осциллятор при импульсном возбуждении. Тогда его симметрия может быть нарушена несимметричным изменением параметров, определяющих частоту колебаний. Герц проверил это, коснувшись одной из ручек изолированной сферой, тем самым добавив емкость в одну из ветвей.<sup>84</sup>

В этих экспериментах побочный контур возбуждался соединением с разрядником проводом. Если, однако, индуктивность короткого куска провода достаточна для создания высокой разности потенциалов, то то же самое должно быть верно и для взаимной индукции между двумя короткими кусками прямолинейных проводов. Герц действительно наблюдал искрение в побочной цепи рис. 6.10(g), которая возбуждается взаимной индукцией между *gh* и *cd*. Он смог усилить искрение,

подключив большой изолированный проводник С (взятый из электростатической машины) к концу провода h. Эта модификация увеличила заряд, накопленный на h и разряженный через провод hgi и искровой промежуток В.<sup>85</sup>

В этот момент Герц заподозрил, что разрядный контур ведет себя как высокочастотный осциллятор, так же как и побочный контур. По этой причине он подвел еще один большой изолированный проводник С' в контакт с концом k разрядника. Усиление искрения в точке М доказало, что разряды в двух частях разрядного контура связаны между собой, что соответствует существованию электрических колебаний. Теперь Герц понял основные достоинства своей системы катушка-разрядник. Катушка служит для зарядки емкости разрядника (в основном емкости двух проводников С и С', когда они присутствуют) до тех пор, пока напряжение искры не будет достигнуто в зазоре В. Наибольшей неожиданностью для Герца было то, что искра внезапно сводит сопротивление воздушного зазора к нулю, и начинается колебательный разряд емкости через индуктивность соединительного провода.<sup>86</sup>

В этом свете было ясно, что проводники С и С' увеличивают интенсивность колебаний (но снижают их частоту), и что по отношению к колебаниям пара проводов ki - gh играет роль непрерывного линейного проводника. Поэтому Герц выбрал более простую схему рис. 6.10(h), в которой проводники С и С' находятся на расстоянии трех метров друг от друга, а толщина проволоки составляет 2 миллиметра. Так он мог наблюдать индуктивное действие, когда расстояние между с-д побочного контура и проводом осциллятора достигало 1,5 м.<sup>87</sup>

Попробовав линейную боковую цепь: кусок прямой проволоки с зазором в середине и двумя сферами на конечностях, Герц понял, что в этом случае электростатическая индукция от проводников С и С' к сферам побочного контура также способствует искрению. Он полагал, что может зашунтировать это действие мокрой нитью через зазор и получить нечто ранее не наблюдавшееся: чистое электродинамическое действие двух незамкнутых токов. Зная, как угодить, он объявил Гельмгольцу:

*Мне удалось достаточно наглядно продемонстрировать индукционное действие одного незамкнутого прямолинейного тока на другой прямолинейный ток, и я могу надеяться, что найденный мной способ со временем позволит мне решить тот или иной вопрос, связанный с этим явлением.*

Он имел в виду, что определение параметров теории Гельмгольца ( $k$  и  $\kappa_0$ ) уже близко.<sup>88</sup>

Варьируя емкости и индуктивности первичной и вторичной цепей, Герц получил широкое, но отчетливое явление резонанса. Это подтвердило колебательный характер разряда и дало возможность

оптимизировать реакцию побочного контура. В последующих экспериментах побочный контур всегда настраивался для получения наилучшего искрения. Герц также определил узлы в своих побочных цепях, но еще не мог получить несколько узлов и измерить длину волны колебаний. Чтобы оценить период, он прибегнул к теории и применил стандартные формулы для емкости сферы и индуктивности провода. Для сферы радиусом 15 см и провода длиной 150 см и диаметром 0,5 см он нашел  $3,54 \times 10^{-8}$  секунды, что в сто раз меньше наименьшего периода, полученного Феддерсеном с лейденскими банками. Соответствующая длина волны, согласно теории распространения в проводах Кирхгофа или Томсона, равнялась длине, пройденной светом за период, то есть 10,62 м. Герц отметил, что эта длина была также *"длиной ЭМ волн, которые, согласно взглядам Максвелла, должны быть внешним эффектом колебаний"*.<sup>89</sup>

Вскоре Герц с досадой узнал, что он был не первым, кто обнаружил высокочастотные колебания в искровом разряде индукционной катушки. Вильгельм фон Бецольт уже сделал это в малоизвестной работе 1870 года. Однако Герц был первым физиком, который получил достаточный контроль над условиями возникновения колебаний, а также относительно удобное средство для их обнаружения. Этим достижением он был обязан *"тщательному вниманию к незначительным деталям"* в сочетании с постоянным обращением к тонким теоретическим рассуждениям. Он считал законы движения электричества в проводниках в основном известными, с неопределенностью, формализованной в  $k$  Гельмгольца. Тем не менее, конкретные электрические движения его устройств зависели от непредсказуемых свойств электрической искры. Он отобрал и усилил удивительные аспекты побочного искрения в длинной серии мутаций своей первоначальной схемы. Последовательные изменения были обусловлены не только известными электрическими законами, но и предположениями о роли искры. Герц начал с идеи очень внезапного электрического возмущения. В итоге он получил колебательный разряд, который можно было обнаруживать, вычислять и манипулировать им.<sup>90</sup>

С самого начала своих экспериментов Герц знал, что не каждая первичная искра способна вызвать побочное искрение. Методом проб и ошибок он определил оптимальный размер зазора и сферических ручек. Как он рассказывает, *"самые незначительные детали, часто без видимой связи, приводили к бесполезным искрам"*. Эффективные искры должны были быть *"блестяще-белыми, слегка зазубренными и резко трещащими"*. Более того, размер побочных искр зависел от того, находились ли они в поле зрения основной искры. Герц решил, что последний эффект заслуживает отдельного исследования. Он установил, что за усиление побочной искры отвечает УФ излучение первичной искры, а не электрическое возмущение. Таким образом, он открыл то, что мы сейчас называем фотоэлектрическим эффектом.<sup>91</sup>



<sup>79</sup> Об универсальном разряднике см., например, Wiedemann 1885, Vol. 1: 142. Герц упоминал об этом разряднике в Hertz 1887a и совершенно определенно в 1887b: 71. Он изображен на фотографии, сделанной Герцем и воспроизведенной в Bryant 1988: 23. Маленький круглый столик использовался для воздействия искр на размещенных на нем различных химических вещества.

<sup>80</sup> Подобное устройство с электростатической машиной вместо индукционной катушки, была описана в очень популярном учебнике бывшего профессора Карлсруэ: Eisenlohr 1870: 717, а также в Jamín and Bouty 1878-1883, том 4: 207. По словам Р. Эппльярда, знакомого с техникой электрических лабораторий в начале 19 века, это устройство (с индукционной катушкой и разрядным промежутком) была стандартным методом работы спиралей Рисса (Appleyard 1930: 118).

<sup>81</sup> Это мой перевод Hertz 1892a: 2: *"Я был удивлен, обнаружив, что нет необходимости разряжать большие батареи [лейденских банок] через одну из спиралей [Riess], чтобы получить искру в другой; что маленькие лейденские банки - даже импульс небольшой индукционной катушки - достаточны для этой цели, при условии, что разряд должен пружинить через искровой промежуток."* (Английский перевод в Hertz 1893: 2 неверен).

<sup>82</sup> Hertz 1887a: 33.

<sup>83</sup> Hertz 1887a: 33-34.

<sup>84</sup> Hertz 1887a: 36-39

<sup>85</sup> Hertz 1887a: 39-41. См. также Buchwald, 1994: 227-229

<sup>86</sup> Hertz 1887a: 41-43. См. также Buchwald, 1994: 230-231. Сама катушка имеет чрезвычайно большое сопротивление для колебательного тока разряда. Однако катушка также обладает емкостью, соответствующей поляризации ее последовательных слоев, как впервые описано у Гельмгольца 1869b: 535. Эта емкость пренебрежимо мала по сравнению с емкостью СС', но не по сравнению с емкостью незамкнутого разрядника (Герц не обсуждал этот момент).

<sup>87</sup> Hertz 1887a: 43-4. Герц считал колебания в петлеобразном побочном контуре abcd полностью обусловленными электромагнитной индукцией. См. Buchwald 1994: 231-2.

<sup>88</sup> Hertz 1887a: 44-5; Герц - Гельмгольцу, 5 декабря 1886 года, в Hertz 1977, и Susskind 1995: 107. Рассуждения о мокрой нити ошибочны, поскольку шунт устраняет только низкочастотную составляющую электростатического воздействия.

<sup>89</sup> Hertz 1887a: 46-50 (резонанс), 50-4 (узлы), 54-8 (теория). У Герца "Schwingungsdauer" и "Wellenlänge" - это половина периода и половина длины волны. В этой статье Герц не ссылался явно на теорию Кирхгофа и Томсона о распространении электричества в проводах, хотя он, очевидно, использовал ее несколько раз. См. Buchwald 1994: 233-9.

<sup>90</sup> Bezold 1870; Герц 1887a: 53. Бецольд создавал фигуры пыли Лихтенберга (которые зависят от характера и интенсивности электрического возмущения) в разных точках длинного провода. См. Hertz 1892a: 2-3; 59-68 (воспроизведение части работы Bezold 1870).

<sup>91</sup> Hertz 1887a: 35; Hertz 1887b. См. Также Buchwald 1994: 244.

#### 6.4.4 Ответ на призовой вопрос Берлина

Главной целью Герца по-прежнему оставался ответ на вопрос Берлинской премии о поляризации диэлектриков. На высоких частотах, которые он теперь умел получать, обнаружение индуктивных эффектов диэлектрических токов казалось простым делом. Летом 1887 года Герц экспериментировал с прибором (рис. 6.11), в котором диэлектрический блок ВВ (сера или парафин) был подвергнут высокочастотному электрическому воздействию пластин АА'. Он еще не мог прийти к

определенному выводу, потому что сильное искрение возникало в побочном контуре С независимо от наличия или отсутствия блока ВВ. Постепенно он понял, что для высоких частот, которые он использовал, квазизамкнутый контур С больше не ведет себя как селективный индикатор электромагнитной индукции. Разность электростатических потенциалов на небольшом зазоре могла быть достаточно большой, чтобы вызвать искрение.<sup>92</sup>

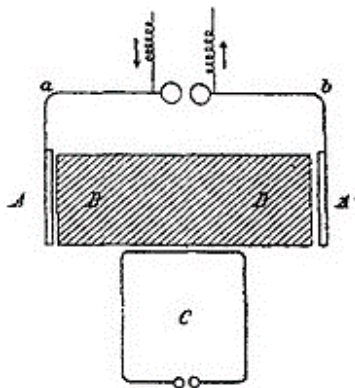


Рис. 6.11. Примерное устройство для проверки индуктивного эффекта диэлектрического тока. (Hertz 1892a: 5).

В сентябре 1887 года Герц исследовал поведение настроенного кругового побочного контура вблизи своего осциллятора теоретически и экспериментально. В терминах Гельмгольца, побочный контур подвергается воздействиям электростатического и электродинамического происхождения. В первом приближении искрение зависит от циркуляции общей ЭДС  $\mathbf{E}$  по проволоке побочного контура.<sup>93</sup> Это равно циркуляции  $\alpha$  электродинамической части  $\mathbf{E}$  по воображаемой завершенной цепи, минус  $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ , где  $d\mathbf{l}$  - вектор, соединяющий два конца зазора. Следовательно (пренебрегая изменением  $\mathbf{E}$  в  $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ ), искрение должно изменяться следующим образом:  $|\alpha + \beta \cos \theta \sin \omega|$ , где  $\beta$  - постоянная, пропорциональная напряженности полной электрической силы,

$\omega$  - угол между вектором  $\mathbf{E}$  и осью побочного контура,

$\theta$  - угол между зазором и проекцией  $\mathbf{E}$  на плоскость бокового контура.

Направление вектора  $\mathbf{E}$  экспериментально определяется направлением оси побочного контура, для которого поворот побочного контура в собственной плоскости не изменяет искрения ( $\omega = 0$ ). В этом случае искрение полностью обусловлено циркуляцией  $\alpha$ . Для других направлений оси контура и вблизи осциллятора искрение имеет два минимума и два максимума. Для исчезающей циркуляции ( $\alpha = 0$ ) минимумы диаметрально противоположны и возникают, когда зазор перпендикулярен электрической силе. Если электродинамическая

циркуляция не исчезает, два минимума больше не противоположны, а два максимума имеют неодинаковую интенсивность.<sup>94</sup>

Теперь Герц был готов к решению проблемы Берлинского приза.

Он использовал балансирующее устройство (рис. 6.12), в котором переменная электростатическая сила пластин  $A$  и  $A'$  может одновременно воздействовать на проводник  $C$  и диэлектрик  $D$ . Побочный контур  $B$  перпендикулярен горизонтальной плоскости пластин  $A$  и  $A'$ , а его ось проходит через первичный искровой промежуток. Рассмотрим сначала поведение побочного контура, когда  $C$  и  $D$  удалены.

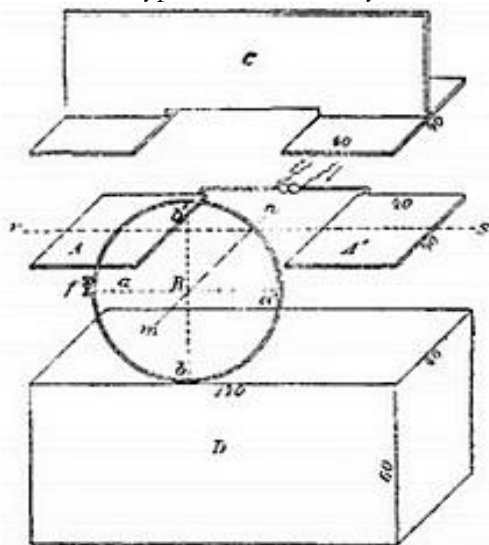


Рис. 6.12. Аппарат Герца для сравнения индуктивных воздействий тока проводимости и диэлектрического тока (Hertz 1887с: 104).

Когда микрометрический зазор  $f$  побочного контура  $B$  находится в одном из диаметрально противоположных положений в плоскости  $AA'$ , искрение отсутствует, что означает исчезновение электростатического и электродинамического воздействия на контур. Искрение максимально при самом верхнем и самом нижнем положениях зазора, что означает, что электростатическая сила горизонтальна. Если побочный контур  $B$  немного смещен вниз в своей плоскости, то положения нулевой искры в зазоре немного повернуты вниз; искрение увеличивается в самом верхнем положении зазора и уменьшается в самом нижнем. Это является признаком электродинамического действия.<sup>95</sup>

Затем Герц вернул контур  $B$  в исходное положение и приблизил верхний проводник  $C$ . Наблюдаемые изменения в искрении были прямо противоположны тем, которые наблюдались при смещении вниз контура  $B$ , что означало, что  $C$  действовал как ток, идущий противоположно току осциллятора. Именно этого и ожидал Герц, поскольку он знал, что проводник  $C$ , рассматриваемый как осциллятор, находится ниже

резонанса, и поэтому его вынужденные колебания находятся в фазе с источником.

Затем он убрал  $C$  и поместил диэлектрик  $D$  под  $AA'$ . Характер искрения изменился точно так же, как и для проводника, находящегося ниже резонанса, что означало, что ток в диэлектрике обладает таким же электродинамическим действием, как и обычный ток. Герц подтвердил этот результат, уравновесив это действие с действием тока  $C$  на другой стороне. Тщательно устранив все возможные неясности, он пришел к выводу, что ответ на первый вопрос Берлинской премии должен соответствовать взглядам Фарадея и Максвелла на (вещественные) диэлектрики.<sup>96</sup>

<sup>92</sup> Hertz 1892a: 4-5. Я следую хронологии экспериментов Герца, тщательно установленной Doncel 1991, и принимаю его и Бухвальда выводы, основанные на недавно обнаруженных лабораторных тетрадах (опубликованных в Hertz and Doncel 1995). Первое доказательство Герцем запаздывающего действия произошло гораздо позже (декабрь 1887 года), чем предполагается в Hertz 1892a.

<sup>93</sup> Это не так очевидно для резонансного контура. Герц рассуждал в более общих терминах. См. Buchwald 1994: 245-254.

<sup>94</sup> Результаты (с разными обоснованиями) приведены в Hertz 1887c и 1888b..

<sup>95</sup> Hertz 1887c: 103-106.

<sup>96</sup> Hertz 1887c: 108-113. Ср Doncel 1991; Buchwald 1994: 254-261. Hertz (1887c: 112) также дал более прямое доказательство того, что действие  $D$  является электродинамическим: он сделал  $D$  намного больше осциллятора и расположил его так, что его верхняя грань касалась  $AA'$  и одна из его вертикальных граней находилась в вертикальной плоскости, проходящей через линию симметрии  $rs$ . Тогда стороны состоят из электрических силовых линий, за исключением тех, где они касаются  $A$  и  $A'$ ; следовательно, по теореме Грина  $D$  не может изменить электростатическую силу вне своей собственной массы.

#### 6.4.5. Электродинамическое распространение

Чтобы продемонстрировать превосходство теории Максвелла в рамках гельмгольцевской теории, оставалось установить два момента: что диэлектрическую поляризацию можно создать электродинамическими средствами (второй вопрос академии), и что вакуум сам по себе обладает чрезвычайно высокой поляризуемостью. Решив, что отдельное доказательство этих положений слишком сложно, Герц в ноябре 1887 года перешел к проверке основного вывода, который сделал из них Гельмгольц: для распространения электромагнитной индукции необходимо конечное время. Он намеревался сравнить фазу электрического воздействия, распространяющегося по натянутому проводу, с фазой прямого воздействия осциллятора.<sup>97</sup>

Герц впервые продемонстрировал волны в проводе с помощью устройства рис. 6.13. Провод начинается от пластины  $P$ , которая параллельна пластине  $A$  генератора. Он изгибается от  $m$  до  $n$ , а затем проходит прямо горизонтально, в плоскости, проходящей через искровой разрядник. Для бегущих волн Герц использовал 70-метровый

провод, заканчивающийся в земле за пределами здания. Для стоячих волн он держал конец проволоки свободным и настраивал его длину так, чтобы получить наиболее отчетливые узлы.

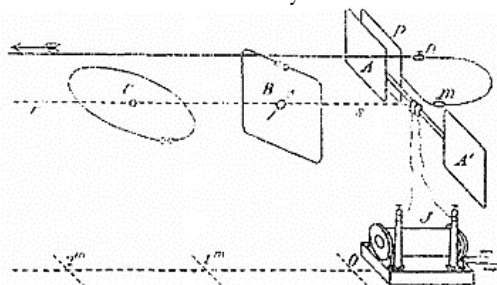


Рис. 6.13. Устройство Герца для демонстрации волн в проводах (Hertz 1888a: 116).

Он наблюдал электрическую силу возле провода с боковыми цепями В и С, центры которых находились на горизонтальной базовой линии  $r-s$ , выведенной из искрового промежутка. В стационарном случае он получал периодические вариации искрения, когда побочный контур перемещался вдоль базовой линии (с той же ориентацией).

Эта периодичность дала половину длины волны 2,8 м и скорость 200 000 км/с (расчетный период настоящего генератора составляет  $2,8 \times 10^{-8}$  с), что примерно соответствует более ранним измерениям скорости распространения электричества вдоль проводов. Последнее число Герц рассматривал только как оценку, поскольку он сомневался в точности своего расчета частоты генератора.<sup>98</sup>

Затем Герц приступил к сравнению фазы бегущей волны вдоль провода и фазы прямого действия генератора. Для этой цели он использовал ориентации боковой цепи, в которой были наложены действия через провод и через воздух. На любом расстоянии от генератора два действия могут быть выполнены сравнимой величиной путем регулировки расстояния между пластинами Р и А. Измерения Герца лучше всего объясняются в терминах трех основных ориентаций побочной цепи, как показано на рис. 6.14.

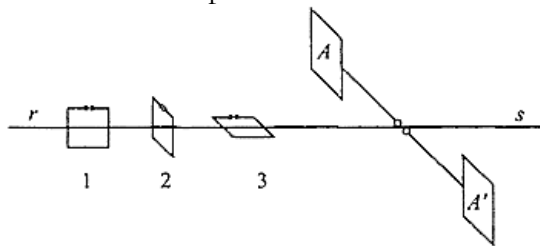


Рис. 6.14. Конфигурации боковой цепи Герца.

Сначала предположим, что осциллятор действует один (без провода). При ориентации 1 электрическая сила от осциллятора перпендикулярна

каждой части бокового контура, так что искрение отсутствует. Во второй ориентации электрическая сила параллельна зазору, и происходит сильное искрение. Эта сила в основном электростатическая вблизи осциллятора и электродинамическая вдали от осциллятора.<sup>99</sup> В ориентации 3 электрическая сила перпендикулярна зазору. Тем не менее, существует слабое искрение из-за её конечной циркуляции вокруг петли. В этом случае эффект является чисто электродинамическим.

Для наложения действие провода и воздуха, Герц первоначально использовал ориентацию побочного контура, промежуточную между 1 и 2. Тогда провод вносит вклад в искрение в пропорции, изменяющейся с отклонением от ориентации 2 и с расстоянием между пластинами A и P. Герц предпочитал такие ориентации, потому что вклад осциллятора в искрение был тогда достаточно сильным, чтобы создать интерференцию на расстоянии до 8 м от осциллятора. Однако их недостатком было смешивание электростатического и электродинамического эффектов осциллятора, которые, согласно общей теории Гельмгольца, распространяются с разной скоростью. К своему разочарованию, Герц обнаружил, что интерференция между действиями воздуха и провода изменяется с тем же пространственным периодом, что и волна в проводе. Это означало, что распространение в воздухе от осциллятора было мгновенным, и что поляризуемость воздуха пренебрежимо мала.<sup>100</sup>

22 декабря Герц повторил этот эксперимент с более тщательной подготовкой, но снова не обнаружил задержки действия воздуха. На следующий день он попробовал ориентацию 3 боковой цепи, в которой действие провода накладывается исключительно на электродинамическое действие осциллятора. Хотя в этом случае интерференция могла быть получена только на расстоянии до 4 или 5 метров, этого было достаточно, чтобы указать на пространственную периодичность, намного большую, чем у волн в проводе. Значит, скорость распространения индуктивного воздействия в воздухе должна была быть конечной. С большим волнением Герц вскоре расширил свои предыдущие измерения в конфигурациях 1-2 до 12 м и подтвердил конечную скорость электродинамического воздействия. Теперь оказалось, что его прежние неудачи объясняются преобладанием электростатического действия на меньших расстояниях от осциллятора. К 27 декабря он говорил об "индукционных волнах" или "воздушных волнах".<sup>101</sup>

Детали, однако, не соответствовали теории Максвелла. Герц обнаружил, что скорость электродинамического действия на 60 процентов больше в воздухе, чем в проводе, тогда как для медного провода теория Максвелла предполагала равенство этих двух скоростей. Герц сначала пытался обосновать это различие конечным значением  $k$  в теории Гельмгольца. Это не удалось. Гельмгольц уже показал, что пока радиус провода составляет малую часть длины волны, распространение в

проводе не зависит от  $k$ . Более того, конечное значение  $k$  подразумевало возможность существования двух видов эфирных волн с разными скоростями, тогда как эксперименты показывали только один вид. Наконец, электромагнитная теория света требовала, чтобы скорость в воздухе была равна скорости света; тогда поляризуемость воздуха (вакуума) должна быть бесконечной или чрезвычайно большой; в этом случае теория Гельмгольца эмпирически эквивалентна теории Максвелла, если только  $k$  не слишком велико. К лету 1888 года Герц отказался от всякого обращения к  $k$  Гельмгольца и вместо этого надеялся, что некоторая незначительная модификация теории Максвелла объяснит более медленную скорость волн в проводе.<sup>102</sup>

<sup>97</sup> Hertz 1892a: 7-8; 1888a: 115. См. Также Buchwald 1994: 262-6.

<sup>98</sup> Лабораторные записи Герца, проанализированные в Doncel 1991 и Buchwald 1994: 266-276. Также Hertz 1888a: 119-122.

<sup>99</sup> Электростатическая сила изменяется как  $1/r^2$ , электродинамическая сила как  $1/r$ .

<sup>100</sup> см. Doncel 1991; Buchwald 1994: 269-276

<sup>101</sup> см. Doncel 1991: 22 и Buchwald 1994: 289-98 об оригинальных экспериментах; Hertz 1888a: 125-31 об опубликованном отчете.

<sup>102</sup> Hertz 1889a: 169 (игра с  $k$ ); Гельмгольц, 1870b: 551; Hertz 1889a: 169 (два вида волн).

То, что Герц знал последний аргумент (ссылка на высокую поляризуемость эфира), не вызывает сомнений. В качестве модификации теории Максвелла Герц предложил отказаться от непрерывности параллельной компоненты  $\mathbf{E}$  на поверхности провода.

#### 6.4.6. Построение максвелловских волн

Более насущной задачей Герца было дать прямое доказательство существования воздушных волн. Он беспокоился, что его эксперименты по интерференции волн в воздухе и проводе слишком сложны, чтобы быть достаточно убедительными. В феврале 1888 года ему пришла в голову мысль использовать влияние проводящих масс на волны. Он знал о существовании таких эффектов в течение нескольких месяцев, но рассматривал их как возмущающие эффекты, которые необходимо устранить. Теперь он понял, что для отражения волн и создания стоячих волн можно использовать металлические листы. В течение нескольких дней он смог найти соответствующие узлы и пучности с помощью побочной цепи и подтвердить предыдущее значение длины волны в воздухе (9 м). Он опубликовал эти результаты в июле 1888 года, подтвердив теорию Максвелла: *"Очевидно, что эксперименты вполне оправдывают теорию электродинамических явлений, которую Максвелл впервые построил на основе взглядов Фарадея"*.<sup>103</sup>

Конечно, Герц проводил и анализировал свои эксперименты в рамках гельмгольцевского подхода, четко различая электростатические и электродинамические силы. Например, эксперимент по изучению индуктивного эффекта от диэлектрической поляризации предполагал тщательное устранение электростатического эффекта. Также

доказательство распространения конечных волн в воздухе касалось электродинамического действия резонатора, отделенного от электростатического. В теории Гельмгольца это доказательство означало лишь то, что поляризуемость воздуха или вакуума должна быть большой. Тем не менее, Герц предпочитал бесконечную поляризуемость, потому что это позволяло использовать электромагнитную концепцию света, и потому что в этом случае теория Гельмгольца могла быть заменена более простой теорией Максвелла. С 1884 года Герц был убежден, что теория Максвелла с характерным единством электрической силы наиболее вероятна, и был готов принять ее, как только появятся достаточные экспериментальные свидетельства в ее пользу.

Осенью 1888 года Герц использовал свою версию (6.26, стр. 273) уравнений Максвелла для вычисления поля осциллятора в дипольном приближении, для которого размеры осциллятора пренебрежимо малы по сравнению с длиной волны. Он вывел известные теперь элегантные формулы излучения и с помощью своей жены нарисовал диаграммы поля. На больших расстояниях от осциллятора поле представляет собой поле чисто поперечной волны, движущейся со скоростью  $c$ . Самое поразительное, что электрические и магнитные силы уменьшаются как величина, обратная расстоянию, тогда как для не осциллирующего диполя они уменьшались бы соответственно как куб и квадрат расстояния. Согласно формуле Пойнтинга, этому полю соответствует поток внешней энергии, пропорциональный квадрату силы диполя и четвертой степени частоты его колебаний.<sup>104</sup>

Охарактеризовав таким образом поле излучения, Герц переосмыслил свои эксперименты по распространению в терминах электрического и магнитного полей Максвелла, вместо электростатических и электродинамических сил Гельмгольца. Он преуспел достаточно хорошо, за исключением интерференционных измерений в ориентации 3: в этом случае вычисленное изменение фазы вблизи резонатора было намного меньше, чем измеренное. По иронии судьбы, это были те самые измерения, на основании которых Герц впервые заподозрил конечную скорость распространения в воздухе.<sup>105</sup>

Этим теоретическим исследованием Герц завершил построение концепции электрических волн. Он сначала показал распространение электромагнитной индукции с конечной скоростью, затем манипулировал волнами с помощью отражателей и, наконец, определил основные характеристики их развития в пространстве на основе теории Максвелла. В этом гармоничном сочетании фактов и теории был только один недостаток: вопреки предсказаниям теории Максвелла скорость распространения волн в проводе оказалась меньше, чем в воздухе. В июле 1889 года О. Лодж заметил, что Герц ошибся в расчете частоты своего осциллятора на коэффициент  $\sqrt{2}$ . В результате скорость волн в



проводе стала почти равна скорости света, а скорость в воздухе на 60 процентов больше скорости света. Если бы Герц доверился новому значению частоты, он заподозрил бы свои измерения длины волны в воздухе. Однако он этого не сделал, потому что расчет частоты был основан на формулах, установленных только для медленно меняющихся токов. Герц начал сомневаться в своих измерениях в 1891 году, уже после того, как он обнаружил, что расхождение исчезает для более коротких волн. Его полное опровержение последовало в 1893 году, после того как Эдуард Сарасин и Люсьен де ла Рив повторили эксперименты Герца с длинными волнами в большом зале Ронского гидроузла в Женеве и обнаружили полное согласие с теорией Максвелла. Скорее всего, измерения длины волны Герца были нарушены отражениями от стен лекционного зала, в котором он проводил эксперименты.<sup>106</sup>

<sup>103</sup> Hertz 1888c: 145-146. См. также Buchwald 1994: 299-310.

<sup>104</sup> Hertz 1889a. См. также Buchwald 1994: 304-321.

<sup>105</sup> Hertz 1889a: 164-5. См. также Buchwald 1994: 320-321 по иронии судьбы.

<sup>106</sup> Lodge and Howard 1889: приложение, а также Пуанкаре к Герцу без даты, Deutsches Museum, #3001; Герц - Лоджу, 21 июля 1889 года, в O'Hara and Pricha 1987: 93 (о недоверии к формуле частоты); Hertz 1889b (короткие волны); Sarasin and de la Rive 1893 г. См. также Hertz 1892a: 9-11 (сомнения); 1893: 14n (сокращение); O'Hara and Pricha 1987: 5-6; 17-18 (участвуют Фитцджеральд и Трутон); Folsing 1997: 443-439.

### **6.5 Влияние открытия Герца**

Открытие Герца вскоре привлекло внимание физиков всего мира. Получение электрических волн электрическими средствами было огромным достижением. Эксперименты можно было легко повторить: катушки Румкорфа были очень распространенным устройством, а остальная часть аппаратуры могла быть изготовлена из медных проводов и фольги в течение нескольких часов. Были трудности с регулировкой первичной искры и наблюдением в темноте гораздо более слабых вторичных искр, но Герц дал достаточно инструкций, чтобы преодолеть их. К 1889 году многие физики подтвердили результаты Герца, за исключением иногда разницы скоростей в воздухе и проводах. Как обычно бывает при "повторениях", были сделаны улучшения, например, альтернативные детекторы или двойные провода Лехера, вдоль которых возникали более четкие стоячие волны; были объявлены побочные открытия, например, множественный резонанс Сарасина и де ла Рива; и возникали конфликты по поводу их правильной интерпретации.<sup>107</sup>

#### **6.5.1 Британский энтузиазм**

Первыми о теоретической значимости открытия публично заявили британские физики. Фицджеральд назвал эксперименты Герца "великолепной проверкой теории Максвелла" еще до публикации статьи с размышлениями. Председательствуя в сентябре на заседании секции математики и физики Британской ассоциации в Бате, он заявил:

*"1888 год навсегда останется в памяти как год, в котором этот великий вопрос [распространяются ли электрические силы через среду] был экспериментально решен Герцем в Германии и, я надеюсь, другими в Англии".*

В продолжение он объяснил, как эксперименты Герца доказали существование электромагнитного эфира. Его красноречие превратило встречу в посмертный триумф Максвелла.<sup>108</sup>

В действительности, открытие Герца не стало сюрпризом для Фицджеральда, который ранее размышлял об электрическом получении электромагнитных волн. Это было верно и для максвелловцев в целом.

Лодж воспринял эксперименты Герца как улучшение его собственных экспериментов с волнами в проводе. Хевисайд заметил Герцу:

*"Я давно знаком с волнами в диэлектриках, поэтому ваш экспериментальный результат я воспринял без удивления, как нечто само собой разумеющееся".*

Хевисайд, однако, быстро заметил, что "со многими людьми дело обстоит совсем иначе". Только он и его несколько максвелловских друзей полностью осознали последствия теории Максвелла о распространении электричества, которые лишь подразумевались в тексте Максвелла. Вот почему Фицджеральд преподносил открытие Герца как триумф Максвелла. Как он и предполагал, максвелловские физики сразу же привлекли к себе гораздо более широкое внимание, став героями новой эры британской физики.<sup>109</sup>

В этом раннем восприятии экспериментов Герца возможность практического применения почти не играла никакой роли. Герц и Фицджеральд, как и большинство других физиков, были озабочены только фундаментальным значением нового открытия. Введенные в заблуждение аналогией между светом и электрическими волнами, они не могли представить, что герцевская телеграфия будет лучше оптической. На самом деле, последующий успех беспроводной передачи зависел от нескольких непредсказуемых обстоятельств, наличия чрезвычайно чувствительного детектора (когерера) и способности волн обходить препятствия, преодолевать препятствия, а также от способности волн обходить препятствия, волны обходить препятствия, пересекать облака и даже не подчиняться кривизне Земли. На рубеже веков впечатляющий успех системы Гульельмо Маркони помог расширить и ускорить распространение теории Максвелла. В это технологическое приключение были вовлечены такие важные ученые, как Лодж, Пуанкаре и Кон. Однако этот ажиотаж не оказал большого влияния на современную эволюцию фундаментальной электродинамики и поэтому не нуждается в обсуждении в данной книге.<sup>110</sup>

<sup>107</sup> Lecher 1890; Sarasin and de la Rive 1890. Cf. Hertz 1892a: 13, 17-19; O'Hara and Pricha 1987: 6-7; Folsing 1997: 438-43 1997: 438-43 (множественный резонанс, который Альфред Корну (Alfred Cornu) использовал для дискредитации Герца); Poincare 1904a за превосходный популярный обзор ранних работ по колебаниям Герца. О недавнем

повторении экспериментов Герца, ср. Бухвальд, 1994: 163-6.

<sup>108</sup> O'Hara and Pricha 1987: 23-4; FitzGerald 1888: 231. См. также Hunt 1991a: 158-9.

<sup>109</sup> Герц - Хевисайду, 13 июля 1889 года, в O'Hara and Pricha 1887: 66. О реакции Лоджа, см. там же: 87-8 и выше, глава 5, с. 205. О стратегии Фитцджеральда, см. Hunt 1991a: 160-152.

<sup>110</sup> ср. Aitken 1985; Poincare 1904; Fahie 1899; Appleyard 1930. О Маркони и его конкурентах см. Hong 1994b, 1996.

### 6.5.2 Максвелл Герца

В Англии открытие Герца лишь изменило относительную важность уже устоявшейся теории, в Германии же оно резко нарушило принятые концепции. Герц сам стал пионером нового вида теории, возникшей в результате столкновения между немецкими и британскими концепциями. Его первым шагом был уже упомянутый расчет поля осциллирующего электрического диполя. Там он написал уравнения Максвелла в терминах электрического и магнитного полей, но без исходных терминов. Его интересовало только распространение в вакууме от точечного источника или вдоль цилиндрического провода с хорошей проводимостью. Он не обсуждал природу электрического заряда и тока и использовал такие выражения, как "свободные количества электричества" или "волны в проводе", которые выдавали сохранение в его сознании континентальных представлений.<sup>111</sup>

Герц стал более максвеллианцем в следующем, 1889 году, после переписки с Фицджеральдом и Хевисайдом и экспериментов со скин-эффектом его волн в проводах. Он понял, что согласно максвелловскому взгляду

*"электрическая сила, определяющая ток, вовсе не распространяется в самом проводе, но при всех обстоятельствах проникает снаружи в провод и распространяется в нем сравнительно медленно и по законам, подобным законам изменения температуры в теплопроводящем проводнике".*

Он присвоил замечание Хевисайда о том, что скорость вдоль проводов лучше определяется в случае двух параллельных проводов, когда электромагнитная волна направляется между двумя проводами, тогда как в случае одного провода движение волны частично зависит от неопределенных, удаленных проводников. Таким образом, Герц усвоил центральную максвелловскую догму о примате полевых процессов.<sup>112</sup>

Однако Герц, как и большинство континентальных читателей, не понял максвелловскую Максвелла электрического смещения и тока. Как он писал в 1892 году,

*"Многие люди с рвением бросались изучать работы Максвелла, и, даже не наткнувшись на нежелательные математические трудности, они все же были вынуждены отказаться от надежды сформировать у себя полностью последовательную концепцию идей Максвелла. Я сам оказался не лучшим".*

В частности, Герц не понимал, как поляризация Максвелла, будучи

"смещением электричества", может быть направлена от положительной пластины конденсатора к отрицательной. Он упустил из виду, что "электричество" Максвелла было электрически нейтральным, что заряд означал только разрыв в напряжениях, вызванных смещением "электричества". От отчаяния он решил, что представления Максвелла относятся к *"одеянию геев, в которое мы произвольно облакаем природу"*.

Отбросив гипотетические флюиды, смещения и потенциалы, он заявил:

*"На вопрос "Что такое теория Максвелла?" я не знаю более короткого или более определенного ответа, чем следующий: Теория Максвелла - это система уравнений Максвелла".*<sup>113</sup>

В 1890 году Герц предложил собственное систематическое изложение теории Максвелла, впечатляющий образец эпистемологического порядка и ясности. Сначала он признал существование электромагнитного эфира и охарактеризовал его состояние электрическими силами **E** и **H**, операционально заданными силами, действующими на единичные электрические и магнитные полюса.<sup>114</sup>

Он предположил, что плотность энергии

$$w = \epsilon E^2/2 + \mu H^2/2 \quad (6.27)$$

где  $\epsilon$  и  $\mu$  - "диэлектрическая проницаемость" и "намагничивающая постоянная". В абсолютных единицах Герца эти константы безразмерны, и их значение равно единице в случае вакуума. Затем Герц постулировал уравнения поля для тел, находящихся в состоянии покоя:

$$\begin{aligned} (1/c) \partial \mu \mathbf{H} / \partial t &= - \nabla \times \mathbf{E}, \\ (1/c) \partial \epsilon \mathbf{H} / \partial t &= \nabla \times \mathbf{H} - \sigma \mathbf{E} / c \end{aligned} \quad (6.28)$$

где  $c$  - константа с размерностью скорости, а  $\epsilon/\sigma$  - время релаксации электрической силы.<sup>115</sup>

Герц считал эти постулаты полным основанием для электродинамики покоящихся тел. Он не пытался ни вывести их априорным путем, ни найти их отдельно на экспериментах, считая, что:

*"Каждая отдельная формула не может быть доказана экспериментом, а только система в целом"*.

На том этапе понятия заряда и тока еще не были определены ни формально, ни операционально. Герц ввел их только во второй части, как *"имена и определения"*, которые ничего не добавили к эмпирическому содержанию теории. Их единственной целью было *"позволить более краткое выражение и частично установить связь с более старыми взглядами на электричество"*. Электрическая и магнитная "поляризации" **D** и **B** были определены как  $\epsilon \mathbf{E}$  и  $\mu \mathbf{H}$ ; "истинное электричество" как  $\nabla \cdot \mathbf{D}$ , "свободное электричество" как  $\nabla \cdot \mathbf{E}$ , "истинный магнетизм" как  $\nabla \cdot \mathbf{B}$ , "свободный магнетизм" как  $\nabla \cdot \mathbf{H}$ , "плотность электрического тока" как  $\sigma \mathbf{E}$ .<sup>116</sup>

Таким образом, Герц отказался от веберовского, содержательного, взгляда на электричество в пользу взгляда Максвелла, согласно которому

заряд и ток вытекают из понятий поля. Однако для Герца выведение понятий заряда и тока было чисто формальным, тогда как для Максвелла оно опиралось на конкретную картину. Это различие объясняет, почему, например, в системе Герца могли сосуществовать два определения электрического заряда, тогда как Максвелл допускал только одно.<sup>117</sup> Кроме того, Максвелл придавал большое значение физико-математическому различию между потоком и силой (количеством и интенсивностью), тогда как Герц настаивал на том, что векторы **D** и **B** соответствуют альтернативным описаниям состояний эфира, уже определенных векторами **E** и **H**.<sup>118</sup>

Система Герца также отличалась от системы Максвелла по вопросу механической основы. Герц игнорировал лагранжев вывод электродинамических уравнений и рассматривал вездесущность векторного потенциала в *Трактате* Максвелла как "*рудиментарное явление математической природы*". Такое отношение несколько удивляет, учитывая, что в тот же период Гельмгольц пытался подвести всю физику под принцип Гамильтона. Однако следует помнить, что аргумент Герца о единстве электрической силы и его более поздняя забота о распространении вывели силы **E** и **H** на передний план теории. Более того, Герц не был полностью удовлетворен лагранжевой формулировкой механики, что видно из его собственной более поздней попытки обоснования механики.<sup>119</sup>

<sup>111</sup> Hertz 1889a: 152, 165

<sup>112</sup> Hertz 1889c: 172; Хевисайд Фицджеральду от 30 января 1889 года, в O'Hara and Pricha 1987: 39; Герц Фицджеральду от 20 июля 1891 г., там же: 47.

<sup>113</sup> Hertz 1893: 20, 28, 21; Hertz 1890a: 208-10. см. также Heimann 1971; Buchwald 1985a: 192-3; Darrigol 1993a: 251-7.

<sup>114</sup> В присутствии вещества Герц поместил свои полюса в бесконечно узкие цилиндрические полости Томсона.

<sup>115</sup> Hertz 1890a: 210-220. Для простоты я привожу формулы только для изотропных сред и рационализирую единицы Герца.

<sup>116</sup> Hertz 1890a: 210, 223, 224-232.

<sup>117</sup> Hertz 1890a: 227-228. Максвелл также ввел дивергенцию **E**, но только как «кажущееся электричество»: математическое промежуточное звено без физического значения (Maxwell 1873a: #83).

<sup>118</sup> Hertz 1890a: 224; 1890b: 258.

<sup>119</sup> Hertz 1890a: 209. Hertz 1894: 22-29 (против принципа Гамильтона)

### 6.5.3. Электродинамика Герца для движущихся тел.

Герц отказался от метода Лагранжа даже для определения механических сил, действующих на носители заряда или тока. Как только было принято во внимание движение среды, для определения этих сил из уравнений поля стало достаточно энергетических соображений. Герц доказал это в продолжении своей переформулировки теории Максвелла, основываясь на двух следующих предположениях:

1. Скорость эфира непрерывна и совпадает со скоростью вещества во всех случаях, когда вещество присутствует.

2. Силовые линии, соответствующие поляризациям **D** и **B**, следуют за движением среды. Точнее: если бы эти линии находились только под влиянием этого движения, они всегда проходили бы через одни и те же частицы среды.

Герц знал, что первое предположение было дискредитировано интерферометрическим экспериментом Физо в 1851 году: сопротивление эфира проточной воде было лишь частичным. Для второго предположения у него не было априорного обоснования, поскольку он отбросил любое изображение **D** и **B**. Он удовлетворился тем, что эти два предположения привели к формально полной теории, предсказания которой согласуются со всеми известными электродинамическими экспериментами.<sup>120</sup> Для вывода фундаментальные уравнения поля, Герц использовал понятие конвективного изменения потока, придуманное Гельмгольцем для определения сил, действующих на трехмерный ток (см. Приложение 5). В движущейся среде изменение потока **F** в данной частице среды определяется изменением в фиксированной точке пространства за вычетом конвективного изменения. В символах это дает

$$D\mathbf{F}/Dt = \partial\mathbf{F}/\partial t - [\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{F}) - \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{F})], \quad (6.29)$$

где **v** - скорость среды. С такими обозначениями общие уравнения поля Герца приобретают вид:<sup>121</sup>

$$\begin{aligned} (1/c)D\mu\mathbf{H}/Dt &= -\nabla \times \mathbf{E}, \\ (1/c)D\varepsilon\mathbf{E}/Dt &= \nabla \times \mathbf{H} - (\sigma/c)\mathbf{E}. \end{aligned} \quad (6.30)$$

Члены, зависящие от скорости, бывают двух видов. Члены с двойным векторным произведением приводят к движущим силам Хевисайда  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  и  $\mathbf{D} \times \mathbf{v}$ . Первая сила дает электромагнитную индукцию в теле, движущемся в магнитном поле. Вторая объясняет эффект, впервые показанный Вильгельмом Рентгеном в 1885-1888 г.г.: действие на магнитную стрелку незлектризованного диэлектрического диска, вращающегося между пластинами конденсатора. Остальные члены, зависящие от скорости, соответствуют конвективному току  $\mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{D})$ , уже введенному Фицджеральдом и Хевисайдом и подтвержденному экспериментом Роуланда с наэлектризованным вращающимся диском.<sup>122</sup>

Чтобы определить механические силы электрического и магнитного происхождения, Герц исследовал изменение электромагнитной энергии объемного элемента движущейся среды. Он обнаружил две составляющие: поток Пойнтинга через поверхность элемента и члены  $\sigma_j \partial v_j / \partial x_i$ , соответствующие работе максвелловских напряжений  $\sigma_{ij}$  при деформации элемента (см. Приложение 6). В соответствии с концепцией непрерывного действия через эфир, Герц вывел все электромеханические силы из этих напряжений и получил соответствующие формулы Максвелла с небольшими исправлениями и дополнениями. Главным

дополнением была старая знакомая Герца сила  $\mathbf{D} \times \mathbf{V}$ , действующая на переменные кольцевые магниты.<sup>123</sup>

Благодаря этой электродинамике движущихся тел Герц довел теорию Максвелла до высшей степени формального совершенства. Однако он знал, что его предположения об отношениях между эфиром и веществом слишком просты, чтобы быть верными. Они противоречили хорошо известным результатам оптики движущихся тел. Более того, они предполагали механическую силу  $\partial(\mathbf{D} \times \mathbf{V})/\partial t$  (сила Герца +  $\mathbf{D} \times \mathbf{V}$  Максвелла), которая может действовать на эфир даже в отсутствие вещества. Это означало нарушение равенства действий и реакций, когда речь шла только о веществе. То, что эфир будет обладать инерцией и передавать импульс, казалось Герцу очень маловероятным, хотя он и заставил его передавать энергию и напряжения.<sup>124</sup>

<sup>120</sup> Hertz 1890b: 256-259.

<sup>121</sup> Hertz 1890b: 259-63; Helmholtz 1874a: 730-4. См. Также Darrigol 1993b: 318-24, 338-40.

<sup>122</sup> Hertz 1890b: 263-265. 274-275; Röntgen 1885, 1888, 1890. В 1903 году Александр Эйхенвальд показал, что измеренное значение последнего эффекта соответствует теории Лоренца, по которой только часть  $\mathbf{D}$  вращается вместе с диском: см. Whittaker 1951: 400.

<sup>123</sup> Hertz 1890b: 275-284. Сила Герца формально идентична магнитоэлектрической силе Хевисайда.

<sup>124</sup> Hertz 1890b: 284-285.

#### 6.5.4. Сравнение Герца и Хевисайда

Существует очевидное сходство между версиями теории Максвелла, предложенными Герцем и Хевисайдом. Оба физика критиковали представление Максвелла об электричестве как о несжимаемой жидкости; они избегали механических картин полевых процессов в целом; они отбросили лагранжеву основу уравнений поля; они устранили потенциалы; они подчеркивали электромагнитную симметрию; и они настаивали на локальном уравнивании энергии. Первоначально Хевисайд подозревал, что Герц использовал больше его работ, чем он признал в печати. Подозрения быстро исчезли, поскольку Герц вскоре похвалил Хевисайда за дуплексные уравнения (1885) и позволил забыть о своем собственном вкладе 1884 года. В свою очередь, Хевисайд восхищался электродинамикой движущихся тел Герца за ее отказ от принципа Гамильтона. Наиболее систематический и подробный анализ максвелловской полевой энергетики, опубликованный Хевисайдом в 1991 году, опирался на представление Герца о полностью затянутом эфире (см. Приложение 6). Естественно, Хевисайд разделял беспокойство Герца по поводу оптики движущихся тел.<sup>125</sup>

Тем не менее, электродинамика Герца была слишком формальной и слишком абстрактной на вкус Хевисайда. Если Герц заботился лишь о формальной полноте и эмпирической адекватности, то Хевисайд

требовал динамического фундамента на основе обобщенных сил, скоростей и "действий". Для него смещение **D** и индукция **B** имели центральное физическое значение, поскольку их изменения во времени давали обобщенные скорости. Соответственно, он упрекал Герца за исключение коэффициентов  $\epsilon$  и  $\mu$  из уравнений поля в вакууме:

*"Можно ли представить себе среду для эл. маг. возмущений, которая не имеет по крайней мере двух физических констант, аналогичных плотности и упругости? Если нет, то не лучше ли явно символизировать их, оставив на будущее их истинную интерпретацию?"*

Эфир Хевисайда был настоящей механической средой, хотя его точная механическая структура была неизвестна. В частности, эта среда могла обеспечить импульс, который Герц сожалел, что отсутствует в его электродинамике движущихся тел.<sup>126</sup>

<sup>125</sup>Hertz 1890a: 209-10 (приоритет Хевисайда); Heaviside 1891-1892. См. также Buchwald 1985b; Darrigol 1993b: 324-7; Yavetz 1995: 133n.

<sup>126</sup> Хевисайд - Герцу, 8 декабря 1890 года, в O'Hara and Pricha 1987: 80-1; Хевисайд - Герцу, 13 сентября 1899 года, там же, и Heaviside 1893-1912, Vol. 1: 108 для сил, действующих на эфир (см. также Darrigol 1993b: 327). Более техническое различие между Герцем и Хевисайдом касалось способа введения импрессионных сил в уравнения поля: способ Хевисайда отражал его динамическую точку зрения.

### **6.5.5 Немецкие максвелловцы**

Герц со своей модернистской абстракцией совсем не походил даже на того британского максвеллианца, кто был наименее склонен к моделям и картинам. И все же его отказ от старых немецких взглядов был очень основательным. Он отверг электрическую жидкость или флюиды и рассматривал поле эфира как первичную концепцию, из которой вытекают все другие понятия. Эта революционная лихорадка была заразной. После экспериментов Герца число немецких физиков, интересующихся теорией Максвелла, значительно выросло. Некоторые из них создали систематические изложения теории, адаптированные для немецкой аудитории. Без потери эмпирической адекватности они могли бы оставаться в рамках действия на расстоянии и использовать переосмысление Гельмгольцем теории Максвелла в терминах бесконечно поляризуемого эфира. Никто этого не сделал. Все они приняли максвелловский полевой монизм.<sup>127</sup>

Даже Гельмгольц не позаботился о том, чтобы защитить свою собственную теорию поляризации. В своих лекциях 1892 года по электромагнитной теории света он начал с уравнений Максвелла-Герца и отметил, что электрический заряд, как и энергия, сохраняется, не будучи веществом. В отличие от Герца, он очень восхищался тем, что Максвелл использовал метод Лагранжа. С 1880-х годов он стремился подвести всю физику под принцип наименьшего действия. Этот принцип был достаточным условием механической сводимости и разделял достоинство принципа энергии, выражаемое непосредственно в терминах физически



управляемых переменных. В нем Гельмгольц увидел мощный инструмент для структурирования и расширения теорий. В 1892 году ему удалось найти функцию действия для уравнений Максвелла-Герца в самом общем случае, включая движущиеся тела. За несколько недель до своей смерти, в сентябре 1894 года, он все еще работал над упрощением вариационной процедуры.<sup>128</sup>

В 1891-1893 годах Больцман опубликовал свои мюнхенские лекции по теории Максвелла. Несмотря на свою исключительную симпатию к британской физике и глубокое понимание вихревой модели Максвелла, Больцман согласился с Герцем, что максвелловские понятия заряда и тока были непоправимо неясны. В своих лекциях он принял точку зрения Герца, что электричество - это *"предмет мысли, служащий для изображения [versinnlichen] интегралов определенных уравнений"*. Но он делал это неохотно и выражал надежду, что тайна электрического движения скоро будет разгадана - что его собственные лекции скоро устареют. Он также критиковал операциональные определения Герца для **Е** и **Н** и *"его пристрастие к наготe"*. По его мнению, теория не может быть сформулирована без обращения к механике. Он предложил динамический фундамент для уравнений поля и целый набор сложных механических моделей для основных электродинамических явлений. Для примера читатель может взглянуть на рис. 6.15.<sup>129</sup>

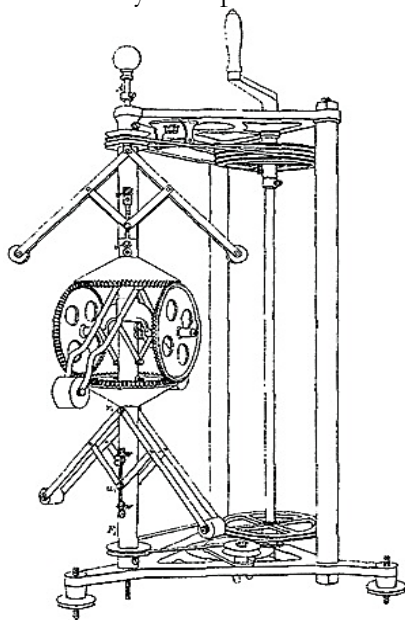


Рис. 6.15. Модель Больцмана для двух связанных цепей RLC (Boltzmann 1891-1893, Vol. 1: plate).

Последующие немецкие толкователи теории Максвелла отдавали должное механическим иллюстрациям Больцмана, но, без сомнения, находили их более

сложными, чем объяснение. Они приняли минимализм Герца или вернулись к первоисточнику - **Трактату** Максвелла. Пауль Друде, ученик Фойгта и читатель Эрнста Маха, принадлежал к феноменологической традиции и ценил экономный путь Герца:

*"Мне кажется, что для ученика экономя, приносимая математикой в описание фактов, должна преобладать над презентациями, которые пытаются удовлетворить потребности философа природы, а не экспериментатора".*

В своем бестселлере "Физика эфира" (*Physik des Aethers*, 1894) Друде оживил номинализм Герца в отношении заряда и тока и дистанцировался от механических основ:

*"Из наблюдаемых фактов нельзя сделать вывод ни о необходимости, ни о целесообразности механического представления".*

По его мнению, обратное превращение электромагнетизма в механику, имела равные шансы на успех. Возможно, сам эфир был ненужным продолжением механического редукционизма:

*"Точно так же, как мы приписываем посредничество сил определенной среде, заполняющей пространство, мы могли бы обойтись без среды и приписать самому пространству физические свойства, которые в настоящее время приписываются эфиру. Физики пока не рассматривают последний вариант, поскольку под "пространством" они понимают абстрактное представление без физических свойств".<sup>130</sup>*

Август Фёпль, инженер-физик, опубликовал не менее популярную книгу о теории Максвелла в том же 1894 году. Фёпль разделял отвращение Друде к механистическому разврату Больцмана, но находил аскетизм Герца столь же непривлекательным. Его источниками были Максвелл и его *"самый выдающийся последователь"*, Оливер Хевисайд, достигший *"самого непосредственного и ясного представления концепций Максвелла"*. Фёпль принял векторную запись Хевисайда и некоторые из его динамических понятий, особенно о воздействующих силах. Его мало интересовала лагранжева формулировка теории, и он поддержал мнение Маха о том, что происхождение фундаментальных законов является эмпирическим. Тем не менее, он дал полный и ясный отчет о максвелловских картинах заряда и тока, включая понятие проводимости как релаксации поляризации и метафору несжимаемой жидкости. Для тех, кто считает, что концепция Максвелла об электричестве была слишком британской, чтобы пересечь Ла-Манш, Фёпль является наглядным контрпримером.<sup>131</sup>

Другим немецким максвелловским трудом был *"Das elektromagnetische Feld"* ("Электромагнитное поле"), Эмиля Кона, опубликованный в 1900 году. Будучи феноменологом и поклонником Маха, Кон оставался максимально приближенным к экспериментальной и инженерной практике. Он основывал теорию на операционально определенных полях **Е** и **Н** и на электрических и магнитных силовых линиях. Следуя

Фарадею, он определил электрический заряд как окончание или скачок электрических силовых линий. Вдохновленный совместно с Лео Аронсом экспериментальными исследованиями диэлектрических свойств плохих проводников в 1886 году, он разделял мнение Максвелла о том, что проводник - это диэлектрик с утечкой, и отождествлял ток проводимости с диссипативным затуханием электрических силовых линий. Кон считал все это чисто феноменологическим и избегал дальнейшего изображения полевых процессов. Он игнорировал электрическое смещение Максвелла и воображаемую жидкость так же, как и континентальные электрические флюиды. Наиболее радикально он оценил концепцию эфира как излишнюю. По его мнению, электромагнитная волна - это не распространение возмущения в эфире, как сказали бы предыдущие максвелловцы, а *"распространение электромагнитного поля"*. Современная лексика "распространение" и "поле" была изобретением Кона. Она стала общепринятой после того, как издательство *"Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften"* (Энциклопедия математических наук) проконсультировалось с Коном по этому вопросу.<sup>132</sup>

Открытие Герца вызвало настоящую интеллектуальную революцию в Германии. Никто из немецких максвелловцев не пытался спасти содержательную концепцию электричества Вебера. Все они приняли идею Максвелла о примитивности концепции поля и производном характере заряда и тока. Некоторые из них зашли так далеко, что приняли максвелловскую картину проводимости как процесса релаксации поля. Остальные заняли агностическую позицию и отказались от создания картин заряда и тока. Континентальная и максвелловская картины электричества уничтожали друг друга в их в их сознании. Этот радикальный разрыв вызвал эпистемологические размышления. Больцман морализировал:

*"Полезно выдвинуть теорию Вебера в качестве предупреждающего примера на все времена, чтобы мы всегда сохраняли необходимую гибкость ума"*.

Он подчеркивал необходимость множества подходов, включая как математическую феноменологию, так и теории, основанные на различных представлениях. Герц с подозрением *относился к физическим картинам и приписывал системе уравнений Максвелла "собственную жизнь"*. Эта система, вместе с некоторыми операциональными определениями, была самодостаточным целым, однозначно представляющим электромагнитные явления. Другие понятия, хотя они и могли напомнить более ранние представления, были всего лишь "именами". Друзе и Кон восприняли это как подтверждение мнения Маха о том, что мы никогда не должны забывать о происхождении наших понятий и приписывать им метафизическую неизбежность. Они настаивали на прямой

эмпирической привязке понятий, вплоть до сомнения в существовании эфира.<sup>133</sup>

Эти размышления вновь подняли вопрос о механическом редукционизме. Теперь немецкие физики столкнулись, по крайней мере, с четырьмя концепциями механической основы электромагнетизма:

- сведение к парным силам, действующим на расстоянии;
- сведение к смежным действиям;
- механические аналогии *a la* Томсон;
- требование, чтобы фундаментальные уравнения выводились из принципа наименьшего действия.

Друде, Кон и Фёпль отказались сделать выбор и отрицали необходимость механической основы.

Больцман решительно отстаивал три последние концепции механической основы и мучительно переживал неудачу второй.

Гельмгольц выбрал более деликатную четвертую возможность.

А Герц мечтал о пятой: он планировал новую механику, которая очистила бы остатки метафизики действия на расстоянии и сформировала более подходящую основу для электродинамики.

Короче говоря, старшие, неокантовские физики хотели сохранить основополагающую роль механики, в то время как младшие, махистские, заставляли электромагнетизм встать на собственные ноги.

<sup>127</sup> ср. Darrigol 1993a.

<sup>128</sup> Helmholtz, 1897 (1892-1893 лекции): 92-3, 99; Helmholtz, 1886, 1892, [1894].

См. также Klein 1972a; Darrigol 1994b: 235-7.

<sup>129</sup> Boltzmann 1891-1893, Vol. 2: 23 (предмет размышления), 13-14 (операционные определения); 1895: 413 (нагота). Ср Kaiser 1982: 5\* -32\*; Darrigol 1993a: 257-264.

Интерес Больцмана к теории Максвелла возник еще до экспериментов Герца. В 1873 году он измерил диэлектрические постоянные различных прозрачных тел в лаборатории Гельмгольца и обнаружил, что зависимость Максвелла между оптическим индексом и диэлектрической постоянной приблизительно подтверждается: см. Buchwald 1994: 208-14.

<sup>130</sup> Drude 1894: VII, VI, 9. См. также Darrigol 1893a: 264-267.

<sup>131</sup> Föpl 1894: V. См. также Bromberg 1972; Holton 1973b; Darrigol 1993a: 267-71

<sup>132</sup> Cohn 1900a; Cohn and Arons 1886. Кон впервые разработал свою концепцию поля в Cohn 1890. См. также Darrigol 1993a: 271-6.

<sup>133</sup> Boltzmann 1904: 162; Hertz 1896 (1889): 318. Мах был менее критичен к эфиру, чем его последователи. Он даже предположил, что эфир может решить парадокс абсолютного движения: ср Mach 1901: 241-242.

## 6.6 Выводы

К 1860-м годам континентальная электродинамика стала более консервативной и академичной. Завершая работы над физиологической оптикой, Гельмгольц решил возродить дремлющие воды немецкой физики. Его опыт в физиологии, философия принципа энергии и открытость к британской физике определили оригинальность его подхода. В своих электрофизиологических экспериментах он столкнулся

с очень быстрыми электродинамическими процессами, о которых имеющиеся теории или молчали или не соответствовали им. С помощью индукционных катушек, лейденских банок, коммутаторов и лягушачьих лапок он разработал лабораторные методы, позволившие сделать первый шаг в неизвестную область неограниченных токов. На соответствующий теоретический вызов он ответил общей структурой, включающей предсказания предыдущих теорий как частные или предельные случаи.

Такая общность могла быть получена только путем отказа от детальных представлений для электрического тока или эфира. Гельмгольц позаимствовал у Франца Неймана понятие электродинамического потенциала и обобщил его до "*закона потенциала*" для пар элементов тока. Этот закон был онтологически нейтральным, формально простым и приводил к силам, которые удовлетворяли энергетическому принципу. В электрические токи Гельмгольц включил поляризационные токи, вносимые диэлектриками и, возможно, самим вакуумом. Наиболее общая теория, которая соответствовала известным законам для замкнутых токов, включала только два неизвестных параметра: константу  $k$  в формуле потенциала и поляризуемость вакуума. Конкретный выбор этих констант позволил получить законы Вебера и Максвелла для движения электричества в покоящихся телах, несмотря на крайнее несоответствие концептуальных основ.

Теория Гельмгольца сыграла важную историческую роль, обеспечив основу для разработки важнейших экспериментов, как воображаемых, так и реальных. С течением времени характер этих экспериментов менялся. В своей фундаментальной работе 1870 года Гельмгольц показал, что случай Вебера ( $k = -1$ ) и любое отрицательное значение  $k$  приводят к неустойчивости равновесия электричества в проводниках, и определил, что имеющиеся экспериментальные средства не могут выбрать другие значения  $k$ . В ответ на последующую критику он обратил свое внимание на важнейшие эксперименты, связанные с движением проводников: в этом случае его закон потенциала предполагал силы, неизвестные другим теориям, если только поляризуемость вакуума не была очень большой. В 1875 году его собственный умный эксперимент - первый количественный эксперимент, когда-либо проведенный на незамкнутых токах, - показал, что новые силы не действуют. Тогда надо было или отказаться от потенциального закона, или считать вакуум поляризуемым. Гельмгольц предпочел вторую возможность, что приблизило его к теории Максвелла. Тем не менее, он призывал к третьему виду решающего эксперимента, который бы проверил электродинамическое действие поляризационных токов и их наличие в вакууме.

Теория Гельмгольца, основанная на понятии электродинамического потенциала, была ближе всего к теории Франца Неймана и частично

разделяла его феноменологическое мировоззрение. Это родство включает в себя надуманный парадокс: феноменология Неймана подразумевала крайне жесткую концепцию эксперимента, в то время как Гельмгольц и его ученики постоянно изобретали новые устройства. Это различие легко понять, если вспомнить, что Нейман сохранял свою теорию незавершенной, когда экспериментальные факты были недоступны. Гельмгольц, напротив, стремился к полноте и достиг ее благодаря общим организующим принципам: принципу разложения, энергетическому принципу и принципу Гамильтона. Таким образом, он превратил узкую математическую феноменологию в физику принципов. В рамках ограничений, налагаемых принципами, он придумал несколько способов дооления теории и представил новые эксперименты для выбора из этих возможностей.

От Гельмгольца Герц унаследовал физику принципов с ее кантовскими нотками, основу для важнейших экспериментов, несколько лабораторных методов, приспособленных к быстро меняющимся токам, и вопрос Берлинской премии о поляризационных токах. Его успех в ответе на последний вопрос и последующая демонстрация конечной скорости распространения электродинамических действий в воздухе также зависели от более личных качеств. Герц был очень внимателен к деталям, которые могли перерасти в новые эффекты. Он превосходно умел при преобразовании устройств очищать и усиливать эффекты, анализировать их причины и предлагать им новые объяснения. Он не позволял своим теоретическим предпочтениям влиять на результаты. Это нам Фарадея. Однако Герц не разделял взгляды Фарадея на математические теории. Напротив, он часто полагался на передовую теорию при анализе и модификации своих приборов. Высокоматематическая система Гельмгольца обеспечивала необходимые понятия, законы и вопросы.

Долго обсуждался вопрос о том, намеревался ли Герц подтвердить теорию Максвелла. Вопрос Берлинской премии 1879 года о диэлектрических токах явно касался достоверности теории Максвелла. Кроме того, после 1884 года Герц считал, что теория, непосредственно основанная на уравнениях поля Максвелла, скорее всего, верна, во имя единства электрической силы. Однако он отказался преждевременно закрыть этот вопрос и стремился выработать четкую концепцию того, как эмпирически отличить теорию Максвелла (или эмпирически эквивалентную ей теорию) от альтернативных теорий. Именно поэтому он принял гельмгольцевские рамки для всех своих экспериментальных исследований 1886-1887 годов. Открытие быстрых колебаний, демонстрация электродинамических эффектов изменяющейся поляризации диэлектрика и первое доказательство запаздывания в воздухе (декабрь 1887 года) относятся к этой категории; они перемежались с временными результатами, противоречащими теории

Максвелла. Только после экспериментов с отражающими экранами (февраль 1888 года) Герц оставил гельмгольцевские рамки и принял уравнения поля Максвелла. К тому времени он считал теорию Максвелла подтвержденной, несмотря на сохраняющиеся трудности со скоростью распространения волн в проводках. В последующие месяцы Герц усвоил основной постулат системы Максвелла: главенство электромагнитного поля и производный характер заряда и тока. Однако он проигнорировал представления Максвелла и динамическую основу. Его весьма абстрактная переформулировка основывалась на двух уравнениях поля, двух операционных определениях и формуле энергии. Он рассматривал эфир как среду неизвестного состава, а заряд, ток и поляризацию ввел как полезные "имена" для определенных математических символов. Некоторые немецкие авторы теории Максвелла приняли номинализм Герца и даже распространили его на эфир. Другим требовались динамические основы и картины основных эфирных процессов. Но никто не пытался спасти старый взгляд на электричество. Попытка Гельмгольца возродить немецкую физику оказалась безнадежной.

## **7. Проводимость в электролитах и газах.**

### **7.1 Введение**

Около 1890 года волны Герца занимали передовую позицию в электродинамике. В этом ограниченном контексте не требовалось знать более глубокую природу электрического тока или точное соотношение между эфиром и веществом. Британские и немецкие последователи Максвелла могли ограничиться макроскопической феноменологией поля, которой отдавал предпочтение Максвелл. Однако они ожидали, что атомная структура вещества будет играть роль в электрической проводимости, в магнитных свойствах вещества и в ряде оптических явлений. На континенте Вебер отстаивал эту веру гораздо раньше. Никто не мог игнорировать его микроскопические объяснения магнетизма, независимо от того, насколько непопулярными стали электрические флюиды после открытия Герца. Даже Клаузиус и Гельмгольц, выступавшие за феноменологический подход к физике, не могли обойтись без атомистических соображений.<sup>1</sup>

Существовало, по сути, две концепции того, как атомизм должен быть введен в электродинамику. Согласно естественной максвелловской тенденции, молекулы вещества действуют на эфир, изменяя его механические свойства. Эта модификация должна была быть описана механически, без использования электрических понятий. Электрический заряд и ток рассматривались как вновь возникшие макроскопические понятия, зависящие от средних свойств модифицированного эфира. Заряд атома или внутримолекулярные токи были бессмысленными понятиями.<sup>2</sup>

Континентальные физики придерживались противоположной точки зрения. Вебер представлял металлическую проводимость как скачки электрических частиц от молекулы к молекуле, магнетизм - как молекулярные токи, а атомы - как системы орбитальных электрических частиц. Более трезвые Клаузиус и Гельмгольц все же допускали наличие наэлектризованных молекул и даже атомов электричества. Это немецкое различие сохранялось даже после того, как Герц поколебал веру своих коллег в электрические флюиды.

Континентальный подход к молекулярной электродинамике был в целом более успешным, чем максвелловский. В конце 1880-х годов это превосходство стало очевидным. В то же время эксперименты Герца, казалось, подтвердили основные понятия Максвелла о заряде и токе. К 1895 году нескольким физикам удалось разрешить возникшее в результате этого напряжение, как в Англии, так и на континенте. Это произошло в двух различных контекстах: эмпирические исследования электролитической и газовой проводимости и теоретический синтез оптики и электромагнетизма. В настоящей главе рассматривается первый контекст, в следующей - второй.

В первом разделе рассказывается о том, как немецкие физики пришли к пониманию электролитического тока в терминах конвекции того, что мы сейчас называем ионами: частей молекулы, несущих целые кратные универсального кванта заряда (следует помнить, что первоначальное определение ионов Фарадея было чисто макроскопическим). Затем мы обратимся к первой длительной фазе истории электрического разряда в разреженных газах, когда считалось, что ток разряда не имеет ничего общего с электролизом. В третьем разделе описывается, как Артур Шустер в 1880-х годах ввел газообразные ионы, как Дж. Дж. Томсону удалось совместить их с максвелловскими взглядами, и как эти два физика определили новую экспериментальную микрофизику. Последний раздел посвящен изучению катодных лучей и открытию электрона.

## 7.2 Электролиз

Несмотря на свою глубину и тщательность, исследования Фарадея по электролизу имели противоречивые аспекты. Они были лишь отправной точкой долгой и сложной эволюции. Ретроспективно кажется, что закон Фарадея, закон Ома и законы термодинамики почти обязательно привели к современной теории диссоциации. Исторически такой необходимости не было: долгое время изучающие электролиз предпочитали жертвовать одним из этих законов, нежели отказаться от устоявшихся химических догм. Еще в 1885 году Оливер Лодж считал электрохимию очень запутанной областью *"с отталкивающим характером, присущим любой пограничной области науки"*. Исследовать эти джунгли истории не легче. В следующем разделе приведены некоторые вехи, подчеркивающие физические аспекты, которые имели отношение к общей эволюции



<sup>1</sup> О теории Максвелла и атомизме см. главу 4: с. 200-203; об атомизме Вебера см. главу 3: с. 133; о Гельмгольце и Клаузузе см. далее.

<sup>2</sup> Примеры этой точки зрения приведены в J.J. Thomson 1883b (см. далее), Larmor 1894 (см. Главу 8) и в Lodge 1885b, 1889. Заметным исключением является обращение Фитцджеральда (трудное) в 1882 г. к идее, что «взаимодействия между молекулами вещества и эфира имеют тот же характер, что и электромагнитные воздействия, с которыми мы знакомы» (FitzGerald 1882: 101, цитата из Hunt 1991a: 40)

<sup>3</sup> Lodge 1885b: 723. К сожалению, нет авторитетной истории электрохимии. Наиболее богатыми источниками являются Ostwald 1896 and Wiedemann 1882-1885, Vol. I: 183-298, 729-95 (гальванические элементы), Vol. II: 463-625 (электролиз). 626-862 (поляризация электрода), 863-933 (энергетика), 924-1002 (теория). Удобное изложение частей истории Оствальда содержится в Le Blanc 1896. Проницательные исторические замечания также можно найти в Hittorf 1878.

### 7.2.1 Блуждающие ионы

Взгляды Фарадея на электролиз были основаны на тесной связи между электрическим током и цепочками разложения и восстановления в электролите. Закон Фарадея выражал эту связь количественно, устанавливая, что количество разложения в электролизере одинаково для данного количества электричества и пропорционально химическим эквивалентам. Что касается химической природы продуктов разложения или "ионов", Фарадей судил по веществам, высвобождающимся на электродах, и по принятым химическим представлениям, согласно которым соль представляет собой комбинацию металлического оксида (щелочи) и неметаллического оксида (кислоты). Согласно этой точке зрения, в растворе серной кислоты разлагается вода, а не кислота. В растворе сульфата соды соль разлагалась на соду и серную кислоту, обнаруженные на электродах, а вода также разлагалась с выделением водорода и кислорода.<sup>4</sup>

В 1839 году лондонский профессор химии Фредерик Дэниелл убедил Фарадея в несовместимости старой теории солей с законом электрохимических эквивалентов. Он подверг электролизу раствор серной кислоты и раствор сульфата натрия последовательно в одной и той же цепи и обнаружил, что количество кислорода и водорода, выделяющихся в двух ячейках, было одинаковым. Следовательно, одновременное разложение воды и сульфата натрия не могло происходить во второй ячейке без нарушения закона Фарадея. Дэниелл предположил, что истинными ионами являются натрий и новый "сульфион - ион  $\text{SO}_4$ , и что прямого разложения воды не происходит. С этой точки зрения наблюдаемые водород и кислород, а также щелочь и кислота были лишь вторичными продуктами действия натрия и сульфата на воду. В целом, Дэниелл не считал воду непосредственно разлагаемой и приписывал проводимость растворов исключительно

растворенному веществу.<sup>5</sup>

В 1844 году Даниэль сравнил изменения концентраций растворенного вещества вблизи двух электродов и обнаружил, что перенос ионов в растворе несимметричен. Для любого, кто верил в цепочки разложения Гроттуса, это был удивительный результат: казалось очевидным, что положительные и отрицательные ионы могут мигрировать только с равными и противоположными скоростями, поскольку переходы их атомов от одной молекулы к другой должны быть синхронизированы (см. рис. 7.1 (а)). Эта аномалия оставалась нерешенной в течение десяти лет, пока Вильгельм Хитторф из Мюнстера не разработал соответствующий набор идей и методов. С помощью простой диаграммы Хитторф объяснил, что очевидное не обязательно должно быть правдой: на рис. 7.1 (b) атомы катиона (черные) постоянно соединяются с атомами аниона (белые), даже если последние дрейфуют быстрее первых. С помощью оригинально сконструированных ячеек Хитторф измерил число переноса (отношение скоростей) для ряда электролитов при различных концентрациях и температурах. Его результаты подтвердили идентификацию Даниэлем ионов в солевых растворах и вторичную роль растворителя.<sup>6</sup>

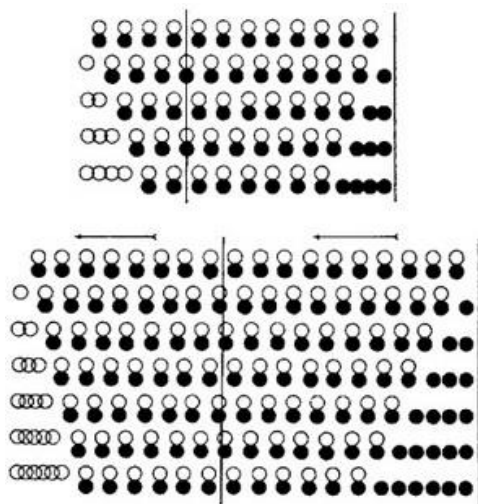


Рис. 7.1. Диаграммы Хитторфа для электролитического разложения (Hittorf 1853).

Первоначально Хитторф считал, что скорости миграции ионов зависят от их химического сродства. Это согласуется с общепринятым мнением, что электролитическая проводимость связана с химическим разложением. Однако вскоре Хитторф понял, что в этом представлении для преодоления химического сродства необходима минимальная электродвижущая сила, тогда как наблюдаемые числа переноса не зависят от электродвижущей силы, какой бы малой она ни была. В 1856 году он пришел к выводу, что электролитическая проводимость не имеет ничего

общего с химическим сродством и подчиняется закону Ома так же хорошо, как и металлическая проводимость. Это было важное, новое открытие: в то время было принято считать, что закон Ома не применим к электролитам по ряду причин, связанных с поляризацией электродов и вторичными реакциями. Измеряя проводимость путем переноса ионов, Хитторф пришел к противоположному выводу.<sup>7</sup>

Предположительно вдохновленный Хитторфом, Клаузиус в 1857 году разработал теорию электролиза, которая предполагала общую справедливость закона Ома. Если, рассуждал Клаузиус *ab absurdo*, молекулы электролитов находятся в состоянии покоя до того, как по ним пущен ток, то закон Ома не может быть применим, и для запуска цепи разложения Гроттуса должна быть необходима минимальная ЭДС. Поэтому нужно было представить непрерывное, беспорядочное движение молекул в соответствии с более ранней кинетической теорией вещества Клаузиуса. В этом представлении между молекулами постоянно происходили столкновения, иногда приводящие к разделению заряженных "частей молекулы" (то, что мы сейчас называем ионами). Такая часть могла в свою очередь столкнуться с частью противоположного знака другой молекулы и соединиться с ней, освобождая таким образом другую часть молекулы того же знака. В присутствии внешней ЭДС диссоциирующие столкновения становились более частыми из-за ориентации полярных молекул. Самое главное, эта сила предполагала общий дрейф частей молекулы, который Клаузиус отождествил с электролитическим током. Все это происходило независимо от того, насколько мала ЭДС, в соответствии с законом Ома. Проводимость должна была увеличиваться с температурой, как это наблюдалось для большинства электролитов.<sup>8</sup>

Сегодняшним читателям работы Даниэля, Хитторфа и Клаузиуса кажутся весьма убедительными. Однако они не смогли убедить большинство современных специалистов в области электролиза. Взгляды Даниэля и Хитторфа противоречили старой теории солей, которая все еще имела сильных сторонников, например, Густава Магнуса. Отделение электролитической проводимости от химического разложения, отстаиваемое Хитторфом и Клаузиусом, противоречило другой догме: стабильности молекул соединений в обычных физических условиях, включая слияние и растворение. Электролитические явления были настолько сложными, что многочисленные стратегии могли спасти эти догмы, по крайней мере, на время. В течение десятилетия после работ Хитторфа существовало примерно столько же теорий электролиза, сколько было исследователей в этой области.<sup>9</sup>

Ситуация изменилась благодаря поддержке, которую Видеман оказал Хитторфу в его "*Гальванизме*", и когда Фридрих Кольрауш, сын Рудольфа

и блестящий ученик Вебера, применил дух *Maassbestimmungen* к электролитической проводимости. Основным препятствием для прямого измерения сопротивления была давно известная "поляризация" электродов - кумулятивное поверхностное явление, зависящее от количества электричества, прошедшего через электрод. В целом, связанные ЭДС и сопротивление препятствуют точному измерению сопротивления электролитических растворов. Кольрауш придумал хитрость - использовать в измерительном мосте быстро меняющийся ток: тогда не успевает накопиться поляризация, и ничто не возмущает сопротивление раствора. Кольрауш сначала проверил закон Ома и измерил сопротивление большого количества электролитов при различных концентрациях и температурах.<sup>10</sup>

Наиболее важным выводом Кольрауша, опубликованным в 1876 году, была "независимая миграция ионов": в достаточно разбавленном растворе вклад двух ионов в проводимость взаимно независим и аддитивен. Его эмпирическое отношение удерживало его от атомистической интерпретации этого закона. Однако он использовал абсолютные единицы своего наставника и числа переноса Хитторфа для определения абсолютной скорости ионов под действием заданной ЭДС. Теперь физики могли удивлять химиков, открывая им чудеса невидимого: наклон потенциала в 1 вольт/см заставлял ион водорода двигаться со скоростью 1 см/час через почти чистую воду, ион натрия - со скоростью 13 мм/час, ион хлора - со скоростью 20 мм/с...<sup>11</sup>

Взгляды Кольрауша получили всеобщее признание в Германии. В Англии они были менее успешными. В своем докладе Британской ассоциации в 1885 году Лодж отверг немецкие доказательства независимой миграции ионов. Согласно модели электролитического тока в виде бусинок и нитей, он предложил альтернативную теорию, в которой скорости двух ионов всегда равны и противоположны. Даже общая справедливость закона Ома для электролитов казалась максвелловцам подозрительной. В 1886 году Фицджеральд все еще считал, что стоит провести эксперименты в этом направлении.<sup>12</sup>

Молодой шведский физик Сванте Аррениус очень серьезно отнесся к измерениям проводимости Кольрауша. В конце 1880-х годов он сделал из них вывод, что молекулы разбавленных растворов были почти полностью диссоциированы. Он исследовал последствия этого предположения с помощью недавно созданной Якобусом ван т'Хоффом газовой теории растворов. Вильгельм Оствальд и ван т'Хофф отстаивали теорию диссоциации в качестве редакторов журнала *Zeitschrift für physikalische Chemie*, основанного в 1887 году. В последующие 15 лет их идеи постепенно завоевали область электрохимии, несмотря на упорное сопротивление многих химиков и физиков.<sup>13</sup>

---

<sup>4</sup> FER 1: ##742-747 (January 1834). Cf. Ostwald 1896: 480-578, особенно 520-521.

- <sup>5</sup> Daniell 1839, 1840. См. также Ostwald 1896: 596-609.
- <sup>6</sup> Daniell and Miller 1844; Hittorf 1853. Cf. Ostwald 1896: 609-11, 814-19; Wiedemann 1885, Vol. 2: 582-93.
- <sup>7</sup> Hittorf 1856: 45-46; 1858: 52. Характерно, что Weber and Kohlrausch 1856 (#19) полагались на связь между сопротивлением и родством в своём абсолютном определении механической силы, действующей на ионы.
- <sup>8</sup> Clausius 1857. См. также Ostwald 1896: 869-871; Wiedemann 1882-85, Vol. 2: 941-942; Whittaker 1951: 335-336.
- <sup>9</sup> О конфликте между Хитторфом и Магнусом см. Hittorf 1859 и Ostwald 1896: 830-835, 840-858. Другие теории см. там же: 819-824, 830-840, 858-868; Wiedemann 1882-1885, Vol. 2: 935-941.
- <sup>10</sup> Wiedemann 1863, 1874; Kohlrausch and Nippoldt 1869; Kohlrausch and Grottrian, 1875; Kohlrausch 1876a. См. также Ostwald 1896: 884-897. Видеманн провел важные исследования в области электролиза. Его исследования 1852 года по эндосмосу (электролитически индуцированному потоку жидкости через пористые тела) были полезны Хитторфу. В 1856 году он подтвердил некоторые результаты Хитторфа и показал, что скорость движения ионов зависит от вязкости жидкости. См. Wiedemann 1882-1885, Vol. 2: 167-168 (эндосмоса), 589-593 (о Хитторфе), 946-947 (вязкость).
- <sup>11</sup> Kohlrausch 1876b: 143; 1879: 4, 197-207; там же.: 206, и Lodge 1889: 87 для чисел.
- <sup>12</sup> Lodge 1885b: 731-40; FitzGerald and Trouton 1886, 1887. Позиции Лоджа и Фицджеральда были отчасти определялись их дружбой с влиятельным химиком Генри Эвардом Армстронгом, который отвергал немецкие ионные теории. См. также Dolby 1976: 314-15, 332-333.
- <sup>13</sup> См. Ostwald 1896: 1067-1124; Whittaker 1951: 343-348; Crawford 1996 (об Аррениусе); Hiebert 1978 and Barkan 1990/1990 (о Нернсте); Dolby 1976 (о британском сопротивлении теории диссоциации).

### 7.2.2 Энергетика

Вышеупомянутые работы освещали то, что Хитторф назвал "блужданием ионов". В других исследованиях по электролизу судьба ионов на электродах обсуждалась с энергетической точки зрения. Гельмгольц стал пионером этого подхода в своей публикации 1847 года о сохранении силы. Он предположил, что джоулево тепло, выделяемое в гальванической цепи, может возникать только в химических реакциях на электродах или при поляризации электродов. Для неполяризующегося гальванического элемента (элемента Даниэля или Бунзена), включенного в резистивную цепь, ЭДС постоянна и численно равна механическому эквиваленту тепла Джоуля, выделяющегося после прохождения через цепь одной единицы электричества. Гельмгольц приравнивал это тепло к теплоте химических превращений, происходящих в клетке. То же самое сделал и Томсон в 1851 году. В результате появилось правило Гельмгольца-Томсона:

*"Электродвижущая сила электрохимического аппарата в абсолютной мере равна механическому эквиваленту химического действия на один электрохимический эквивалент вещества".<sup>14</sup>*

Измерения химического тепла подтвердили правило Гельмгольца-Томсона в нескольких простых случаях, включая ячейку Даниэля.

Трудности в других случаях обычно объяснялись неучтенными вторичными процессами. В 1873 году Гельмгольц вернулся к гальванизму, чтобы разобраться с серьезной аномалией такого рода. В принципе, один элемент Даниэля не мог непрерывно электролизовать воду, поскольку химическая теплота образования эквивалента воды была выше, чем разница между теплотами сгорания эквивалентов цинка и меди. Там мог быть только временный ток поляризации. Однако уточненная гальванометрия показала наличие небольшого остаточного тока. Самым простым выходом было предположить нарушение закона Фарадея и небольшую металлическую проводимость электролита.

Вместо этого Гельмгольц предположил, что поляризация электродов постоянно разрушается по механизму, не связанному с производством свободного кислорода и водорода. В частности, он представил себе постоянный поток растворенного (нейтрального) кислорода от анода к катоду, и кислород, окклюдированный таким образом в платиновом катоде, соединяется с зарождающимся водородом. Он подтвердил эту точку зрения, откачав растворенные газы и искусственно введя снова водород или кислород.<sup>15</sup>

В уточненных экспериментах 1880 года Гельмгольц обнаружил, что остаточный ток никогда не исчезал полностью, даже когда количество растворенного газа было совсем незначительным. В 1877 году он столкнулся с другой аномалией того же рода при исследовании концентрации частиц. В этом случае два электрода были сделаны из одного и того же металла, и единственной асимметрией является разница в концентрации растворенного вещества на двух электродах. Сначала Гельмгольц считал, что за электрическую энергию ответственны химические силы между растворителем и растворителем. Однако, рассуждая термодинамически, он обнаружил, что ЭДС пропорциональна логарифму отношения концентраций. Следовательно, ЭДС не зависит от общей силы раствора и не может соответствовать химической теплоте растворения. Правило Гельмгольца-Томсона было нарушено.<sup>16</sup>

Эти замечания являются вероятной отправной точкой термохимии Гельмгольца. Немного позже Гиббса, но независимо от него, он понял, что развитие химических реакций и ЭДС гальванических элементов определяются "свободной энергией" предполагаемых химических веществ, а не их теплотами сгорания. Правило Гельмгольца-Томсона теперь казалось нарушенным из-за пренебрежения теплом, которым обменивается элемент с окружающей средой во время электролитического процесса. Однако энергетический принцип и закон Фарадея оставались непоколебимыми.<sup>17</sup>

<sup>14</sup> Helmholtz 1847: 46-57; Thomson 1851c: 477. См. Также Ostwald 1896: 749-766; Kragh 1993: 409-10.: 409-410.

<sup>15</sup> Helmholtz 1873a. См. Также Kragh 1993: 410-11. О проверках правила Гельмгольца-

Томсона см. Wiedemann 1882-1885, Vol. 2: 863- 873; Ostwald 1896: 766-791.

<sup>16</sup> Helmholtz 1883a, 1883b: 99-101; Helmholtz 1877, 1882b. См. также Kragh 1993: 412-14; Whittaker 1951: 341-3; Ostwald 1896: 978-83.

<sup>17</sup> Helmholtz 1882a, 1882b, 1883b. См. также Kragh 1993. О Гиббсе см. Klein 1972b.

### 7.2.3 Атомы электричества

В соответствии с более сильной программой в публикации о сохранении силы, Гельмгольц также пытался свести гальванические явления к игре центральных сил. В 1847 году он предположил, что *"различные химические вещества имеют различные силы притяжения для двух электричеств"*.

Это объясняет Вольтову контактную силу двух различных металлов: в них электричество находится в равновесии тогда и только тогда, когда разница их "свободных напряжений" (электростатических потенциалов) равна разнице кинетических энергий, которые получит единица электричества при входе в каждый металл. Гельмгольц предположил, что в электролитах разлагаемые молекулы имеют части, заряженные универсальным количеством электричества (наши ионы). Две пластины из разных металлов, соединенные проводником и погруженные в электролит, будут ориентировать и перераспределять эти части молекул под действием контактной силы Вольта.

Затем Гельмгольц выделил два случая.<sup>18</sup>

1. Если электрическая сила, действующая на молекулы, находящиеся рядом с электродами, была слишком мала, чтобы передать их электричество металлу (или наоборот), то постепенно достигалось состояние равновесия, и ток через некоторое время прекращался: так Гельмгольц интерпретировал электродную поляризацию.

2. В противном случае заряженные части нейтрализовались, и соответствующее химическое вещество освобождалось на электродах (или вызывало вторичную реакцию). Это могло продолжаться, если чистая энергия, полученная в результате этих двух нейтрализаций, отождествлявшихся Гельмгольцем с химической теплотой диссоциации, была положительной.

Главной задачей Гельмгольца было примирить контактную и химическую теории гальванического элемента. В его компромиссе электролитический ток запускался под действием контактной силы Вольта (между двумя металлами или между металлом и электролитом). Но энергия, необходимая для поддержания электролитического тока, обеспечивалась химическими реакциями на электродах, в соответствии со взглядами Дэви и Фарадея. В этом не было никакого противоречия, поскольку и химическая энергия, и эффект Вольта происходили от силы притяжения между химическими атомами и электричеством. В простом случае с ячейкой Даниэля химическая энергия и сила Вольта зависели от

различных притяжений электричества к меди и цинку. Следовательно, ЭДС ячейки должна была быть такой же, как и контактная сила Вольта (с противоположным знаком). Ключевым моментом было различие между двумя аспектами "силы": ускоряющей силой и тем, что мы сейчас называем энергией. Контактное напряжение относилось к первому аспекту, электрохимическое разложение - ко второму.

Хитроумные рассуждения Гельмгольца не смогли закрыть спор между контактными и химическими теоретиками. Большинство теоретиков-немцев выступали за одну из форм контактной теории, а большинство их британских коллег поддерживали чисто химическую теорию Фарадея. Однако в 1860-х годах Уильям Томсон нашел прямое доказательство существования контактной силы, наблюдая за отклонением сильно наэлектризованной иглы, помещенной под линией контакта полуколец из меди и цинка. Электрометрические измерения убедили его в том, что контактная разность потенциалов достаточна для объяснения ЭДС элемента Даниэля. С тех пор его взгляды на гальванические явления были схожи с взглядами его друга Гельмгольца.<sup>19</sup>

Максвелл не последовал за Томсоном. В своем *"Трактате"* он предложил новый аргумент против контактной теории. Он считал, вопреки термоэлектрической теории Томсона, что тепло Пельтье, развиваемое или поглощаемое на стыке двух различных металлов при пересечении их электрическим током, просто представляет собой работу, выполняемую этим током для преодоления контактной разности потенциалов на стыке. Это давало контактную силу в несколько микровольт, что было слишком мало для объяснения ЭДС в соответствующем гальваническом элементе. Хотя при жизни Максвелла его аргумент не привлек особого внимания, он стал предметом оживленной дискуссии между его сторонниками и сторонниками Томсона в 1880-х годах, так и не приведшей к согласию. Различия в системах Максвелла и Томсона были слишком фундаментальными: они касались самого определения электрического потенциала. Более того, любая попытка измерения последовательных потенциалов в гальванической цепи обязательно вводила новые интерфейсы с неизвестными контактными потенциалами.<sup>20</sup>

Между тем, Гельмгольц, по сути, сохранил свою картину гальванических процессов, в которой легко уживались представления Хитторфа и Клаузиуса о процессе электролитической проводимости. В большинстве своих работ по физике берлинского периода Гельмгольц полагался на организующую силу общих принципов и избегал обсуждения более глубокой природы электричества. Однако он оставался убежден, что на границе химии и физики атомистические соображения неизбежны. Около 1880 года он развил свою микроскопическую картину поляризации электродов концепцией двойного электрического слоя. В



этом представлении ток поляризации заключался в накоплении заряженных частей молекул возле каждого электрода, что приводило к образованию электрических двойных слоев молекулярной толщины. Эти двойные слои обеспечивали конечные скачки потенциала, которые уравнивали исходную разность потенциалов электродов. Они объясняли, почему поляризованные электроды ведут себя как конденсаторы чрезвычайно высокой емкости, что было известно еще Варли и Максвеллу. Они повлияли на многие другие явления, включая контактное электричество, электричество трения, течение электролитов через пористые мембраны и поверхностное натяжение ртутных электродов.<sup>21</sup>

С 1847 года примитивной сущностью электрохимии Гельмгольца был наэлектризованный атом, несущий универсальный квант заряда (или его целое кратное число). Гельмгольц публично подтвердил эту точку зрения в своей Фарадеевской лекции в 1881 году:<sup>22</sup>

*Если мы принимаем гипотезу о том, что элементарные вещества состоят из атомов, мы не можем не прийти к выводу, что как положительное, так и отрицательное электричество делится на определенные элементарные части, которые ведут себя подобно атомам электричества. Пока каждый ион движется в электролитической жидкости, он остается объединенным со своим электрическим эквивалентом или эквивалентами.*

В этот период Гельмгольц часто использовал слово "ион" в атомистическом смысле. Он не был первым - Хитторф уже сделал это в 1878 году, - а самым воинствующим: им был Аррениус. Использование этого слова ознаменовало более широкое признание наэлектризованных атомов и частей молекул.

В 1834 году Фарадей вскользь упомянул, как такое понятие может оправдать его закон электрохимической эквивалентности, но только для того, чтобы раскритиковать атомистические спекуляции. У Максвелла было другое отношение, как мы видели в главе 4. Когда он писал раздел своего **"Трактата"** об электролизе, он был соблазнен кинетической теорией электролитов Клаузиуса и не мог избежать вывода, что закон Фарадея, выраженный в терминах диссоциированных молекул Клаузиуса, требует постоянного значения молекулярных зарядов. "Для удобства описания" Максвелл назвал эту величину "одной молекулой электричества". Однако он считал эту фразу "грубой" и "не гармонирующей с остальной частью [его] трактата". Он надеялся, что истинная теория электрических токов изгонит молекулярные заряды.<sup>23</sup>

В 1881 году Гельмгольц не сомневался в превосходстве теории Максвелла над ее континентальными конкурентами. Однако он не до конца понимал ее, о чем и сообщил своей британской аудитории:

*"Признаюсь, я был бы не в состоянии объяснить без помощи математических*

*формул, что [Максвелл] считает количеством электричества, и почему это количество постоянно, как количество вещества".*

Гельмгольц оправдывал сохранение старой субстанциалистской терминологии хотя бы для удобства. Он считал, что теория Максвелла должна была включать понятие атомного заряда, чтобы объяснить законы электролиза. Авторитет Гельмгольца в то время был огромен как в Германии, так и в Англии. Его фарадеевская лекция вскоре стала каноническим пособием для всех занимающихся атомистической электродинамикой. Тем не менее, максвелловские физики с трудом усваивали "атомы электричества", как мы вскоре увидим.<sup>24</sup>

<sup>18</sup> Helmholtz 1847: 48-9. 56-7. См. также Kragh 1993: 409-10. Гельмгольц использовал выражение «сложный атом» для того, что мы называем молекулой.

<sup>19</sup> Thomson 1862. См. также Hong 1994a: 238-43. О продолжающемся противоречии между контактом и химической теорией см. Ostwald 1896: гл. 17: 909-913; Wiedemann 1882-1885, Vol. 2: 970-1002.

<sup>20</sup> Maxwell 1873a: # 249. Томсон интерпретирует конфликт, см. Томсон 1897. Для более глубокого восприятия истории см. Hong 1994a.

<sup>21</sup> Helmholtz, 1879. 1880, 1881г. О ртутных электродах см. Whittaker 1951: 340-1. Об эндосмосе, см. примечание 10 выше.

<sup>22</sup> Helmholtz 1881a: 69. В дальнейшем я использую выражение «электролитический квант» для обозначения атома электричества Гельмгольца (или «электрона» Стони) нейтральным образом. В своих лекциях Гельмгольц предпочитал выражение «elektrisches Elementarquantum» (см. Lenard 1920: 34).

<sup>23</sup> FER 1: # 869; Maxwell 1873a: № 260. Смотрите главу 4: с. 171.

<sup>24</sup> Helmholtz, 1881a: 60.

### **7. 3 Разряд в разреженных газах**

Электролиз был лишь одной из тем исследований, от которых Фарадей ожидал понимания природы электричества. Другой темой был электрический разряд в разреженных газах. По большей части историки исследовали последнюю тему лишь постольку, поскольку к ней относилось открытие электрона. В отличие от этого, данный раздел направлен на точное описание целей и ресурсов основных действующих лиц в этой области. Это подразумевает воскрешение экзотических эффектов и фантастических теорий, не имеющих ничего общего с современными исследованиями газового разряда. Однако без этого не могут быть поняты существенное сужение этой области около 1890 года и сопутствующий подъем ионной физики.

#### **7.3.1 Фарадей и немецкий друг**

В 1838 году Фарадей предсказал:

*"Результаты, связанные с различными условиями положительного и отрицательного разряда [в газах], окажут гораздо большее влияние на философию науки об электричестве, чем мы сейчас предполагаем, особенно если, как я полагаю, они зависят от особенностей и степени поляризованного состояния, которое приобретают молекулы диэлектриков".*

Сам он несколько месяцев изучал различные формы разряда чтобы

подтвердить свой общий взгляд о смежном действии. В одной серии экспериментов он изучал появление разряда от электростатической машины в вакуумированном сосуде и обнаружил то, что сейчас называется "темным пространством Фарадея", которое отделяет фиолетовую дымку "отрицательного (катодного) разряда" от красноватого света "положительного (анодного) разряда", когда давление воздуха меньше половины сантиметра ртутного столба (рис. 7.2).

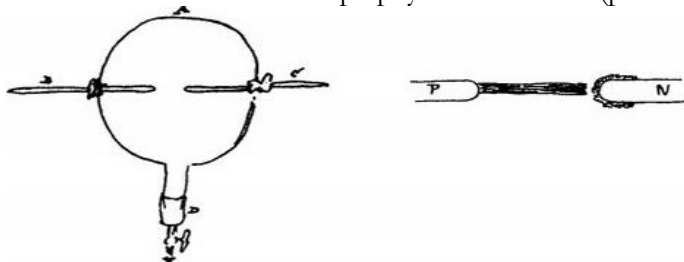


Рис. 7.2. Сосуд Фарадея для изучения электрического разряда в разреженном газе (FD 3: # 3114); и появление разряда (FD 3: # 3137).

Фарадей полагал, что обнаружил новый вид пробойного разряда, который мог бы больше рассказать о роли частиц диэлектрика в возникновении и распаде поляризации<sup>25</sup>.

И все же британские физики оставили красоты газового разряда просвещенным любителям, даже спустя долгое время после того, как Максвелл порекомендовал эту тему "тем, кто хочет узнать что-нибудь о природе электричества". Прогресс был медленным, в основном из-за зависимости разряда от многих факторов, среди которых были форма трубки, форма электродов, давление и характер остаточного газа, вид источника электричества и сила тока. Наблюдались странные, красивые закономерности, которые не обязательно подчинялись каким-либо простым законам. Типичными в этом отношении были полосы положительного (анодного) света, которые привлекли большое внимание после новаторского исследования Джона Питера Гассио, но породили столько же различных теорий, сколько было исследователей.<sup>26</sup>

Первыми навели некоторый порядок в физике газового разряда Юлиус Плюкер и его ученик Вильгельм Хитторф. Плюкеру помогли ртутный воздушный насос (1855) и исключительные навыки стеклодува Генриха Гайслера. Продолжая свои прежние исследования диамагнетизма, он изучал изменения свечения (рис. 7.3) и положительного (анодного) света под действием магнитного поля.

Разряд, заключил он в 1860 году, ведет себя

*"как пучок элементарных токов, которые под воздействием магнита изменяют свою форму, а также положение внутри трубки, согласно известным законам электромагнитного действия".*

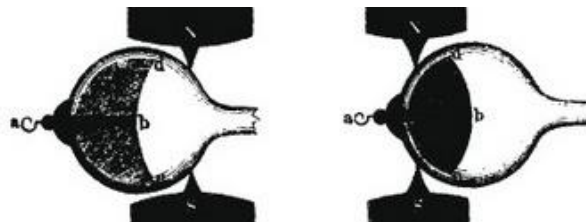


Рис. 7.3. Два наблюдения Плюккера за свечением в магнитном поле (Plücker 1858). Свечение резко ограничено линией силы  $cd$ , проходящей через кончик катода.

Например, если катод был в виде точки, отрицательное свечение превращалось в яркую линию света вдоль магнитной силовой линии, проходящей через эту точку, потому что это была единственная линия, вдоль которой ток не нарушался электромагнитными силами. Плюкер с гордостью объявил своему старому другу Фарадею, что он "осветил магнитные кривые". (Помните, что Фарадей использовал то же выражение в менее буквальном смысле, открыв магнитооптическое вращение).

Плюкер также заметил, что под воздействием разряда отрицательного заряда стекло трубки флуоресцирует. Он вообще полагал, что свет, производимый разрядом, был вторичным явлением:

*"Я считаю наиболее вероятным, что видимый нами свет производит не электрический разряд, а газ, нагретый тепловым действием тока".*

Что касается природы этого тока, Плюкер не осмеливался строить предположения. Он знал только, что ток подчиняется тем же электромагнитным законам, что и в других случаях проводимости, в соответствии со взглядами Фарадея о единстве электрического тока.<sup>27</sup>

<sup>25</sup> FER 1, серия 13 (февраль 1838 года): # 1523; там же: № 1544-1560; FD 3:# 3137 (21 июня 1836 г.). В эксперименте, описанном там же: # 3174 (25 июня 1836 г.), Фарадей использовал наименьшее давление, которое он мог получить с помощью насоса («менее 0,4 дюйма»); темное пространство было тогда около 1/16 дюйма в ширину. См. также Whittaker 1951: 349- 350; Hiebert 1995: 95-97.

<sup>26</sup> Maxwell 1873a: #56. См. также Hiebert 1995: 97-100 для описания исследований Уильяма Гроува (адвокат по образованию) и Гассио (торговец вином). Для некоторых теорий полосчатости см. Wiedemann 1882-1885, Vol. 4: 581-584.

<sup>27</sup> Plucker 1858, 1859, 1860: 256, 269. См. также Whittaker, 1951: 350-351; Hiebert 1995: 102-117; Dahl 1997: 49-55. О Гайслере см. Kangro 1972. Насос Гайслера снизил давление до доли миллиметра.

### 7.3.2. Светящаяся область Хитторфа

Примерно десять лет спустя Хитторф сосредоточил внимание на сиянии (*Glimmlicht*) вокруг катода. При достаточном разрежении (ниже 2 мм. Рт. столба) сияющий свет, казалось, состоял из трех слоев: тонкий слой у поверхности катода, затем сравнительно темное пространство (названное англичанами "пространством Крукса"), увеличивающееся с ростом степени разрежения, и, наконец, светящееся пространство,

постепенно исчезающее в темном пространстве Фарадея (рис. 7.4).

Экспериментируя с L-образной трубкой, Хитторф с удивлением обнаружил, что отрицательное свечение, в отличие от положительного света, не может пройти кривую L. Он сделал вывод, что свечение состоит из лучей (*Glimmstrahlen*). В соответствии с этой точкой зрения он обнаружил, что твердые предметы, помещенные между точечным катодом и стенками флуоресцирующего стекла, способны отбрасывать четко очерченные тени.<sup>28</sup>

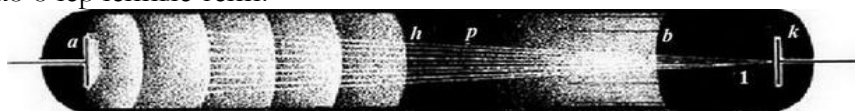


Рис. 7.4. Общий вид разряда в разреженном газе (из Е. Wiedemann, 1883).

*k* - катод, окруженный тонким светящимся слоем;

*kb* - темное пространство Хитторфа-Крукса;

*bp* - сияющий свет;

*ph* - темное пространство Фарадея;

*ba* - полосатый позитивный свет;

*a* - анод;

1 - пучок в основном невидимых катодных лучей (в 1869 году Хитторф не знал, что эти лучи могут проникать сквозь положительный свет).

Затем Хитторф изменил форму и расположение электродов в своих трубках, чтобы пропорции двух видов света были разными. Сравнивая токи в двух разнородных трубках при параллельном питании от одного и того же источника, он обнаружил, что сопротивление сияющего света прохождению тока намного выше, чем у положительного света. Это свойство, способность возбуждать флуоресценцию и распространение в лучах делали сияющий свет очень своеобразным явлением. Тем не менее, Хитторф нашел две причины считать, что свечение было процессом, посредством которого газ передавал электрический ток вблизи катода.

Во-первых, приблизив анод к катоду, он заметил, что сияющий свет сопротивляется проникновению положительного света (рис. 7.5).

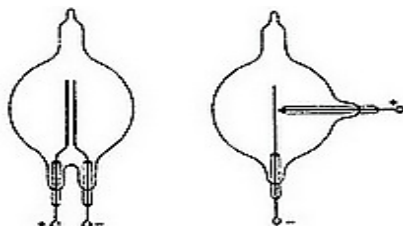


Рис. 7.5. Трубки Хитторфа для демонстрации непроницаемости сияющего света (Hittorf, 1869).

Более решительно он показал, что лучи свечения были изогнуты магнитом так же, как и линии тока (рис. 7.6).

Он заключил, что в электрическом разряде участвуют два способа

распространения электричества. Первый способ, соответствующий положительному свету, был сродни металлической или электролитической проводимости. Второй, соответствующий сияющему свету, был характерен для газов и поэтому заслуживал особого внимания.



Рис. 7.6. Спиральное вращение лучей света накалившия в магнитном поле (Hittorf, 1869). Стекла́нная труба действует как коллима́тор на катодном конце

Светящиеся лучи, добавил Хитторф, предполагали передачу электричества путем волнового движения, начинающегося у катода. Возможно, они раскроют сущность электрического тока и избавят физику от последних непреодолимых препятствий.<sup>29</sup>

В своих поздних работах Хитторф обильно цитировал взгляды Фарадея на заряд, ток и поляризацию как основу, в которой развивались его мысли об электрическом разряде. Однако он избегал дальнейших спекуляций в соответствии со своим обычным эмпиризмом. Его главной целью было закрепить факт асимметрии между свечением и положительным разрядом. В 1879 году он показал, что газ при положительном свечении способен разряжать очень малую разность потенциалов между дополнительной парой электродов (рис. 7.7).

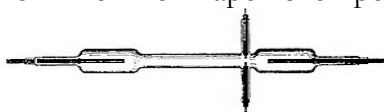


Рис. 7.7. Трубка Хитторфа для отображения поперечной проводимости (Hittorf 1879).

Кроме того, количественное исследование сопротивления остаточного газа в различных частях трубки требовало, непрерывного разряда. Вопреки общепринятому мнению, Хитторф показал, что непрерывный разряд можно получить с помощью батарей из многих элементов, если внутреннее сопротивление батареи достаточно мало.



Рис. 7.8. Трубка Хиттона для измерения падения потенциала (Hitton 1883).

В 1883 году он измерил потенциалы в различных точках непрерывного разряда благодаря вторичным электродам вдоль трубки (рис. 7.8). и обнаружил резкое падение потенциала в отрицательном разряде,

что соответствовало его предыдущим измерениям сопротивления тогда как падение потенциала в положительном разряде мало зависело от силы тока. Другими словами, проводимость остаточного газа линейно увеличивалась с ростом тока. Этот закон прекрасно иллюстрирует необыкновенный талант Хиттона извлекать простые количественные законы из сложных явлений.<sup>30</sup>

<sup>28</sup> Hittorf 1869a: 1-10. См. также Whittaker 1951: 351; Hiebert 1995: 117-24; Dahl 1997: 55-56

<sup>29</sup> Hittorf 1869: 222-223. См. также Hiebert 1995: 119. Спиральное движение катодных лучей в магнитном поле не следует путать с освещением Плюккером магнитных силовых линий, которое касалось более яркой части свечения

<sup>30</sup> Hittorf 1879: 553-596 (непрерывность разряда батареей), 597-599 и 609-10 (о Фарадее), 614-7 (поперечная проводимость); Hittorf 1883: 726, 729. См. также Schuster 1911: 57-58.

### **7.3.4 Корпускулярная теория разряда**

Физики довольно медленно признавали важность работы Хиттона по газовому разряду, как и его работы по электролизу. Когда в 1871 году Густав Видеман и Рихард Ртильман предложили первую обобщенную теорию газового разряда, они не обратили внимания на эксперименты Хитторфа. Их интересовал разряд при умеренном или высоком давлении и с хорошо известной асимметрией между "+" и "-" разрядом. В веберовском стиле они предположили, что частицы "+" электричества или положительно заряженные молекулы газа вылетают из анода, а отрицательные - из катода. При этом электрические частицы перескакивали с молекулы на молекулу, или заряженные молекулы обменивались зарядом и движением с другими молекулами при столкновениях. Свет излучался всякий раз, когда скорости заряженных молекул достигали порога теплового излучения. Сила излучения от электрода зависела от сродства каждого электричества к металлу электрода и поэтому могла быть асимметричной. Эта уловка объясняет разный порог напряжения для положительного и отрицательного разряда, а также меньшую длительность отрицательного разряда. Темное пространство Фарадея соответствовало нейтрализации двух электричеств. Ничего не было сказано о новых фактах Хитторфа при более низких давлениях.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> G. Wiedemann and Rühlmann 1872. См. также Wiedemann 1882-1885, Vol. 4: 576-80. В том же году Кромвель Варли предположил, что отрицательное свечение состоит из "ослабленных частиц вещества, спроецированных с отрицательного полюса" (Varley 1871: 239). Его единственными аргументами были влияние магнита на свечение и способность свечения отталкивать подвешенное шелковое волокно. Он не предложил всеобъемлющей теории разряда.

### **7.3.5 Гольдштейновский разделенный разряд**

В 1874 году один из учеников Гельмгольца, Ойген Гольдштейн, занялся изучением новых лучей Хитторфа, которые он назвал "катодными лучами" (Kathodenstrahlen) или "отрицательными лучами".

Он заметил, что лучи, испускаемые плоским, вытянутым катодом, способны отбрасывать четкие тени. Это указывало на то, что излучение было нормальным к поверхности катода. Гольдштейн согласился с Хитторфом, что лучи представляют собой особый вид тока, на что указывает их магнитное отклонение. Но он отверг идею о том, что положительный разряд и отрицательное свечение представляют собой принципиально разные проводимости тока, полагая, что отрицательный свет и последующие слои положительного света были одного вида. Каждый слой включал в себя пучок лучей, начинающийся с его передней части, и мог демонстрировать те же эффекты магнитного отклонения, отбрасывания тени и флуоресценции, что и сияющий свет. Различный внешний вид последовательных слоев был лишь вопросом степени, и его можно было изменять по желанию, играя с формой и давлением разрядной трубки. Самое поразительное, что сужение сечения трубки восстанавливало появление негативного света, как будто в этом месте создавался новый катод (рис. 7.9).<sup>32</sup>

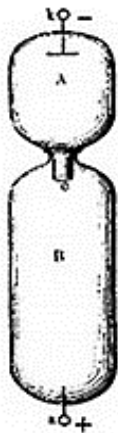


Рис. 7.9. Воронка Гольдштейна.

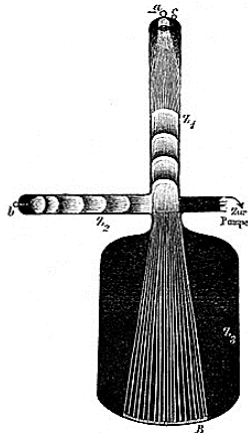


Рис. 7.10. Трубка Гольдштейна для демонстрации взаимной независимости различных слоев разряда (Goldstein 1880a). Лучи из пятого слоя направляются прямо во флуоресцентный экран В, даже, если анод находится в перпендикулярном направлении.

В 1878 году Гольдштейн уточнял свое представление о множественных подобных разрядах посредством мысленного анализа пути тока в трубках различных извилистых форм (рис. 7.10).

Если отрицательные лучи представляли собой электрический ток, и если эти лучи не распространялись в направлении анода, трудно было представить обратный ток; не наблюдалось никакого эффекта такого тока. Гольдштейн сделал решительный вывод: обратного тока вообще не было, каждый слой разряда составлял независимую систему тока, и ток не циркулировал вообще в темных пространствах между последовательными



слоями. Это понятие незамкнутых токов без компенсаторного накопления заряда противоречило как континентальной, так и максвелловской теории электричества. Это не беспокоило Гольдштейна, который больше верил в свои трубы, чем в устоявшиеся догмы.<sup>33</sup>

<sup>32</sup> Goldstein 1876: 284-5 (нормальное излучение катодных лучей), 286 (Kathodenstrahlen); 291 (сокращение секции трубы, «Aufeinanderfoge von Complexen negativen Lichtes»). Самым известным открытием Гольдштейна является открытие «лучей канала», которые появляются в катоде, когда через него пробивается отверстие (Goldstein, 1886). В Англии Spottiswoode и Moulton 1880 и 1881 также подчеркивали относительную независимость последовательных слоев разряда, особенно в отношении действия магнита.

<sup>33</sup> Goldstein 1880a (от 1878): 840-6 (проблема обратных токов); 846-7 (независимые токовые системы), 855 (открытые токи). См. также Buchwald 1994: 135-7. Для современной критики, см. G. Wiedemann 1882-1885, Vol. 4: 190. В той же сборнике (стр. 832-838) Гольдштейн показал, что фосфорогенные лучи (свет очень короткой длины волны) генерировались в конце катодных лучей. Однако он наблюдал эти лучи только внутри трубки и считал, что они не могут проходить через сплошные пленки (с. 838).

### 7.3.6 Крукс. Четвертое состояние вещества

В том же году газовым разрядом занялся английский экспериментатор Уильям Крукс. Проработав несколько лет над радиометром, он был мастером в использовании навыков вакуумной откачки и выдувания стекла своего друга Чарльза Гимингема. Будучи обращенным к кинетико-теоретическому объяснению радиометра, он попытался визуализировать кинетические давления, превратив мельницу радиометра в катод. Этот своеобразный контекст исследований Крукса в области разряда сразу же объясняет, почему он работал с более высокими вакуумами, чем немцы (достигая миллионной доли атмосферы!), и сосредоточился на молекулярных движениях. С помощью искусно сконструированных газоразрядных трубок и превосходного ртутного насоса он заново открыл лучи негативного света, их способность вызывать флуоресценцию, их нормальную эмиссию с катода и их магнитное отклонение.<sup>34</sup>



a



b



c

Рис. 7.11. Эксперименты Крукса подтверждают его метательную теорию катодных лучей. (Crookes 1879a)

С помощью и поддержкой Джорджа Стокса Крукс интерпретировал лучи как поток заряженных молекул, спроецированных с катода, как будто при выстреле. Излучение света зависело от столкновений заряженных молекул с другими молекулами или со стеклом трубки. Первое темное пространство соответствовало свободному полету заряженных молекул до их первых столкновений с другими молекулами. В качестве дополнительной поддержки этих представлений Крукс привел электромагнитное объяснение Стокса электромагнитного отклонения, резких границ теней - отсутствие дифракции (рис. 7.11a), отталкивание двух пучков лучей (рис. 7.11b) и движение легких объектов под воздействием лучей (рис. 7.11c).

В знак преданности Фарадею он объявил свои результаты "освещением линий молекулярных сил". Под такими линиями он подразумевал прямые траектории молекул в сильно разреженном газе, когда внутримолекулярные столкновения стали маловероятными. Это "ультрагазовое" состояние вещества, как он его называл, отвечало его вкусу к оккультизму и позволяло ему похвастаться крупным открытием.<sup>35</sup>

Публикация Крукса вызвала раздражение у немецких экспертов по газовому разряду. Будучи знакомыми с большинством описанных эффектов, они были шокированы почти полным отсутствием ссылок на работы Хитторфа и Гольдштейна и решительно возражали против интерпретации катодных лучей как молекулярного потока. Хитторф пересмотрел свое согласие с Фарадеем в том, что в темном пространстве происходит истинный разрушительный разряд без электрической конвекции. Гольдштейн отметил, что теория Крукса не смогла объяснить первый слой свечения Хитторфа, остаточную светимость второго слоя (темное пространство Крукса), прямолинейное распространение лучей в третьем слое и их способность выходить далеко за пределы отрицательного свечения. Он также обнаружил, что темное пространство намного толще, чем длина свободного пробега молекул и гораздо более резко очерчено, чем предполагает объяснение Крукса.<sup>36</sup>

Даже Видеманн, соавтор ведущей корпускулярной теории газового разряда, не признавал взгляды Крукса. Его сын Эйлхард убедил его отказаться от любой теории, которая превращала ток разряда в конвекцию заряженных молекул. Аргумент был основан на недавнем открытии В. фон Цана, что линии спектра разряда не проявляют никакого измеримого эффекта Доплера. Это означало, что скорость светящихся молекул должна была быть менее 1 км/ч, тогда как скорость газового разряда, известная со времени измерения вращающегося зеркала Уитстона в 1835 году, превышала 1000 км/с. К этому противоречиво молекулярной теории разряда Эйлхард Видеманн добавил особое возражение против интерпретации Круксом катодных лучей. Он утверждал, что, если эти лучи состоят из молекул, их скорость должна

превышать 100 км/с, чтобы объяснить тепло, выделяемое при их ударе о стенки трубки. Но такая высокая скорость противоречила отсутствию эффекта Доплера в светящемся газе.<sup>37</sup>

<sup>34</sup> Crookes 1879a, 1879b. О британских исследованиях газовых разрядов в этот период, см. Gordon 1880, Vol. 2: главы. 34-37

<sup>35</sup> Crookes 1879a: 58 (катодная мельница), 60-62 (доказательства молекулярной теории), 62 («выстрелы из оружия»), 64 (четвертое состояние); Crookes 1879b: 142-144 Crookes 1879b: 142-4 (измерения давления и темного пространства), 142 (объяснение темного пространства); Stokes [1876] для магнитного отклонения в терминах макроскопических элементов тока, подчиненных электромагнитной силе и механическому напряжению (для веберовского вывода, см. Riecke 1881). См. также Dahl 1997: 64-77. Об обмене Стокса-Крукса см. Stokes 1907, Vol. 2: 410-421; Wilson 1987: 191-201. О биографиях и спиритизме Крукса, см. Brock 1971.

<sup>36</sup> Crookes 1879b: 163n за сдержанную ссылку на Goldstein 1876 (которую Schuster перевел для *PM*); Hittorf 1879: 607-608 (со ссылкой на FER I: # 1551); Гольдштейн 1881a: 90-1.

<sup>37</sup> G. Wiedemann 1882-1885, Vol. 4: 580-1; E. Wiedemann 1880: 245-6 (отсутствие эффекта Доплера); 252 (нагрев стенок трубок); Zahn 1879, также Tait 1880. Критика Э. Видемана была также направлена против таких физиков, как Johann Puluĳ and Wilhelm Gintl, которые полагали, что катодные лучи состояли из частиц металла катода (см. G. Wiedemann, 1882-1885, т. 4): 586-587).

### 7.3.7 Немецкие волны

Высказывания Крукса побудили немцев опубликовать альтернативные механизмы газового разряда. Эйльхард Видеманн представил первую всеобъемлющую теорию, основанную на эфире. Поскольку ток разряда не является конвекцией заряженных молекул, рассуждал он, это может быть только поляризационный ток, включающий как эфир, так и молекулы. Рассуждая в свободных максвелловских терминах, он предположил, что электричество или "свободный эфир", накопленный на поверхности электродов, вызывает диэлектрическую поляризацию газа, то есть деформацию "эфирных оболочек" молекул. Во время разряда на электродах возникали продольные волны поляризации, которые приводили эфирные оболочки молекул в светогенерирующие колебания. Таким образом Видеман объяснил высокую скорость разряда, а также свой главный экспериментальный вывод: светимость разреженного газа не является следствием нагрева. Он также предложил причину диссиметрии отрицательного и положительного разряда: в то время как первый в основном зависел от волны поляризации, второй также включал перенос свободного эфира от молекулы к молекуле. В этой схеме катодные лучи представляли собой чистую поляризационную волну, первая волновая поверхность которой отражала форму катода.<sup>38</sup>

Гольдштейн также имел в виду эфирные процессы, но другого рода. Для Видеманна молекулы играли существенную роль в формировании поляризации, которая предшествовала разрядному току. Гольдштейн,

напротив, предполагал наличие напряжения в свободном эфире и рассматривал молекулы как ингибиторы этого напряжения. Он обосновал эту странную, антимаксвелловскую точку зрения с помощью новых измерений сопротивления различных частей разряда. Помещая искровой микрометр параллельно трубкам и изменяя длину различных частей разряда, он обнаружил, что когда давление было достаточно низким, единственным сопротивлением оставалось поверхностное явление на катоде. Это противоречило предыдущим результатам Хитторфа, которые указывали на высокое сопротивление отрицательного свечения при низком давлении. Вопреки общепринятому мнению, Гольдштейн сделал вывод, что вакуум является идеальным проводником.<sup>39</sup>

Основываясь на этой концепции, Гольдштейн представил общую теорию разрядной трубки. Во-первых, в разрядной трубке должно было возникнуть неравномерное напряжение эфира. Если давление газа было не слишком высоким, то напряжение превышало порог разрыва на ряде поверхностей, которые можно отождествить с фронтами различных слоев разряда. Со стороны этих поверхностей, противоположной катоду, исходили отрицательные лучи, вызывающие светящиеся эффекты в соседнем газе, с переменным аспектом в зависимости от исходного распределения напряжения. Последовательные темные промежутки обозначали области, в которых не было напряжения и, следовательно, движения эфира (если только давление газа не было достаточно низким, чтобы позволить проникновение лучей из предыдущего фронта слоя).

Читатели Гольдштейна, как в Германии, так и в Англии, недоумевали, как он мог объявить вакуум идеальным проводником и при этом отрицать существование тока в темных пространствах. Очевидно, концепция проводимости Гольдштейна была менее светлой, чем его трубки.

<sup>38</sup> E. Wiedemann 1880: 246-251 и 1879 (для излучения холодного света).

### **7.3.8 Отделение катодных лучей от тока разряда**

Разгоревшиеся споры о приоритетах и интерпретации, делали газовый разряд горячей темой. В 1882 году звездный ученик Гельмгольца, Г. Герц, задался целью было проверить: следует ли ток в отрицательном разряде по пути катодных лучей, как предполагали Хитторф, Гольдштейн, Крукс и Видеманны. Возможно, его сомнения возникли из-за визуального доказательства Гольдштейна (рис. 7.10), что никакой обратный ток не соответствует катодным лучам. Чтобы решить этот вопрос, Герц с помощью подвешенной магнитной иглы измерил и нанес на карту магнитную силу, создаваемую плоским разрядом. Если катодные лучи не оказывали эффекта на магнит, (что Герц тщательно проверял), то из этой карты можно было вычислить линии тока. Герц обнаружил, что они не следуют за катодными лучами (рис. 7.12).

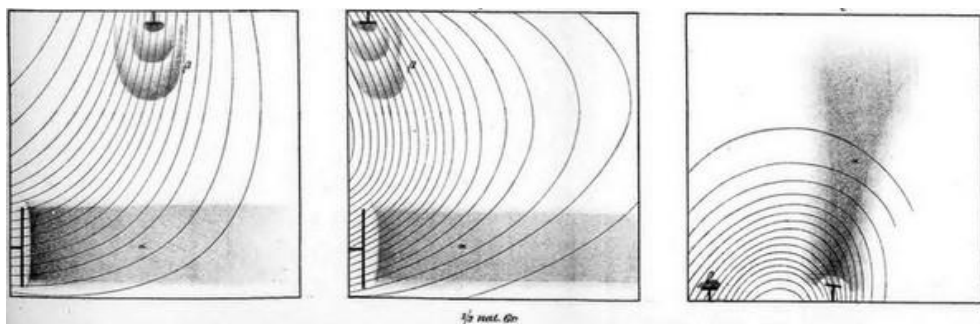
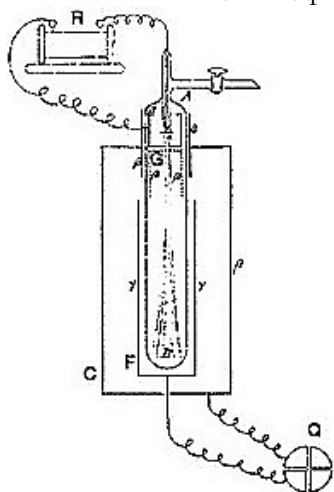


Рис. 7.12. Карты токов (Hertz 1883) для разряда в слое разреженного газа  $\beta$  - полосатый положительный (анодный) свет,  $\alpha$  - синий катодный свет

Герц счел неправдоподобным объяснением то, что на токи катодных лучей накладывались токи другой природы, даже при отрицательном свечении. и предположил, что лучи - это побочное явление, возмущение эфира, имеющее мало общего с собственно электрическим разрядом. Гельмгольц согласился и предложил связь с продольными волнами, которую допускала его электродинамика (при ненулевом  $k$ ). Герц добавил, что магнитное отклонение лучей, возможно, можно объяснить по аналогии с эффектом Фарадея: повороту поляризации для поперечной оптической волны может соответствовать отклонение продольной волны в той же среде.<sup>40</sup>

Для подтверждения своих взглядов Герц проверил отсутствие электростатического воздействия лучей двумя различными способами.

1. Он попытался показать, что катодные лучи не смогли вызвать заряды в металлическом цилиндре, подключенном к электromетру (рис. 7.13).



$AB$  - стеклянная трубка  $\varnothing 25$  мм;  $l=250$  мм в которой генерировался пучок,

$R$  - катушка Румкорфа;

$G$  - "очищенные" катодные лучи;

$F$  - цилиндр Фарадея;

$C$  - клетка Фарадея;

$Q$  - квадрантный электрометр;

$\alpha$  - катод;

$\beta$  - анод, состоящий из хорошо соединенных друг с другом частей внутри стеклянной трубки  $AB$ ;

$\gamma$  потенциал цилиндра Фарадея.

Рис.7.13. Аппарат Герца для обнаружения заряда катодных лучей (Герц 1883).

2. Он пропустил лучи между двумя наэлектризованными пластинами и

не обнаружил отклонения.

Эти эксперименты были спорными. В действительности в первом опыте Герц наблюдал индуцированный заряд, но приписывал его неполной "очистке лучей". Что касается эксперимента по отклонению, то Герц знал от Хитторфа, что газ, подвергнутый разряду, становится хорошим проводником, но не вполне осознавал, что этот эффект может препятствовать установлению электрической силы между отклоняющимися пластинами. По крайней мере, он признал, что эти два электростатических эксперимента были «несовершенными» и не имели большого значения в последующих обсуждениях катодных лучей.<sup>41</sup>

Карта разрядного тока Герца оказала большее влияние. Эйльхара Видеманн немедленно модифицировал свою теорию и заявил, что катодные лучи *"не могут принимать сколько-нибудь существенного участия в образовании тока и в передаче электричества"*.

В то время как последний процесс определялся продольными волнами диэлектрической поляризации, то катодные лучи представляли собой не что иное, как «лучи света с очень малым периодом колебаний». Видеманн даже утверждал, что наблюдал отражение этого "света" на стенках трубки. В отличие от Герца, он имел в виду истинный свет, с поперечными колебаниями. Так он объяснил, почему лучи "мешали" продольным волнам разряда только тогда, когда пересекали их под прямым углом. Взаимное отталкивание двух лучей и их магнитное отклонение были более проблематичными. Видеманн предварительно отнес первый эффект к максвелловскому давлению излучения, а второй — к аналогии Герца с эффектом Фарадея.<sup>42</sup>

Публикация взглядов Гольдштейна и Видемана означала резкий контраст между взглядами немецкими и британскими взглядами на Германию и Великобританию на разряд в газе. В Англии проекции заряженных молекул Крукса легли в основу нескольких исследований разряда. В Германии эфирные процессы были существенной частью разряда либо в форме диэлектрической поляризации (Видеманн), либо в форме вакуумной проводимости (Гольдштейн). Как ни парадоксально, британский взгляд (Крукса) был наименее максвелловским или фарадеевским, а немецкий (видемановский) — наоборот. Принципиально новое понимание этой области дал Артур Шустер.<sup>43</sup>

<sup>39</sup> Goldstein 1880b: 189; 1881 b: 257-60. 266. Edlund 1882 предложил аналогичные взгляды в связи с его эфирной теорией 1872 г.

<sup>40</sup> Hertz 1883: часть 2. . Helmholtz to Hertz 29 июля 1883 года, в Кенигсбергер 1902, Vol. 2: 305; Hertz to Helmholtz, ответ на предыдущее, там же. См Buchwald 1995, 1994: 150-157, 171-174, для подробного обсуждения.

<sup>41</sup> Hertz 1883: часть 3. Описание этих экспериментов см. в Hon 1987; их понимание Герцем см. в Buchwald 1994: 158-163, 166-169; ; Lenard 1920: 80 для *a posteriori* объяснения их неудачи. G. Wiedemann 1882-85. Том 4: 436-437 обобщил результаты Герца. Однако их обычно игнорировали или отвергали. Гольдштейн наблюдал

отклонение лучей катода при прохождении рядом с другим катодом (Goldstein 1876: 285; см. также Wiedemann 1882-85. Vol. 4: 425-429). Он объяснил этот эффект переменным показателем преломления среды вблизи катода для катодных волн (Goldstein 1880b)

<sup>42</sup> E. Wiedemann 1883, 1884: 85, 86, 88-89. Э. Видеманн также использовал (там же: 85) собственное открытие, что экранирование катодных лучей слюдяной пластинкой не влияли на общий ток в трубке (E. Wiedemann 1880).

<sup>43</sup> Переводы основных работ Гольдштейна и Э. Видемана появились в РМ. Основными английскими исследованиями разряда после Крукса были исследования двух талантливых любителей, Уильяма Споттисвуда и Джона Моултона: см. J. J. Thomson 1893a: 129-131, 141.

## 7.4 Газообразные ионы

### 7.4.1 Революция Шустерса

Артур Шустер родился во Франкфурте в 1851 году, в 19 лет последовал за своей семьей в Англию, посещал Оуэнс-колледж в Манчестере и уехал, чтобы завершить свое образование под руководством Кирхгофа, Вебера, Гельмгольца и Максвелла. Оуэнс-колледж предложил ему кафедру прикладной математики в 1880 году и кафедру физики в 1887 году. Он был в равной степени знаком с *"Трактатом"* Максвелла и электрическими теориями Вебера и Гельмгольца. Его британский наставник, Генри Роско, предложил ему первую тему для исследований: спектроскопию. Это предполагало частое использование трубок Гейслера в качестве спектральных источников. Через некоторое время Шустер решил самостоятельно изучить разряд. Это произошло в 1882 году, вскоре после ажиотажа, вызванного в Германии Бейкерской лекцией Крукса, и всего через несколько месяцев после Фарадеевской лекции Гельмгольца. Первоначально Шустер отдавал предпочтение теории Крукса, хотя механизм вылета молекул из катода оставался неясным.<sup>44</sup>

В 1883 году Шустера "поразили" эксперименты Люсьена Блейка в лаборатории Гельмгольца: пар ртути при очень высоком электрическом потенциале оказался совершенно неэлектризованным. Это делало зарядку молекул в разрядных трубках невозможной. Шустер предположил, что *"прохождение электричества от одной молекулы к другой [всегда] сопровождается обменом атомов, составляющих молекулы"*.

В частности, он представил себе расщепление молекул на заряженные части на катоде, за которым следует электрическое отталкивание "-" частиц, их свободный полет через темное пространство и свечение генерируемое при столкновении. Зная возражения Э. Видеманна против Крукса (основанные на эффекте Доплера), Шустер уточнил, что излучение света происходит только после того, как энергия быстрых частиц из катода изотропно перераспределяется между частицами свечения.<sup>45</sup>

Для дальнейшего объяснения процесса распада Шустер опирался на систематическую аналогию с теорией электролиза Гельмгольца и на

недавние измерения потенциала Хитторфом. Падение потенциала при отрицательном свечении, по его мнению, указывало на существование гельмгольцевского двойного слоя электричества, с отрицательным электричеством на катоде и скопление положительных частиц в свечении. Сильное электрическое поле в этом пространстве вместе с химическими силами, оказываемыми положительными частицами, было ответственно за расщепление молекул. Одним из отличий от электролиза был макроскопический размер двойного слоя, который Шустер объяснил лакунарной структурой газа. Более важным отличием было отсутствие разложения перед разрядом. По мнению Шустера, начальная искра создавала начальный запас разложившихся молекул, необходимых для образования двойного слоя. Он также предположил, что ЭДС контакта между газом и электродами может объяснить, почему разложение преобладает на катоде. Наконец, он дал предвестие своего будущего объяснения полос положительного (анодного) света в терминах переменных скоростей разложения и рекомпозиции молекул вдоль газа.<sup>46</sup>

В поддержку своей электролитической концепции Шустер привел широкий спектр свойств разряда. Воспользовавшись своей предыдущей специальностью, он предоставил спектроскопические доказательства разложения вблизи катода. Он также сослался на доказательство Уоррена де ла Рю и Хьюго Мюллера о нетепловом расширении газа под действием разряда. Он показал, что в якобы одноатомном газе - парах ртути - разряд был труднопроходимым и однородным. Развивая старые эксперименты Хитторфа о влиянии анода на свечение, ему удалось оттолкнуть свечение с помощью положительного электрода в соответствии с накоплением положительных частиц в этой области. Из Хитторфа он также смог объяснить высокую поперечную проводимость газа под разрядом и тот факт, что проводимость положительного столба линейно увеличивалась с силой тока: проводимость зависела от числа диссоциированных молекул, а это число, естественно, увеличивалось с ростом тока разряда.<sup>47</sup>

Для Шустера лучшим доказательством электролитической теории была бы демонстрация того, что частицы разложившихся молекул несут одинаковый заряд: "атом электричества" Гельмгольца. Он надеялся вывести значение  $e/M$ , отношение заряда к массе, из магнитного отклонения катодных лучей и из их скорости. Ему это удалось только в 1890 году. Даже тогда он смог дать лишь широкую скобку для этого значения. Основная трудность заключалась в определении скорости частиц. Шустер измерил разность потенциалов  $V$  между катодом и мембраной, из которой исходил искривленный магнитом луч. По его мнению, если частицы проходят через эту разность потенциалов без потери энергии, то их скорость  $v$  будет определяться как  $2Ve = Mv^2$ , где  $M$  - масса иона. Это соотношение, вместе с формулой  $Mv^2/R = evB$  для



радиуса кривизны  $R$  в магнитном поле  $B$ , дает  $e/M = 2V/B^2R^2$ . Применяв свои измерения  $R$  и  $V$ , Шустер обнаружил значение, в 1000 раз превышающее ожидаемое для ионов остаточного газа. Он заключил, что перед входом в мембрану ионы замедлялись столкновениями. Приняв за  $v$  тепловую скорость газа, он восстановил электролитическое значение  $e/M$ .<sup>48</sup>

<sup>44</sup> см. Kargon 1975; Feffer 1989: 34-38; Dahl 1997: 92-99.

<sup>45</sup> Schuster 1884: 318 (цитаты), 331 (отсутствие эффекта Доплера); Blake 1883. См. также Feffer 1989: 40-41. Другим источником вдохновения Шустера было убеждение его друга Нормана Локьера, что сложные спектры зависят от молекулярной диссоциации: см. Brock 1969, и Feffer 1989: 40.

<sup>46</sup> Schuster 1884: 326-30 (двухслойный), 329 (асимметрия), 336 (страты). См. также Whittaker 1951: 355-356; Heilbron 1965: 62. Шустер еще не называл заряженные атомы «ионами». На собрании БА в 1885 году Шустер раскритиковал доклад Лоджа об электролизе (Lodge 1885b) за недооценку свидетельств Хилтона и Колрауша в пользу независимой миграции ионов (см. выше, стр. 309, 310); он также объяснил взгляды Гельмгольца и их влияние на расход газа (Schuster 1885; ср. Feffer 1969: 46).

<sup>47</sup> Schuster 1884: 319 (Hg), 322 (спектр), 323 (де ла Рю), 326 (отраженный свет), 335 (закон Хитторфа). См. также Feffer 1989: 41. Schuster 1887 модифицировал эксперименты Хитторфа по поперечной проводимости, разместив вторичные электроды вдали от разряда (чтобы исключить тепловые эффекты). Разряд в парах ртути имеет большое темное пространство, которое, однако, не было видно в узких трубках Шустера (см. Schuster 1911: 61-62). В 1893 году Франц Стенгер из Дрездена предположил, что проводимость в этом одноатомном паре включала «диссоциацию более высокого порядка», при которой атомы разделялись на более мелкие части (Stenger, 1893: 379).

<sup>48</sup> Schuster 1884: 332; 1890: 545-547. См. также Schuster 1911: 65-67. Heilbron 1964: 63; Feffer 1989: 41-42, 48-49. Для давления в трубе Шустера 0,3 мм, ширина темного пространства около 1 см в воздухе (Шустер использовал азот). Экспериментальные трудности Шустера, по-видимому, зависели от двух противоречивых требований: он хотел определить скорость по ускоряющему потенциалу, и в то же время он хотел, чтобы лучи были видны (через флуоресценцию остаточного газа). В более успешных измерениях Вихерт и Дж.Томсон отказались от обоих требований и использовали гораздо более низкие давления.

#### 7.4.2. Гельмголец против Максвелла

Исследования Шустера стали предметом двух Бекеровских лекций, прочитанных в 1884 и 1890 годах. В то же время он с удовольствием наблюдал, что электролитический взгляд на проводимость в газах достиг большого прогресса в Германии. Инициатором этого движения был бывший ассистент Гельмгольца Вильгельм Гизе. Путем тщательных электрических измерений, опубликованных в 1882 году, Гизе установил нарушения закона Ома для проводимости горячих газов и объяснил их наличием "ионов". Нагревание газа создавало ограниченное количество ионов, которые переносились к электродам под действием тока и нейтрализовались там. За Гизе последовали неразлучные Ганс Эльстер и Юлиус Гейтель, интерпретировавшие свойства горячих электродов - то, что мы сейчас называем термоионным эффектом - в аналогичных

терминах. Сын Гельмгольца Роберт также внес вклад в новую ионную физику, показав, что способность горячих газов конденсировать влагу (открытая Джоном Эйткенем) зависит от образования ионов.<sup>49</sup>

В своей второй Бекеровской лекции Шустер обсудил всю эту работу и подчеркнул, что все известные случаи проводимости в газах можно отнести к образованию ионов под действием различных причин, включая высокую температуру, электрический разряд и УФ - излучение. Теперь он систематически использовал термин "ион" вместо термина "заряженный атом", как это сделал Гизе в 1882 году. Так родилась новая физика ионов, уже не ограниченная газовым разрядом или электролизом и обещающая объединить широкий спектр явлений.<sup>50</sup>

Шустер заявил, что доволен тем, как его теорию приняли, особенно в Германии. Он получил личную поддержку Гельмгольца, с позволения Гольдштейна и Герца. На родине он столкнулся с возражениями максвелловцев. Предвидя такую реакцию, в своей первой Бейкеровской лекции он подчеркнул, что его теория избегает наиболее шокирующих ересей континентальных теоретиков: скачков электричества от молекулы к молекуле (согласно Видеманну) и проводимости вакуума (согласно Гольдштейну и Эдлунду). Но и этого было достаточно, чтобы вызвать недовольство максвелловцев. Вслед за Гельмгольцем Шустер говорил о двух электричествах как о реальных субстанциях с различными притяжениями для различных химических элементов. Он также ввел грубо антимаксвелловское понятие объемной электризации и предположил независимую миграцию ионов, которую Лодж отказался признать в своем докладе Британской ассоциации по электролизу. Все это, иронизировал он в своей лекции 1890 года, противоречит "так называемым современным взглядам на электричество". По этой причине он поставил себя "под защиту признанного авторитета", процитировав в начале своей лекции слова Гельмгольца об атомах электричества.<sup>51</sup>

В то же время Шустер сделал примирительный жест:

*Во всех отраслях физики прогресс знаний постепенно заставляет нас отказаться от предположения об однородности, и если это будет сделано, то не возникнет больше никаких трудностей с телесной электризацией, так как мы можем считать, что это действительно только поверхностная электризация между атомами и средой.*

Понятие электризации как разрыва в диэлектрической деформации может быть сохранено, если только деформация происходит в пространстве между атомами.

*"Даже если принять крайнее мнение [Фицджеральда и У. М. Хикса], что электрическое напряжение обусловлено вихревыми нитями в эфире, - продолжал Шустер, - нам достаточно предположить, что все эти нити имеют одинаковую интенсивность, а некоторые из них заканчиваются на*

*поверхности атомов, чтобы примирить, казалось бы, антагонистические взгляды".*

Это и сделал Дж. Дж. Томсон в следующем году.<sup>52</sup>

<sup>49</sup> Giese 1882: 537-44; Elster and Geite 1883, 1889; R. von Helmholtz 1887 (по предложению в Giese 1882: 538n).

<sup>50</sup> Schuster 1890a: 526-39.

<sup>51</sup> Schuster, 1890a: 527 (удовлетворение), 559 (цитаты): 1884: 317. См. также Feffer 1989: 49-50.

<sup>52</sup> Schuster 1890a: 558-9. Вероятно, Шустер имел в виду вихревой аналог электростатики, предложенный Уильямом Хиксом на заседании БА в 1888 году (Hicks, 1888): пучки вихревых нитей соответствовали электрическим силовым линиям; примыкание нитей к твердому телу - электрическому заряду; их сокращение - электрического тока; а их линейное движение жидкости - магнитному полю. Ср Whittaker 1951. 302-303.

### **7.4.3 Дж. Дж. Томсон о вихревых кольцах**

В печати Шустер был не первым физиком, применившим электролитическую аналогию к разряду в газах. Дж. Дж. Томсон сделал это в 1883 году, но совсем по- другому. Томсон, также учившийся в Оуэнс-колледже, разделял интерес Шустера к пограничным вопросам между физикой и химией. Однако его кембриджское образование направило его к динамическим теориям Уильяма Томсона и Максвелла. Одной из его первых публикаций в 1881 году была максвелловская теория конвекции заряда, мотивированная экспериментами Крукса. В 1882 году он получил премию Адамса за математическую работу о движении вихревых колец в идеальной несжимаемой жидкости. Как и Уильям Томсон, он надеялся объяснить атомы и молекулы комбинацией таких вихревых колец.<sup>53</sup>

От сложных математических теорем о взаимодействии двух вихревых колец Дж. Дж. Томсон перешел к свободным рассуждениям о кинетике и химии газов, для которых взаимодействие между молекулами было самым простым. Он представил атомы как системы взаимно охватывающих колец и отождествил их валентность с числом колец. В простом случае двух одовалентных атомов он предсказал, что соответствующие кольца могут объединять свои движения при мягких столкновениях. Однако такая комбинация была нестабильной. В соответствии с теорией электролиза Клаузиуса, Томсон предположил, что молекулы постоянно обмениваются своими атомами при столкновениях, даже если доля свободных атомов в газе в целом остается очень малой.<sup>54</sup>

<sup>53</sup> Neilbron 1976; Falconer 1987: 252-3; Feffer 1989: 38-39; Davis and Falconer 1997: 1-17. Об интересе Томсона к химии, Chayut 1991. О его работах по теоретической динамике и вихревых моделях, Topper 1971, 1980.

<sup>54</sup> Thomson 1883a: 114-115, 120, 124.

### **7.4.4 Вихревая теория газового разряда**

Если, как предположил Томсон, электрическое поле - это не что иное,

как неоднородное распределение скорости первородной жидкости, то оно должно влиять на непрерывную диссоциацию молекул. Например, более сильный компонент скорости вдоль электрических силовых линий означал бы более высокую скорость диссоциации и, следовательно, согласно теории вихрей, меньшее давление вдоль этих линий. Это могло бы объяснить фарадеевские напряжения в электрическом поле. Самое главное, Томсон отождествил ток в разрядной трубке с продолжающимся распадом молекул газа в электрическом поле. Здесь важно отметить, что для Томсона расщепленные атомы не несли никакого электрического заряда. С его максвелловской точки зрения, электрический заряд был макроскопическим поверхностным явлением, возникающим на границе между проводящей и непроводящей средой. Проводимость - это не конвекция заряженных частиц, а диссипативный распад энергии поля. Молекулы были инструментами этого распада, а не переносчиками электрического заряда.<sup>55</sup>

Картина Томсона сразу же объяснила, почему электрическая прочность газа зависит от его химического состава. Она также объясняла, почему разрежение газа сначала облегчает проводимость, но препятствует ей, если зайти слишком далеко: меньшее давление подразумевает более высокую склонность к диссоциации (поскольку у свободных атомов меньше шансов встретить партнеров), но уменьшает количество доступных молекул. Рассуждения были сомнительными, и они не объясняли асимметрию и основные проявления разряда, как быстро заметил Шустер.<sup>56</sup>

Вскоре Томсон предложил усовершенствованное объяснение газового разряда, опять же на основе модели вихревого кольца: электрическая диссоциация происходит, когда молекула движется в направлении действия электрической силы в течение достаточно длительного времени. В плотном газе это условие никогда не соблюдалось из-за частых столкновений. В разреженном газе диссоциация была наиболее вероятна вблизи катода, поскольку там заканчивались самые длинные перелеты в направлении поля. Томсон рассматривал распад вблизи катода как взрыв, во время которого атомы или части молекул вылетали за пределы темного пространства и рекомбинировали в свечении. Выделяющееся при этом тепло вызывало новые взрывы, и так далее до анода. Этот механизм внешне напоминал теорию Шустера и, возможно, был частично вдохновлен ею. Однако в случае Томсона вылетевшие атомы не несли заряда, они не отталкивались от катода, а своей кинетической энергией были обязаны первоначальному взрыву.<sup>57</sup>

В 1884 году Томсон был избран преемником лорда Рэля во главе Кавендишской лаборатории. Эта обязанность, конечно же, включала в себя экспериментальные исследования. Первые попытки Томсона в местной традиции точных измерений были не впечатляющими,

поскольку ему не хватало терпения и навыков ручного труда. Он не стал упорствовать. В соответствии со своими недавними теоретическими интересами он решил начать программу экспериментального изучения электрического разряда в газах. В отношении манипуляций и аппаратуры он полагался на своего друга Ричарда Трейфолла и искусного стеклодува Д.С. Синклера. Самые ранние эксперименты Томсона были двух видов. В первом он убедился, что электрический разряд легче переносится в спонтанно диссоциированных газах, таких как пары йода, и измерил изменение давления во время разряда в различных газах как свидетельство разложения. Во втором виде эксперимента он изучал разряд между двумя параллельными металлическими пластинами, самый простой с точки зрения теории вихрей. Результаты оказались разочаровывающе сложными, но дали Томсону возможность опубликовать свою теорию взрывов в серии.<sup>58</sup>

<sup>55</sup> Thomson 1883b: 427-429 (напряжение), 431-2 (разряд). См. Feffer 1989: 38-39. Однако в 1881 году Томсон, похоже, согласился с интерпретацией Круксом катодных лучей, которая была объявлена стимулом его статьи об электрической конвекции (J. J. Thomson 1881a).

<sup>56</sup> J. J. Thomson 1883b: 432; Schuster 1884: 317. В 1890 году Шустер предложил собственное объяснение того, почему более высокое давление подразумевает более сложный разряд: электрическая сила диссоциации на катоде уменьшается за счет диэлектрической поляризации поверхностного слоя газа, толщина которого увеличивается с давлением (Schuster 1890c: (97)).

<sup>57</sup> J. J. Thomson 1884b: 237; 1886: 396-406.

<sup>58</sup> J. J. Thomson 1887, 1886. См. также Neilbron 1976; Feffer 1989: 42-3; Davis and Falconer 1997: 45-49. О выходе Томсона из предыдущей кавендишской традиции, см. Falconer 1989 года. После 1887 года Дж. Дж. Томсон в решающей степени зависел от своего личного помощника Эбenezера Эверетта, который строил всевозможные аппараты и помогал во всех манипуляциях: см. Davis and Falconer 1997, стр. 55-56.

#### 7.4.5 Кризис Максвелла

В 1888 году взгляды Томсона претерпели серьезный кризис. Одной из причин стало столкновение с результатами Шустера. По мнению Шустера, электрический ток в разреженном газе или в электролите заключается в движении имеющих ионы, т.е. проводимость зависела от исходного количества ионов, а не от того, насколько легко ЭДМ может разрушить молекулы. У Томсона же первоначально же проводимость представляла собой разложение. Это противоречило доказательствам Хитторфа и Шустера высокой поперечной проводимости газов под действием разрядов. Томсон вынужден был признать, что

*"при расщеплении молекул на составляющие возникает такое состояние молекулярной структуры, при котором разряд можно получить путем перестройки без дальнейшего расщепления"*<sup>59</sup>.

Томсон также озабочен проблемой электролиза. Оказавшись на время без стеклодува, он решил измерить осмотическое давление

электролитов для различных значений силы тока. Из неизменности этого давления он сделал вывод, что прохождение тока не увеличивает число составляющих, что соответствовало теории немцев о предварительной диссоциации. Томсон по-прежнему избегал концепции Аррениуса о квазиполной диссоциации. Он утверждал, что за непрерывным расщеплением молекул (в отсутствие ЭДС) быстро следует их рекомбинация, так что доля диссоциированных молекул остается небольшой. Однако теперь он признал, что "*атомы в зарождающемся состоянии*" могут свободно перемещаться под действием внешней ЭДС. Это означало существенный отход от его прежних взглядов, согласно которым разделенные атомы не несли электрического заряда. В новой концепции Томсона вихревой атом больше не появлялся, а молекула, находящаяся на грани распада, вела себя как пара заряженных атомов.<sup>60</sup>

Принятие Томсоном ионов Шустера было непростым. Он упорно пытался вписать наэлектризованные атомы в упорно максвелловское представление об электрическом токе. С одной стороны, он по-прежнему рассматривал ток проводимости как "*серию преувеличенных разрядов, вызванных перестройкой составных частей молекулярных систем*". С другой стороны, он описывал эту перестройку как разделение ионов, временно разряжающих электрическое поле, образуя локальные двойные слои, с последующим пересоединением положительных ионов одного двойного слоя с отрицательными ионами следующего. Томсон полагал, что эта картина применима ко всем видам проводимости, в том числе и к металлической (без видимого эффекта разложения из-за однородности металла). Таким образом, он смог объяснить типичную максвелловскую аномалию - прозрачность электролитических растворов и тонких металлических листов. Поглощение света в этих проводниках не происходило, поскольку период колебаний соответствующего электрического поля был намного меньше времени, необходимого ионам для разряда поля. Так были заложены основы новой, максвелловской микрофизики, в которой ионы участвовали в основных полевых процессах, из которых вытекали заряд и ток.<sup>61</sup>

Этот важный переход в мысли Томсона произошел без огласки и без явного отказа от его прежних взглядов, что породило недопонимание. В своей второй Бекеровской лекции Шустер критиковал идею о том, что молекулы диссоциировали в газах до прохождения разряда как «фатальные» для теории Томсона. Самопроизвольная диссоциация, по мнению Шустера, приведет к образованию ионов и позволит проводить ток даже при очень малых ЭДС, по аналогии с электролитической проводимостью. В действительности Томсон допускал предварительную диссоциацию газа только в своей теории 1883 года, для которой продукты диссоциации были электрически нейтральными. В 1888 г. у него появились ионы, но он отрицал их существование в газах при

нормальных условиях даже в виде "зарождающихся атомов". В своем ответе Шустеру Томсон мог бы просто объяснить эволюцию своих взглядов. Вместо этого он заявил, что предварительная диссоциация не была существенной для его первоначальных взглядов, возможно, чтобы избежать самоотрицания. Шустер тут же возразил, что старое объяснение Томсоном связи между электрической силой и давлением явно зависит от предварительной диссоциации. Далее он упрекнул Томсона в том, что у него нет четкого, определенного представления об электрическом токе: *"Я не знаю, можно ли назвать теорией такие общие соображения [о связи между током и разложением]"*.<sup>62</sup>

<sup>59</sup> J. J. Thomson 1888: 292. Томсон часто ссылался на эксперименты Шустера, но не на свои теоретические идеи, хотя я полагаю, что он нашел в них много вдохновения.

<sup>60</sup> Thomson to Threlfall. 7 августа и 4 сентября 1887 года, Библиотека Кембриджского университета, цитируется в Feffer 1989: 43-44 и J. J. Thomson 1888: 294 (электролитические эксперименты); там же: 213 (против Аррениуса), 295 (заряженные атомы). Томсон называет заряженные атомы «ионами» один раз, 301; однако систематическое использование им этого слова началось в 1896 г.

<sup>61</sup> J. J. Thomson 1888: 397 (цитата), 397-400 (общий механизм проводимости), 300-1 (прозрачность). Максвелл предположил, что аномальная прозрачность электролитов связана со временем расщепления молекул (Maxwell 1873a: #799, #800)).

<sup>62</sup> Schuster 1890a: 539; 1890b: 592; J. J. Thomson 1890a, 1890b. См. также Feffer 1989: 44-45; Mulligan 1997.

#### 7.4.6 Цепочки Гроттуса

Томсон отошел от спора. Через несколько недель после второй Бекеровской лекции Шустера он опубликовал откровенно гельмгольцевское рассуждение о распаде ионов. По его мнению, первоначальное электрическое поле электродов было слишком слабым, чтобы преодолеть электрическое притяжение между двумя ионами, заряженными электролитическим квантом. Поэтому для разделения ионов необходим специальный механизм. Томсон рассматривал две возможности: на электродах могут быть двойные электрические слои, которые усиливают разлагающее поле, как предполагали Гельмгольц и Шустер, или же молекулы газа могут ориентироваться во внешнем поле и образовывать цепочки, в которых химическая сила может способствовать расщеплению молекул.<sup>63</sup>

Естественно, Томсон предпочел второй вариант, что означало возврат к старой идее Фарадея о цепочках разложения Гроттуса. Вскоре он нашел этому подтверждение. От Уитстоуна он узнал и проверил с помощью разрядной трубки длиной 50 футов и вращающегося зеркала, что скорость разряда была того же порядка, что и скорость света. Такое быстрое распространение не могло быть обусловлено движением ионов с той же скоростью хотя бы потому, что соответствующая кинетическая энергия превышала бы имеющуюся электрическую энергию. Поэтому

Томсон представил себе, что разряд проходит через ряд цепочек Гроттуса, внутри которых распад распространяется почти со скоростью света. Полосы положительного разряда и относительную независимость токов в последовательных слоях (по Гольдштейну) он объяснил макроскопической длиной цепочек.<sup>64</sup>

В 1891 г. Томсону после многих неудачных попыток удалось получить газовый разряд без электродов. Он окружил сосуд с разреженным газом катушкой, питаемой током высокой частоты, и наблюдал ярко светящееся кольцо, отмечающее путь разряда. Необходимое электрическое поле было не более интенсивным, чем в обычных разрядных трубках. Здесь двойные слои Шустера не могли помочь, только цепочки Гроттуса могли обеспечить разряд. По крайней мере, так считал Томсон. Тем не менее, он принял центральную составляющую взглядов Шустера: образование и конвекцию ионов, несущих электролитический квант заряда. Он подтвердил количественное определение заряда зимой 1891-1892 гг., повторив старые эксперименты Адольфа Перро по электролизу пара и показав, что к ним применим закон электрохимических эквивалентов Фарадея.<sup>65</sup>

<sup>63</sup> J. J. Thomson 1890c: 360-1 (со ссылкой на Фарадеевскую лекцию Гельмгольца на 360).

<sup>64</sup> J. J. Thomson 1890d: 132-140 (Grotthus chain); 1893a: 115-118 (новое измерение скорости).

<sup>65</sup> J. J. Thomson 1891b и 1893a: 92-107 (безэлектродный разряд); 1893a: 181-185, 559-55970 и 1893b (пар). Ср Feffer 1989: 45-46, 52-3; Дэвис и Фальконер 1997: 83-89.

#### 7.4.7 Единые силовые трубки

Томсон не стал довольствоваться грубой смесью гельмгольцевских и максвелловских идей. В 1891 г. он подхватил идею Шустера о вихревых нитях с универсальной силой и положил ее в основу грандиозной микрофизической теории электромагнитного поля. Эта теория легла в основу его "Последних исследований", помпезно опубликованного в 1893 году как продолжение *"Трактата"* Максвелла. Источниками теории послужили силовые трубки Фарадея, теория электростатики вихревых нитей Уильяма Хикса, идея Пойнтинга об их движении и растворении, взгляды Гельмгольца на электролиз - и физика ионов Шустера, хотя Томсон старался по минимуму ссылаться на своего конкурента. Если Гельмгольц атомизировал электричество, то Томсон атомизировал силовые трубки Фарадея.<sup>66</sup>

Основным объектом Томсона была "единичная силовая трубка" - тонкая трубка электрического смещения с силой (поток), равной электролитической единице заряда. Подобно вихревым нитям Хикса, трубки могли замыкаться только на себя или заканчиваться на веществе. Выход трубки из атома означал единицу "+" заряда, а ее окончание на другом атоме - единицу "-" заряда. Далее Томсон предположил, что энергия взаимодействия между атомом и трубкой зависит от химического



элемента и от направления трубки. Когда два атома соединяются трубкой длиной, сравнимой с атомными размерами, они образуют молекулу. Если длина соединяющей трубки была намного больше, то два атома образовывали пару свободных ионов. С помощью атомов и силовых трубок Томсон объяснил все, что сделал Гельмгольц, в терминах двух электричеств, их атомов и их различных притяжений к различным химическим атомам: химическое сродство, контактное электричество, электричество трения и т.д.<sup>67</sup>

Томсон назвал свою теорию *"своего рода молекулярной теорией электричества, в которой трубки Фарадея занимают место молекул в кинетической теории газов"*. молекулы в кинетической теории газов". Все электрические свойства вещества и все электромагнитные явления должны были быть выведены из статистического поведения единичных силовых трубок, как термодинамика была выведена из молекулярной статистики. Томсон представил себе, что огромное количество единичных силовых трубок рассеяно в пространстве и таким образом придает эфиру волокнистую структуру. Он макроскопически определил электрическую поляризацию  $\mathbf{D}$  макроскопически, как дающую превышение  $\mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$  числа трубок, проходящих от задней стороны к передней стороне элемента поверхности  $d\mathbf{S}$ , над числом трубок, проходящих в обратном направлении через тот же элемент. В диэлектрике трубки не могут ни разрушаться, ни создаваться, поэтому изменения  $\mathbf{D}$  полностью определяются движением трубок.<sup>68</sup>

Предположим на минуту, что все трубки движутся с одинаковой равномерной скоростью  $\mathbf{v}$ . Тогда изменение  $\mathbf{D}$  в точке, движущейся со скоростью  $\mathbf{v}$ , равно нулю:

$$\partial \mathbf{D} / \partial t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{D} = 0, \quad (7.1)$$

или, что то же самое

$$\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{D}) = - \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \nabla) \quad (7.2)$$

В соответствии со своими старыми работами по электроконвекции Томсон интерпретировал правую часть этого уравнения как полный ток, сумму поляризационного и конвекционного токов. Тогда  $\mathbf{v} \times \mathbf{D}$  означало магнитную силу  $\mathbf{H}$ , возникающую при простом движении трубок (рис. 7.14).<sup>69</sup> Затем Томсон приписал движению трубок кинетическую энергию

$$T = \int (\mu H^2 / 2) d\tau \quad (7.3)$$

и применил приемы кембриджской динамики. Вывод  $T$  относительно  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{D}$  дал ему, соответственно, импульс  $\mathbf{D} \times \mathbf{B}$  для движения трубки и ЭДС  $\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ . Из последнего выражения и бездивергентности  $\mathbf{B}$  следует, что

$$\nabla \times \mathbf{E} = (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = - \partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (7.4)$$

что согласуется с законом индукции Фарадея.

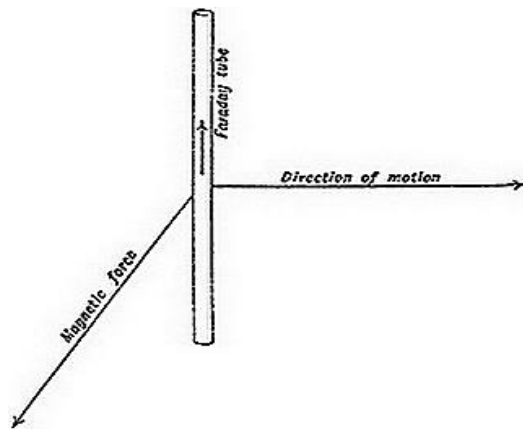


Рис. 7.14. Диаграмма магнитного эффекта движения трубок  
(J. J. Thomson 1893a: 12)

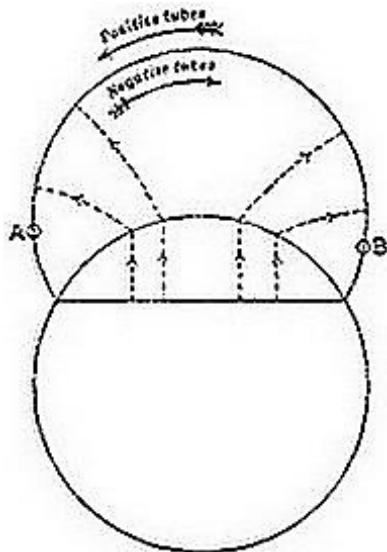


Рис. 7.15. Сечение поля поперечно намагниченного цилиндра  
(J. J. Thomson 1893a: 32).

Пунктирные линии представляют магнитные силовые линии. Трубки (например, A и B) перпендикулярны плоскости рисунка и параллельны цилиндру. Они движутся по магнитным эквипотенциальным поверхностям, как указано стрелками.

Томсон легко обобщил эти результаты на более сложные движения трубок. Например, он рассматривал поле магнита как противоположное движение "+" и "-" трубок: действия двух видов трубок с поляризацией **D** взаимно компенсируется, а их движения объединяются в создании магнитного поля (рис. 7.15).<sup>70</sup>

Т.о., для Томсона электрическое поле означало предпочтительную ориентацию силовых трубок, магнитное поле соответствовало поперечному движению силовых трубок, а ЭМС и ЭДС - кинетической энергии этого движения. В руках Томсона эта гениальная картина привела к впечатляюще лаконичным расчетам сложных задач электродинамики движущихся тел, таких как эффект вращающегося диска Роуланда и Ронтгена или конвекция наэлектризованной сферы. Однако рассуждениям Томсона не хватало строгости кантабригской

смешанной математики. Его не волновало, можно ли дать законченное математическое выражение его динамике силовых трубок. Многие его количественные выводы были ошибочными, например, вывод о "силе Лоренца". Истинным достоинством силовых трубок было то, что они предлагали единый подход к очень широкому кругу явлений.<sup>71</sup>

<sup>66</sup> Schuster 1890a: 559; J. J. Thomson 1891a, 1883a: гл. 1. Ср. Buchwald 1985a: 49-53, который подчеркивает максвелловские аспекты картины Томсона: также Falconer 1987: 259-262. Хотя Дж. Дж. Томсон не дал ссылки на аналогию между единичными трубками и вихревыми нитями, он почти наверняка позаимствовал ее у Хикса (см. Примечание 52). Эту аналогию не следует путать со старой аналогией Гельмгольца между вихревыми линиями и электрическим током.

<sup>67</sup> J. J. Thomson, 1891a, 1883, а: 2-5, 64 (заменитель Гельмгольца). В 1895 году Томсон проиллюстрировал взаимодействие конца трубки с атомом взаимодействием вихревой нити с гиростатами, вращающимися на поверхности атома; единственная цель этой иллюстрации состояла в том, чтобы показать, что переменные притяжения Гельмгольца двух электричеств для разных химических элементов можно имитировать без электрических жидкостей, как динамическую связь между двумя различными движениями (J. J. Thomson 1895b).

<sup>68</sup> J. J. Thomson 1893a: 4, 2, 6. Элемент  $dS$  должен быть достаточно большим, чтобы его можно было пересечь большим количеством трубок, но небольшим по сравнению с расстояниями, на которых макроскопические поля заметно изменяются.

<sup>69</sup> J. J. Thomson 1891a, 1893a: 6-9 (без ограничения равномерной скорости).

<sup>70</sup> J. J. Thomson 1893a: 9-16, 28-32. Томсон первым приписал импульс полю. Он рассматривал электромагнитные силы как результат потока этого импульса.

<sup>71</sup> J. J. Thomson 1893a: 16-23 (движущаяся сфера), 23-28 (вращающиеся пластины). Там же: 36, Томсон дал  $(1/3) \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  для силы Лоренца, что усугубляет ошибочное происхождение Дж. Дж. Томсона 1881а. Он проигнорировал противоположный результат Хевисайда. Шустер исправил его в печати в Schuster 1897

#### 7.4.8. Усадка трубки

Для электрической проводимости Томсон заимствовал общую идею Пойнтинга о растворении силовых трубок (без магнитных трубок) и дополнил ее микроскопическим механизмом. Парадигматический случай газового разряда он трактовал следующим образом (рис. 7.16).

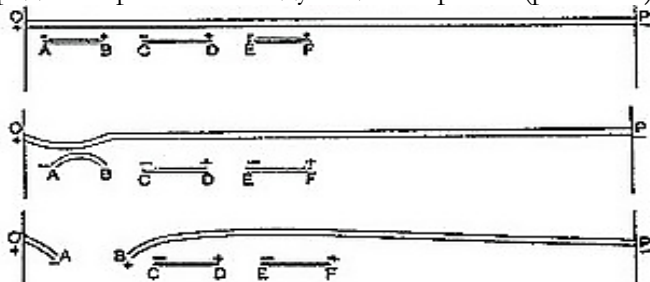


Рис. 7.16. Три стадии усадки силовой трубки, первый вариант (Thomson 1893a: 45-46).

На первом этапе молекулы (AB, CD, EF, ...), примыкающие к силовой трубке ОР, протянувшейся между электродами, принимают ориентацию

этой трубки. Затем связующая трубка ближайшей к аноду молекулы (AB) набегает на трубку ОР и разбивает ее на микроскопическую трубку ОА и длинную трубку ВР, давая начало молекуле ОА и свободному иону В<sup>+</sup>. Процесс продолжается до тех пор, пока трубка ОР не уменьшится до молекулярных размеров.<sup>72</sup>

В этой картине ионы представлялись как атомы, соединенные в единую трубку. Однако для Томсона сущностью тока было разрушение силовых трубок, а не движение ионов. Это было не единственное отличие от концепции Шустера. Томсон считал маловероятным последовательный распад молекул АВ, CD, EF. В соответствии со своим представлением о цепочках Гроттуса он представлял себе цепочки молекул, для которых распад происходит одновременно (рис. 7.17).

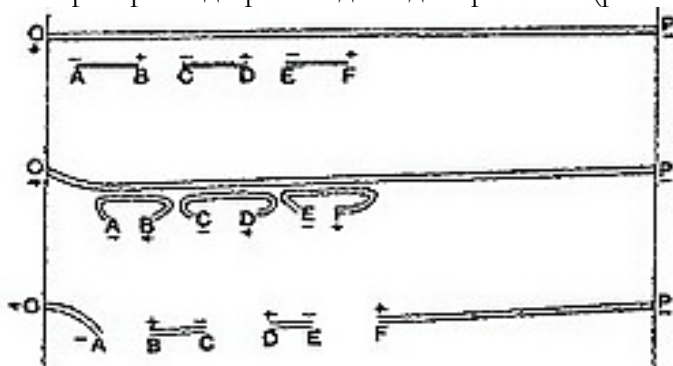


Рис. 7.17. Усадка силовой трубки, второй вариант (Thomson 1893a: 46)

Среди фактов, указывающих на существование таких агрегатов, Томсон напоминает высокую скорость разряда.<sup>73</sup>

Если качественное понимание разряда Томсоном включало в себя силовые трубки и молекулярные агрегаты, то более количественные соображения требовали только числа и скоростей ионов. В 1894 г. он набросал кинетическую теорию проводимости в газах в духе кинетической теории газов Максвелла. В ней он считал электрический ток двойным потоком свободных ионов под ускоряющим действием ЭДС силы и тормозящим действием столкновений. После открытия в 1896 г. рентгеновской ионизации он стал учитывать изменение числа ионов из-за конкуренции между молекулярным распадом и рекомбинацией при столкновениях. Например, он написал, что для изменения числа  $N$  ионов в единицу времени создаётся  $q$  ионов,  $aN^2$  ионов рекомбинируют во время столкновений, а  $I/e$  нейтрализуются на электродах:

$$dN/dt = q - aN^2 - I/e \quad (7.5)$$

Простые уравнения такого рода уже не относились к силовым трубкам и их усадке и могли быть поняты без стремления к более глубокому представлению об электричестве. Они зависели от небольшого числа параметров, объединяющих свойства газов, ионизированных по разным причинам. Позднейшие успехи Томсона и его сотрудников в изучении

ионизированных газов во многом зависели от таких моделей.<sup>74</sup>

<sup>72</sup> J. J. Thomson 1891a, 1893a: 45-6. Ср Buchwald 1985: 50-53. Подобная теория найдена у Пойнтинга 1895.

<sup>73</sup> J. J. Thomson 1891a, 1893a: 46-7. Ср. Falconer 1987: 255-256.

<sup>74</sup> J. J. Thomson 1894a: 490-492; Thomson and Rutherford 1896: 395; J. J. Thomson, 1898a: 36-39. Эта теория была продолжением кинетической теории химической диссоциации, изложенной в J. J. Thomson 1884b в контексте вихревой модели. Для его более позднего значения см. Lelong 1995: 45-48, 85-88.

### 7.5 Катодно-лучевая полемика.

В концепции газового разряда Шустера отрицательное свечение играло существенную роль как место диссоциации молекул. Так же как и катодные лучи: разряд начинался с отталкивания отрицательных ионов катодом. Все остальные процессы, в том числе и положительное излучение, были вторичными. Более того, Шустер рассматривал магнитное отталкивание катодных лучей как наилучшую возможность проверить концепцию ионов, несущих универсальный квант заряда.<sup>75</sup>

Томсон согласился с Шустером, что катодные лучи - это ионы, вылетающие из катода, и что их магнитное отклонение является важным фактом. Но он, как и Э. Видеман и Герц, отрицал, что лучи и отрицательное свечение играют какую-либо важную роль в газовом разряде. По его мнению, суть разрядного тока заключалась в процессе разложения-восстановления молекул, а не в свободном полете ионов в катодных лучах. Основную часть разряда составлял положительный столб, который проходил кратчайшим путем между анодом и катодом и занимал все пространство безэлектродного разряда. Напротив, отрицательное свечение и его лучи были неотделимы от катода, и их распространение не зависело от положения анода. По мнению Томсона, наблюдение Гольдштейном лучей в частях трубки, не совпадающих с катодом, свидетельствовало об образовании вторичных катодов на стенках трубки. Наконец, магнитное отклонение лучей указывало на то, что если это отрицательные ионы, то их скорость по крайней мере в 1000 раз меньше, чем у положительного разряда. Естественно, Томсон решил, что более быстрый процесс является более важным. Он заключил:

*"Как бы ни были поразительно красивы явления, связанные с "отрицательными лучами", представляется наиболее вероятным, что эти лучи являются локальным эффектом и играют лишь незначительную роль в прохождении тока через газ".<sup>76</sup>*

<sup>75</sup> см. Falconer 1987: 247-248.

<sup>76</sup> J. J. Thomson 1893a: 113-115 (положительный столбец), 122-124 (переосмысление Гольдштейна), 137-138 (скорость катодных лучей); 128 (цитата). См. Neilbron 1964: 62; Falconer 1987: 247. В своей оценке скорости катодных лучей Томсон использовал эксперименты по магнитному отклонению Хитторфа, а не Шустера, хотя он был, очевидно, очень хорошо знаком со второй Бекеровской лекцией Шустера (см. Polemiku в «Nature» 1890 года и ссылки в J. J. Thomson 1893a: 108-110, 159). В 1894 г

Томсон все еще сожалел об отсутствии количественных экспериментов по магнитному отклонению катодных лучей (J. J. Thomson 1894b: 365). После получения письма протеста от Шустера, он публично извинился в «Философском журнале» (PM 40 (1896): 151). См. также Feffer 1989: 51.

### 7.5.1 Лучи Ленарда

Новые немецкие исследования катодных лучей привлекли внимание Томсона. В 1892 г. Герц обнаружил, что катодные лучи могут проходить через тонкие листочки золота и других металлов, чего, конечно, не могут сделать атомы или молекулы вещества. В следующем году его ассистент Филипп Ленард использовал это, чтобы вывести лучи из разрядной трубки. Хитрость заключалась в том, что конец трубки, обращенный к катоду, закрывался тонким алюминиевым окошком (рис. 7.18).

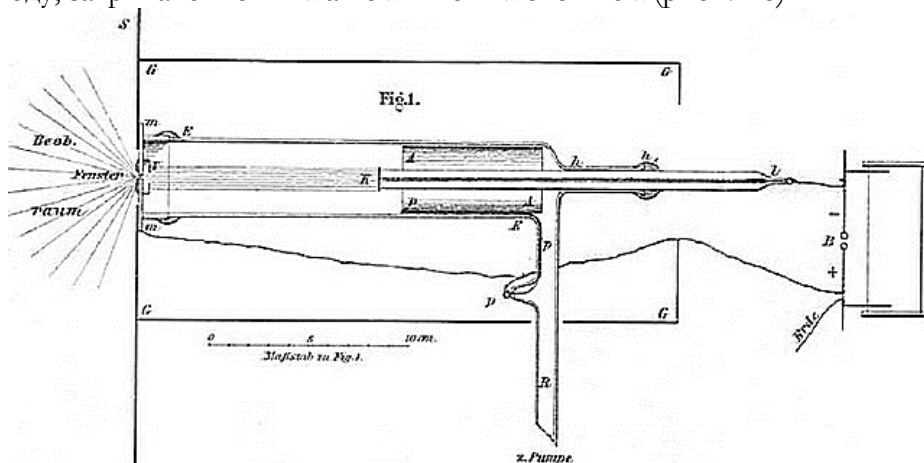


Рис. 7.18. Трубка с окном Ленарда. B - катушка Румкорфа, (Lenard 1894a)

G + S - заземленная клетка Фарадея, K - катод, A - анод, «Веоб.

Fenster Rauill' -пространство наблюдения лучей за окном. Окно заземлено чтобы оно не действовало как вторичный катод.

Ленард убедился, что возникающие лучи обладают свойствами катодных лучей, и измерил их поглощение и магнитное отклонение в различных газах при различных давлениях. Дальность действия лучей оказалась гораздо больше, чем это было бы для британских ионов: несколько сантиметров в открытом воздухе по сравнению с  $10^{-5}$  см для среднего свободного пробега молекул воздуха. Кроме того, лучи могли проходить через глубокий вакуум, а их магнитное отклонение было одинаковым для любого газа при любом (достаточно малом) давлении, что согласуется с мнением о том, что они представляют собой "процесс в эфире"<sup>77</sup>.

Ленард мог предложить нечто большее, чем подтверждение эфирно-волнового представления о катодных лучах.

Наблюдая за мутностью воздуха возле окна (рис. 7.19), он тщательно изучил рассеяние лучей и обнаружил, что оно очень похоже на рассеяние света на коллоидной взвеси.

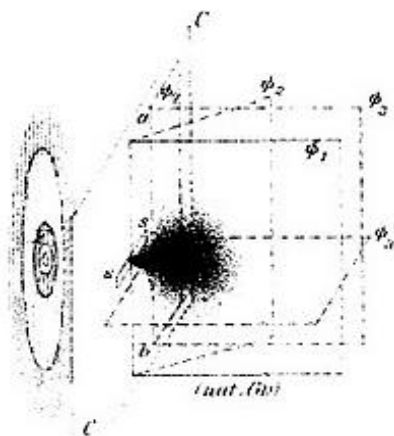


Рис. 7.19. Диффузия лучей Ленарда на открытом воздухе (Ленард 1894а)

Подтвердив аналогию экспериментами с разбавленным молоком, он пришел к выводу, что длина волны катодных лучей настолько мала, что становится очевидной гранулярная структура вещества. Молекулы рассеивали катодные лучи по отдельности, как коллоидные частицы рассеивают обычный свет. Далее Ленард исследовал поглощение лучей, соответствующих фиксированным условиям в разрядной трубке, в различных газах при разном давлении и в твердой фольге различной толщины. Произведение дальности действия на плотность поглощающего тела оказалось примерно постоянным. Для данного газа при различных давлениях этот результат просто вытекает из коллоидной аналогии. Гораздо более удивительным он оказался в случае различных веществ: вместе с коллоидной аналогией это означало, что рассеяние одной молекулой пропорционально ее массе! В печати Ленард воздержался от рассуждений об этом странном свойстве. Однако, согласно его более позднему рассказу, он сделал алхимический шаг и представил, что за рассеяние во всех элементах отвечает один и тот же *Urstoff* (конечная материя).<sup>78</sup>

Томсон легко объяснил эксперименты Герца с тонкой металлической фольгой с помощью своей обычной уловки: образования вторичного катода. Но результаты Ленарда ему объяснить оказалось сложнее. Вместо их обсуждения он предложил новое доказательство неземной природы катодных лучей. Старым методом вращающегося зеркала он измерил скорость катодных лучей в водородной трубке и обнаружил 200 км/с для ускоряющего потенциала около 200 В. Этот результат совпадал с ожидаемым значением для ионов водорода и на три порядка отличался от обычной скорости эфирных процессов (скорости света). Сторонники эфирной теории не доверяли этому измерению. И скорость катодных лучей, более точно измеренная три года спустя, оказалась того же порядка, что и скорость света.<sup>79</sup>

<sup>77</sup> Hertz 1892a; Lenard 1894a (лучи на открытом воздухе, в вакууме и т. д.), 1894b (магнитное отклонение). См. также Lenard 1920: 16-24; Heilbron 1964: 65-66; Dahl 1997: 82-88. Первые попытки Ленарда вывести лучи из трубки предшествовали открытию Герца и зависели от его убеждения, что лучи были своего рода светом (см. также Lenard 1920: 14-15). Возможность лучей в высоком вакууме не может быть проверена внутри разрядной трубки, для разряда требуется минимальное давление.

<sup>78</sup> Lenard 1894a: 235-236 (мутность). 237 и 259-260 (молоко). 250 (закон поглощения); 266-267 (длина волны); Lenard 1895 (закон поглощения). Об *Ursoff* и *feinere Besfandfeile* см. Lenard 1920: 24, 47.

<sup>79</sup> J. J. Thomson 1894b. См также Heilbron 1964: 67. Позднее Томсон объяснил грубую неточность этого измерения (требовалось найти скорость, близкую к скорости света) задержкой флуоресценции стенок трубки: эта задержка могла зависеть от интенсивности лучей и, следовательно, на расстояние от катода (J.J. Thomson 1897c: 315).

### 7.5.2 X-лучи

Интерес Томсона к катодным лучам значительно возрос в следующем году после того, как в Англии стало известно об открытии Рентгена. В ноябре 1895 г. Вильгельм Рентген экспериментировал с электронно-лучевой трубкой, окруженной черным картоном, вероятно, имея в виду некоторое расширение экспериментов Ленарда. Лист флуоресцентной бумаги, используемой для обнаружения катодных лучей, лежал на некотором расстоянии. К удивлению Рентгена, бумага сильно светилась, хотя катодные лучи не могли пройти сквозь стеклянную стенку трубки, картон и большое воздушное пространство. Влияние газового разряда вдали от трубки было отмечено и несколькими другими наблюдателями, включая Ленарда и Дж. Дж. Томсона, но только Рентген более тщательно исследовал природу этих лучей. Лучи создавались при воздействии катодных лучей на стенки трубки; они не отклонялись магнитом; они распространялись по прямым линиям; они проникали сквозь толстые непрозрачные тела; их поглощение зависело только от плотности пройденного вещества.

Из трех последних свойств Рентген предложил ошеломляющую демонстрацию: фотография костей человеческой руки (рис. 7.20).<sup>80</sup>



Рис. 7.20. Анатомия руки Geheimrath во Влицбурге (Рентген 1896a: 13).

Рентгеновские лучи были самым сенсационным открытием физики XIX века. Среди физиков, начавших свое исследование, был и Дж. Дж.



Томсон. Он быстро установил, что прохождение лучей через газ временно превращало его в превосходный проводник. В соответствии со своими и Шустера идеями о проводимости в газах, Томсон проследил этот эффект до образования ионов и придумал глагол «ионизировать». Он сразу понял, что у него есть способ производить ионы в совершенно контролируемых условиях. Вместе с Джоном Макклелландом Томсон установил существование тока насыщения, который первоначально интерпретировал как выравнивание дорогих ему цепочек Гроттуса, но несколько недель спустя принял объяснение Гиза о подобном эффекте в нагретых газах как баланс между подачей и удалением ионов. В соответствии с этой точкой зрения новый сотрудник Томсона Эрнест Резерфорд заметил, что прохождение тока уменьшило проводимость ионизованного газа. Эти исследования открыли новую, плодотворную область, в которой была разработана и проверена кинетическая теория ионного тока Томсона.<sup>81</sup>

Естественно, Томсона интересовала и природа рентгеновских лучей. Рентген первоначально полагал, что нашел давно искомые продольные колебания оптического эфира. Месяц спустя Шустер предположил, что новые лучи - это свет чрезвычайно высокой частоты, ультрафиолетовое излучение, возникающее при столкновении ионов катодных лучей со стенками трубки. Дж. Дж. Томсон поддержал эту интерпретацию, вскоре получившую всеобщее признание. При этом он объяснил, почему рентгеновские лучи не обладают некоторыми характерными свойствами света. Например, они не преломлялись, поскольку, согласно ионной теории дисперсии Гельмгольца (о которой речь пойдет ниже), показатель преломления любого вещества для сверхвысоких частот стремится к единице. Наиболее интересным было предложение Томсона объяснить, почему поглощение рентгеновских лучей данного вида зависит только от плотности поглощающего вещества: он представил себе рэлеевское рассеяние лучей на "первородных атомах", из которых состоит все вещество, что-то вроде протейя Праута. Вдохновением для него, вероятно, послужила аналогия Ленарда с облаками для поглощения катодных лучей. Как мы видели, Ленард держал свои более алхимические мысли при себе. У Томсона, в своё время попытавшегося построить химические атомы с помощью вихревых колец, не было такого запрета.<sup>82</sup>

<sup>80</sup> Röntgen, 1895, 1896a, 1896b. См. также тщательно документированную историю рентгеновских лучей в Glasser 1959: 1-23, Whittaker 1951: 357-8; Heilbron 1964: 68-72, обсуждает ожидания и объясняет время открытия Рентгена (например, трубка с окном Ленарда направила внимание экспериментатора на процессах вне разрядной трубки).

<sup>81</sup> J. J. Thomson 1896a; Thomson and McClelland 1896; Rutherford and Thomson 1896. См. также Whittaker 1951: 359-360; Glasser 1959: 264-267; Heilbron 1964: 71; Falconer 1987: 255-259; Davis and Falconer 1997: 114-21; Dahl 1997: 115-121.

<sup>82</sup> Röntgen 1895: 11; Schuster 1896 1896: 268 (с комментарием: «Если бы лучи Рентгена содержали волны очень малой длины, то колебания в молекулах, которые на них реагируют, могли бы казаться отличающимися на порядок от тех, которые до сих пор известны. Возможно, мы имеем здесь вибрация электрона внутри молекулы вместо вибрации молекулы, несущей с собой вибрацию электрона»; J. J. Thomson 1896a: 582; 1896b; 1896c: 304-305. Ср Whittaker 1951: 358; Glasser 1959: 261-4; Falconer 1987: 265: 265 (первородные атомы).

### 7.5.3 Дилемма

Катодные лучи стали, по словам Томсона, «родителями рентгеновских лучей». Как таковые, они были достойны повышенного внимания. В своем президентском обращении к собранию Британской ассоциации в сентябре 1896 года Томсон рассмотрел доказательства в пользу корпускулярного представления, к которому он добавил электростатическое доказательство Джина Перрена об электрическом заряде лучей. Он также вернулся к экспериментам с окнами Ленарда и предложил причину, по которой магнитное отклонение лучей не зависело от природы газа. Воздействие катодных лучей на окно производило рентгеновские лучи, которые проходили через окно и ионизировали газ за ним; при каждом импульсе индукционной катушки, питающей разрядную трубку, электрический импульс сообщался окну, и этот импульс придавал определенный импульс  $p$  отрицательным ионам на внешней поверхности окна; тогда магнитное отклонение,  $eB/p$ , не зависит от массы иона.<sup>83</sup>

Это объяснение было несколько надуманным. Более того, большая проникающая способность лучей Ленарда оставалась несовместимой с корпускулярным представлением. Ленард, присутствовавший на собрании БА, имел возможность убедить Томсона в силе своих аргументов. Кроме того, Томсон измерил магнитное отклонение пучка катодных лучей внутри трубки и обнаружил, что оно не зависит от остаточного газа (рис. 7.21).

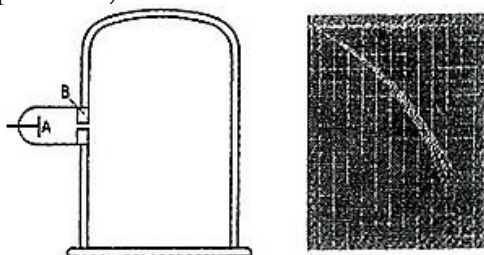


Рис. 7.21. Устройство Дж. Дж. Томсона для отображения магнитного отклонения катодных лучей (J. J. Thomson 1898a: 152, 154).

А обозначает катод, В обозначает анод. Магнит не представлен.

Здесь фокус с определенным импульсом не удался. Тем не менее Томсон был убежден, что магнитное отклонение указывает на наличие потока наэлектризованных частиц. Он устранил все сомнения в этом вопросе, усовершенствовав эксперимент Перрена. В последнем

эксперименте цилиндр Фарадея, соединенный с электрометром, помещался на оси катода (рис. 7.22(a)).

Как понял Томсон, эксперимент был бы бесполезен для Герца или Видеманна, поскольку электрический ток в трубке мог бы объяснить заряд, накопленный в цилиндре, даже если бы катодные лучи не участвовали в этом токе даже если бы катодные лучи не участвовали в этом токе. Поэтому Томсон использовал трубку (рис. 7. 22(б)), в которой пучок катодных лучей не мог достичь цилиндра Фарадея, если только он не искривлялся при приближении к магниту. Так исключалось воздействие катодных лучей как причина отклонения электрометра.<sup>84</sup>

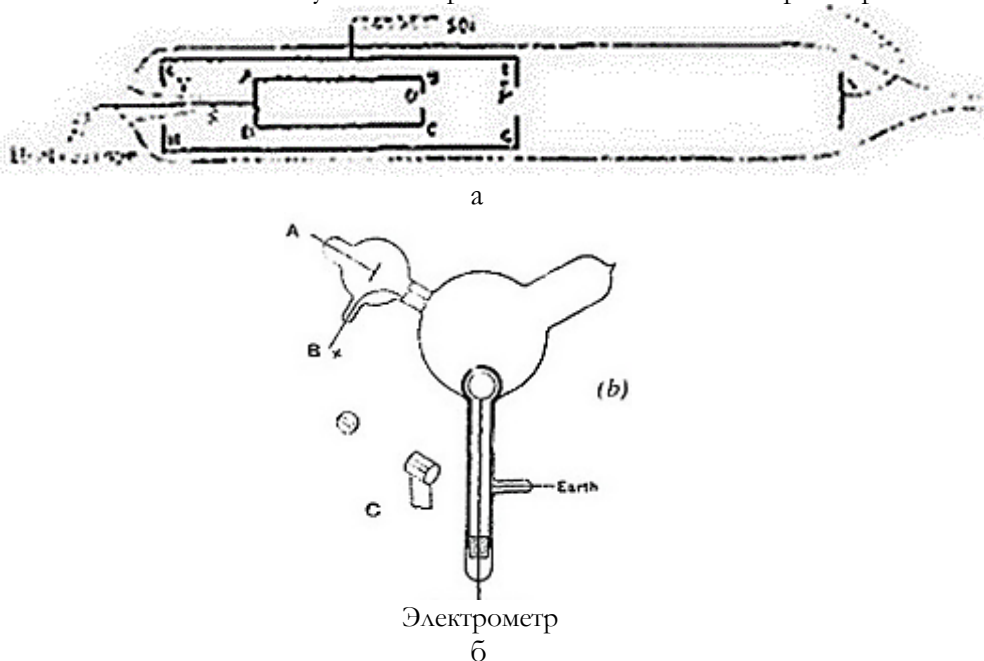


Рис. 7.22. Трубки Перрина (а) и Дж. Дж. Томсоны (б) для обнаружения электрического заряда катодных лучей. (Perrin 1895; J.J. Thomson 1897с).

Теперь дилемма достигла своей полной силы: лучи могли быть только наэлектризованными частицами, и при этом их магнитное отклонение не зависело от остаточного газа. Первым вдохновением Томсона стало использование молекулярных агломератов, которые он в изобилии использовал при объяснении разрядного тока. Катодные лучи могли быть сделаны из таких агломератов, настроенных на постоянное отношение заряда к массе. На первый взгляд, это предположение объясняло и макроскопическую проникающую способность катодных лучей в открытом воздухе, поскольку массивная частица мало нарушалась бы при столкновении с молекулами воздуха. Однако вскоре Томсон отказался от этой возможности, поскольку в этом случае поглощение

зависело от вязкости газа (которая почти не зависит от давления).<sup>85</sup>

<sup>83</sup> J. J. Thomson 1896c: 302 (родители); 1896b: 701-702 (на Перрине), 702-703 (импульс); 1897b (импульсное и магнитное отклонение); Перрин, 1895. Фитцджеральд и Стокс предложили объяснения лучей Ленарда, которые были похожи на лучи Томсона: ср. Falconer 1987: 247-50.

<sup>84</sup> J. J. Thomson 1897a (8 февраля). Для сравнения экспериментов Герца, Перрина и Томсона по электрическому заряду лучей, см. также Lenard 1920: 79-84; Buchwald 1994: 158-166.

<sup>85</sup> J. J. Thomson [1896d]; 1898a: 197. Ср. Falconer 1987: 265. Томсон придерживался агломерационной концепции катодных лучей еще до своих экспериментов по магнитному отклонению.

#### 7.5.4 Корпускла.

Единственной оставшейся возможностью было "несколько поразительное предположение": частицы катодных лучей были намного меньше атомов. Чтобы объяснить закон поглощения Ленарда, Томсон далее предположил, что все атомы представляют собой облака таких частиц, идентичных друг другу: тогда поглощение зависит только от общего числа частиц в единице объема газа, которое пропорционально плотности. Здесь Томсон переносил свое предыдущее ленардовское объяснение аналогичного закона на рентгеновские лучи. Основное отличие заключалось в том, что поглощенные лучи теперь представляли собой сами составляющие поглощающих атомов, вылетевшие из катода после некоего атомного взрыва. Томсон назвал "корпускулу" новой субатомной частицей. Он уже мечтал об атомах, состоящих из правильного расположения корпускул. Возможно, химическая валентность зависит от стабильности таких конфигураций, что он и проиллюстрировал на примере системы плавающих магнитов.<sup>86</sup>

Чтобы укрепить свою корпускулу, Томсон вернулся к магнитному отклонению катодных лучей. Он знал, что это отклонение одинаково в любом остаточном газе, и мог точно измерить его. Чтобы извлечь из этого измерения отношение заряда к массе, необходимо было знать скорость лучей. По мнению всех экспертов, определение скорости по ускоряющему потенциалу лучей было ненадежным, поскольку часть полученной кинетической энергии могла быть поглощена остаточным газом, а также потому, что этот потенциал менялся во времени, особенно если трубка питалась от индукционной катушки. Томсон также не мог полагаться на свои собственные предыдущие определения с помощью вращающегося зеркала, которые приводили к соотношению заряда и массы того же порядка, что и у ионов. Теперь он признал, что задержка в флуоресценции стенок трубки могла испортить это измерение.<sup>87</sup>

Ранней весной 1897 г. Томсон опробовал новый метод, основанный на измерении тепла и электрического заряда, образующихся при ударе лучей о цилиндр Фарадея. Эти два измерения в сочетании с магнитным отклонением тех же лучей дали отношение заряда к массе, примерно в

1600 раз превышающее отношение заряда к массе иона водорода. Сам по себе этот результат не являлся достаточным доказательством малой массы: его можно было объяснить большим зарядом, к тому же он зависел от тонких калориметрических измерений. Однако Томсон решил, что "в сочетании с результатами Ленарда" эти цифры говорят в пользу частицы с гораздо меньшей массой, чем ион водорода. Он также отметил, что влияние сильного магнитного поля на линии натрия, недавно открытое Питером Зеemanом, указывает на отношение заряда к массе того же порядка. Через несколько месяцев Томсон значительно улучшил свое определение отношения заряда к массе, объединив электростатическое (рис. 7.23) и магнитное отклонение.<sup>88</sup>

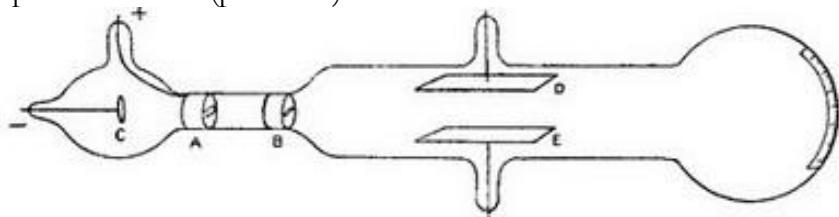


Рис. 7.23. Трубка Дж. Дж. Томсона для электростатического отклонения катодных лучей (J. J. Thomson 1897с). Отклоняющий потенциал применен к пластинам D и E.

Впервые Томсон сообщил об открытии "корпускулы" на вечернем заседании Королевского института 30 апреля 1897 года, а в более полном виде - в октябрьском номере журнала "Philosophical Magazine". Он надеялся разрешить споры о природе катодных лучей и, что более амбициозно, положить начало новой физике, основанной на новом фундаментальном строительном блоке. В то время он считал корпускулу материальной частицей, масса которой лишь частично электромагнитна. Масса ( $e^2/a$ ) и отношение заряда к массе ( $a/e$ ) чисто электромагнитной частицы, утверждал он, были бы существенно переменными, поскольку радиус  $a$  был бы произвольным. Томсон также отверг связь между зарядом корпускулы и электролитическим квантом электричества. Он не мог приписать заряд иона включенным в него корпускулам, поскольку все корпускулы несли отрицательную электризацию. Более того, он полагал, что заряд корпускулы должен быть значительно более кратен электролитическому кванту, чтобы объяснить аддитивность диэлектрической проницаемости химически объединенных газов.<sup>89</sup>

<sup>88</sup> J. J. Thomson, 1897b: 430-431; 1897с (плавающие магниты). См. также Whittaker 1951: 360-361; Heilbron 1964: 81-82, который впервые увидел решающее значение результатов поглощения Ленарда; Falconer 1987: 267-271 за исключение реконструкций корпускулы Томсона, которые придают вес теории Лармора или эффекту Зеemана; Heilbron 1976: 367 и Kragh 1997 для плавающих магнитов Альфреда Майера и их использования Томсоном в контексте вихревых атомов и корпускул. Томсон также сослался на спектроскопические аргументы Нормана

Локьера в пользу субатомов (J. J. Thomson 1897b: 431): см. Neilbron 1964: 19-20; Falconer 1987: 267-268; Kragh 1997. Приняв закон поглощения Ленарда, Томсон неявно признал прозрачность его окна для катодных лучей; т.о. импульсная теория лучей Ленарда, стала бессмысленной.

<sup>87</sup> См. выше примечание 78 об опровержении Томсоном своего предыдущего измерения скорости.

<sup>88</sup> J. J. Thomson 1897b: 431-2 (тепло и заряд), 432 (цитата, Зеeman); 1897c (электрическое и магнитное отклонения). См. также, Whittaker 1951: 362-3; Anderson 1964: 42-6; Davis and Falconer 1997: 123-9; Dahl 1997: 158-74. Примерно за 15 лет до этого Эйльхард Видеман уже измерил тепло, выделяемое при ударе катодных лучей, и использовал полученные результаты против Крукса: см. выше, с. 323.

<sup>89</sup> J. J. Thomson 1897b, 1897c: 311 (материальная масса), 312-3 (заряд). См. Neilbron 1964: 83; Feffer 1989: 59. Если бы, рассуждал Томсон, электрический момент молекулы определялся просто разделением ее ионов, то закон аддитивности не мог бы быть понят; должны были бы иметь место большие вклады составляющих атомов, что, по-видимому, требовало бы большого заряда корпускул.

### **7.5.5. Корпускула против электрона**

Изобретение Томсоном "корпускулы" не было единичным явлением. В следующей главе мы увидим, что Эмиль Вихерт уже обнаружил в катодных лучах новую частицу, имеющую больше общего с современным электроном, чем корпускула Томсона. Мы также увидим, что у Фицджеральда и Лармора были свои собственные представления об электроне. Эти физики согласились с тем, что в катодных лучах была обнаружена отрицательно заряженная частица с массой, значительно меньшей, чем у иона водорода. Примерно через год эфирно-волновые теории катодных лучей сошли на нет. Даже Ленард, который был убежденным сторонником эфирной теории, заявил, что катодные лучи - это "особые, не обнаруженные частицы эфира, которые индивидуально подвижны, обладают массой (инерционны), а также являются носителями заряда". Как видно уже из этой цитаты, существовали серьезные разногласия по поводу более широкого значения новой частицы.<sup>90</sup>

Электрон Лармора, Вихерта и Фицджеральда представлял собой сингулярность в эфире, обладающую чисто электромагнитной массой и несущую электролитический квант заряда; любое изменение электрического заряда означало перенос электронов. Для Лармора и Вихерта электроны также являлись основными составляющими материи, как и корпускулы Томсона. Для большинства других физиков, включая Фицджеральда, предположения о внутреннем строении атомов были преждевременными и граничили с алхимическим; испускание электрона атомом не означало диссоциации, а только изменение электризации. Дж. Дж. Томсон отверг это представление о "развоплощенном электроне", по крайней мере, по трем причинам. Его концепция электрического заряда подразумевала прикосновение трубок сил к веществу и, таким образом, исключала развоплощенное электричество. Его концепция корпускулы зависела от закона поглощения Ленарда, который указывал на существование универсального строительного блока атомов. А

объяснение химических атомов он считал высшей целью физики.<sup>91</sup>

В последние годы столетия Томсон и его сотрудники путем измерений в облачной камере установили, что заряд корпскуллы идентичен кванту электролитического заряда и что такой же заряд корпскуллы возникает при многих других обстоятельствах, включая фотоэлектрический эффект, термоионный эффект и радиоактивность. Томсон также допускал, что масса корпскуллы может быть чисто электромагнитной. Это сделало корпскуллу более похожей на электрон других физиков. Тем не менее Томсон сохранил название "корпскулла" на протяжении всей своей карьеры. Возможно, он хотел показать, что за пределами узкого круга вопросов, связанных с электроном, его стиль физики отличается от стиля других лидеров развивающейся микрофизики.<sup>92</sup>

### **7.5.6 Новый Кавендишский стиль**

Главным достижением Томсона было не столько открытие новой частицы, для которого нельзя назвать ни одного автора, ни одной даты. Скорее, корпскулла Томсона ознаменовал рождение новой максвелловской микрофизики. С теоретической стороны это означало соединение ионов Гельмгольца и Шустера с трубками сил Фарадея и разработку простых моделей с небольшим числом измеряемых параметров для эволюции ионов в различных условиях. Подчеркивая педагогические достоинства своих трубок и моделей, Томсон осуждал традиционные "нагрузки обучения" кембриджской системы, которые могли "подавить энтузиазм студентов" еще до того, как они получали возможность проводить эксперименты. Под последней деятельностью Томсон не имел в виду строгую дисциплину точных измерений, которую отстаивал его предшественник. Он переориентировал Кавендишскую лабораторию на изучение новой физики ионов и излучений. В этом контексте визуальное отображение и порядки величин имели большее значение, чем точность. Хотя старые методы электрических измерений, термометрии и т.д. все еще были полезны, они теперь были подчинены новым методам - выдуванию стекла, высокому вакууму, облачным камерам и т.д. С заразительным энтузиазмом Томсон преподавал новую физику многочисленным посетителям, привлеченным открывшимися тайнами материи и новой системой стипендий. Новый стиль Кавендиша быстро распространился в мире физики.<sup>93</sup>

<sup>90</sup> Lenard 1898: 279-80. См. также. Heilbron .1964: 84; Falconer 1989: 271-3.

О расширенном, коллективном и конструктивном характере "открытия электрона" см. Arabatzis 1996; Lelong 1997; Darrigol 1998.

<sup>91</sup> См. Falconer 1987: 273-4; Feffer 1989: 59-60; Lelong 1997: 105-10. Во Франции Поль Виллар до 1905 г. придерживался антиатомистской интерпретации катодных лучей как заряженных частиц водорода: см. Lelong 1997.

<sup>92</sup> J. J. Thomson 1898b, 1899 См. Также Heilbron 1964: 84-85; 1976; 367; Feffer 1989: 60-61. Об измерении заряда см. Robotti 1995; Davis and Falconer: 129-134; Dahl 1997: 175-189.

Thomson 1898b: 541 ссылался на указание Лоренца о том, что заряд оптических ионов равен электролитическому кванту, основанное на дисперсии и эффекте Зеемана (см. главу 8. стр. 376-377).

<sup>93</sup> См. Falconer 1989 о переориентации Кавендиша; Lelong 1995: гл. 2, и Kim 1995 - о распространении нового стиля.

## 7.6 Выводы

Представление об электрически заряженных атомах или частях молекул впервые возникло в области электролиза. В противовес господствующим химическим представлениям Хитторф и Кольрауш дали количественные доказательства независимой миграции двух ионов растворенного вещества (в макроскопическом смысле). Одним из аспектов этой независимости было то, что электролитическая проводимость никак не связана с химическим родством и удовлетворяет закону Ома даже для очень малых ЭДС. Клаузиус истолковал этот факт с точки зрения предварительной диссоциации молекул. По аналогии с кинетической теорией газов он представлял себе тепловое движение молекул растворенного вещества и столкновения, в результате которых они распадаются на электрически заряженные части. Роль внешней ЭДС заключалась в наложении дрейфа этих заряженных частей на тепловое движение. Долгое время Клаузиус и его последователи допускали лишь частичную предварительную диссоциацию молекул. Когда в конце 1880-х г.г. Аррениус выступал за практически полную диссоциацию в разбавленных растворах, он еще встречал значительное сопротивление. Тем не менее, наэлектризованные атомы и части молекул, называемые теперь ионами, стали центральным притоком немецкой электрохимии.

Гельмгольц придал атомистическому понятию иона наиболее точную форму. В его "Полностью понятной природе" 1847 года все химические и электрохимические явления сводились к переменному притяжению двух электричеств для различных химических элементов. С одной стороны, такая точка зрения обосновывала справедливость термодинамических принципов, через которые можно было связать химические теплоты и вольтовые силы. С другой стороны, Гельмгольц объединил ее с законом электрохимических эквивалентов Фарадея и ввел представление о том, что части молекулы несут фиксированный квант заряда или его целую кратность. В ходе своих электрохимических исследований 1870-х годов он уже не верил в буквальное существование электрических флюидов. Однако он по-прежнему утверждал, что "атомы электричества", связанные с химическими атомами или частями молекул с определенными энергиями, составляют центральную картину электрохимии. С помощью этого четкого, определенного понятия он объяснял процессы, происходящие на границе раздела двух различных проводников, в терминах "двойных слоев" электрических атомов или ионов. Таким образом, он разрешил старый конфликт между химической и контактной теориями гальванического элемента и объяснил широкий



спектр новых электрохимических явлений.

Максвелл и его последователи критиковали понятия свободных ионов, атомов электричества и двойных электрических слоев как возврат к старой электрической жидкости или флюидам. Они подвергли сомнению независимую миграцию ионов и теорию предварительной диссоциации, несмотря на симпатии Максвелла к кинетическим теоретическим взглядам Клаузиуса. И они боролись с гельмгольцевской формой контактной теории гальванических элементов, которую поддерживал Уильям Томсон. Не имея альтернативной молекулярной теории гальванизма, они уступили лидерство в электрохимии немцам. Однако они надеялись, что будущее принесет более философский взгляд на электролитический ток и тем самым прольет свет на общий процесс электропроводности.

Фарадей задолго до этого выражал такую же надежду как на электролиз, так и на электрический разряд через газы. В 1860-1870-х годах наиболее успешными исследователями последнего направления были его немецкие почитатели Плюкер и Хитторф. В газах, разреженных с помощью насоса Гейслера, они наблюдали магнитные и электрические свойства разряда. Плюкер установил, что по магнитному отклонению разряд ведет себя подобно обычным токам. Хитторф обнаружил, что это сходство распространяется и на процесс проводимости вблизи положительного электрода. Однако вблизи катода он наблюдал удивительное лучевое распространение разряда, которое Гольдштейн позже назвал "катодными лучами". С помощью электрических измерений Хитторф также продемонстрировал несколько способов нарушения газовым разрядом закона Ома (помимо давно известного электродвижущего порога), например, резкое падение потенциала вблизи катода и очень низкое сопротивление газа прохождению *второго* разряда.

Хотя они неоднократно ссылались на надежду Фарадея, что разряд в разреженных газах раскроет суть диэлектрических пробоев, Плюкер и Хитторф избегали рассуждений о механизме газового разряда. Первые попытки такого рода игнорировали их работы и категорически противоречили интуиции Фарадея. В начале 1870-х годов Г. Видеман и Рюльман представили, что от электродов отлетают заряженные молекулы, а также частицы электричества Вебера. В 1879 году Крукс и Стокс аналогичным образом предположили, что катодные лучи представляют собой потоки отрицательно заряженных молекул, проецируемых с катода. В начале 1880-х годов Гольдштейн и Э. Видеман отвергли эти корпускулярные представления, поскольку они были несовместимы с очень высокой скоростью разряда и не могли объяснить его сложный визуальный вид. Они предложили альтернативные теории, в которых ток разряда представлял собой

продольную эфирную волну. Для Э. Видеманна, как и для Фарадея, существенным условием возникновения тока была поляризация материальных частиц. Для Гольдштейна, напротив, вакуум был идеальным проводником, а вещество могло только препятствовать возникновению тока.

Теории эфира не были немецкой сильной стороной. Взгляды Гольдштейна были слишком фантастичны, чтобы их всерьез воспринял какой-либо крупный теоретик, а взгляды Видеманна слишком свободны и расплывчаты, чтобы иметь более чем описательную ценность. Однако их полемика с Круксом привлекла внимание двух первоклассных британских физиков. Одним из них был Шустер, уроженец Германии, который в 1884 г. перенес электролитические представления Гельмгольца об ионах и двойных слоях на газовый разряд. Согласно его оригинальной теории, проводимость в газах заключается в диссоциации молекул газа на ионы и конвекции последних в электрическом поле; очевидные отличия от электролитической проводимости, включая нарушение закона Ома, обусловлены большой сложностью получения ионов в ослабленном веществе. Шустер также дал прямые экспериментальные доказательства диссоциации ионов. В Германии ученики Гельмгольца представили дополнительные доказательства того, что проводимость в газах всегда связана с образованием и конвекцией ионов. Эти работы положили начало новой микрофизике, в которой электродинамические свойства вещества сводились к взаимодействию ионов.

Другим британским физиком-звездой, занявшимся изучением газового разряда, был Дж. Дж. Томсон, спорщик и убежденный максвеллианец. Как и Шустер, Томсон проводил аналогию между электролизом и газовым разрядом и считал химическую диссоциацию необходимой для обоих видов тока. Однако для него продуктами диссоциации молекул были нейтральные атомы или части молекул, а электрический ток представлял собой диссипацию напряжения электрического эфира, а не конвекцию частей молекул. Томсон развил эту максвелловскую точку зрения на основе вихревой кольцевой модели атомов и молекул. В этой модели, по которой он написал призовое эссе, не было места понятию наэлектризованного атома.

Около 1888 года Томсон осознал эмпирическое превосходство ионной теории разряда Шустера и был готов отказаться от вихревых атомов. Но он не мог просто признать ионы Гельмгольца: это противоречило бы основному максвелловскому принципу первичности эфирных процессов. В 1891 г. он разрешил кризис, переопределив ион как прикосновение единичной трубки электрической силы к атому или группе атомов. Такое представление позволило ему перенести успехи гельмгольцевских атомов электричества на материю, не изменяя максвелловскому сведению электрического заряда и проводимости к эфирным процессам. Заряд

представлял собой завершение или скачок эфирных трубок, а проводимость - их усадки. Томсон также заменил двойные слои Шустера старым представлением Фарадея о цепочках Гроттуса, в пользу которого свидетельствовали различные свойства разряда.

Между тем, разногласия по природе катодных лучей сохранялись. Гольдштейн считал их токнесущими эфирными волнами, Э. Видеманн - ультрафиолетовым светом, Герц - продольными волнами в оптическом эфире, Шустера и Томсона - отрицательными ионами, излучаемыми катодом. У каждого эксперта были веские основания придерживаться своей позиции. Никто не изучал лучи самостоятельно, кроме Герца, который подозревал в них совершенно новую сущность, не являющуюся ни обычным светом, ни электрическим током. В 1894 году его ассистенту Ленарду удалось вывести катодные лучи из разрядной трубки и обнаружить, что они ведут себя совсем не так, как ионы Шустера. При повторении этого эксперимента (предположительно) Рентген сделал свое впечатляющее открытие рентгеновских лучей. После этого физики стали уделять больше внимания их "родителям" - катодным лучам.

Томсон обобщил доказательства корпускулярной природы катодных лучей. Но он не мог понять их высокую проникающую способность, пока не заподозрил, что участвующие в них "корпускулы" гораздо меньше ионов. В 1897 г. он и Вихерт представили доказательства того, что отношение заряда к массе частиц катодных лучей примерно в 2000 раз больше, чем у иона водорода. Вскоре физики согласились с корпускулярной природой катодных лучей и существованием электрически заряженной частицы субатомного размера. Однако они разошлись во мнениях относительно роли этой частицы в общей экономике физики. Для Томсона новая частица была фундаментальной составной частью всей материи. Для других теоретиков она была материализацией кванта электрического заряда.

Такое раздвоенное использование новой частицы отражало существование двух разновидностей поднимающейся физики ионов. Та, что была основана Шустером и Томсоном, занималась вопросами электропроводности в электролитах и газах, а также строением вещества. Разновидность Лоренца, Лармора и Вихерта, которой посвящена следующая глава, стремилась усовершенствовать максвелловский синтез оптики и электромагнетизма. Оба подхода привели к компромиссу между континентальной и британской электродинамикой и в последние годы века они постепенно сходились на единой концепции электрона. Шустер и Томсон закрепили новую микроэлектродинамику на твердой эмпирической почве. Возглавив Кавендишскую лабораторию, Томсон отошел от прежней дисциплины точных измерений и разработал методики изучения проводимости в разреженных газах и свойств новых

излучений. Преуспели в этой новой физике и немцы Ленард, Кауфман и Штарк, однако Томсон и Кавендишская лаборатория были наиболее эффективны в обучении новичков и распространении целостного набора экспериментальных и теоретических методик.

## 8. Электронные теории

### 8.1 Введение

Для многих читателей Максвелла самым впечатляющим его успехом было объединение оптики и электромагнетизма. Однако Максвелл оставил эту тему в очень незавершенном виде. Для оптической рефракции, дисперсии, магнитооптических эффектов и оптического поведения движущихся тел у него не было полностью электромагнитного объяснения. Он считал, что эти явления требуют более детального рассмотрения молекулярного строения вещества, но не выполнил практически никакой работы такого рода. Как мы видели в предыдущей главе, некоторые наследники Максвелла, особенно Лодж и Дж. Дж. Томсон, все же ввели атомистику в теорию Максвелла. Но в основном они занимались механизмом электрической проводимости. В оптике и магнитооптике максвелловцы предпочитали макроскопический подход, который доминировал в "*Трактате*". Физики, впервые разработавшие атомистические соображения в этой области, либо жили на континенте (Лоренц, Гельмгольц, Вихерт), либо не соглашались с важными аспектами теории Максвелла (Лармор). К концу века их усилия сошлись на новом, микрофизическом подходе к электромагнетизму, который Лармор назвал "теорией электронов". В этой главе рассказывается о формировании этой теории.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> См. главу 5 о максвелловской оптике и магнитооптике. Название «Теория электронов» принадлежит Лармор 1895а.

### 8.2 Некоторые вопросы оптики движущихся тел

Одним из основных вопросов, волновавших первых теоретиков электронов, была оптика движущихся тел. Правильная история этой темы, начиная с открытия Джеймсом Брэдли звездной абберации и заканчивая экспериментами Майкельсона-Морли, должна учитывать астрономический контекст, а также споры о природе света. Здесь мы ограничимся лишь теми аспектами этой истории, которые имели отношение к эволюции электродинамики.<sup>2</sup>

#### 8.2.1 Френель против Стокса

Самый старый известный эффект движения в оптике - абберация звезд: видимое положение звезды на небе получается путем сложения скорости света от этой звезды и скорости Земли относительно неподвижных звезд. В своей волновой теории 1820-х гг. Огюстен Френель рассматривал этот эффект как следствие движения Земли через неподвижный эфир. Точнее, он предполагал, что в вакууме эфир остается неподвижным, а в движущемся материальном теле избыток эфира (необходимый для

объяснения рефракции) переносится телом. Соответственно, разбавленная движущаяся материя, например атмосфера Земли, оставляет ход света неизменным, а более плотная материя, движущаяся в направлении световых волн, передает волнам долю  $1 - 1/n^2$  от своей скорости, если  $n$  - оптический индекс тела. Это частичное перетягивание объясняет ранее сделанное Араго наблюдение, что преломление света не зависит от движения Земли через эфир (см. Приложение 11).<sup>3</sup>

Теория Френеля не осталась без ответа. Джорджу Стоксу было трудно представить, что огромная масса Земли проницаема для эфира. В 1845 г. он предположил отсутствие эфирного ветра вблизи поверхности Земли. Тогда движение Земли вообще не влияло на оптические эксперименты с земными источниками. Однако простое объяснение звездной абберации, данное Френелем, уже не действовало. Стоксу потребовалось, чтобы скорость эфира (относительно неподвижных звезд) была неизменной, чтобы путь светящихся лучей был таким же, как в неподвижном эфире. Теория Стокса была наиболее популярна в Великобритании. В отчете по оптическим теориям, написанном в 1885 г. для Британской ассоциации, по-прежнему преуменьшались "несколько жестокие предположения Френеля об отношении между эфиром внутри и вне прозрачного тела". К тому времени некоторые британские физики, возможно, осознали, что ЭМ- теория света Максвелла неявно поддерживает полное затягивание эфира Стоксом, поскольку в ней эфир и материя идеализированы как единая среда с переменными макроскопическими свойствами.<sup>4</sup>

В 1851 году Ипполит Физо объявил о подтверждении сопротивления Френеля, основанном на интерференции движущейся воды в двухлучевом интерференционном устройстве (рис. 8.1).

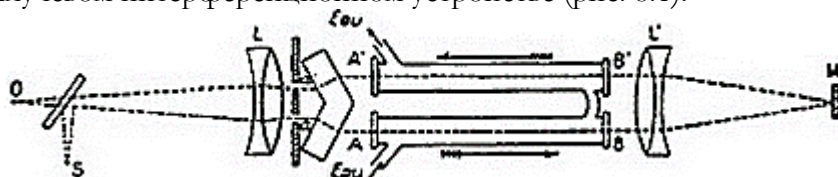


Рис. 8.1. Эксперимент Физо 1851 года по измерению затягивания световых волн движущейся водой (из Mascart 1893, том 3: 101).

После отражения стеклянной пластиной луч от источника S пересекает линзу L, диафрагму с двумя отверстиями aa' и V-образное двойное лезвие, что приводит к двум параллельным пучкам света. Один пучок движется вдоль АВМВ'N, в направлении потока воды; другой вдоль NB'MBA, против потока воды. Они снова встречаются, смешиваясь в О. Теория Стокса может быть модифицирована с учетом этого результата, но ценой усложнения по сравнению с теорией Френеля. Сам Максвелл признавал, что результат Физо, если он верен, говорит в пользу теории эфира Френеля. Однако за Ла-Маншем доверие к этому тонкому

эксперименту было не столь велико. В 1878 г. Максвелл все еще оценивал теорию Стокса как "весьма вероятную", хотя и с осторожностью:

*"Весь вопрос о состоянии светящейся среды вблизи Земли и о ее связи с грубой материей еще очень далек от разрешения экспериментальным путем".<sup>5</sup>*

На континенте сопротивление Френеля обычно рассматривалось как установленный факт. В начале 1870-х годов Вильгельм Вельтман и Элевтер Маскарт доказали, что сопротивление Френеля, наряду с принципами Гюйгенса и Доплера, предполагает нечувствительность земной оптики к движению Земли первого порядка по  $u/c$ , где  $u$  - скорость Земли по отношению к эфиру, а  $c$  - скорость света.

Маскарт сопровождал свою демонстрацию множеством тщательных экспериментов, опровергающих прежние утверждения об обратном. Его общий вывод гласил:

*"Поступательное движение Земли не оказывает заметного влияния на оптические явления, производимые земным источником или светом от Солнца, [поэтому] эти явления не дают нам возможности определить абсолютное движение тела, а относительные движения - единственные, которые мы в состоянии определить".*

Далее Маскарт отметил, что объяснения Френеля и других авторов, объяснявших френелевское сопротивление избытком эфира в прозрачных телах, уже невозможны. Например, инвариантность экспериментов с двойным преломлением требует двух различных коэффициентов сопротивления для двух преломленных лучей. Адекватной эфирной теории сопротивления Френеля еще не было.<sup>6</sup>

<sup>2</sup> Об истории оптики движущихся тел, ср. Ketteler 1873; Mascart 1893, Vol. 3, гл. 15; Larmor 1900a, гл. 2; Schaffner 1972; Hirosige 1976; Buchwald, 1988; и авторитетный обзор Janssen and Stachel [1999].

<sup>3</sup> Bradley 1728 (абберрация); Fresnel 1818. См. Также Whittaker, 1951: 94-95, 109-110; Hirosige 1976: 6-9; Mayrargue 1991.

<sup>4</sup> Stokes 1845b, 1846b; Glazebrook 1885 (отчет BASS). Ср Wilson 1972; Hirosige 1976: 10-12; Whittaker 1951: 386-7; Buchwald 1988: 56-7. Глазebroок не стал комментировать значение электромагнитной теории света для оптики движущихся тел. Heaviside (1889a: 519-521), Lodge, and FitzGerald (письма от апреля 1891 года, прокомментированные в Hunt 1991a: 203) согласились, что теория Максвелла подразумевает полное сопротивление, вопреки J. J. Thomson 1880 года, нашедшему коэффициент сопротивления половинным (в хорошем согласии со значением Френеля для воды) путем наивной комбинацией уравнений *Трактата* Максвелла.

<sup>5</sup> Fizeau 1851; Maxwell to Huggins, 10 June 1867, *MSLP* 2: 311; Maxwell 1878: 769, 770. В 1864 году Максвелл ошибочно полагал, что сопротивление Френеля-Физо подразумевает влияние движения Земли на отклонение света от призмы, и выполнил эксперимент для проверки этого эффекта (эксперимент Араго с призмой с заземленным источником), с отрицательным результатом; Стокс вскоре исправил свой расчет: ср. Harman 1995a: 9-10.

### 8.2.2. Эксперименты Майкельсона-Морли.

Ситуация усложнилась в 1880-х годах, когда американский физик Альберт Майкельсон провел эксперименты, направленные на решение

вопроса о движении эфира. В первом эксперименте, проведенном в Потсдаме в 1881 году, Майкельсон использовал собственный интерферометр (рис. 8.2) для проверки эффекта второго порядка, связанного с движением Земли относительно эфира.

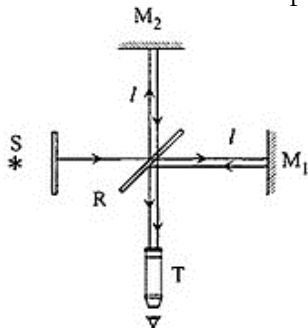


Рис. 8.2. Схема интерферометра Майкельсона

В этом приборе свет от источника S разделяется на два луча полупрозражающей пластиной R. После отражения от зеркал  $M_1$  и  $M_2$  оба луча вновь встречаются в точке R, и полученная интерференционная картина наблюдается в телескоп Т. Предположим, что одно плечо интерферометра параллельно скорости  $u$  Земли относительно эфира. Согласно анализу Майкельсона, проведенному в 1881 году, эффект этого движения через неподвижный эфир заключается в увеличении длительности кругового пробега света в этом плече на величину  $[l/(c - u) + l/(c + u)]/(2l/c)$ , которая равна  $(1 - u^2/c^2)^{-1}$ . Прибор Майкельсона был достаточно чувствителен, чтобы обнаружить половину соответствующего смещения полосы. Из нулевого результата он сделал вывод, что от теории аббераций Френеля следует отказаться.<sup>7</sup>

Через год Майкельсон узнал от Альфреда Потье, что он упустил из виду влияние движения другого плеча интерферометра: путь света в обе стороны в этом плече увеличивается в  $(1 - u^2/c^2)^{-1/2}$  раз. Этот эффект уменьшает ожидаемое смещение полос в два раза, и точность измерений в Потсдаме становится недостаточной для исключения теории Френеля. Позже Майкельсон по совету Уильяма Томсона и лорда Рэля решил повторить эксперимент Физо. С его мощной интерферометрической техники и помощи Эдварда Морли в 1886 году он точно подтвердил коэффициент затягивания Френеля.<sup>8</sup>

Через несколько месяцев голландский физик Хендрик Лоренц опубликовал то, что Майкельсон назвал "очень глубоким анализом" проблемы движения эфира. Прежде всего Лоренц утверждал, что теория Стокса кинематически невозможна: поток несжимаемой жидкости вокруг движущейся твердой сферы не может быть одновременно неизменным и прилипающим к сфере. Теорию Стокса можно было спасти, только допустив конечное скольжение эфира у поверхности Земли и приняв

френелевское сопротивление в прозрачных телах, чтобы скольжение не влияло на законы преломления на Земле. Эта модифицированная теория позволяла получить нулевой результат Потсдамского эксперимента Майкельсона, поскольку на Земле могли существовать места, в которых проскальзывание эфира было настолько мало, что его нельзя было обнаружить. Однако Лоренц предпочел теорию Френеля за ее большую простоту и по другим причинам, которые будут рассмотрены ниже. Как и Потье, он отметил ошибку в теории Майкельсона при проведении его эксперимента и призвал к его повторению.<sup>9</sup>

Майкельсон и Морли осуществили это желание уже в следующем, 1887 г. С помощью усовершенствованного интерферометра, установленного на мраморной плите, плавающей в ртутной ванне, они обнаружили, что смещение границы по крайней мере в 20 раз меньше, чем ожидалось для неподвижного эфира. Этот результат привлек внимание двух ведущих максвелловцев, Фицджеральда и Лоджа. Последний занялся движением эфира и для экспериментального исследования построил впечатляющую "вихревую машину", в которой два тяжелых коаксиальных стальных диска вращались с большой скоростью рядом друг с другом (рис. 8.3).

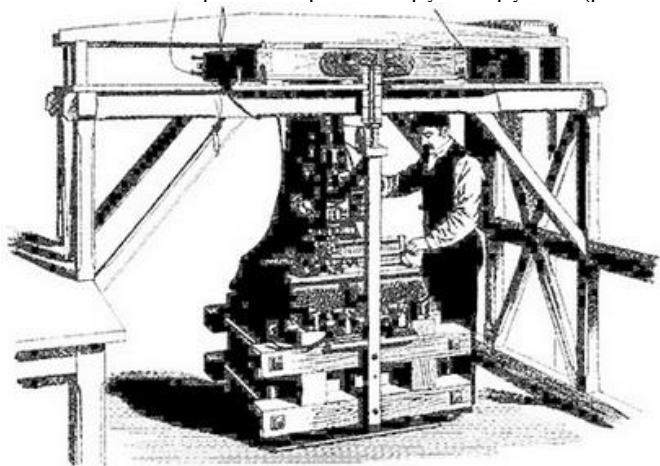


Рис. 8.3. Эфировихревая машина Лоджа (Lodge 1893: 767). Оператор стоит перед двигателем, приводящим в движение вращающуюся пару дисков. Диски заключены в деревянный барабан, расположенный над головой оператора. В барабане находится интерферометрическое устройство. Он опирается на длинные внешние балки, чтобы вибрации центрального алтаря не нарушали оптических измерений.

Возможное движение эфира между дисками было проверено методом интерферометрии Майкельсона. Отрицательный результат, опубликованный в 1893 году, подтвердил стационарный эфир Френеля. Это сделало эксперимент Майкельсона-Морли 1887 года более парадоксальным, чем когда-либо. В 1889 году Фицджеральд уже упоминал Лоджу о возможном выходе из парадокса. От Хевисайда он



знал, что электрическое поле электрифицированной сферы, движущейся со скоростью  $v$ , было сжато в направлении плоскости меридиана (см. стр. 235) в пропорции  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ . Под впечатлением совпадения с соотношениями времени и света в эксперименте Майкельсона он предложил следующее объяснение его нулевого результата:<sup>11</sup>

*Длина материальных тел изменяется в зависимости от того, как они движутся через эфир или через него, на величину, зависящую от квадрата отношения их скоростей к скорости света. Мы знаем, что на электрические силы влияет движение наэлектризованных тел относительно эфира, и не представляется невероятным предположение, что движение влияет на молекулярные силы и, следовательно, размер тел изменяется.*

Поначалу гипотеза не привлекла особого внимания: электродинамики были заняты новыми волнами Герца. Когда в 1890-1892 гг. Герц и Хевисайд предложили полную максвелловскую электродинамику движущихся тел, они с сожалением отметили, что их полностью втянутый эфир несовместим с оптикой движущихся тел. Тем не менее они отложили дальнейшее изучение связи между веществом и эфиром. Так же поступали и другие немецкие авторы теории Максвелла. Как правило, они концентрировались на усвоении основной части системы Максвелла и пренебрегали побочными вопросами электромагнитной оптики. Исключение составлял сборник ионной физики Герман фон Гельмгольц.<sup>12</sup>

<sup>6</sup> Mascart 1872, 1874: 420; Veltmann 1870a, 1870b, 1873. См. также Newburg 1974; Pietrocola Pinto de Oliveira 1992; Hirose 1976: 18-22. Максвелловские физики, похоже, не знали о затруднении с объяснением Френеля сопротивления, как видно в Glazebrook 1885: 182 и в Lodge 1893.

<sup>7</sup> Michelson 1881. См. также Swenson 1972: 54-73; Howbold and Pyenson 1988.

<sup>8</sup> Michelson 1882: 522n (замечание Потье); Michelson and Morley 1886. См. также Swenson 1972: 73, 74-87.

<sup>9</sup> Lorentz 1886; Michelson and Morley 1887; 335. См. также Hirose 1976: 26-28; Buchwald 1988: 59-61. Неизвестный Лоренцу, Стоукс давно знал о кинематической трудности. Однако он полагал, что его гелеобразный эфир может излучать вращательную составляющую движения, создаваемого Землей: см. Wilson 1972.

<sup>10</sup> Michelson and Morley 1887; Lodge 1893. См. также Hirose 1976: 29-30; Swenson 1972: 87-97; Hunt 1986 (о Лодже).

<sup>11</sup> FitzGerald 1889b. См. Brush 1967; Hunt 1988, 1991a: 189-197.

<sup>12</sup> Hertz 1890b: 285. Heaviside 1891-1892: 524. Хевисайд Герцу, 14 августа 1889, в O'Hara and Pricha 1987; Герц Хевисайду, 3 сентября 1889 г., там же. См. также Darrigol 1993b: 319, 324-325, 337.

### 8.3. Ионная оптика Гельмгольца.

#### 8.3.1 Перенос центров силы

С момента проведения важнейших экспериментов в середине 1870-х Гельмгольц был убежден, что теория Максвелла является единственно возможной. В то время под "теорией Максвелла" он подразумевал свою

собственную интерпретацию в терминах сильно поляризуемого вакуума. Как мы видели в предыдущей главе, он считал электрическую жидкость или жидкости удобными при обсуждении электролиза. В своей Фарадеевской лекции в 1881 году Гельмгольц ввел провокационное понятие "атомы электричества". Однако он не считал электричество субстанцией и заявил своим британским слушателям:

*"Вовсе не обязательно принимать какое-либо определенное мнение о конечной природе электричества".*<sup>13</sup>

В 1890-х годах Гельмгольц принял уравнения Герца и его идею о том, что электрический заряд - это только "название" для сохраняющегося свойства поля. Эта точка зрения была вполне совместима с концепцией ионов, которая требовала только постоянства электрического заряда. Но труднее было примириться с передачей атомами электричества между ионами и электродами. По этому поводу Гельмгольц высказался следующим образом:

*"Единственное требование электрохимической теории, которое не содержится в уравнениях Максвелла, состоит в том, чтобы эти центры электрических сил [в ионах] могли мигрировать с большой затратой работы от иона к иону во время химических превращений, как если бы они были прикреплены к существенному носителю, который притягивался бы с различной силой валентными участками различных видов ионов".*

Иными словами, уравнения Максвелла достаточны, если все переносы электричества свести к микроскопической конвекции зарядов. В электролизу это предполагало существование субмолекулярных наэлектризованных частиц, переносящих атом электричества. Теории Лоренца, Лармора и Вихерта предполагали очень многое.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Helmholtz, 1881a: 60, 59. См. также Гл.7, с. 312-313.

<sup>14</sup> Helmholtz 1893a: 506-567. О том, как он принял формулировку Герца, см. Гл. 6, с. 296.

### 8.3.2 Дисперсия

В конце жизни Гельмгольц посвятил большую часть своих усилий подведению физики под принцип наименьшего действия. В случае электродинамики ему удалось найти наименьшее действие для уравнений Максвелла-Герца, в том числе и для случая движущихся тел (см. Приложение 9). Математическая сложность этой работы, вероятно, отпугивала многих его современников, однако в 1893 году Гельмгольц получил убедительную теорию оптической дисперсии, объединив вариационный метод с представлением об упруго связанных ионах.<sup>15</sup>

Физики долгое время считали, что зависимость преломления от длины волны обусловлена молекулярной структурой среды. В оптической теории Коши молекулы эфира и вещества двигались вместе, поэтому показатель преломления был убывающей функцией длины волны. Однако в 1870-х годах стало известно, что избирательно поглощающие тела, такие как пары йода или красители, демонстрируют "аномальную

дисперсию", при которой красный свет преломляется сильнее, чем фиолетовый.

Вскоре ученик Франца Неймана Вольфганг фон Зельмайер с помощью энергичного аргумента показал, что если молекулы сами являются осцилляторами, связанными с движением эфира, то дисперсия меняется на противоположную, когда оптическая частота проходит через частоту молекулярного резонанса.<sup>16</sup>

В 1875 г. Гельмгольц усовершенствовал эту теорию, добавив затухание молекулярных колебаний и переформулировав ее в виде двух связанных динамических уравнений: одно для эфира, другое для молекулярных колебаний. Его теория 1893 года может рассматриваться как перевод этой системы на электромагнетизм. Электрическое поле действует на упруго связанные ионы, а движение ионов рассматривается как источник поля. Дисперсия соответствует зависимости этого взаимодействия от частоты поля. Технически Гельмгольц получил уравнения движения, введя в действие гамильтониана члены, зависящие от средней ионной поляризации  $\mathbf{P}$ . Это дает

$$m\partial^2\mathbf{P}/\partial t^2 + a\partial\mathbf{P}/\partial t + \mathbf{P}/\theta = \partial\mathbf{A}/\partial t \quad (8.1)$$

для движения поляризации в электрическом поле  $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ ; а также

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu_0 \partial/\partial t (\mathbf{P} - \varepsilon_0\partial\mathbf{A}/\partial t) \quad (8.2)$$

для связи между векторным потенциалом  $\mathbf{A}$  и током ионной конвекции  $\partial\mathbf{P}/\partial t$ .

Монохроматические решения плоской волны этой системы приводят к дисперсионной формуле

$$n^2 - 1 = \varepsilon_0^{-1}/(\theta^2 + ai\omega - m\omega^2) \quad (8.3)$$

где  $\omega$  - пульсация волн, а  $n$  - оптический индекс среды.

Гельмгольца не интересовали микроскопические детали взаимодействия или он считал их слишком сложными, чтобы их можно было проанализировать. Его шаг в микрофизику был осторожным, в соответствии с его принципом, что *"не следует специализировать теоретические предположения дальше, чем это необходимо для предмета"*.<sup>17</sup>

Однако идея о взаимодействии света и материи через ионы была для максвелловских физиков новой, даже еретической. В тех случаях, когда атомная структура играла роль, Максвелл и его последователи в Кембридже возвращались к упруго-твердой теории света. В одном из вопросов математического трипоса 1868 г. Максвелл предвосхитил теорию дисперсии Зельмайера, основанную на упругом твердом эфире. Его ученик Глазбрук поступил аналогично, добавив иллюстрацию с системой струн. До появления работ Шустера и Дж. Дж. Томсона по газовому разряду максвелловцы обычно избегали молекулярных расширений макроскопических понятий заряда и токов. У Гельмгольца такого ограничения не было.<sup>18</sup>

- <sup>15</sup> Helmholtz 1893a. О Гельмгольце и наименьшем действии см. Главу 6, с. 296.
- <sup>16</sup> Sellmeier, 1872 год. Ср. Heilbron 1964: 21-5; Buchwald 1985a: 233-234; Carazza and Robotti 1996: 589-590.
- <sup>17</sup> Helmholtz, 1875, 1893a, 1880: 910. См. также Buchwald 1985b: 234-239; Carazza and Robotti 1996: 598-602. Из-за путаницы между микроскопическим и макроскопическим полями выражение действия Гельмгольца не совсем корректно. Хотя это не влияет на форму дисперсионной формулы, ошибка должна быть исправлена до обобщения на движущееся тело, как это сделано в Reiff 1893 (и в уравнениях (8.1) и (8.2)).
- <sup>18</sup> Maxwell [1868b], 1869, [1873b]; Glazebrook 1893. См. также Whittaker 1951: 261-5; Heilbron 1964: 24-25. Заметное исключение из максвелловского подхода см. в главе 7, с. 305, примечание 2.

### 8.3.3 Движущиеся тела

Свои последние работы Гельмгольц посвятил еще одному недостатку электромагнитной теории света Максвелла - оптике движущихся тел. Он предварительно обсудил движение эфира вокруг движущегося твердого тела. Он исследовал, "может ли чистый эфир быть лишенным инерции и удовлетворять уравнениям Максвелла, и какое движение он при этом совершит". Как и Герц, Гельмгольц не хотел приписывать эфиру импульс. Он пытался уравновесить силу Герца  $\partial(\mathbf{D} \times \mathbf{B})/\partial t$ , действующую на эфир, градиентом давления. Согласно уравнениям Максвелла-Герца, это невозможно было сделать, не допустив скольжения эфира на поверхности движущегося твердого тела. Гельмгольц умер, не завершив это исследование. Его проект попытались возродить на рубеже веков Вильгельм Вин и Густав Ми. Они не достигли большого успеха: к тому времени проблема движения эфира в значительной степени устарела.<sup>19</sup>

Если бы Гельмгольц был менее щепетилен в вопросах динамики движения эфира, он мог бы пренебречь движением эфира между ионами и обобщить уравнения своей дисперсионной статьи на случай движущегося прозрачного тела. Это сделал в 1893 году Рихард Рейфф. Сложные расчеты Рейффа сводились к включению эффекта глобальной конвекции ионов в поляризационный ток. В результате было получено именно частичное сопротивление Френеля. Вклад Гельмгольца и заявление Рейффа дали решающий толчок развитию ионной теории в Германии. Однако они не были беспрецедентными. Не зная Рейффа, Хендрик Лоренц годом ранее вывел коэффициент Френеля. Более того, Лоренц получил ионную теорию дисперсии, эквивалентную теории Гельмгольца, примерно за 15 лет до этого.<sup>20</sup>

### 8.4. Синтез Лоренца

Изолированный прорыв Лоренца во многом был связан с его голландским происхождением. Как и подобает открытости его страны, он без разбора читал немецкие, английские и французские источники. Его главные вдохновители - Гельмгольц, Максвелл и Френель - принадлежали к совершенно различным, порой противоречащим друг другу традициям.

Если в обычном сознании эклектика могла бы привести к путанице, то Лоренц извлек из нее пользу. Он выбирал элементы из каждой системы и создавал свои собственные синтезы, отвергая априорную необходимость какого-либо теоретического принципа и осуждая опасность следования исключительно одному направлению исследований. Тем не менее, у него были личные предпочтения. Как и Йоханнес ван дер Ваальс, он утверждал превосходство "принципа атомизма". Большая часть его исследований касалась кинетической теории молекул. Его наиболее влиятельные работы привнесли атомизм в оптику и электродинамику.<sup>21</sup>

<sup>19</sup> Helmholtz 1893b; Wien 1898: II; Wien 1901; Mie 1899, 1901a, 1901b..

<sup>20</sup> Reiff 1893.

<sup>21</sup> О биографии Лоренца, см. McCormach 1974; о его философии см. Lorentz 1878a.

#### 8.4.1. Тезис Гельмгольца

Первая серьезная работа Лоренца, его диссертация 1875 г., была не о молекулярной гипотезе, а сноске, обнаруженной в фундаментальном труде Гельмгольца 1870 г. о движении электричества. Отметив аналогию Максвелла между электрическими движениями в диэлектрике и колебаниями в оптическом эфире, Гельмгольц написал:<sup>22</sup>

*Эта аналогия уместна и в другом, очень важном отношении, которого Максвелл не коснулся. До сих пор механическое состояние светового эфира в прозрачных средах отождествлялось с механическим состоянием твердых упругих тел. Однако на границе между двумя прозрачными средами это предположение дает граничные условия, не соответствующие объяснению отражения и преломления света, так что в теоретической оптике остается неразрешенное противоречие. Напротив, теория электрических колебаний [в диэлектриках с очень большой поляризуемостью] дает законы распространения волн, отражения и преломления, которые, как известно, применимы к свету.*

Диссертация Лоренца объясняла эту краткую сноску. Сначала он подтвердил трудности упруго-твердых теорий света, а затем применил "теорию Максвелла" - он имел в виду ее новую интерпретацию Гельмгольцем - к этой проблеме. Напомним, что Максвелл уклонился от решения этой задачи, предположительно потому, что не доверял своим уравнениям для быстропеременных полей в веществе. Лоренц провел все расчеты с полным набором уравнений Гельмгольца и только в конце взял ограничение на бесконечную поляризуемость диэлектрика. Граничные условия между двумя средами он получал, требуя, чтобы ни одна из наблюдаемых величин не становилась бесконечной на разделяющей поверхности. Полученные формулы для направления и интенсивности отраженных и преломленных лучей совпали с формулами Френеля в изотропном случае и формулами Неймана в анизотропном случае.<sup>23</sup>

Лоренц обосновал свое предпочтение системе Гельмгольца:

*"Я начну с мгновенного действия на расстоянии: таким образом мы сможем*

*основать теорию о наиболее прямой интерпретации наблюдаемых фактов". Он имел в виду, что самые простые эксперименты по электричеству. Кулоновские, например, касались сил, действующих на расстоянии. И ему было "трудно не представить себе ток как движение некоторого вещества, которое содержится во всех хороших проводниках электричества".*

Однако в соответствии со своей плюралистической философией он не стал превращать действие на расстоянии в жесткую догму. Истинной отправной точкой теории, по его словам, были исходные дифференциальные уравнения, а не действие на расстоянии.<sup>24</sup>

Использование уравнений Гельмгольца вместо уравнений Максвелла предполагало гораздо большую аналитическую сложность, чем при современной постановке той же задачи. Лоренц легко ориентировался в математических зарослях. Он излагал свои результаты с большой ясностью и изяществом и исследовал все возможные контакты с экспериментом. Эти качества были быстро отмечены голландскими властями, которые в 1878 г. предложили ему занять Лейденскую кафедру теоретической физики.<sup>25</sup>

Работая над диссертацией, Лоренц убедился в превосходстве "теории Максвелла "над "старой волновой теорией", но подчеркнул ограничения новой теории и наметил молекулярную программу их преодоления:

*Давайте подумаем о явлении дисперсии, вращении плоскости поляризации и о том, как эти явления связаны с молекулярной структурой, а затем о механических силах, которые, возможно, играют роль в некоторых световых явлениях. Затем подумаем, как влияют на свет внешние силы и движение среды; подумаем о явлениях испускания и поглощения, о лучистом тепле [...]. Наконец, теория света должна выявить связь между [молекулярными] электрическими движениями и физико-химическим состоянием вещества, связь, лежащую в основе спектрального анализа с его удивительными результатами.*

Эта программа в значительной степени определяет работу Лоренца на протяжении последующих 30 лет, за исключением последней темы, за которую взялись другие физики.<sup>26</sup>

<sup>22</sup> Lorentz 1875; Helmholtz 1870b: 558-9. См. также Hirose 1969: 160-167

<sup>23</sup> Lorentz 1875. См. также Hirose 1969: 160-167. О трудностях теории упругого твердого тела и максвелловского решения см. главу 5, стр. 222-224. Лоренц не знал о работе МакКаллага. <sup>24</sup> Lorentz 1875: 224. <sup>25</sup> см. McCormach 1974.

<sup>26</sup> Lorentz 1875: 382-383. См. также Hirose 1969: 173.

### 8.4.2 Дисперсия

Большая часть диссертации Лоренца трактовала диэлектрики макроскопически, с простой линейной зависимостью  $\mathbf{P} = \kappa \mathbf{E}$  между поляризацией и электродвижущей силой. Тем не менее, он также содержал предложение для более подробной микроскопической картины:<sup>27</sup>

*Если кто-то хочет дать абсолютно полное описание электрического движения*

*[в материальных диэлектриках], он должен сначала учесть эфир, а затем встроенные молекулы. Затем вступают в игру расстояние, размер и форма молекул, что весьма вероятно влечет за собой возможность объяснить дисперсию и вращение плоскости поляризации. Здесь я оставляю эти вопросы в стороне. Отмечу лишь, что в газах, для которых влияние молекул очень мало, это влияние очень просто можно учесть в первом приближении. Для этого предположим, что эфир обладает абсолютно такими же свойствами в газах, как и в вакууме.*

Последнее предположение было самым простым, что Лоренц мог сделать. Он только должен был наложить поляризацию молекул на поляризацию вакуума, согласно

$$\mathbf{P} = \kappa_0 \mathbf{E} + N \kappa_1 \mathbf{E}, \quad (8.4)$$

где  $\kappa_0$  - поляризуемость вакуума;

$\kappa_1$  - поляризуемость молекулы;

$N$  - количество молекул в единице объема.

Следовательно, скорость распространения поперечных волн пропорциональна  $(\kappa_0 + N \kappa_1)^{-1/2}$ . Соответствующий оптический индекс  $(1 + N \kappa_1 / \kappa_0)^{1/2}$  изменяется в зависимости от плотности газа в соответствии с эмпирическим законом Араго и Био<sup>28</sup>.

Это простое рассуждение во многом было связано с контекстом Гельмгольца, в котором поляризация сводилась к микроскопическим сдвигам электрического заряда. Это противоречило духу трактата Максвелла. Для максвелловских физиков еще в 1880-х годах поляризация была макроскопическим свойством эфира, а не расширяться в атомном масштабе. Роль молекул состояла в том, чтобы изменить эластичность эфира в промежуточном пространстве с помощью неизвестного неэлектрического механизма. Напротив, Лоренц предполагал поляризуемые молекулы, встроенные в неподкупный эфир. В 1878 году Лоренц опубликовал теорию дисперсии, основанную на той же базовой картине.

Он идентифицировал молекулярную поляризацию с электрическим моментом  $qr$  «частиц, обеспеченных свободным электричеством внутри молекул» ( $q$  обозначает заряд,  $r$  его смещение). Эти гипотетические частицы массы  $m$  перемещались под действием комбинированных сил упругости  $qr$  и локального электрического поля. Следовательно, их поляризуемость зависела от пульсации  $\omega$  света согласно  $\kappa_1 = q^2 / (g - m\omega^2)$ . Что касается связи между этой поляризуемостью и оптическим индексом  $n$ , то Лоренц больше не полагался на макроскопическую поляризацию  $\mathbf{P}$ . Вместо этого он обсуждал электромагнитное излучение отдельных молекул с помощью запаздывающих потенциалов для уравнений Гельмгольца. Сложные вычисления привели к нашему закону Лоренца-

Лоренца, согласно которому  $(n^2 - 1)/(n^2 - 2)$  пропорционально  $Nk_1$ . Полученная дисперсионная формула показала тот же резонанс, что и предыдущие формулы Гельмгольца и Селлмайера. Это объясняет аномальную дисперсию.

Эта работа Лоренца предвосхитила существенные черты будущей электронной теории: отделение эфира от материи, идея электромагнитной связи между ними и фокус на микроскопических процессах. Хотя это была первая электромагнитная теория дисперсии, она оставалась в основном незамеченной до середины 1890-х годов. Одной из вероятных причин такого пренебрежения является то, что Лоренц публиковался на голландском языке и не имел личных связей за границей. Другое дело, что до 1890-х годов было мало потенциальных сочувствующих, за исключением Гельмгольца.

<sup>27</sup> Lorentz 1875: 279 (мой акцент).

<sup>28</sup> Lorentz 1875: 280 См. также Hirošige 1969: 171-172.

<sup>29</sup> см. Buchwald, 1988: 62-3.

<sup>30</sup> Lorentz 1878b: 80. См. также Hirošige 1969: 173-178; Buchwald 1985a: 198, 294-298; Carazza and Robotti 1996: 590-595.. Об оптике Людвига Лоренца, см. Kragh 1991

#### 8.4.3. Синтез Максвелла-Вебера

Из-за отсутствия обратной связи Лоренц более чем на 10 лет прекратил реализацию своей молекулярно-электромагнитной программы. В 1880-е годы он в основном занимался термодинамикой и кинетической теорией. В его мемуаре 1884 г., посвященном теории магнитооптических эффектов, использована максвелловская стратегия макроскопической модификации уравнений поля. Однако его рассуждения об оптике движущихся тел, опубликованные в 1886 г., свидетельствуют о стойкости его веры в молекулярную программу. К аргументу простоты в пользу неподвижного эфира Френеля он добавил следующее обоснование:

*"Может оказаться, что то, что мы называем атомом, вполне может занимать то же место, что и часть эфира, что, например, атом есть не что иное, как модификация состояния этой среды; тогда можно понять, что атом может двигаться, не увлекая за собой эфир".<sup>31</sup>*

Лоренц возобновил свою программу в 1890 г., после открытия Герцем электромагнитных волн и последовавшего за этим энтузиазма в отношении теории Максвелла, предпочтя в 1875 г. изложение теории Максвелла, сделанное Гельмгольцем, поскольку оно "основано на наиболее прямой интерпретации наблюдаемых фактов". После получения Герцем новых фактов, он счел теорию Гельмгольца "искусственной" и сразу же рекомендовал "сблизить старую и новую теории, по крайней мере, в отношении формы". Старой теорией была теория Вебера. Вместо веберовских частиц электричества он предположил существование "малых заряженных частиц", взаимодействующих через максвелловский эфир.<sup>32</sup>

Лоренц развил этот синтез в большом французском мемуаре,



опубликованном в 1892 году. Первая часть посвящалась оригинальной макроскопической теории Максвелла. Подобно Гельмгольцу и Пуанкаре, Лоренц высоко оценил использование Максвеллом метода Лагранжа, который обеспечивал механическую основу без явных механизмов. Он обобщил первоначальные рассуждения Максвелла, включив в них трехмерные течения и движущиеся тела (см. Приложение 9). Однако Лоренц также симпатизировал подходу Герца, который начинал непосредственно с уравнений поля и избегал ненаблюдаемых потенциалов. В более поздних работах он редко чувствовал необходимость в динамическом обосновании своей теории.<sup>33</sup>

Что касается заряда и тока, то Лоренц усвоил больше концепций Максвелла, чем Герц. Он назвал "электричеством" то, что является суммарным током. В диэлектрике он предполагал упругое сопротивление потоку, так что перемещение **D** электричества было пропорционально электродвижущей силе **E**. Электрический заряд изолированного тела он рассматривал как избыток электричества, измеряемый потоком **D** через охватывающую поверхность. Таким образом, электризация зависела от предшествующего процесса проводимости, в результате которого было получено необходимое электричество, т.е. Лоренц серьезно отнесся к метафоре Максвелла о несжимаемой жидкости. Но он проигнорировал более фундаментальную концепцию поляризации и выведенные из нее определения заряда и тока, которые британские максвелловцы считали наиболее фундаментальными. Как и Герц, он, должно быть, испытывал трудности с согласованием понятий поляризации Максвелла и Гельмгольца. К счастью, понятия заряженного тела ему было достаточно для собственной микроскопической теории.<sup>34</sup>

Во второй части своего мемуара Лоренц развил *"теорию системы заряженных частиц, которые движутся через эфир, не увлекая за собой эту среду"*. Идея заключалась в том, чтобы применить уравнения Максвелла к этой микроскопической системе и свести все электромагнитные явления к взаимодействию заряженных частиц через неподвижный эфир. Единственный способ воздействия вещества на эфир - это электромагнитное воздействие заряженных частиц вещества.

По аналогии с теорией Вебера проводимость превратилась в поток заряженных частиц, заряд — в их накопление, поляризация в материальных диэлектриках — в их упругое смещение, а магнетизм — в их микроскопические циклические движения. Все это было совершенно не по-максвелловски: исчезли аналогия между эфиром и вещественными диэлектриками и представление о проводимости как о затухании смещения, предубеждение против применения электромагнитных понятий на молекулярном уровне. Лоренц не знал догм и очень ясно видел преимущества новой картины.<sup>35</sup> Для микроскопических полей **d** и **b**

уравнения Лоренца в единицах Герца имеют вид:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{d} &= \rho_m, & \nabla \times \mathbf{d} &= -1/c \partial \mathbf{b} / \partial t \\ \nabla \cdot \mathbf{b} &= 0, & \nabla \times \mathbf{b} &= (\rho_m \mathbf{v} + \partial \mathbf{d} / \partial t) / c\end{aligned}\quad (8.5)$$

где  $\rho_m$  представляет ток конвекции заряженных частиц. Лоренц дал силу, действующую в точке частицы с плотностью заряда  $\rho_m$ ,

$$\mathbf{f} = \rho_m [\mathbf{d} + (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{b}]. \quad (8.6)$$

Эти уравнения совпадали до несущественных членов с уравнениями Герца и Хевисайда для случая электрической конвекции через неподвижный эфир. Лоренц обосновал конвективный член  $\rho_m \mathbf{v}$  в токе, обратившись к электролизу и эксперименту Роуанда. Он вывел закон индукции и закон силы по методу Лагранжа, приняв

$$T = \frac{1}{2} \int b^2 d\tau, \quad U = \frac{1}{2} \int d^2 d\tau \quad (8.7)$$

для кинетической и потенциальной энергий эфира (см. Приложение 9).<sup>36</sup>

Исходя из этих фундаментальных уравнений, Лоренц легко получал стандартные электростатические и электродинамические эффекты путем усреднения по заряженным частицам. Однако главным его стремлением было расширение электромагнитной оптики, начатой им ранее в рамках гельмгольцевской теории. Сначала он определял влияние одной упруго связанной частицы на приходящую электромагнитную волну, а затем суммировал все заряженные частицы, принадлежащие данному элементу объема диэлектрика. Этот громоздкий метод позволил понять микроскопические процессы, а также получить некоторые интересные побочные результаты: электромагнитную массу заряженной частицы и силу радиационного затухания ( $e^2/4\pi c$ )  $\ddot{\mathbf{v}}$  (Лоренц упустил из виду фактор  $2/3$ ). Наиболее эффектно Лоренцу удалось вывести загадочный коэффициент вовлечения Френеля.<sup>37</sup>

Некоторые приемы, использованные в последнем расчете, имели большое будущее. От волновых уравнений относительно эфира Лоренц перешел к уравнениям относительно движущегося прозрачного тела. Если скорость  $u$  этого тела относительно эфира параллельна оси  $x$ , то такой переход сводится к подстановке

$$\partial^2 / \partial x^2 - (1/c^2) \partial^2 / \partial t^2 \rightarrow \partial^2 / \partial x^2 - (1/c^2) [\partial / \partial t - u(\partial / \partial x)]^2 \quad (8.8)$$

в волновом операторе.

В стандартной процедуре решения дифференциальных уравнений, Лоренц искал новые переменные  $x'$  и  $t'$ , которые вернули бы волновой оператор к более привычному виду. Он обнаружил, что преобразование

$$x' = \gamma x, \quad t' = \gamma t - \gamma u x / c^2, \quad (8.9)$$

где

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - u^2 / c^2}, \quad (8.10)$$

восстанавливает исходный волновой оператор.<sup>38</sup>

В неявном виде Лоренц открыл то, что Пуанкаре впоследствии назвал

лоренцевой инвариантностью волнового оператора: подстановка

$$x' = \gamma(x - ut), t' = \gamma(t - ux/c^2), \quad (8.11)$$

полученная путем объединения преобразования (8.9) с галилеевым преобразованием  $x \rightarrow x - ut$ , оставляет оператор  $\partial^2/\partial x^2 - \partial^2/\partial t^2$  неизменным. Однако на этом этапе Лоренц не рассуждал в терминах инвариантных свойств, ни физических, ни математических. Его единственной задачей было облегчить расчет замедленных потенциалов от движущегося источника.

<sup>31</sup> Lorentz, 1884, 1886, 203.

<sup>32</sup> Lorentz 1875: 224; ; Lorentz 1891: 99. См. также Hiosige 1969: 183-6.

<sup>33</sup> Lorentz 1892a: 173-88 (тела в покое). 206-227 (движущиеся тела). См. также Hiosige 1969: 193-6; Buchwald 1985a: 195-197; Darrigol 1994a: 275-8.

<sup>34</sup> Lorentz, 1892a: 189-202. См. также Darrigol 1994a: 278-279.

<sup>35</sup> Lorentz, 1892a: 228-7. См. также Buchwald 1988: 62-3.

<sup>36</sup> Lorentz, 1892a: 230-8. См. также Hiosige 1969: 200-201; Darrigol 1994a: 280-283. Лоренц использовал электромагнитные установки до 1904 года.

<sup>37</sup> Lorentz, 1892a: 250-267 (электростатика и электродинамика), 268-292 (диэлектрик в состоянии покоя), 292-320 (диэлектрик в движении), 319 (коэффициент Френеля), 281 (демпфирование излучения). См. также Hiosige 1969: 202-223; Buchwald 1988: 63-65.

#### 8.4.4 Макроскопические уравнения поля

Через несколько месяцев Лоренц впервые существенно упростил свою оптику движущихся тел. С помощью соответствующей процедуры усреднения он получил уравнения для макроскопических полей в однородном прозрачном теле, движущемся со скоростью  $\mathbf{u}$  относительно эфира. Он использовал систему осей, связанных с прозрачным телом, и определил поляризацию материала  $\mathbf{P}$  как средний электрический момент  $\langle \rho_m \mathbf{r} \rangle$  заряженных частиц, принадлежащим одному элементу объема. Тогда вектор  $\langle \mathbf{d} \rangle + \mathbf{P}$ , как легко видеть, играет ту же роль, что и максвелловский  $\mathbf{D}$ . Усреднив действие силы Лоренца на заряженные частицы, Лоренц показал далее, что поляризация  $\mathbf{P}$  приблизительно пропорциональна вектору  $\mathbf{E} = \langle \mathbf{d} \rangle + (\mathbf{u}/c) \times \mathbf{h}$ .<sup>39</sup>

В первом порядке по  $u/c$  макроскопические поля подчиняются системе

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= 1/c \partial \mathbf{H} / \partial t, \quad \nabla \times (\mathbf{H} - 1/c \mathbf{u} \times \mathbf{E}) = (1/c) \partial \mathbf{D} / \partial t, \\ \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} - 1/c \mathbf{u} \times \mathbf{H} \end{aligned} \quad (8.12)$$

Соответственно, скорость плоской волны, распространяющейся в направлении, параллельном движению прозрачного тела, составляет  $c\epsilon^{1/2} - u\epsilon^{-1}$  (относительно этого тела). Случай  $u = 0$  дает  $n = \epsilon^{1/2}$  для показателя преломления. Следовательно, прозрачное тело частично затягивает волны с коэффициентом  $1 - 1/n^2$ , что соответствует гипотезе Френеля (см. также Приложение 11).<sup>40</sup>

Из гипотезы Френеля следует, что проводимые на Земле оптические эксперименты, в жизни не зависят от движения Земли в первого порядка.

В 1895 году Лоренц вывел этот результат непосредственно из своих уравнений поля. Для этого он использовал версию преобразования первого порядка (8.9), которая сводится к замене "местного времени"  $t' = t - ux/c^2$  на время  $t$ , вместе с преобразованиями поля

$$\mathbf{D}' = \mathbf{D} + 1/c \mathbf{u} \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{H}' = \mathbf{H} - 1/c (\mathbf{u} \times \mathbf{E}). \quad (8.13)$$

С точностью до первого порядка по  $u/c$  полученные уравнения поля имеют тот же вид, что и уравнения Максвелла в системе, покоящейся относительно эфира. Из этого результата Лоренц вывел "теорему о соответствующих состояниях":

*Если для данной системы покоящихся тел известно состояние движения, для которого  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  являются определенными функциями  $x, y, z$  и  $t$ , то в той же системе, дрейфующей со скоростью  $u$ , существует состояние движения, для которого  $\mathbf{D}'$ ,  $\mathbf{E}$ , и  $\mathbf{H}'$  являются такими же функциями  $x, y, z$  и  $t'$ .*

Поскольку, согласно соотношениям (8.13),  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{H}$  исчезают вместе тогда и только тогда, когда исчезают  $\mathbf{D}'$  и  $\mathbf{H}'$ , поверхность, ограничивающая световой пучок, одинакова в двух соответствующих состояниях. Следовательно, законы отражения и преломления, определяющие форму световых пучков, в дрейфующей системе те же, что и в покоящейся. Аналогичная инвариантность имеет место и в интерференционных экспериментах, поскольку положение темных полос одинаково для соответствующих состояний.<sup>41</sup>

Подобные рассуждения стали типичными для теории Лоренца. Чтобы доказать отсутствие влияния движения Земли, Лоренц сначала написал уравнения поля относительно Земли, затем ввел переменную, которая вернула форму уравнений относительно эфира, затем с помощью обратного преобразования вывел решения для движущейся системы из решений для покоящейся системы и, наконец, проверил, имеют ли эти два вида решений одинаковые наблюдаемые следствия. В этой процедуре физический смысл имели только исходные поля и координаты, а преобразованные поля и координаты были лишь вспомогательными средствами для вычислений.<sup>42</sup>

<sup>38</sup> Lorentz 1892a: 297.

<sup>39</sup> Lorentz 1892b. 1895: 35, 63-64, 75. См. также Hirosige 1969: 206.

<sup>40</sup> Lorentz 1892b: 216; 1895: 75.

<sup>41</sup> Lorentz 1895: 84. См. также Hirosige 1969: 207. Лоренц также использовал теорему, чтобы вывести коэффициент Френеля, просто преобразовав фазу плоской волны (Lorentz. 1895: 95-97): см. также Darrigol 1994a: 289.

<sup>42</sup> см. Nersessian 1986: 218-21; Janssen 1995: 157-79.

#### 8.4.5. Сокращение Лоренца

Лоренц применил метод соответствия и к электростатике дрейфующих тел. Тогда уравнения поля в движущейся системе осей приводятся к их виду в покоящейся системе преобразованием  $x' = \gamma x$ , причем коэффициент  $\gamma$  задается в уравнении (8.10). Следовательно,

качественные законы электростатики, например, невозможность наличия внутреннего заряда в проводниках, не зависят от глобального движения. Количественное выражение сил и поверхностных зарядов изменяется лишь до второго порядка по  $u/c$ . Лоренц заключил, что движение Земли не оказывает заметного влияния на равновесие системы проводников.<sup>43</sup>

Однако Лоренц представил себе связь между этой проблемой и экспериментом Майкельсона-Морли 1887 года. Как и Фицджеральд, чье предложение он не знал, он отметил, что сокращение на величину  $\gamma^{-1}$  плеча интерферометра, параллельного движению Земли, аннигилирует теоретическое смещение границ. Затем он утверждал, что его теория предполагает такое сокращение, если только молекулярные силы, ответственные за сцепление твердых тел, ведут себя как электростатические силы в отношении движения Земли в эфире. Действительно, предположим, что молекулярные силы полностью определяют размеры твердого тела для данного расположения молекул. Тогда фиктивное твердое тело, соответствующее реальному движущемуся твердому телу через расширение  $x' = \gamma x$ , будет иметь размеры реального твердого тела, приведенного в состояние покоя. Следовательно, движущееся твердое тело должно сокращаться в пропорции  $\gamma^{-1}$  в направлении движения. Сокращение Лоренца в данном случае было гипотезой подобно сокращению Фицджеральда.<sup>44</sup>

<sup>43</sup> Lorentz 1892c, 1895: 35-9, 119-24. См. также Darrigol 1994a 289-92. Хевисайд использовал это же преобразование в одном из своих выводов для поля движущегося заряда (Heaviside 1888-9: part 4).

<sup>44</sup> Lorentz 1892c: 221. См. также Hirsige 1969: 204-5; Nersessian 1986. 1988; Janssen 1995: 180-98.

#### 8.4.6 Немецкий успех

Предыдущие результаты, касающиеся макроскопических уравнений поля, соответствующих состояний и сокращения длин, были получены Лоренцем в 1892 году. Через три года на немецком языке появилось систематическое изложение его теории. В этой работе Лоренц представил заряженные частицы, которые он теперь называл ионами в связи с электролитической и газовой проводимостью, в качестве исключительных посредников между веществом и эфиром. Он ввел уравнения микроскопического поля и силу Лоренца и сосредоточился на последствиях для макроскопических тел на Земле. Таким образом, он охватил стандартные электродинамические явления, оптическую дисперсию, оптику кристаллов, магнетизм, магнитооптику и оптику движущихся тел. В течение следующих пяти лет его теория становилась все более популярной, особенно в Германии. Этот успех объяснялся предельной ясностью и простотой основных предпосылок, а также обширностью охваченной эмпирической базы.<sup>45</sup>

Однако два экспериментальных открытия ускорили восхождение Лоренца. Одним из них было влияние сильного магнитного поля на D-линию натрия, наблюдавшееся в конце 1896 г. его студентом Питером Зеemanом с помощью решетки Роуланда. По измеренному расширению Лоренц сделал вывод, что излучающий "ион" имеет отношение массы к заряду ( $m/q$ ) примерно в 2000 раз меньшее, чем у иона водорода. В рассуждениях предполагалось, что ион совершает простые гармонические колебания, изменяемые магнитной силой  $q(v/c) \times B$ . Ионные колебания, параллельные магнитной силе, не изменялись, а частота круговых колебаний в перпендикулярной плоскости изменялась на  $\pm qB/4\pi mc$ . Из этого замечания Лоренц сделал вывод, что наблюдение в параллельном и антипараллельном направлениях должно дать дублет циркулярно поляризованных линий, а наблюдение в перпендикулярном направлении - линейно поляризованный триплет. Проверка Зеemanом этого предсказания придавала большую убедительность рассуждениям Лоренца и общей идее о том, что ионы ответственны за электромагнитные свойства материи.<sup>46</sup>

Важное значение имели также исследования катодных лучей, проведенные Вихертом и Томсоном. С момента открытия рентгеновских лучей Лоренц подозревал, что катодные лучи представляют собой частицы гораздо меньшего размера, чем атомы. Соответственно, он должен был приветствовать экспериментальные доказательства большого отношения заряда к массе этих частиц. В 1898 г. он первым устранил неясность в вопросе об электрическом заряде оптических ионов. Из измерений дисперсии он вывел  $q^2/m$ , из эффекта Зеemана -  $q/m$ . Полученное значение  $q$  оказалось близким к электролитическому кванту. В следующем году Лоренц стал называть заряженные частицы своей теории "электронами", в соответствии с названием электролитического кванта, предложенным Джорджем Джонстоном Стоуни (и в согласии с использованием Лармора).<sup>47</sup>

Публичное освящение теории Лоренца произошло в 1898 г. на Дюссельдорфском заседании "*Naturforscherversammlung*". Главной темой была проблема движения эфира, а Лоренц - почетным гостем. В своем вступительном докладе Wilhelm Wien перечислил соответствующие эксперименты, в том числе эксперименты Майкельсона и Морли, и обсудил различные теоретические концепции, особенно концепции Гельмгольца и Лоренца. Он явно отдавал предпочтение стационарному эфиру Лоренца и ионной теории. Присутствовавшие на конференции Вольдемар Фойгт, Макс Планк, Пауль Друде и Густав Ми были сторонниками более феноменологической физики в духе Франца Неймана. Тем не менее они оценили силу аргументации Лоренца. Двое из них, Друде и Планк, вскоре приняли теорию электронов.<sup>48</sup>

Особенно поразителен переход Друде. Если его "Физика эфиров" и

более ранняя магнитооптика имели чисто макроскопический характер, то в его весьма влиятельном "Справочнике по оптике" 1900 г. появились ионные теории магнитооптики, дисперсии и оптики движущихся тел. В том же году он разработал полноценную "электронную теорию металлов", которая позволила получить соотношение Видеманна-Франца между тепло- и электропроводностью, а также термоэлектрические законы. Предложенный механизм электропроводности напоминал старую идею Вебера о переходе электрических частиц от атома к атому. Более того, некоторые основные положения теории Друде вытекали из более ранней ионной теории проводимости, созданной учеником Вебера Эдуардом Рикке. К 1900 году самоотверженный энтузиазм первых немецких максвеллистов иссяк. Синтез британской и континентальной электродинамики Лоренца теперь выглядел наиболее перспективным.<sup>49</sup>

<sup>43</sup> Lorentz, 1892c, 1895: 35-39, 119-124. См. также Дарригол 1994а 289-292. Хевисайд использовал то же преобразование в одном из своих производных поля движущегося заряда (Heaviside 1888-1889: часть 4).

<sup>44</sup> Lorentz 1892c: 221. См. также Hirose 1969: 204-5; Nersessian 1986, 1988; Janssen 1995: 180-98.

<sup>45</sup> Lorentz 1895.

<sup>46</sup> Zeeman 1896. 1897a (включая рассуждения Лоренца), 1897b. См. также Heilbron 1964: 100-2; Arabatzis 1992; Koh 1997..

<sup>47</sup> Lorentz 1896: 165 (предположение о катодных лучах); Lorentz 1898a (определено), 1899 («электроны»). См. также Carazza and Robotti 1996: 606-607.

<sup>48</sup> Lorentz 1898b; Wien 1898. См. Также Hirose 1976: 33-36.

<sup>49</sup> Drude 1900a. 1900b, 1900c; Riecke 1898. См. также Seeliger 1922, Whittaker 1951: 418-20; Kaiser 1987; Eckert et al. 1992: 27-30. Более ранняя теория Гизе объединяла ионную конвекцию и перенос заряда между сталкивающимися ионами и атомами (Giese 1889); в 1895 году Лоренц предложил сохранить только первый процесс (Lorentz 1895: 7). Предложения о конвективной теории металлической проводимости содержатся также в работе J. J. Thomson 1900.

## 8.5 Реформа Лармора

В 1894-1897 гг. физик ирландского происхождения Джозеф Лармор разработал электродинамическую теорию, которая в своем окончательном виде имела общие черты с теорией Лоренца: электроны, неподвижный эфир и оптику движущихся тел. Однако достаточно взглянуть на его труды по этому вопросу, чтобы увидеть существенные различия. Даже в глазах британских современников, они были написаны в сложном, порой непонятном стиле. Лармор стремился представить развивающийся теоретический комплекс, а не окончательный синтез. Он множил исторические и философские отступления. Существенные элементы его теории, даже на ее завершающем этапе, выражались только в словах и рисунках. Точную математизацию он обычно ограничивал феноменологическим уровнем. Физика Лармора была свободнее и шире, чем того требовали концептуальная строгость и практическая

### 8.5.1 Между Томсоном и Максвеллом

Интересы и методы Лармора, а не его неясный стиль, во многом были обусловлены его образованием в Кембридже и ирландскими корнями. Он почитал принцип наименьшего действия Гамильтона

*"как фундаментальную формулировку в динамике и физике" и хвалил его за то, что он дает "более ясный и компактный способ представления [...] и более легкое понимание математических отношений в целом, чем любой другой".*

Однако, как и Уильям Томсон, он считал, что этот принцип освобождает от обязанности иллюстрировать физические теории. Как он позже объяснил:<sup>51</sup>

*Проблема соотношения физических сил [...] распадается на две части:*  
 (1) *определение аналитической функции, представляющей распределение энергии [точнее, лагранжиана] в первоначальной среде, которая предполагается конечным местом всех явлений, и*  
 (2) *обсуждение того, какие свойства можно наиболее удобно и просто приписать этой среде, чтобы наиболее наглядно описать игру энергии в ней в терминах того набора движений, который мы вывели из наблюдений за взаимодействием природных сил, представляющихся непосредственно нашим органам чувств и формулируемых под названием естественного закона.*

До 1893 г. работы Лармора по электромагнитной и оптической теории основывались на эфирных моделях в стиле Уильяма Томсона. Например, в 1890 г. Лармор обобщил объяснение эффекта Фарадея, данное Томсоном, в терминах маховиков, помещенных в небольшие сферические полости внутри упругого твердого тела; вращение маховиков означало намагниченность вещества, а твердое тело - эфир. Что еще более важно, Лармор почитал вихревую кольцевую теорию материи Томсона. Так же поступал и Дж. Дж. Томсон. Однако в их теоретических взглядах имелись существенные различия, что отчетливо проявилось в отношении обоих к теории Максвелла.<sup>52</sup>

Дж. Дж. Томсон никогда не пытался объяснить механизм, лежащий в основе электромагнитного поля Максвелла. Как и Максвелл, он удовлетворился лагранжевым обоснованием уравнений поля или движения трубок сил. В отличие от него, Лармор в 1893 г. сожалел, что *"природа электрического смещения, электрических и магнитных сил на материи, того, что Максвелл называет электростатическим и магнитным напряжением в среде, электрохимических явлений, - все это остается неясным"*. Ему требовалась *"совершенная динамическая теория"*, столь же понятная, как и более старая упруго-твердая теория оптического эфира. Как и Уильям Томсон, он считал электромагнитную теорию света регрессивной и предпочел бы *"объяснять электрические действия на основе механической теории излучения, а не излучение на основе электрических действий"*.<sup>53</sup>



В области магнитооптических явлений Дж. Дж. Томсон вновь остался верен максвелловскому духу. Как и Фицджеральд, он опирался на модификацию макроскопического лагранжиана электромагнитного поля. Вместо этого Лармор использовал, как мы видели, гиостатически заполненный эфир Томсона и высказался за необходимость резкого разделения эфира и вещества.<sup>54</sup>

*Гипотеза о гиостатических ячейках, разбросанных по всей среде, хотя на первый взгляд и искусственная, является правильной реализацией современных представлений о влиянии на колебания эфира весомой материи. Любое исчерпывающее оптическое исследование должно учитывать взаимное влияние двух взаимопроникающих сред - эфира и обычного вещества.*

При электролизе Дж. Дж. Томсон первоначально избегал антимаксвелловской концепции заряженных частей молекул и отождествлял электролитический ток с серией распада-рекомпозиции промежуточных молекул. Лармор, напротив, принял ионы и двойные слои Гельмгольца и применил их в 1885 г. для нового определения размеров молекул. В 1891 г. он даже обратился к общей теории движения электричества Гельмгольца (1870 г.), которая *"предлагала более общий взгляд на природу поляризации диэлектриков"* и представляла собой *"конкретную иллюстрацию общих положений Максвелла относительно электрического смещения"*. Но вскоре он обнаружил (ошибочно), что теория Гельмгольца не согласуется с известным значением электростатического давления на границе раздела двух диэлектриков. К 1893 году он согласился с концепцией Максвелла о токе:

*"Электрический ток в диэлектрике представляет собой скорость изменения электрического смещения, которое имеет упругий характер; в проводящей среде часть тока обусловлена непрерывным затуханием электрического смещения в режимах трения"*.<sup>55</sup>

Подводя итог, можно сказать, что в начале 1890-х годов Лармор принял некоторые основные понятия электродинамики Максвелла, но его не устраивали некоторые компоненты этой теории: динамическая основа, понятие смещения, смешение эфира и материи, трактовка электрохимии. В поисках лучшей теории он обратился к вихревому атому У. Томсона, к различным механическим моделям эфира и даже к ионам Гельмгольца.

<sup>51</sup> Larmor 1884b: 55-6; 1893b: 389-90. См. также Buchwald 1985a: 135-6; Hunt 1991a: 212.

<sup>52</sup> Larmor 1890. 1891a; Larmor 1893a: 390 (вихревые кольца). О модели маховика Томсона для эффекта Фарадея см. Smith and Wise 1989: 439, 473-74. 1989: 439, 473-474.

<sup>53</sup> Larmor 1891a: 253; 1893a: 397. См. также Darrigol 1994a: 302-303. О Дж. Дж. Томсоне см. главу 7. С. 295-300.

<sup>54</sup> J. J. Thomson 1888: ##41-3; 1893a: ##408-14; Larmor 1891a: 248.

<sup>55</sup> Larmor 1885; 1891b: 233; 1892: 284; 1893a: 339. Об ошибке Лармора, см. Buchwald 1985a: 139-140, 320.

### 8.5.2 Воскрешение МакКаллага

В 1893 году Лармор, рассматривая теории магнитооптики, открыл вращательный эфир МакКаллага. Как мы видели в главе 5, среда МакКаллага, в отличие от обычного упругого твердого тела, приводила к граничным условиям, необходимым для законов отражения и преломления Френеля. В своей теории эффектов Керра и Фарадея Фицджеральд дал электромагнитную интерпретацию этой среды: уравнение движения,

$$\mu \partial^2 \xi / \partial t^2 = - \nabla \times (\nabla \times \xi) / \varepsilon \quad (8.14)$$

идентичное уравнению Максвелла

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = - \nabla \times \mathbf{E} \quad (8.15)$$

если  $\mathbf{B}$  - импульс  $\mu \partial \xi / \partial t$ , а  $\mathbf{E}$  - локальный момент, вызывающий скручивание  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \nabla \times \xi$ , Лармор вскоре убедился, что эфир МакКаллага и есть искомая среда.<sup>56</sup>

Эфир МакКаллага был динамической средой в двух отношениях, которые требовал Лармор: его уравнения движения основывались на принципе наименьшего действия, а его упругость могла быть проиллюстрирована механически. Для доказательства последнего положения Лармор прибег к одной из многочисленных моделей эфира, предложенных Уильямом Томсоном в 1890 году. С помощью хитроумной конструкции гироскопов Томсон добился сопротивления элементов среды вращению без сопротивления перемещению, что и требовалось для вращающегося эфира. Эта иллюстрация сняла старое возражение Стокса против теории МакКаллага: крутящий момент может действовать на элемент среды без реакции со стороны соседних частей среды, пояснил Лармор, поскольку гироскопический эффект устанавливает "своего рода связь с абсолютно неподвижным пространством". Кроме того, модель указывала на "*предельно возможное упрощение*" физики, при котором любая энергия будет иметь кинетическое происхождение.<sup>57</sup>

Однако Лармор не верил, что модель Томсона может отражать реальную структуру эфира. Он знал, что при постоянной нагрузке вращательная упругость системы гироскопов постепенно уменьшается. Следовательно, модель Томсона может служить иллюстрацией основных динамических свойств эфира лишь в течение умеренного промежутка времени. Лармор не требовал большего. Он разделял максвелловское убеждение, что конечная среда не может быть похожа ни на одно из тел, доступных нашему непосредственному опыту.<sup>58</sup>

*Основная проблема трансцендентальной физики - определении природы конечной среды или схемы отношений, объединяющей физические явления в единство, в отношениях которого динамические понятия имеют свою область применения, и только предрассудки воспитания могли бы удерживать в этой*

*широкой области слишком близко к идеалу механической передачи в однородном упругом теле.*

<sup>56</sup> Larmor 1893a: 340-43. См. также Hunt 1991a: 212-3.

<sup>57</sup> Thomson 1890. Larmor 1898a: 854; 1898b: 408, 890; 1897c: 15-17 (улучшенный Томсон).

Лармор знал о вихревой губке Фитцджеральда, но сомневался в ее стабильности (Larmor 1898a: 354). О модели Томсона см. Smith and Wise 1989 486-487

<sup>58</sup> Larmor 1897c: 17 (гиростатическая эластичность не является строго постоянной); 1897b: 629-630 (цитата). О максвелловской среде, ср. Stein 1981.

### **8.5.3 Электромагнитные вихри**

Лармор оценил не только динамические достоинства эфира МакКаллага, но и возможность исследовать связь между веществом и эфиром. Эта среда имела жесткость, необходимую для распространения оптических волн, и в то же время была достаточно текучей, чтобы обеспечить свободное движение вещества. Самое главное, Лармору удалось встроить в среду постоянные вихри. Уже через несколько месяцев он смог набросать амбициозную *"динамическую теорию электромагнитной и светящейся среды"*, объединившую оптику МакКаллага, электромагнетизм Максвелла и вихревые атомы Уильяма Томсона.<sup>59</sup>

На первый взгляд, постоянные вихри во вращающемся эфире невозможны: циркуляция скорости  $\mathbf{V}/\mu$  среды вокруг вихря не исчезает, что в электрическом смысле означает наличие тока смещения в каждом сечении вихря, а значит, состояние среды не может быть стационарным. Лармор избежал этой трудности, предположив "разлом" среды вдоль оси вихря. Ядро вихря было либо полым, либо лишенным упругости. Допустив это свойство, Лармор распространил атомы вихря во вращающемся эфире и приступил к обсуждению влияния вещества на оптические свойства эфира.<sup>60</sup>

Объяснение Лармором индуктивной способности и оптического преломления в вещественных телах было типично для максвелловского использования молекулярных соображений:

*"Наличие вихревых атомов, образующих, так сказать, дефекты в эфире, явно уменьшает его эффективную вращательную упругость; поэтому следует ожидать, что удельная индуктивная емкость материальных диэлектриков должна быть больше, чем индуктивная емкость вакуума".*

Детальной картины влияния отдельных атомов не было дано, и никакие электрические свойства отдельным атомам не приписывались. Ссылка на микромир служила лишь для обоснования изменения макроскопических параметров или уравнений. Например, Лармор добавил высшие производные от  $\xi$  в уравнение движения среды, чтобы представить рассеяние. Для аномального рассеяния он признавал превосходство теорий типа Селлмейера, но не делал попыток подражать им.<sup>61</sup>

Лармор также обсуждал вопросы оптики движущихся тел. Он нашел

две причины в пользу неподвижного эфира Френеля. Во-первых, вращательная упругость среды Маккаллаха не препятствует перемещению вихревых колец. Во-вторых, эфирный ветер со скоростью  $\partial \xi / \partial t$  предполагал бы наличие магнитного поля  $\mathbf{B} = \mu \partial \xi / \partial t$ . Поскольку такое поле никогда не было обнаружено, эфир должен быть неподвижным, если только инерция  $\mu$  эфира не мала. Однако малая инерция означала бы неприемлемо большое отклонение световых лучей в магнитном поле. Лодж вскоре убедился с помощью интерферометра в своем вихревом эксперименте, что даже сильное магнитное поле не оказывает заметного влияния на скорость света. Следовательно, эфир Лармора должен быть по крайней мере таким же плотным, как обычная материя. Лармор считал эту гипотезу "несколько поразительной", но приемлемой для "нематериальной среды".<sup>62</sup>

Лармор признал несостоятельность своих рассуждений в отношении сопротивления Френеля:

*"Природу дальнейшего небольшого изменения [. . .] упругости, производимого движением материи в целом, по-видимому, невозможно точно определить".*

В качестве замены он предложил сомнительное термодинамическое обоснование: сопротивление, отличное от сопротивления Френеля, или положительный результат эксперимента Майкельсона-Морли позволили бы использовать эфирный ветер для питания машин.<sup>63</sup>

Благодаря электромагнитной интерпретации среды МакКаллага, предложенной Фицджеральдом, Лармор мог также рассматривать электрические и магнитные явления. Однако существовало серьезное препятствие: если смещение  $\xi$  вращательного эфира однозначно определено в каждой точке диэлектрика, то электрический заряд невозможен, поскольку по теореме Стокса поток электрического смещения  $\nabla \times \xi$  через диэлектрическую поверхность, окружающую проводник, обязательно равен нулю.

Лармор предложил максвелловское решение этой проблемы:

*"Законный вывод состоит в том, что электрическое смещение в среде, соответствующее реальному заряду, не может быть установлено без какого-либо разрыва или проскальзывания в линейном смещении среды: она также не может потерять заряд без аналогичного разрыва".*

Другими словами, тело не может быть заряжено без проводящей связи с другим заряженным телом, а связь предполагает нарушение упругого свойства среды, в соответствии с максвелловской концепцией проводимости.<sup>64</sup>

Вихри были естественным аналогом электрических токов во вращающемся эфире. Макроскопический вихрь подразумевал замкнутые линии потока, которые можно отождествить с замкнутыми линиями магнитных сил вокруг тока. Пока этому круговому потоку противостояла вращательная упругость среды, вихрь соответствовал току смещения.

Когда ядро вихря теряло свою упругость, возникал ток проводимости. Для полноты картины Лармор знал от Гельмгольца, что кинетическая энергия системы линейных вихрей имеет ту же форму, что и энергия системы токов. Из этой аналогии он вывел электродинамические законы Неймана.<sup>65</sup>

Другой энергетический аргумент - кулоновские силы между двумя наэлектризованными телами, необходимые для компенсации изменения упругой энергии среды при изменении расстояния между двумя телами. Интуитивное обоснование этих сил найти оказалось сложнее. В теории Лармора не было места для напряжений Фарадея-Максвелла, поскольку во вращающейся среде напряжения являются линейной функцией электрического смещения. Весьма образно Лармор предположил, что движение наэлектризованного тела подразумевает вторжение в окружающую среду, вызывающее волнообразную упругую перестройку. Электростатическую силу он интерпретировал как динамическую реакцию тела на это излучение волнообразных колебаний. Это не было ни действием на расстоянии, ни контактным действием, это было динамически распространяющееся действие.<sup>66</sup>

<sup>59</sup> Larmor 1893b. 1894 См. также Buchwald 1985a. 141-153; Hunt 1991a; 212-7; Darrigol 1994a: 305-310.

<sup>60</sup> Larmor 1893b: 400, 406.

<sup>61</sup> Larmor 1893b: 406-407; 1894: 438-443

<sup>62</sup> Larmor 1893b: 391 и 1894: 476-478 (стационарный эфир); Larmor 1893b: 413 и 1894: 483-484 (тест Лоджа); Larmor 1894: 483 («поразительно» и «нематериально»). См. также Hunt 1986: 124-32 и 1991a: 214-215.

<sup>63</sup> Larmor 1894: 476 (цитата). 479-480. 482. О термодинамических рассуждениях см. Warwick 1991: 37-40.

<sup>64</sup> Larmor 1893b: 398-399. См. также Buchwald 1985a: 143-50; Darrigol 1994a: 308. С математической точки зрения, смещение вокруг заряженного тела обязательно многозначно.

<sup>65</sup> Larmor 1893b: 399 и 1894: 454-455 (природа тока); Larmor 1893b: 400 и 1894: 457-465 (электродинамика).

<sup>66</sup> Larmor 1894: 451-453. Другие максвелловцы не могли понять ларморовскую картину распада: см. Hum 1991a: 217-218.

#### **8.5.4 От вихрей к электронам**

Вскоро Лармор столкнулся с серьезными трудностями в своей схеме. Отчасти в результате критики Фицджеральда он понял, что его вихри во вращающемся эфире весьма проблематичны. Во-первых, были обычные трудности кольцевого вихревого атома, например, произвольность размеров вихрей. Зная об этом с самого начала, Лармор придумал компенсационные механизмы. Более серьезной проблемой было представление ионов. Лармор допускал наличие ионов для электролиза, для излучения света и для химических сил. Силы между двумя атомами не могли быть сведены к гидродинамическому взаимодействию между

соответствующими вихревыми кольцами, поскольку это сделало бы все тела ферромагнитными (вихревое кольцо - это также контур электрического тока во вращающемся эфире). Поэтому Лармор допустил наличие электрического заряда у вихревых атомов, но к декабрю 1893 г. он стал опасаться, что такое смешанное состояние движения и деформации не будет стабильным.<sup>67</sup>

Вихревое представление электрических токов также было проблематичным: согласно знаменитой гидродинамической теореме Гельмгольца, сила вихрей должна быть неизменной. Это соответствовало амперовским токам в магнитах, но исключало электромагнитную индукцию в макроскопических проводниках, а также веберовское объяснение диамагнетизма. Для последнего явления Лармор ссылался на альтернативную модель Уильяма Томсона. Для индукции он предложил следующий вариант:

*"Обычные токи должны [. . .] протекать в неполных цепях и завершаться либо проводимостью через электролит, либо электрическим смещением или разрядом через промежуток между молекулами"*.

В этом случае напряжение среды действовало в разрывах цепи и, предположительно, создавало наблюдаемую электродвижущую силу.<sup>68</sup>

Наиболее сильный удар нанес Уильям Томсон (лорд Кельвин). Он напомнил Лармору, что аналогия между токами и вихрями несовершенна, что она дает неверный знак для электродинамических сил. Несколько попыток Лармора преодолеть это затруднение превратили его теорию в монстра в стиле барокко. Среди прочих сложностей он придумал флуктуации в ориентации амперовских токов, которые восстановили правильный знак для сил между магнитами и объяснили электромагнитную индукцию в проводнике, движущемся рядом с покоящимся магнитом. По выражению Бухвальда, он "заменил противоречия загадками".<sup>69</sup>

Летом 1894 г. Лармор отказался от вихрей и вместо них ввел новую субатомную частицу. В июне он пришел к выводу, что введение им разрывов в электрических цепях является *"наиболее неестественной чертой настоящей схемы"*, и предложил рассматривать токи проводимости, когда это возможно, как ионную конвекцию. Как мы видели при обсуждении работ Шустера и Дж. Дж. Томсона по изучению газового разряда, это направление развивалось даже в Англии. Единственным препятствием было прохождение электричества между электролитом и электродами. Ранее Лармор предлагал особые пути пробойного разряда между двумя атомами, теперь он предложил "более фундаментальную точку зрения": заряд или разряд иона следует понимать как перенос "монады". Подобно "мигрирующим центрам силы" Гельмгольца 1892 года, монады были точечными сингулярностями в эфире, несущими квант "+" или "-" заряда электролитита. Как и вихревые кольца У. Томсона и Дж. Дж. Томсона,

они должны были стать универсальными составляющими материи.<sup>70</sup>

Лармор также заменил амперовские вихри вращающимися цепочками монад. Таким образом, он восстановил правильный знак магнитных взаимодействий и объяснил электромагнитную индукцию в поле неподвижного магнита без механизма колебаний. Кроме того, отпала необходимость в отдельном объяснении диамагнетизма. К августу 1894 г. он полностью исключил из своей теории вихревые атомы и вихревые токи. Он переименовал монады в "электроны", вслед за Стоуни назвав так электролитический квант. И снова. Фицджеральд сыграл решающую роль в том, чтобы подтолкнуть Лармора к этому решению.<sup>71</sup>

Электроны являлись центрами радиальной закрутки среды. Их можно мысленно построить с помощью следующей операции с эфиром: удалить нить среды между двумя точками М и М'; взять стенки образовавшейся цилиндрической полости и повернуть их на заданный угол; заполнить полость веществом среды; отпустить все. В результате образуется самоблокирующаяся деформация, представляющая собой два электрона противоположных знаков в точках М и М'. Инерция таких электронов полностью электромагнитная, точнее, эфирная. Вещество Лармора представляло собой не что иное, как рой сингулярностей в эфире.<sup>72</sup>

На тот момент Лармор имел основные компоненты для разработки теории, аналогичной теории Лоренца: неподвижный эфир и сведение всех эффектов материи к действию наэлектризованных частиц. Однако он все еще оставался приверженцем максвелловского акцента на макроскопических лагранжианах и уравнениях. Для электродинамики макроскопических токов он суммировал вклады всех соответствующих электронов в кинетическую энергию среды и получал формулу Максвелла для макроскопической энергии. Затем он написал соответствующие уравнения Лагранжа, которые привели к силам, известным Максвеллу (с отличием, которое будет рассмотрено позже).<sup>73</sup>

Для оптики Лармор в основном перенес рассуждения своей прежней теории, причем электроны теперь играли роль вихревых колец, изменяя упругие свойства среды. Однако теперь он смог вывести коэффициент затягивания Френеля. Его метод заключался в том, чтобы, подобно Рейфффу, выделить два различных вклада в макроскопическое смещение или вращательную деформацию: один "принадлежит волнам и обеспечивает) напряжение, под действием которого они распространяются", другой принадлежит "ориентации молекул". В волновом уравнении для смещения он выделил производную по времени второго порядка и заменил ее конвективной производной. Это сразу дало коэффициент Френеля. Аргументация была гораздо проще, чем у Лоренца 1892 года, о котором Лармор не знал, но не имела под собой

<sup>67</sup> Larmor 1893b: 406-407 (проблема размера), 401 (химические силы); [406] (нестабильность). Я использую квадратные скобки для обозначения дополнений, сделанных Лармором в доказательствах. Роль ФишДжеральда задокументировали Buchwald 1885a: 161-7 и Hunt 1991a: 217-220.

<sup>68</sup> Larmor 1894: 468. 477-478: Larmor 1893b: 400-401 (цитата).

<sup>69</sup> Larmor 1894: 504, 506-508. См. Buchwald 1985a: 155-159; Hunt 1991a: 217-219.

<sup>70</sup> Larmor 1894: 475 (неестественная особенность): 1893b: 406 (электроды); 1894: 475 (монады).

<sup>71</sup> Larmor 1894: 468n, 515. В 1881 году Стони ввел и оценил «количество электричества, необходимое для разрыва одной химической связи», и соединил это со скоростью света и гравитационной постоянной, чтобы определить естественные единицы пространства, времени и массы (Stoney 1881). В 1891 году он дал название «электрон» этой величине и объяснил D-дублет натрия в терминах эллиптического движения электрона внутри атома. Здесь речь идет о подвижном центре электрификации в веществе атома, а не обособленной субатомной частице (Stoney 1891. См. также Hcilbron 1964: 93-94; O'Hara 1975). По просьбе ФишДжеральда Стони в июле 1894 года отправил Лармору свою работу 1891 года (см. Robotti and Pastorino 1998: 170).

<sup>72</sup> Larmor 1894: [516], [520].

<sup>73</sup> Larmor 1894: 521-523, 528-529. См. Также Buchwald 1985a: 168-171; Darrigol 1994a. 313-315

<sup>74</sup> Larmor 1894: [530-533]. См. также Darrigol 1994a: 315-316. Как Лармор знал из Glazebrook 1885: 216, Буссинеск при выводе коэффициента Френеля использовал замену конвективной производной на обычную производную по времени, но другим способом, продиктованным идеей Френеля о конвективном избыточном эфире.

### 8.5.5 Обучение у Лоренца

В начале 1895 г. Лармор прочитал "Эксперименты" ("*Versuch*") Лоренца. В последующей работе "Теория электронов" он превратил свою грубую и частично ошибочную схему в точную дедуктивную теорию, которая во многом напоминала теорию Лоренца. Несмотря на его утверждение об обратном, это резкое улучшение во многом было обусловлено проницательностью Лоренца. Например, он отказался от идеи макроскопического лагранжиана и принял процедуру усреднения микроскопических динамических уравнений, предложенную Лоренцем. С этим связано включение конвекционного тока электронов в микроскопическую форму закона Ампера. Ранее Лармор писал уравнения поля только для эфира между электронами, поскольку его электроны были разломами в эфире. Теперь он использовал конвекционный ток как "кинематическую фикцию", прикрывающую переход к макроскопическому току. Эта точка зрения отличалась от точки зрения Лоренца, который ставил конвекционный ток на одну ступень с током смещения. Но оно служило той же формальной цели: последовательному завершению первого уравнения кругового движения.<sup>75</sup>

С помощью этой уловки Лармор легко вывел макроскопическую форму первого циркулярного уравнения для материи, движущейся с



глобальной скоростью  $\mathbf{u}$ :

$$\nabla \times \mathbf{H} = 1/c^2 \partial \mathbf{E} / \partial t + (\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}) \mathbf{u} + \mathbf{j} + D\mathbf{P}/Dt \quad (8.16)$$

в рационализированных электромагнитных единицах.

Первый член представляет собой средний ток смещения, второй - конвекцию среднего заряда  $\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}$ , третий - ток проводимости (соответствующий относительному движению электронов относительно вещества), последний - конвективную производную поляризации  $\mathbf{P}$ . Отметим, что средний заряд включает два члена:  $\rho$  соответствует избытку свободных или малосвязанных электронов, как это бывает в проводниках,  $-\nabla \cdot \mathbf{P}$  - неоднородности в смещении связанных электронов. В отсутствие магнитной поляризации другое макроскопическое уравнение циркуляции имеет простой вид:<sup>76</sup>

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad (8.17)$$

Лармор дополнил макроскопическую систему уравнений связью между поляризацией  $\mathbf{P}$  и средней электрической силой  $\mathbf{E}$ . Сначала он использовал макроскопическую догадку, подобное догадке Гельмгольца и Рейфа. Однако для френелевского сопротивления он также рассмотрел микроскопический механизм поляризации в манере Лоренца и получил

$$\mathbf{P} = (\varepsilon - 1)(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (8.18)$$

путем усреднения силы Лоренца по электронам, движущимся почти с глобальной скоростью  $\mathbf{u}$ .

Волновые решения уравнений (8.16), (8.17) и (8.18) дают коэффициент увлечения Френеля. Единственное отличие от второго вывода Лоренца этого коэффициента состоит в том, что Лармор писал макроскопические уравнения относительно эфира, а Лоренц - относительно движущегося тела.<sup>77</sup>

Лармор также занимался вопросами общей нечувствительности земной оптики к движению Земли, в том числе экспериментом Майкельсона-Морли 1887 года. У Лоренца он позаимствовал местное время, сокращение длин и технику соответствующих состояний. Единственное отличие заключалось в обосновании лоренцева сокращения. Если Лоренц должен был предположить, что молекулярные силы преобразуются подобно электромагнитным, то Лармор мог указать на свое сведение вещества к сингулярностям в эфире. Вскоре он изменил аргументацию, сделав эксперимент Майкельсона-Морли 1887 года доказательством своей конечной среды.<sup>78</sup>

Подобное различие проявилось в более позднем распространении Лоренцем и Лармором техники соответствующих состояний на движение электронов. В соответствии с дуалистическим характером его схемы. Лоренц в своих рассуждениях включал преобразования скорости и ускорения электронов, Лармор же предположил,

*"полноту эфирной схемы", то есть "электрон, взятый сам по себе, должен быть в любой мыслимой теории простой сингулярностью эфира, движение которой [...] можно проследить только через дифференциальные уравнения окружающего свободного эфира".*

Таким образом, он пришел к более простым доказательствам инвариантности, основанным только на преобразованиях полей.<sup>79</sup>

Как и Лоренц, Лармор ожидал общую инвариантность электромагнитных явлений. Он предсказал влияние первого порядка движения Земли на электромагнитные силы и влияние второго порядка на электропроводность. То, что экспериментальных доказательств таких эффектов пока не существует, его не беспокоило. Его и Лоренца убежденность в физическом существовании эфира была настолько сильна, что они естественно ожидали эффектов эфирного ветра.<sup>80</sup>

<sup>75</sup> Larmor 1895b: 556, 577-578.

<sup>76</sup> Larmor 1895b: 573. Подробнее, см. также Darrigol 1894a: 317-319. Лармор определил  $\mathbf{E}$  как среднее от микроскопического электрического поля, тогда как Лоренц взял среднее значение силы, действующей на единичный заряд, связанный с движущимся телом ( $\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}$  в обозначении Лармора).

<sup>77</sup> Larmor 1895b: 557-558, 575-577.

<sup>78</sup> Larmor 1895b: 566. См. также Warwick 1991: 63.

<sup>79</sup> Larmor 1900a: 165. 171-172; и Larmor 1 897c: 41. См. также Darrigol 1994a: 327-331.

<sup>80</sup> см. Darrigol 1994a: 331-332

### 8.5.6 Трансцендентальная физика

Столкнувшись с критикой со стороны британских коллег или предвидя ее, Лармор изо всех сил старался сделать так, чтобы его теория казалась необходимой. Как мы видели, истинной причиной его перехода к "теории электронов" были трудности, связанные с объединением эфира МакКаллага с концепцией проводимости Максвелла и теорией материи Уильяма Томсона. В своей собственной исторической реконструкции Лармор вместо этого ссылаясь на внутренний недостаток теории Максвелла. Он считал, что доказал, что динамические рассуждения Максвелла при правильном проведении должны были привести к появлению дополнительной силы  $(\mathbf{j} \cdot \nabla) \mathbf{A}$ , помимо эмпирически известной силы  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ , действующей на ток  $\mathbf{j}$  (см. Приложение 9). Вскоре от Лоджа и Фицджеральда Лармор узнал, что этой новой силы не существует, но он утверждал, что она является следствием теории Максвелла. В последующих работах он заявил, что эта несостоятельность макроскопической динамики поля Максвелла вынуждает принять электронную теорию. Электрический ток должен быть проанализирован как движение электронов, а динамические рассуждения ограничены электронным масштабом.<sup>81</sup>

Физики-максвеллианцы заподозрили неладное в уничтожающей критике Лармора. Они знали, что Хевисайд подтвердил формулу электродинамической силы Максвелла, не прибегая к лагранжевой

динамике. Однако они не могли найти ошибку в рассуждениях Лармора. Изменяя кинетическую энергию поля при деформации проводников, Лармор неверно рассчитал влияние деформации на плотность тока  $\mathbf{j}$  (см. Приложение 9). Он полагал, что это влияние таково, что произведение  $\mathbf{j}d\mathbf{l}$  инвариантно, тогда как инвариантным является именно  $\mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$ , что обусловлено физическим смыслом тока как потока. Лармор слишком быстро отверг Максвелла.<sup>81</sup>

Аналогичное замечание можно сделать и в отношении другого опровержения теории Максвелла Лармором. Он утверждал, что эксперимент Роуанда с вращающимся равномерно наэлектризованным диском не соответствует теории Максвелла, в то время как новая теория электронов дает удовлетворительное объяснение. Опять же, это возражение возникло апостериори: в 1894 г. Лармор считал, что эффект Роуанда был установлен только для дисков с радиальными разрезами. Более того, суждение Лармора о невозможности существования тока в максвелловском анализе вращающегося равномерно наэлектризованного диска было неверным. В своей максвелловской электродинамике движущихся тел Герц показал, что движение эфира вблизи поверхности диска предполагает наличие тока смещения такой же силы, как и конвективные токи в теории жидкости.<sup>82</sup>

Помимо псевдо-опровержения теории Максвелла, Лармор доказывал философскую необходимость основных понятий своей теории и заявлял:

*"Идея эфирной среды представляет собой настолько естественную и мощную аналогию, что в целях практического разума доказывает существование эфира".*

Атомизм был столь же необходим:

*"Как только мы [...] перестаем рассматривать пространство как пустую геометрическую непрерывность, атомарное строение материи [...] становится естественным и необходимым следствием новой точки зрения".*

Он считал себя основателем новой трансцендентальной эстетики:

*"Можно утверждать, что эта концепция дискретных атомов и непрерывного эфира действительно находится, как и концепция пространства и времени, действительно тесно связана с нашими способами психического восприятия, в которые с необходимостью вписываются непротиворечивые картины внешнего мира".<sup>84</sup>*

<sup>81</sup> Larmor 1894: (529); 1897b: 627. О материалах Лоджа и Финдджеральда, см. Buchwald 1985a; 170,171; Hum 1991a: 223- 226.

<sup>82</sup> О скептицизме максвеллианцев см. Hum 1991a: 226, 227. Об ошибке Лармора см. Darrigol 1993b: 346-8.

<sup>83</sup> Larmor 1895b: 583. 1894: 466, 467; Герц 1890b: 274, 275. См. также Darrigol 1994a: 323; 1993b: 321.

<sup>84</sup> Larmor 1897c: 13, 14; 1900a: 76; 1904: 278; 1900b: 202. См. также Darrigol 1994a: 326, 327.

### 8.5.7 Максвелловские антипатии

Риторика Лармора о неизбежности не произвела впечатления на его конкурентов. Никто из учеников Максвелла не принял теорию Лармора в целом, хотя они были готовы ввести в электродинамику атомы и ионы. Наибольший антагонизм проявил Хевисайд. Он обвинял Лармора в том, что тот скрывает неудачу вращательного эфира, предсказанного им в 1891 г., за педантичными лагранжианами и запутанным словоблудием. В 1895 году он сказал Фицджеральду:

*"Что я хотел бы видеть, так это немного больше откровенности по поводу неудачи вращательного эфира в удовлетворении электрических требований"*.

Хевисайд также критиковал полное исключение истинной проводимости и концепцию электронов как особенностей (сингулярностей) в эфире. По его мнению, электроны могли быть только частичками наэлектризованного вещества в соответствии с максвелловской концепцией электрического заряда. Они были не более чем "специальной гипотезой", которой Хевисайд предпочел привычный реестр электротехнических аналогий.<sup>85</sup>

Дж. Дж. Томсон, безусловно, видел в "корпускуле" нечто большее, чем специальную гипотезу. Тем не менее, ему было *"чрезвычайно трудно прийти к каким-либо определенным выводам относительно достоинств [теории Лармора]"*. Он разделял критику Хевисайда в отношении электрона как сингулярности и, соответственно, избегал термина "электрон". Его и Пойнтинга картина растворения единичных трубок сил в проводниках сохранила максвелловскую интуицию электрического тока, в отличие от электронного потока Лармора и Лоренца. Более дружелюбными к Лармору были Фицджеральд и Лодж: они признавали необходимость *"теории электромагнитного действия, полностью зависящей от действия электронов"*, и одобряли проект сведения электронов к сингулярностям в динамическом эфире. Однако, гиростатическая иллюстрация вращающегося эфира Лармора не соответствовала их представлениям о динамическом объяснении. С помощью вихревой губки они все еще надеялись свести эфир и материю к идеальной жидкости, "извивающейся внутри со скоростью света".<sup>86</sup>

В британском контексте истинным преимуществом Лармора была его работа по оптике движущихся тел. Он получил премию Адамса в 1898 г. за эссе на эту тему, которое переросло в его влиятельную работу "Эфир и материя", опубликованную в 1900 г. Последующее развитие его подхода зависело от двух факторов: его активности в Кембриджском математическом *Трипосе* и отстраненности наследников Максвелла. Фицджеральд умер преждевременно в 1901 году; Хевисайд вышел из научного сообщества; Лодж посвятил себя директорству в новом Бирмингемском университете; единственный опасный конкурент, Дж. Дж. Томсон, сосредоточился на новых излучениях и атомной структуре.

Во всяком случае, кембриджские институты предотвращали деструктивное вмешательство: Лармор контролировал математический трипос, а Томсон - естественнонаучный трипос. Лармор мог свободно обучать нескольких британских теоретиков тонкостям конечной среды.<sup>87</sup>

<sup>85</sup> Герц Фитцджеральду. 22 июля 1897 г., цитируется в Hunt 1991a: 233; Heaviside 1893-1912. Том 3: 58. См. также Hunt 1991a: 229-238.

<sup>86</sup> Дж. Дж. Томсон, обзор в Larmor 1897c, цитируется в Buchwald 1985a: 172; FitzGerald 1896: 353; Lodge 1909: 97. См. также Buchwald 1885a: 172-3; Hunt 1991a: 128-9.

<sup>87</sup> Larmor 1900a. О максвелловском спаде, см. Hunt 1991a: 241-243. О Ларморе Дж. Дж. Томсоне и Кембриджских трипосах см. Warwick 1992, 1993a.

## 8.6 Мировой эфир Вихерта

Лоренц и Лармор были не единственными физиками, которым пришла в голову мысль свести электродинамику к движению заряженных частиц через неподвижный эфир. Эта идея независимо возникла в голове кенигсбергского физика Эмиля Вихерта, более известного тем, что впоследствии он руководил Геттингенским геологическим институтом. Несмотря на свою подготовку в школе математической феноменологии Неймана, Вихерт был горячим сторонником атомных теорий. Как и Гельмгольц, но в отличие от других немецких сторонников теории Максвелла, он настаивал на несостоятельности макроскопического полевого подхода для объяснения электролиза, оптической дисперсии и поглощения, а также ферромагнетизма. Он напомнил о достоинствах молекулярной теории Вебера и предложил психологическое объяснение максвелловских эксцессов своих коллег:

*"По человеческой природе, мы зашли слишком далеко при внедрении новых идей. В восторге от новых достижений мы применяли новую схему ко всему без исключения и оставляли в стороне все, что сопротивлялось интеграции".<sup>88</sup>*

### 8.6.1 Электрические атомы

Тем не менее, Вихерт был увлечен одним из аспектов теории Максвелла: объединением оптики и электромагнетизма. В этом достижении он видел признак того, что эфир является "действительным носителем чувственного мира". Читая в марте 1894 г. лекцию "О значении мира-эфира", он предложил свести материю к мириадам "центров возбуждения" в эфире, наделенных массой чисто электромагнитного происхождения. Такая точка зрения объясняла aberrацию звезд, поскольку простые центры возбуждения, как вихревые кольца Уильяма Томсона, свободно перемещаются в эфире:

*"Нам вспоминается наблюдение, что волны в океане движутся с огромной скоростью и, тем не менее, оставляют позади себя свой носитель - воду".*

Далее Вихерт предположил, что существует только один вид центра возбуждения: "атом электричества" Гельмгольца ставший "строительным блоком" всей материи.<sup>89</sup>

У Вихерта были основные предпосылки для создания теории, сравнимой с теорией Лоренца, о которой он не знал. Однако он считал свои взгляды слишком гипотетичны для полной публикации. До 1898 г. он давал лишь наброски, не имея достаточного математического развития. Он показал, что электродинамика Ампера и закон Фарадея совместимы с интерпретацией тока проводимости как потока электрических атомов, если уравнения Герца применимы к неподвижному эфиру и на электрические атомы действует сила Лоренца. Поляризацию материальных диэлектриков он интерпретировал как упругое сопротивление смещению электрических атомов. Он также набросал теорию дисперсии, основанную на динамической связи Гельмгольца между поляризацией ионов и электродвижущей силой. В отличие от Лоренца, он почти ничего не сказал об оптике движущихся тел, за исключением явления абберации, и не анализировал микроскопическое действие электрических атомов на поле.<sup>90</sup>

<sup>88</sup> Wiechert 1894. 1896b: 2. См. также Angenheister 1928; Heilbron 1964: 95-6; Hirose 1966: 18-20; Jungnickel and McCormmach 1986. Том. 2: 236.

<sup>89</sup> Wiechert 1894: 10; 1896b: 18 (*Baysteinn*).

<sup>90</sup> Wiechert 1896a, 1896b, 1897.

### 8.6.2 Катодные лучи

Наиболее оригинальным в подходе Вихерта было его внимание к экспериментальному обоснованию своих фундаментальных гипотез. Их было четыре:

1. Процессы в свободном эфире подчиняются уравнениям Максвелла.
2. Электричество состоит из атомов.
3. Эфир неподвижен.
4. Непосредственного влияния вещества на эфир не существует, все взаимодействия происходят через электрические атомы.

Две первые гипотезы были надежно закреплены в экспериментах Герца и в законах электролиза. Третья гипотеза "убедительно подтверждалась абберациями". Эту гипотезу подтвердило открытие. Как объяснил Вихерт в 1896 году, отсутствие отражения и преломления рентгеновских лучей исключает прямое воздействие вещества на эфир, поскольку такое воздействие, в отличие от воздействия через упруго связанные ионы, не исчезает при высокой частоте.<sup>91</sup>

Последний аргумент предполагал интерпретацию рентгеновских лучей как света чрезвычайно высокой частоты. Вихерт, как и Шустер и Дж. Дж. Томсон, рассматривал рентгеновские лучи как электромагнитные возмущения, возникающие при ударе частиц катодных лучей о твердую мишень. Опровержение Герцем корпускулярной точки зрения на катодные лучи он считал неубедительным из-за ионизации остаточного газа. По его мнению, катодные лучи были ионами или "возможно, даже электрическими атомами". Чтобы решить этот вопрос, он задался целью

определить отношение заряда к массе этих лучей. Комбинируя измерения магнитного отклонения и падения потенциала на катоде, он обнаружил, что это отношение значительно больше, чем для иона водорода. Этот результат удивил его, поскольку предполагал скорость лучей намного больше 200 км/с, измеренных Дж. Дж. Томсоном. Возможным выходом было признать, что лишь небольшая часть падения потенциала на катоде (около одного вольта вместо нескольких сотен вольт) служит для ускорения лучей. Это показалось Вихерту неправдоподобным, и он стал сомневаться в измерении скорости Дж. Дж. Томсоном: последнее могло быть ошибочным из-за задержки флуоресценции стенок трубки.<sup>92</sup>

Осенью 1896 г. Вихерту стало известно о доказательстве Теодором дес Кудресом того, что скорость катодных лучей больше, чем было установлено Дж. Дж. Томсоном. Дес Кудрес проницательно представил катодные лучи трубки, питаемой током Тесла, под магнитным воздействием провода (abcd), питаемого тем же током (рис. 8.4).

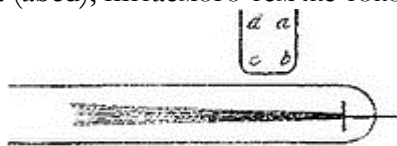


Рис. 8.4. Прибор Дес Кудреса для измерения скорости катодных лучей (Wiechert 1897: 14).

В этом приборе лучи генерируются с перепывами, на частоте тока Тесла ( $10^6 \text{ сек}^{-1}$ ), и фаза отклоняющего поля одинакова для каждого импульса. Если бы скорость лучей была столь мала, как полагал Дж. Дж. Томсон, то эта фаза зависела бы от положения провода вдоль трубки: при смещении на 10 см знак отклоняющего поля менялся бы на противоположный. Исходя из отсутствия такого отклонения, дес Кудрес определил, что скорость должна быть по крайней мере в 10 раз больше, чем предполагал Томсон.<sup>93</sup>

Вихерт продолжил работу по улучшению этого результата. Поскольку частоту тока в трубке нельзя было значительно увеличить, он объединил отклонения, создаваемые двумя отрезками проволоки abed и efgh, расположенными на разных расстояниях от катода и питаемыми током гораздо более высокой частоты, чем ток в трубке (рис. 8.5).

До конца 1896 г. он показал, что скорость его лучей равна, по крайней мере, равна или несколько больше  $3 \cdot 10^7$  м/сек. В сочетании с магнитным искривлением тех же лучей это давало отношение заряда к массе по крайней мере в 2000 раз, а возможно, и ненамного больше, чем у иона водорода. Вихерт объявил об этих результатах и приказал свою аппаратуру 7 января 1897 года на заседании математико-физического общества в Кенигсберге. Частицы катодных лучей, заключил он, представляют собой не что иное, как электрические атомы.<sup>94</sup>

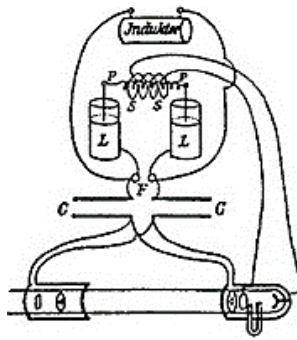


Рис. 8.5. Прибор Вихерта для измерения скорости катодных лучей (Вихерт 1898а).

*Индукционная катушка ('Induktor') и искровой разрядник F управляют двумя колебательными контурами. Первый, состоящий из лейденских банок L и спирального трансформатора Теслы PP, индуцирует во вторичной катушке SS напряжение для создания катодных лучей в трубке (каждый положительный полупериод этого напряжения создает серию лучей). Второй, с гораздо более высокой частотой, состоит из двух плоских конденсаторов C и двух проволоочных петель. Совместное действие одной петли, подковообразного магнита и первой диафрагмы (за анодом) используется для модуляции пучка катодных лучей; другая петля воздействует на луч дальше в трубе, перед второй диафрагмой, за которой следует флуоресцентная мишень. Светимость этой мишени зависит от фазового сдвига модуляции при прохождении лучей через трубку. Скорость лучей может быть вычислена из изменений этой светимости, когда длина пробега и частота модуляции изменяются.*

До этого времени новая электродинамика Вихерта оставалась в основном в Кенигсберге. Открытие электрических атомов в катодных лучах изменило его отношение к этому вопросу. В последующие годы он обнаружил свой вклад в теорию электронов, консолидировал свои исследования катодных лучей и стимулировал исследования своих новых геттингенских коллег. Для обозначения электрического атома он принял термин Стоуни и Лармора - электрон. Однако он признал приоритет Лоренца в создании электронной теории электродинамики и проявил голландскую сдержанность в отношении дальнейших рассуждений о природе эфира, заявив в 1891 г:

*"Вещество и эфир - это только картинки, которые мы видим в природе с нашей человеческой точки зрения; решение вопроса о том, что соответствует этим картинкам в действительности, оставлено на усмотрение будущего прогресса науки."*<sup>95</sup>

<sup>91</sup> Wiechert 1896b: 44 - 47.

<sup>92</sup> Wiechert 1896b: 45 (с удивительным замечанием, что корпускулярный вид катодных лучей был наиболее распространенным в Германии в то время). По истории своих экспериментов с катодными лучами, ср. Вихерт 1898а: 260. Лармор также предположил, что катодные лучи могут быть свободными электронами (Larmor 1894:



[524n]).

<sup>93</sup> Des Coudres 1895. 1896. См. также Wiechert 1897: 13-15. Дж. Дж. Томсон уже использовал колебания Теслы для создания своих безэлектродных разрядов (J. J. Thomson, 1891b) и для подачи в трубку, на которой он измерял скорость катодных лучей (Дж. Дж. Томсон, 1894b).

<sup>94</sup> Wiechert 1897: 15 - 16 Ср. Heilbron 1964: 96.

<sup>95</sup> Wiechert 1898b. 1899. 1901: 668. Вихерт ссылается на Larmor в 1896 году (Wiechert 1896b: 48), в Лоренц только в 1898 году (Вихерт 1898b: 92).

## 8.7 Выводы

Максвелл и его британские последователи были убеждены, что в электромагнитной теории света необходимо учитывать молекулярную структуру вещества. Однако, не желая применять электрические понятия в молекулярном масштабе, они не имели возможности уточнить механизм, изменяя свойства эфира веществом и довольствовались модификациями макроскопических уравнений поля или ограничивались молекулярными рассуждениями в рамках старой упруго-твердой теории света. Немецкие же максвелловцы начала 1890-х годов игнорировали все явления, которые не вписывались в первоначальную полевую феноменологию Максвелла. Физики, которые первыми преодолели это ограничение, относились к теории Максвелла более спокойно.

Гельмгольц, первоначально воспринявший Максвелла через концепцию электрического сдвига поляризации, без колебаний интерпретировал поляризацию материального диэлектрика как сдвиг ионов. Аналогично поступил и Лоренц, который исходил из переосмысления Максвелла Гельмгольцем. Вихерт переосмыслил "атомы электричества" Гельмгольца и попытался сохранить те аспекты теории Вебера, которые оказались лучше максвелловских. В Великобритании никто из крупных теоретиков не искал вдохновения в старых немецких взглядах на электричество. Однако Лармор признал электролитические ионы Гельмгольца и на время заинтересовался его теорией поляризации. Более важным было то, что он согласился с Уильямом Томсоном в том, что в теории Максвелла отсутствует конечная динамическая среда, столь же понятная, как упругое твердое тело или идеальная жидкость. Его смелая попытка создать атомы, эфир и ионы путем объединения среды МакКаллага и вихревой теории вещества привела к кризису, в конце которого он преступил существенные части максвелловской догмы.

Все пионеры электронной теории были согласны с тем, что эфир неподвижен и что взаимодействие между эфиром и веществом происходит исключительно через заряженные частицы. Однако они по-разному обосновывали эту картину. Лоренц и Гельмгольц выступали за простоту, экспериментальную адекватность и абстрактную динамику. Они не пытались объяснить природу своих "ионов" и не пытались создать общую теорию материи. Лармор и Вихерт, напротив,

интерпретировали свои "электроны" или "электрические атомы" как сингулярности в эфире. Они хотели устранить основной дуализм эфир/вещество и построить всё вещество из "+" и "-" электронов. В то время как Вихерт не проявлял особого интереса к этим рассуждениям, Лармор объяснил, как построить электроны путем перфорации и заполнения среды МакКаллага, и представил себе атомы, состоящие из вращающихся электронов.

Различные основатели теории электронов различались и своими физико-математическим приемам. Гельмгольц и Вихерт, в соответствии с немецким стремлением к математической феноменологии, отдавали предпочтение макроскопическим методам: они обращались к микроскопической картине только для обоснования модификаций макроскопических уравнений.<sup>96</sup>

Лоренц же вначале исследовал взаимодействие электромагнитных волн с отдельными ионами и лишь затем перешел к средним макроскопическим эффектам. Он стремился развить представление об электромагнитных процессах в микроскопическом масштабе. Лармор изначально был ближе к макроскопическим методам Гельмгольца, но по другой причине: он все еще зависел от максвелловской тенденции рассматривать воздействие вещества на эфир как модификацию макроскопической динамики поля. Только после прочтения Лоренца он перешел к более подлинно микрофизическому подходу.

Самые новаторские результаты Лоренца касались оптики движущихся тел. При условии, что эфир неподвижен, каждый земной прибор подвергался воздействию эфирного ветра, соответствующего быстрому движению Земли. Однако все попытки оптически обнаружить влияние этого ветра заканчивались неудачей. По мнению Маскарта, оптические явления зависели исключительно от относительного движения предполагаемых вещественных тел. Первое теоретическое объяснение этого результата Лоренц дал косвенное. Решив уравнения для волны, проходящей через движущееся транспарентное тело, он вывел частичное сопротивление волны Френеля, из которого следует нечувствительность законов преломления первого порядка к движению Земли.

Позднее, в том же 1892 г, Лоренц нашел более прямое доказательство инвариантности первого порядка для оптических явлений. Здесь он открыл важный метод "соответствующих состояний", который вскоре был использован Лармором. Метод заключался в приведении дифференциальных уравнений для полей в движущейся системе к виду, который они имеют в покоящейся системе, путем изменения полей и координат с использованием "местного времени"  $t - vx/c^2$ . По мнению Лоренца и Лармора, это преобразование было чисто формальным и относилось к стандартной стратегии решения дифференциальных уравнений. Физический смысл имели только исходные поля как

состояния эфира. Решения преобразованных уравнений не имели прямой интерпретации (они относились к "фиктивной системе"), и физические выводы из них можно было сделать, только изменив преобразование на противоположное.

Лоренц не ожидал, что все электромагнитные явления не зависят от движения Земли. Однако, распространив технику соответствующих состояний на второй порядок, он смог показать, что электростатические явления не зависят от движения Земли. Тем же методом он установил, что если влияние движения Земли на молекулярные силы такое же, как и для электростатических сил, то жесткие земные тела должны сжиматься в направлении, параллельном скорости Земли. Последний эффект объяснял нулевой результат эксперимента Майкельсона-Морли 1887 года. Лармор принял эти рассуждения с личным оттенком: он воспринял эксперимент Майкельсона-Морли как подтверждение своей эфирной концепции материи.

Усилия Лоренца и Лармора не ограничивались оптикой движущихся тел. Они оба стремились свести всю физику к теории электронов. Кроме оптики, они рассматривали различные виды магнетизма, термостатику (Лармор), магнитооптику (Лоренц и его ученики), атомные модели (Лармор) и даже гравитацию.<sup>97</sup>

Вклад Гельмгольца, несмотря на его влияние, был гораздо более ограниченным: он касался только оптической дисперсии (оставив Рейфу коэффициент Френеля). Вихерт мало что сказал по оптике движущихся тел, но первым набросал электронную теорию проводимости и единственным теоретиком, экспериментально определившим электрон.

Выдающиеся работы Вихерта по катодным лучам, а также несколько более позднее сообщение Дж. Дж. Томсона о "корпускуле" дали экспериментальную жизнь теоретическому электрону и тем самым укрепили электронную теорию. Кроме того, была устранена неясность с массой электрона: первоначально Лоренц и Лармор знали только, что эта масса не может превышать массу самого маленького электролитического иона. Прогрессу теории электрона способствовали и другие экспериментальные открытия. Во-первых, открытие рентгеновских лучей вывело ионную теорию дисперсии Гельмгольца на передний план физики. Как мы видели в главе 7, Вихерт, Дж. Дж. Томсон и другие использовали формулу Гельмгольца для согласования электромагнитной интерпретации лучей с их недостаточной рефрактивностью. Напротив, Вихерт утверждал, что поведение рентгеновских лучей подтверждает основной постулат теории электронов: материя воздействует на эфир только через электроны. Эффект Зеемана стал еще одним важным вкладом в теорию электрона. Лоренц предложил первое объяснение этого эффекта и способы его проверки. На основе измерений Зеемана он

оценил отношение заряда к массе своих оптических ионов. То же самое сделали Фицджеральд и Лармор для массы своего электрона.<sup>98</sup>

Электронные теории получили большое распространение на рубеже веков. Все большее число физиков осознавало, что их объяснительная сила во многом превосходит возможности более ранних теорий, включая максвелловскую. В Германии Лоренц стал провидцем, примирившим микрофизику Вебера и теорию поля Максвелла. Выдающийся специалист по оптике и электродинамике Пауль Друде отказался от неймановской и максвелловской феноменологии и включил основные идеи Лоренца в свои учения и теории. В целом теория электронов воспринималась как прогрессивное и плодотворное направление даже предпочеваемыми не работать над ней. В Англии Лармор был красноречивым защитником той более британской формы, которую он ей придал. Его задача была нелегкой: он столкнулся с конкуренцией экспериментальной микрофизики Дж. Дж. Томсона и критикой со стороны других максвеллианцев. Тем не менее, он распространил свою философию конечной среды через Кембриджский математический трипос и престижную книгу *"Эфир и вещество"*. Электронная теория имела международный успех, что соответствовало космополитизму ее голландского основателя.

<sup>96</sup> Интерес Вихерта к отдельным электронам возрос после того, как он изучил Лоренца. Например, он вывел формулу «Ленарда-Вихерта» для запаздывающих потенциалов от движущегося электрона (Вихерт 1900, Lienard 1898a).

<sup>97</sup> Для магнетизма, смотри Larmor 1894: [515-516, 518-519]; 1895b: 553-554, 597; 1897b: 637-638; 1897c: 114-117 (с выводом закона Кюри); Lorentz 1902: 121-122. 128. О термостатистике см. Larmor 1897b: 636-638; 1897c: 29-30. 81-106 Для магнитооптики см. Wind 1898, 1898-99 (обсуждается в Buchwald 1985a: 245-247). Атомные модели см. в Larmor 1894: [516-517]; 1895: 597; 1900a: 233 (обсуждается в Heilbron 1964: 91-922). О гравитации см. Larmor, 1900a: 187; Lorentz 1900b (обсуждается в McCormach 1970b: 476-478).

<sup>98</sup> Lodge 1897b сообщает о соображениях Фицджеральда ; Larmor 1897a: 506. Теорема Лармора найдена там же: 504 (см. также Warwick 1993b; Robotti and Pastorino 1998).

## 9. Старые принципы и новое мировоззрение

### 9.1 Введение

На континенте теория электронов стала известна в основном по работе Лоренца *"Versuch"* (Проба) 1895 года. На том этапе теория еще имела очевидные недостатки. Сам Лоренц отмечал, что "очень простой факт" - отсутствие оптических эффектов первого порядка в эфирном ветре, появился в его теории "как случайное следствие довольно сложных соображений". Для эксперимента Майкельсона-Морли 1887 г. он ввел новое предположение о поведении внутримолекулярных сил. Более того, он допускал, что будущие эксперименты, возможно, потребуют больше предположений. Это побудило Анри Пуанкаре произнести знаменитую фразу "В гипотезах никогда нет недостатка". В конце века французский

математик, тщательно проанализировав основные электродинамические теории, констатировал серьезный кризис. Наиболее успешная в эмпирическом отношении теория Лоренца противоречила общим принципам, которые Пуанкаре считал общепринятыми. В частности, Пуанкаре призвал модифицировать теорию электрона, чтобы сделать ее совместимой с принципом относительности.<sup>1</sup>

Другой движущей силой новой теории электронов было электромагнитное мировоззрение. Как мы видели, Лармор и Вихерт мечтали о мире, в котором нет ничего, кроме эфира и его особенностей, причем инерция последних является чисто электромагнитной. В конце века Вильгельм Вин (Wilhelm Wien) превратил эту прекрасную идею в систематическую программу исследований, которая свела всю физику, даже механику и гравитацию, к электромагнетизму. Некоторые из наиболее одаренных теоретиков и экспериментаторов Германии внесли свой вклад в этот проект. Их предположения и результаты оказались противоречащими принципам Пуанкаре. В этой главе рассказывается о возникновении, воплощении и конфликтах релятивистских и электромагнитных идей до 1905/6 года.

<sup>1</sup> Lorentz 1898b: 102; Poincare 1902: 202: «Гипотезы - это дно, которое пропускает меньше всего».

## **9.2 Критика Пуанкаре**

### **9.2.1 Французский изоляционизм**

Пуанкаре был в основном математиком, когда в 1886 г. его избрали на кафедру "математической физики и исчисления вероятностей" в Сорбонне. Практика резервирования таких кафедр для чистых математиков была в то время обычной во Франции и отражала резкое дисциплинарное разделение между экспериментальной и математической физикой. Первой занимались физики, которые стремились быть как можно ближе к фактам и избегали теоретических спекуляций. Второй занимались математики, которые шлифовали форму существующих теорий и использовали их чисто математические возможности. Такая организация французской физики и связанное с ней сочетание эмпиризма и консерватизма привели к изоляции и упрочению французской физики. Именно поэтому до сих пор нам удавалось игнорировать французский вклад в электродинамику после Ампера без существенной потери понимания общей эволюции предмета.<sup>2</sup>

Конечно, можно отметить несколько выдающихся французских работ в области электрических измерений и некоторые теоретические дополнения к амперовскому наследию. Но они были методологически консервативны и не несли в себе никаких фундаментальных инноваций. Французские физики и математики встретили новые зарубежные веяния скептически и даже враждебно. Декан французской математической

физики академик Жозеф Бертран осудил **"Трактат"** Максвелла за отсутствие математической строгости и обилие произвольных допущений. В гидродинамике и электродинамике Гельмгольца он нашел ошибки, которые свидетельствовали лишь о предрассудках и плохом знании немецкого языка. Теоретической физике британского и немецкого типа не было места во Франции, поскольку она включала в себя запутанные физические, математические и экспериментальные аргументы, которые были чужды французской практике и институтам. Добавьте к этой несовместимости оттенок шовинизма, и относительная незаметность французской электродинамики будет объяснима.<sup>3</sup>

К счастью, из французского изоляционизма были исключения. Альфред Потье, которого Пуанкаре знал как риптилиста в Политехническом институте, организовал перевод **"Трактата"** Максвелла в 1885 году. Маскарт и Жубер включили главу, посвященную теории Максвелла, в свой авторитетный труд *"Legons sur l'Electricite et le magnetisme"* (1882 года). Текст Максвелла уже был хорошо известен французским инженерам-телеграфистам, которые увидели в нем кладезь методов для решения практических задач электричества. Ведущий французский журнал по электротехнике *L'eclairage electrique* (*Электрическое освещение*) публиковал переводы или подробные изложения зарубежных работ, в том числе теоретических мемуаров Гельмгольца и Герца.<sup>4</sup>

<sup>2</sup> см. Atten 1988b. 1992. 1996.

<sup>3</sup> Bertrand 1891. См. Также Helmholtz 1868; Atten 1992, 1996: 37.

<sup>4</sup> Maxwell 1885-1889; Mascart and Joubert 1882-1886: Ch. 6. См. также Auen 1988a. 1992; Walter 1997.

### 9.2.2. Лекции в Сорбонне

Благодаря обучению в Политехнической школе и Школе горного дела Пуанкаре имел доступ к этим французским открытиям. Его преподавание в Сорбонне было гораздо более разнообразным и авантюрным, чем то, которое обычно ведется с аналогичных кафедр. Он рассматривал новейшие зарубежные теории и обсуждал новые эксперименты, хотя сам их не проводил. Он активно интересовался технологическими вопросами, о чем свидетельствуют его многочисленные материалы в журнале *L'eclairage electrique*. И, наконец, он прекрасно справился с задачей популяризации науки, написав бестселлер о бесприволочной телеграфии.<sup>5</sup>

Весной 1888 г. Пуанкаре прочитал курс электромагнитной теории Максвелла, ставший естественным продолжением его предыдущих лекций по математическим теориям света, излагая Максвелла в своей характерной манере: он быстро читал научные тексты целиком и реконструировал рассуждения по-своему. Результат часто оказывался яснее оригинала, раскрывал в полном свете одни существенные черты, но упускал из виду другие. В частности, он улучшил математические

выкладки Максвелла, выделил использование им метода Лагранжа как многообещающее ослабление механического редукционизма, но упустил то, что максвелловцы считали сущностью теории Максвелла, а именно сущность теории Максвелла - сведение электрического заряда и тока к эфирным процессам.<sup>6</sup>

В 1889, 1892 и 1899 годах Пуанкаре читал лекции по электродинамике других зарубежных мастеров: Гельмгольца, Герца, Лармора, Лоренца. По его мнению, такой эклектизм был необходим для предотвращения догматизма. Не боясь интеллектуального косоглазия, он множил сравнения и связи между различными теориями. Он первым предоставил доказательства, того, что теория Максвелла - *"не что иное, как предельный случай теории Гельмгольца"*; показал, как уравнения Герца могут быть получены из уравнений Максвелла; соединил теорию Лармора со старой теорией света Неймана; нашел модификации уравнений Герца, приведшие к уравнениям макроскопического поля Лоренца; показал, как Лармор *"присвоил предположения Лоренца и объединил их со своими"*.<sup>7</sup>

Пуанкаре основывал эти сравнения на дифференциальных уравнениях теорий, которые он переформулировал в стандартных обозначениях (максвелловских) и единицах (электромагнитных). Этот акцент на математическом аппарате мог затушевывать контраст между различными теориями. Например, истинные максвелловцы отвергли бы утверждение, что теория Максвелла является предельным случаем теории Гельмгольца: для них наиболее существенной была реформа Максвеллом понятия электричества, тогда как Пуанкаре заботился только о восстановлении эмпирических предсказаний, *истинных отношений* теории Максвелла.<sup>8</sup>

Однако Пуанкаре чувствовал индивидуальность каждой теории и старался передать стиль ее изобретателя.

Его Максвелл *"не пытался построить единственное, окончательное и хорошо упорядоченное здание, а скорее, казалось, возводил множество временных и независимых конструкций, связь между которыми [была] затруднена, а иногда и невозможна"*. Он изобразил Герца строгим наблюдателем, *"признававшим только установленные Максвеллом уравнения, оставлял в стороне классический текст Максвелла, считая его неясным, и пытался, заранее установив окончательные уравнения, создать теорию, приводящую к ним"*.

В Ларморе он видел умного реакционера, который *"искал общее механическое объяснение света и электричества и [для этого] вернулся к [старым] упругим теориям [оптики]"*.

Наконец, его Лоренц был сторонником нового микроскопического видения, которое устраняло истинный магнетизм и токи проводимости и заменяло их циркулирующими электронами. В его глазах разнообразие было достоинством: *"Каждый имеет свои характерные способности, и эти*

способности должны быть различными, иначе научный концерт будет напоминать квартет, где каждый хочет играть на скрипке".<sup>9</sup>

Особую привлекательность лекциям Пуанкаре придавал его яркий стиль изложения. Его математические выкладки были в высшей степени элегантны, а французский язык отличался прекрасной ясностью. Он тщательно излагал все необходимые гипотезы, но избегал чрезмерной абстракции, свойственной чисто аксиоматическому изложению. По педагогическим соображениям он предпочитал индуктивное изложение и приводил выразительные аналогии для наиболее трудных утверждений. Привлекательность лекций Пуанкаре не ограничивалась французскими читателями. Максвеллианец Эндрю Грэй аплодировал: *"Здесь можно найти пример того порядка и гармонии, которые делают работы лучших французских математиков столь изысканно ясными, и того художественного очарования, которое так редко встречается в трудах ученых других национальностей"*.<sup>10</sup>

Более верные максвелловцы не были так довольны тем, как Пуанкаре изложил теорию Максвелла. Фицджеральд справедливо заметил, что Пуанкаре совершенно неправильно понял основное понятие Максвелла об электрическом смещении и что ни один из парадоксов, воспринятых французским математиком, на самом деле не существует. Цербер французской ортодоксальности Жозеф Бертран осудил лекции Пуанкаре по противоположной причине: его молодой коллега наглядно продемонстрировал недостаточную строгость максвелловских рассуждений. К счастью, некоторые французские физики были настроены более открыто, и к концу века Пуанкаре стал высшим авторитетом в области теории электричества в своей стране. Немцы были наиболее восприимчивы к лекциям Пуанкаре. Как правило, они предпочитали их оригинальному тексту Максвелла и использовали их при написании собственных учебников. Особенно восприимчивы они были к критике рисунков Максвелла. То, что Пуанкаре объявил непонятным, например, электрическое смещение, они обычно опускали в своих текстах.<sup>11</sup>

<sup>9</sup> См. P. Langevin 1914; Broglie 1954; Darrieus 1954; Wien 1954.

<sup>10</sup> Poincare 1890. См. также Darrigol 1993a: 215-22; 1995a: 6-8.

<sup>11</sup> Poincare 1891: 83, 1894; 1901a: 345-52, 587, 627.

<sup>12</sup> По поводу понятия «правдивые отчеты», см. Poincare 1900b, 1902: гл. 10; и Stump 1989.

<sup>13</sup> Poincare 1890: IV; 1901a: 344, 583, 422; 1929: 4.

<sup>14</sup> Gray 1891.

<sup>15</sup> FitzGerald 1892; Bertrand 1891. О французском приеме см. Atten 1992; Darrigol 1995a: 8. О немецком приеме ср. Darrigol 1993a и 1995a: 8-10

### 9.2.3. Физика принципов

В своем обсуждении взглядов Максвелла на механическое объяснение Пуанкаре различает "феноменологические законы" и "механическую интерпретацию": законы касаются "параметров, которые могут быть непосредственно достигнуты и измерены опытом", и дифференциальных



уравнений, дающих их эволюцию, в то время как механическая интерпретация сводит законы к ньютоновскому движению обычной материи и гипотетических флюидов. Затем Пуанкаре доказал следующую теорему: *"Если явление допускает механическое объяснение, то существует бесконечное множество других механических объяснений, которые одинаково хорошо учитывают все аспекты, выявляемые опытом"*. Перед лицом такого произвола он рекомендовал использовать принцип наименьшего действия, который предполагает возможность механического представления, не давая его. Эту трансформацию механистического идеала он считал величайшим достижением Максвелла.<sup>12</sup>

Пуанкаре считал неизбежной эволюцию от ньютоновского или лапласовского идеала к "физике принципов":

*Наступил день, когда концепция центральных сил уже не казалась достаточной [...]. Что же тогда было сделано? Попытка проникнуть в детали строения Вселенной, выделить части этого огромного механизма анализируя одну за другой силы, приводящие их в движение, была оставлена, и мы довольствовались тем, что приняли за руководство некоторые общие принципы, цель которых - избавить нас от этого минутного исследования.*

К общим принципам Пуанкаре относил различные принципы механики (наименьшего действия, относительного движения, сохранения массы, равенства действия и реакции, сохранения энергии), а также дополнительные термодинамические или электродинамические принципы (принцип Карно, сохранения электрического и магнитного заряда, единства электрической и магнитной силы). Как и Гельмгольц, он намеревался найти компромисс между старым ньютоновским идеалом и чистой феноменологией.<sup>13</sup>

Пуанкаре верил в трансцендентную истинность принципов подобно Гельмгольцу или Томсону. Он придал им индуктивное происхождение:

*Принципы - это результаты экспериментов, смело обобщенные: но, высокая степень достоверности по-видимому, вытекает из самой их общности. На самом деле, чем более общими они являются, тем возможным их проверить, и проверки, множась, принимая самые разнообразные, самые неожиданные формы, заканчиваются тем, что уже не остается места для сомнений.*

В некоторых случаях Пуанкаре утверждал, что принципы механики, несмотря на их эмпирическое происхождение, стали совершенно неопровержимыми и выступают теперь как определения или конвенции. При столкновении с эмпирическим противоречием принципы всегда можно спасти, введя в них невидимые сущности. Однако. Пуанкаре говорил об этом только для того, чтобы прояснить логический статус принципов. В своей собственной практике физики он отказывался спасать принципы путем обращения к нематериальным сущностям, поскольку в этом случае они переставали управлять наблюдаемыми

явлениями и становились бесплодными.<sup>14</sup>

В своих лекциях в Сорбонне Пуанкаре оценивал различные электродинамические теории с точки зрения их соответствия общим принципам. Например, он считал (ошибочно), что эфирные напряжения Максвелла несовместимы с сохранением энергии; соглашался с Герцем, что теория Гельмгольца противоречит единству электрической силы; считал, что теория дисперсии Гельмгольца-Рейффа нарушает сохранение заряда. Только теория Герца соответствует всем необходимым принципам, включая принцип относительного движения и равенства действия и реакции. Последнее суждение может удивить читателя, который помнит, что сам Герц отрицал существование в своей теории неуравновешенной силы  $\partial(\mathbf{D} \times \mathbf{B})/\partial t$ . Пуанкаре переосмыслил теорию Герца как теорию поля в движущейся *материальной* среде, причем наличие материи предполагалось даже в самом совершенном вакууме. Тогда силе Герца было на что действовать.<sup>15</sup>

Проблема с теорией Герца, как сетовали Герц и Пуанкаре, заключалась в том, что она предполагала полное перетаскивание световых волн в движущемся прозрачном теле, что противоречило результату Физо. Только теория Лоренца давала правильное перетаскивание, а также другие многочисленные результаты оптики движущихся тел. Пуанкаре решил, что эта теория "наилучшим образом объясняет факты" или "наименее дефектна". При этом он обнаружил, что она противоречит принципу относительного движения и принципу реакции. Для того чтобы понять глубину этой дилеммы, необходимо рассмотреть мнение Пуанкаре о роли эфира.<sup>16</sup>

<sup>12</sup> Poincare 1890: IX. XIV. См. также Stein 1981: 310-311.

<sup>13</sup> Poincare 1904b: 299.

<sup>14</sup> Poincare 1904b: 301; 1901c (конвенции по механике); 1902: 196 (против стерильных принципов).

<sup>15</sup> Poincare 1890: 91-92 (Максвелл); 1891: 114-117 (Гельмгольц); 1901a (Гельмгольц-Райфф); 1894: 337; 1895; 394-402; 1901a: 345-420 (Герц). См. также Darrigol 1993a: 219-220; 1995a: 11-16.

<sup>16</sup> Poincare 1901a: II. 611.

### 9.2.4 Исчезающий эфир

В 1888 году в предисловии к своим лекциям по математической теории света Пуанкаре писал:

*Неважно, существует ли эфир в действительности; это дело метафизиков. Для нас существенно то, что все происходит так, как если бы он существовал, и что эта гипотеза удобна для объяснения явлений. В конце концов, есть ли у нас другие основания верить в существование материальных объектов? Это тоже лишь удобная гипотеза, только она никогда не перестанет быть таковой, тогда как эфир, несомненно, когда-нибудь будет отброшен как бесполезный.*

Скептицизм Пуанкаре отчасти объясняется тем, что в оптике множество взаимно противоречащих теорий упругого эфира одинаково

хорошо подходят для представления явлений. Можно также сослаться на господствовавший в этот период во французской физике эмпиризм и, конечно, на неоднократные неудачи в обнаружении эффектов эфирного ветра. Во всяком случае, Пуанкаре ощущал постепенное угасание концепции эфира от Френеля до Герца. Как он вспоминал, Френель анализировал свой эфир в терминах механических взаимодействий системы молекул; Максвелл только предполагал скрытое механическое движение; внутренние напряжения, придававшие его эфиру большую телесность, Пуанкаре считал несовместимыми с остальными элементами системы. Наконец, теория Герца, по мнению Пуанкаре, полностью исключала эфир.<sup>17</sup>

Если эфир и получит новую жизнь, считал Пуанкаре, то только в виде призрака. Движение относительно эфира должно было оставаться необнаружимым, и эфир не мог нести импульс. Другими словами, принцип относительного движения и принцип реакции должны были действовать *исключительно* для вещества. К сожалению, Лоренц лишь частично и искусственно удовлетворил первый принцип, а второй грубо нарушил.

Пуанкаре презрел "переворот" в сокращении Лоренца и поставил вопрос о высших порядках:

*"Я считаю весьма вероятным, что оптические явления зависят только от относительного движения присутствующих материальных тел - источников света и приборов, причем не только первого или второго порядка [...], но и в точности".*

Против точки зрения, согласно которой эфир является законным телом отсчета, он возразил следующее:

*"Разве не очевидно, что из понятого таким образом принципа мы уже не сможем ничего вывести? Он уже ничего не может нам сказать, поскольку не боится никакого противоречия".<sup>18</sup>*

Четко разделяя эфир и вещество, теория Лоренца противоречила и принципу реакции. Чистая сумма сил, действующих на ионы, равна интегралу от силы Герца  $\partial(\mathbf{E} \times \mathbf{H})/c\partial t$ , который в общем случае не исчезает. Например, пучок электромагнитного излучения будет оказывать давление на проводник. Или источник, испускающий излучение в одном направлении, будет давать отдачу в противоположном направлении. Максвелл уже рассматривал первый эффект. В его теории он не вызывал затруднений, поскольку его эфир, несущий энергию, поддерживающий напряжения и движущийся вместе с веществом, мог с таким же успехом передавать импульс. Напротив, в теории Лоренца Пуанкаре усмотрел нарушение принципа реакции, поскольку соответствующий эфир не мог нести столь грубый атрибут вещества, каким является импульс.<sup>19</sup>

<sup>17</sup> Poincare 1889: 1.

<sup>18</sup> Poincare 1901a: 536 (его акцент); 1904b: 306.

<sup>19</sup> Poincare 1895: 391-392. См. также Darrigol 1995a: 17-19.

### 9.2.5 Кризис

Будучи неудовлетворенным теорией Лоренца, Пуанкаре исследовал возможность изменения теории Герца для включения в нее результата Физо и сохранения при этом принципа энергии, принципа реакции и принципа сохранения электричества и магнетизма. Отрицательный вывод его сложного математического анализа указывает на фундаментальную несовместимость между результатом Физо и общими принципами. Интуитивно казалось, что частичное затягивание световых волн превращает эфир в тело, способное к механической реакции. По словам Пуанкаре, этот эффект *"как бы показывает нам две различные среды, взаимопроницающие и в то же время движущиеся одна относительно другой; кажется, что мы прикасаемся пальцем к эфиру"*.<sup>20</sup>

В этот момент Пуанкаре мог бы отказаться от общности принципа реакции, как предлагал сам Лоренц. Но он этого не сделал, так как считал, что любое нарушение принципа реакции подразумевает, наряду с принципом относительности, возможность вечного двигателя. Чтобы показать эту абсурдность, он рассматривал два тела, первоначально находящиеся в состоянии покоя и изолированные от других тел. Пусть действие одного тела на другое не взаимно. Соединим два тела жестким стержнем. Полученная система начинает двигаться. Согласно принципу относительного движения, чистая сила на это движение не действует, поэтому система постоянно ускоряется.<sup>21</sup> Перед лицом подобных парадоксов Пуанкаре рассматривал несовместимость результата Физо с принципом реакции как симптом серьезного кризиса электродинамики:

*"Когда-нибудь мы должны будем изменить наши идеи в каком-то важном пункте и сломать рамки, в которые мы пытаемся вписать как оптические, так и электрические явления"*.<sup>22</sup>

В 1900 г. по случаю юбилея Лоренца Пуанкаре вернулся к вопросу о том, каким образом теория Лоренца нарушает принцип реакции. Он ввел фиктивную жидкость с плотностью импульса  $(1/c)\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  (в единицах Герца). Если добавить эту жидкость в систему тел, то формально соблюдается сохранение импульса. Затем Пуанкаре приписал фиктивной жидкости плотность массы, полученную делением плотности энергии электромагнитного поля на  $c^2$ . Когда часть энергии поля поглощалась веществом, то фиктивная жидкость приходила в состояние покоя и оставалась скрытой в пространстве, не имея энергии. При таком заведомо искусственном допущении он получил равномерное движение центра масс. Внимательное прочтение его текста показывает, что он не хотел приписывать фиктивной жидкости никакого физического смысла. Напротив, он рассматривал вклады фиктивной жидкости в импульс и

инерцию системы как меры физического нарушения принципа реакции.<sup>23</sup>

Другая задача Пуанкаре состояла в том, чтобы показать, что нарушение принципа реакции в теории Лоренца влечет за собой соответствующее нарушение принципа относительности. Для этого он рассмотрел излучение параллельного пучка электромагнитных волн источником, движущимся со скоростью  $u$  через эфир в направлении волн. Для наблюдателя, находящегося в состоянии покоя, энергия, испускаемая источником, равна энергии  $J$  испускаемого излучения плюс работа  $(-J/c)u$ , совершаемая импульсом отдачи  $-J/c$  (большая инерция источника препятствует существенному изменению скорости). Для наблюдателя, движущегося вместе с излучателем, сила отдачи не совершает работы, и он должен приписать излучению энергию  $J(1 - u/c)$ , если энергия по-прежнему сохраняется. Этой поправке к излученной энергии соответствует поправка  $-Ju/c^2$  к импульсу отдачи. Пуанкаре рассматривал эту крошечную "дополнительную силу" как нарушение принципа относительности первого порядка. И снова он увидел необходимость "глубоко изменить наши представления об электродинамике".<sup>24</sup>

<sup>20</sup> Poincare 1895: 395—413; 1900b: 149. Профессор физики Пуанкаре в Политехнике Альфред Корну рассматривал эксперимент Физо как прямое экспериментальное доказательство существования эфира (Cornu [1894-1895]: 207).

<sup>21</sup> Poincare 1900a: 270. Подобный аргумент приводится в *scholium* (школе) к законам **Принципов** Ньютона (я благодарю Фридриха Штайнле за это замечание) и в Ampere 1826b: 1-2.

<sup>22</sup> Poincare 1895: 412.

<sup>23</sup> Poincare e 1900a: 253-258. См. также Darrigol 1995a: 23-25.

<sup>24</sup> Poincare 1900a: 273-278. Рассуждение Пуанкаре было несколько более общим: оно не предполагало равенство скоростей излучателя и движущегося наблюдателя. Альфред Лиенар уже вывел дополнительную силу из теории Лоренца (Lienard 1898b: 323 - 324).

### 9.2.6 Явные состояния

Обсуждая этот мысленный эксперимент, Пуанкаре показал, что оценки движущимся наблюдателем энергии излучения и силы отдачи согласуются с оценками, вычисленными на основе "соответствующих состояний" электромагнитного поля Лоренца. Он ожидал такого согласия, поскольку интерпретировал соответствующие состояния как состояния, наблюдаемые движущимися наблюдателями без учета их движения в эфире. Это было принципиально новое понимание, которое можно было противопоставить приписыванию Лоренцем и Лармором соответствующих состояний фиктивной системе, находящейся в состоянии покоя. Теперь Пуанкаре мог непосредственно использовать преобразования Лоренца для вывода результатов наблюдений в движущейся системе отсчета, тогда как Лармор и Лоренц всегда должны были возвращаться к "реальному" полю в эфире.<sup>25</sup>

В частности, Пуанкаре трактовал местное время как время, получаемое в результате следующей процедуры синхронизации:

*Предполагаю, что наблюдатели, находящиеся в разных точках, настраивают свои часы с помощью оптических сигналов; что они пытаются скорректировать эти сигналы по времени передачи, но, игнорируя свое поступательное движение и полагая, что сигналы идут с одинаковой скоростью в обоих направлениях, довольствуются пересечением наблюдений, посылая один сигнал из А в В, а затем другой из В в А. Местное время  $t'$  - это время, показываемое часами, настроенными таким образом.*

По первому порядку эта процедура приводит к выражению Лоренца для местного времени. Доказательство, которое Пуанкаре оставил на усмотрение читателя, выглядит следующим образом.<sup>26</sup>

Получив сигнал от А, В устанавливает свои часы, например, на ноль и тут же посылает ответный сигнал А. Получив его, А отмечает время  $t$ , прошедшее с момента посылки своего сигнала, и устанавливает свои часы на время  $\tau/2$ . При этом он совершает ошибку  $\tau/2 - t$ , где  $t$  - время, за которое свет действительно проходит путь от В до А. Это время и время обратного пути определяются следующим образом

$$t = AB/(c + u), \quad t_+ = AB/(c - u), \quad (9.1)$$

где  $u$  - общая скорость двух наблюдателей относительно эфира.

Время  $\tau$  - это сумма этих двух времен движения. Таким образом, с точностью до первого порядка по  $u/c$  ошибка, допущенная при установке часов А, равна

$$\tau/2 - t = (t_+ - t)/2 = uAB/c^2 \quad (9.2)$$

Иными словами, в данный момент истинного времени время, показываемое двумя часами, отличается на  $uAB/c^2$ , что соответствует выражению Лоренца о местном времени.

Пуанкаре перенес эту процедуру синхронизации из своей предыдущей работы об измерении времени, опубликованной в 1898 году. Там он отметил, что датировка астрономических событий основана на неявном постулате, "что свет имеет постоянную скорость, и в частности, что его скорость одинакова во всех направлениях", и привел описанный выше метод синхронизации часов, правда, только для часов, находящихся в состоянии покоя. Обобщение на движущиеся часы вытекало из принципа относительности: движущиеся наблюдатели не могут обнаружить свое движение в эфире и поэтому могут поступать так, как если бы они находились в состоянии покоя. Поэтому движущиеся часы должны быть синхронизированы таким образом, чтобы скорость света, измеренная с помощью этих часов, по-прежнему была равна  $c$ .<sup>27</sup>

Эти рассуждения Пуанкаре, как и его диагноз серьезного кризиса электродинамики, зависели от весьма оригинального представления о принципах относительности и реакции. Физики, разделявшие его стремление дематериализовать эфир, например Друде и Кон, не

стеснялись нарушать общие принципы механики. Те же, кто придерживался разновидности механического редукционизма, например Больцман и (в меньшей степени) Лоренц, рассматривали эфир как часть механической системы и не ожидали, что механические принципы применимы только к материи. Пуанкаре был уникален тем, что сопрягал общие принципы механики и механически безотносительный эфир. На рубеже веков только он обнаружил кризис и предсказал серьезное изменение взглядов Лоренца. Другие теоретики не увидели в теории Лоренца ничего особо страшного, а некоторые из них, как мы сейчас увидим, представили новые перспективные разработки.

<sup>25</sup> Poincare 1900a: 274-277.

<sup>26</sup> Poincare 1900a: 272. Большинство историков упускают из виду этот аспект мемуаров Пуанкаре. Обычно они утверждают, что интерпретация Пуанкаре локального известия впервые появилась в работе Poincare 1904b, если только они не отдают Эйнштейну полное первенство в этом вопросе. Исключения составляют Scribner 1964; Cuvaj 1970a: 77-78; Stachel et al. в *ЕСР* 2: 308n. См. также Thirring 1927: 270n.

<sup>27</sup> Poincare 1900a: 272; Poincare 1898: 232 - 233.

### 9.3 Погружение в электрон

#### 9.3.1 Электромагнитное мировоззрение

Со времени старого исследования Дж. Дж. Томсоном электрической конвекции (1881 г.) было известно, что электрически заряженная частица обладает электромагнитной инерцией. В своих теориях электронов Лармор и Вихерт предположили, что вся инерция имеет электромагнитное происхождение и что механика может быть сведена к электромагнетизму. В своем вкладе в юбилей Лоренца Вин превратил эти рассуждения в программу: необходимо было построить электромагнитную модель электрона и проверить ее следствия. Как знал известно Вин из расчетов ученика Хевисайда Джорджа Серла, масса электрона, если он электромагнитный, должна зависеть от скорости, когда эта скорость приближается к скорости света. Казалось, более ранние эксперименты Ленарда с сильно ускоренными катодными лучами, демонстрировали этот эффект. Через несколько месяцев Геттингенский экспериментатор Вальтер Кауфман подтвердил его, изучая электрические и магнитные отклонения быстрых электронов от солей радия.<sup>28</sup>

Геттингенский коллега Кауфмана, Макс Абрахам, вскоре предложил изящную количественную теорию электромагнитного электрона. По его мнению, полностью электромагнитная картина предполагает, что электрон должен быть идеально жестким. Распределение заряда электрона поддерживается чисто кинематическим ограничением жесткости, так что энергия этой частицы может изменяться только за счет работы электромагнитных сил. Он предположил сферическое распределение заряда и вывел динамические свойства электрона в

квазистационарном приближении. В расчетах использовалась техника Лоренца о соответствующих состояниях и понятие электромагнитного импульса.<sup>29</sup>

Абрахам утверждал, что заимствовал последнее понятие у Пуанкаре. На самом деле Пуанкаре показал, что для механического импульса электронов и интеграла  $(1/c)\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  по всему пространству действует формальный закон сохранения, однако последний вклад был признан патологическим. Абрахам же отрицал существование первого вклада вообще, а всем моментам придавал электромагнитное происхождение. Поэтому он считал  $(1/c)\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  реальным электромагнитным импульсом. Однако разрыв Абрахама с механикой не был полным. Само понятие импульса было механическим. Более того, он перевел уравнения поля в лагранжеву форму и вывел лагранжиан для движения электрона.<sup>30</sup>

Теория Абрахама сразу же завоевала успех: она давала точное выражение программе Вина и открывала возможности для интересных математических разработок. Геттингенские физики, хорошо владеющие высшей математикой, в первую очередь Арнольд Зоммерфельд, Карл Шварцшильд и Пауль Герц, разрабатывали тонкости движения электромагнитного электрона и исследовали сверхсветовое движение. В 1905 году при содействии Вихерта геттингенские математики Давид Гильберт и Герман Минковский организовали научный семинар по теории электронов – весьма технической теме, дававшей работы, которые мало кто из физиков мог понять. Тем не менее, она имела значительный престиж, отчасти потому, что в 1903 г. Кауфман подтвердил формулы массы Абрахама, а также потому, что имела революционный характер как вызов старому механическому мировоззрению.<sup>31</sup>

<sup>28</sup> J. J. Thomson 1881a; Larmor 1895a, 1895b. Wiechert 1894; Wien 1900; Kaufmann 1901.

См. также McCormack 1970b; Miller 1981a; 45-54. О Кауфмане см. Cushing 1981; Hon 1995.

<sup>29</sup> Abraham 1902. См. также Goldberg 1970b; Miller 1981a: 55-61. и следующий раздел о Лоренце с дальнейшим описанием методов Абрахама.

### 9.3.2. Сокращающийся электрон Лоренца

Осторожный Лоренц лишь мягко поддержал электромагнитное мировоззрение. Он не был уверен, что все силы и все массы имеют электромагнитное происхождение. Как мы видели, он использовал свойства преобразования электромагнитных сил для обоснования сокращения Лоренца. Однако он лишь предполагал, что при глобальном преобразовании системы все силы должны вести себя так, как будто они имеют электромагнитное происхождение. Интерес Лоренца к модели и динамике электрона возник не из-за веры в электромагнитное мировоззрение, а из-за трех различных обстоятельств: он хотел ответить на критику Пуанкаре по поводу специального кумулятивного характера его предположений; ему нужно было объяснить различные новые



эксперименты по дрейфу эфира, особенно неудачи Рэлея и Брейса в обнаружении двойного преломления, подразумеваемого Лоренцевым сокращением прозрачных тел; ему нужно было принять во внимание эксперименты по отклонению быстрых электронов.<sup>32</sup>

В апреле 1904 г. усилия Лоренца привели к появлению важного голландского мемуара под названием *'Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity less than that of light.'* ("Электромагнитные явления в системе, движущейся со скоростью, меньшей скорости света").

Основными предположениями были:

- уравнения поля для неподвижного эфира и силы Лоренца;
- что при глобальном перемещении системы все силы изменяются так, как если бы они имели электромагнитное происхождение;
- что движущийся электрон сокращается в продольном направлении со скоростью  $\gamma^1 = (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ ;
- что вся масса имеет электромагнитное происхождение.

Из этих предположений Лоренц сделал вывод, что оптические явления не зависят от глобального, равномерного, поступательного движения системы любого порядка, и вывел новые выражения для масс (поперечной и продольной) электрона.<sup>33</sup>

Лоренц сначала написал уравнения поля относительно движущейся системы осей, то есть, в современной терминологии, выполнил галилеево преобразование. Затем он точно восстановил форму уравнений относительно эфира - за исключением исходных членов - с помощью преобразования

$$\begin{aligned} x' &= \gamma \varepsilon x, \quad y' = \varepsilon y, \quad z' = \varepsilon z, \quad t' = \varepsilon (\gamma^1 t - \gamma v x / c^2), \\ \mathbf{d}' &= \varepsilon^2(l, \gamma) [\mathbf{d} + (\mathbf{u}/c) \times \mathbf{h}], \quad \mathbf{h}' = \varepsilon^2(l, \gamma) [\mathbf{h} - (\mathbf{u}/c) \times \mathbf{d}], \end{aligned} \quad (9.3)$$

где символ  $(l, \gamma)$  означает умножение на 1 компоненты последующего вектора, параллельной  $\mathbf{u}$ , и умножение на  $\gamma$  компоненты, перпендикулярной  $\mathbf{u}$ . Это преобразование в сочетании с первым, галилеевым преобразованием, дает то, что Пуанкаре впоследствии назвал "преобразованием Лоренца" для координат и полей пространства-времени до глобального масштабного коэффициента  $\varepsilon$ . У Лоренца это преобразование было уже в 1899 году, но тогда не смог извлечь из него полной пользы.<sup>34</sup>

Преобразования для скорости, тока и заряда в мемуаре 1904 г. отличались от тех, которые мы сейчас считаем правильными. Тем не менее Лоренц смог показать, что дипольное излучение в движущейся системе трансформируется в дипольное излучение в покоящейся системе. Из предположения, что межмолекулярные силы ведут себя по отношению к движению как электромагнитные силы, следовало, что изображение этого тела при преобразовании (9.3) будет иметь размеры того же тела в состоянии покоя. Далее, изменение размеров электронов в

пропорциях ( $\varepsilon^{-1}\gamma^{-1}$ ,  $\varepsilon^{-1}$ ), предполагало, что образ электрона будет подобен электрону в состоянии покоя. Для доказательства инвариантности оптических явлений с помощью техники соответствующих состояний, Лоренцу требовался еще один результат: чтобы преобразованное уравнение движения электрона совпадало с уравнением в системе эфира. Рассуждения включали в себя метод Абрахама, перенесенный на сокращающийся электрон следующим образом.<sup>35</sup>

Электромагнитный импульс электрона, движущегося с постоянной скоростью  $\mathbf{u}$ , по определению равен,

$$\mathbf{p} = 1/c \int \mathbf{d} \times \mathbf{h} d\tau, \quad (9.4)$$

где  $\mathbf{d}$  и  $\mathbf{h}$  представляют собой электромагнитное поле электрона.

Через преобразование (9.3) это выражение становится следующим

$$\mathbf{p} = 1/c^2 \varepsilon \gamma \int \mathbf{d}'_{\perp}{}^2 d\tau' \quad (9.5)$$

где  $\mathbf{d}'_{\perp}$  - перпендикулярная составляющая электрического поля преобразованного электрона ( $\mathbf{h}'$  равно нулю), находящегося в состоянии покоя. Если заряд равномерно распределен по сфере радиуса  $R$ , то получается

$$\mathbf{p} = m_0 \gamma \varepsilon \mathbf{u}, \text{ где } m_0 = e^2/6\pi R c^2 \quad (9.6)$$

Как и Абрахам, Лоренц распространил это выражение на умеренно ускоренные электроны (квазистационарное приближение). Тогда ускоряющая сила может быть выражена через компоненты ускорения  $\mathbf{a}$  в соответствии с выражением

$$\mathbf{f} = d\mathbf{p}/dt = m_{\parallel} \mathbf{a}_{\parallel} + m_{\perp} \mathbf{a}_{\perp}, \quad (9.7)$$

при этом

$$m_{\parallel} = m_0 d\gamma \varepsilon u / du, \quad m_{\perp} = m_0 \gamma \varepsilon. \quad (9.8)$$

Этот соблазнительно простой результат опроверг сложные логарифмические выражения Абрахама для двух масс. Лоренц убедился, что данные Кауфмана, полученные в 1903 г., недостаточно точны, чтобы сделать выбор между двумя моделями. Однако его главной целью было показать инвариантность уравнения движения (9.7) в следующем виде.<sup>36</sup>

С одной стороны, двойное дифференцирование преобразования координат (9.3) дает

$$a'_{\parallel} = \varepsilon^{-1} \gamma^3 a_{\parallel}, \quad a'_{\perp} = \varepsilon^{-1} \gamma^2 a_{\perp} \quad (9.9)$$

С другой стороны, Лоренц предполагает, что сила  $\mathbf{f}$  преобразуется подобно электромагнитной силе  $e[\mathbf{d} + (\mathbf{u} + \mathbf{v}) \times \mathbf{h}/c]$ . Пренебрегая относительной скоростью  $\mathbf{v}$ , это дает

$$\mathbf{f}'_{\parallel} = \varepsilon^{-2} \mathbf{f}_{\parallel}, \quad \mathbf{f}'_{\perp} = \gamma \varepsilon^{-2} \mathbf{f}_{\perp} \quad (9.10)$$

Следовательно, уравнение движения (9.7) превращается в уравнение  $\mathbf{f} = m_0 \mathbf{a}'$  для медленно движущихся электронов тогда и только тогда, когда

$$d\varepsilon \gamma / du = \varepsilon \gamma^3 \quad (9.11)$$

что эквивалентно  $\varepsilon = 1 = \text{constant}$ , т. к. для  $u = 0$  длины не изменяются.<sup>37</sup>

Комплексный мемуар Лоренца удовлетворял требованию Пуанкаре о необходимости общего объяснения инвариантности оптических явлений любого порядка. Однако в нем неявно признавались неэлектромагнитные силы для когерентности деформируемого электрона, на что обратил внимание Абрахам. Это признание не только противоречило электромагнитному мировоззрению, но было неясно, можно ли ввести такие силы последовательным образом. Кроме того, выводы Лоренца требовали определенных приближений, например, дипольного приближения, приближения малых относительных скоростей оптических электронов, пренебрежения их вращательным движением. Они требовали долгих и не прямых рассуждений, поскольку Лоренц, в отличие от Пуанкаре, все еще рассматривал свои "соответствующие состояния" как принадлежащие фиктивной системе, находящейся в состоянии покоя. Возникающие сложности не беспокоили Лоренца, по-прежнему считавшего, что движение относительно эфира в принципе может быть обнаружено.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Abraham 1902. См. также Miller 1981a: 55-61.

<sup>31</sup> см. Pyenson 1979.

<sup>32</sup> Lorentz 1895. 1901. 1904a: Rayleigh 1902; Brace 1904. См. также Hirose 1969; McCormack 1970b; Miller 1981a: 67-70. Другими важными экспериментами были эксперимент Траутона и Нобла, касающийся пары, создаваемой эфирным ветром на заряженном конденсаторе (см. Warwick 1995 о множестве контекстов этого эксперимента и причастности Фитцджеральда и Лармора, и Janssen 1995: гл. 1 за подробное обсуждение интерпретаций Лоренца и Лармора) и воображаемой версией Ленарда эксперимента Майкельсона-Морли в диэлектрике с высоким индексом (обсуждается в Lorentz 1899).

<sup>33</sup> Лоренц 1904a. См. также Миллер 1981a: 70-75; Нерсисян 1986; Пати 1993; 45-48, Darrigol 1994a: 292-298.

<sup>34</sup> Lorentz 1904a, 1899. Larmor 1897c уже имел точное выражение преобразования Лоренца для координат и полей, но еще не осознал, что это преобразование оставляет уравнения Максвелла (без источников) инвариантными в любом порядке.

<sup>35</sup> Lorentz 1904a: 177-189.

<sup>36</sup> Lorentz 1904a: 191-194

<sup>37</sup> Lorentz 1904a: 188-189.

<sup>38</sup> см. Miller 1981a: 75-79

### 9.3.3. Динамика электрона Пуанкаре

Пуанкаре с энтузиазмом откликнулся на мемуары Лоренца. Он увидел, что с небольшими улучшениями он может получить желаемую точную инвариантность и полную совместимость с тем, что он теперь называл "постулатом относительности". Его "*Dynamique de l'électron* (Динамика электрона) появилась в кратком виде в *Comptes rendus* за июнь 1905 г., а в более полном виде - в мемуарах, опубликованных в Палермо в 1906 году. Сначала он дал "преобразования Лоренца" координат, поля, скорости, заряда и тока в их точной и современной форме, как образующие группу

инвариантности уравнений Максвелла-Лоренца. Используя структуру группы, которую скрывала двухшаговая процедура Лоренца, он устранил возможность глобального перемасштабирования гораздо более простым способом, чем Лоренц. Он также дал квадратичный инвариант группы и ввел мнимую временную координату, для которой преобразования формально становятся четырехмерными вращениями.<sup>39</sup>

В соответствии с мысленным экспериментом, который он обсуждал в "*Lorentzfestschrift*", Пуанкаре обнаружил, что сила Лоренца не является инвариантной. Однако он уже не считал, что это является нарушением принципа относительности. Если все силы, включая инерционные, преобразуются подобно электромагнитным, рассуждал Пуанкаре, то условия динамического равновесия инвариантны, поскольку условие, что суммарная сила. (внешняя плюс инерционная) должна быть равна нулю. И наоборот, для соблюдения принципа относительности все силы должны преобразовываться подобно электромагнитным силам, т.е. в соответствии с представлением группы Лоренца. Пуанкаре потребовал, чтобы когезионное давление электрона было лоренц-инвариантным, и таким образом получил последовательную, ковариантную динамику сокращающегося электрона. Он также предпринял попытку ковариантного обобщения теории тяготения Ньютона, в которой гравитационная сила распространяется со скоростью света.

Очевидно, что Пуанкаре отождествлял формальное условие лоренцевой инвариантности с принципом относительности. Единственным его замечанием по этому поводу было следующее:

*"Причина, по которой мы можем, не изменяя никакого видимого явления, придать всей системе общий перевод, заключается в том, что уравнения электромагнитной среды не изменяются при определенных преобразованиях, которые я буду называть преобразованиями Лоренца; две системы, одна в покое, другая в переводе, становятся, таким образом, точными изображениями друг друга".*

Пуанкаре имел в виду, что преобразованные по Лоренцу величины описывают кажущиеся явления. В частности, преобразованные координаты дают видимые движущимся наблюдателям пространственно-временные соотношения. Эта точка зрения была выражена в его вкладе в *Lorentzfestschrift* 1900 года, повторена в лекции в Сен-Луи в 1904 году и получила дальнейшее развитие в лекциях 1904 г. и получило дальнейшее развитие в его лекциях в Сорбонне в 1906/7 гг.<sup>40</sup>

<sup>39</sup> Poincare 1905, 1906. См. также Scribner 1964; Holton 1964; Goldberg 1967, 1970a; Cuvaj 1968, 1970a, 1970b; Miller 1973, 1981a: 79-86; Schaffner 1976; Keswani and Kilmister 1983; Paty 1987, 1993: 49-52.<sup>40</sup> Пуанкаре 1906: 495; 1900A; 1904; [1906-1907]: гл. 11 (*«Dynamique de l'électron»*).

#### 9.3.4. Относительность против электромагнетизма.

Теперь можно сравнить основные теории электрона. Жесткий

электрон Абрахама был наиболее совершенным воплощением электромагнитного мировоззрения, но он предполагал наблюдаемые эффекты движения Земли относительно эфира, например двойное лучепреломление, которое тщетно искали Рэлей и Брейс. Поэтому Лоренц предпочел использовать сократимый электрон, с помощью которого можно было получить инвариантность всех явлений в пределах экспериментальной досягаемости. Его доказательство заключалось в обобщении старой методики соответствующих состояний и некоторых приближениях. Пуанкаре усовершенствовал рассуждения Лоренца, сделав их полностью совместимыми с "постулатом относительности". Он ввел современную форму преобразования Лоренца, а также идею о том, что все теории должны быть лоренц-инвариантными, чтобы удовлетворять постулату относительности. Он интерпретировал преобразование Лоренца как обеспечение кажущегося пространства и времени для наблюдателей, принадлежащих к движущейся системе отсчета. Эфир, по его мнению, по-прежнему является эталоном для определения истинного пространства и времени. Однако, чтобы соответствовать постулату относительности, различие между абсолютным и кажущимся могло быть только условным, не связанным с какими-либо обнаруживаемыми эффектами.

Несмотря на усилия Лоренца и Пуанкаре, теория электронов по-прежнему страдала от противоречий между электромагнитным мировоззрением и принципом относительности. Абрахам не был убежден, что эксперименты Рэлей-Брейса противоречат его полностью электромагнитному электрону. Противоречие возникало только в том случае, если ответственность за оптическую дисперсию возлагалась на простые внутриатомные осцилляторы, что не позволяло объяснить наблюдаемые закономерности атомных спектров. Лоренц и сам не был уверен в превосходстве своего сокращающегося электрона. По его собственным словам, сокращение не было "ни правдоподобным, ни неприемлемым". Он временно отказался от этой идеи, когда в 1905 г. Кауфман опубликовал новые, противоречащие ей данные.<sup>41</sup>

Пуанкаре верил в принцип относительности и с подозрением относился к результатам Кауфмана. Однако, помимо значительного упрощения схемы Лоренца, он жаждал фундаментального обоснования своего предположения о том, что все силы будут вести себя в отношении движения как электромагнитные силы:

*"Мы не можем довольствоваться простым сопоставлением формул, которые согласуются только по счастливому совпадению; формулы должны, так сказать, проникать друг в друга. Наш разум будет удовлетворен только тогда, когда мы будем считать, что понимаем причину этого согласия, так что мы можем вообразить, что мы его предсказали".<sup>42</sup>*

Зачинатель электромагнитного мировоззрения Вильгельм Вин подчеркивал прогресс, достигнутый теорией электронов, но соглашался с тем, что она все еще находится в предварительной форме:

*Невозможно переоценить знания, полученные с помощью теории электронов. Не то чтобы мы рассматривали ее как замкнутую конструкцию, охватывающую [...] все физические явления. Многочисленные, существенные трудности, с которыми мы столкнулись, скорее свидетельствуют о том, что эта теория должна быть заменена более общей. Однако эта теория показала, что все физические понятия, в том числе и те, которые мы привыкли считать неизменными, например, понятие массы, при ближайшем рассмотрении могут оказаться изменчивыми, что вообще мы должны по мере роста наших знаний все дальше и дальше отходить от чувственных представлений и принятых физических понятий, что абстракция должна быть все более общей.*

Свою речь Вин завершил знакомыми стихами Гете:

*Все преходяще —  
Это только притча.*<sup>43</sup>

<sup>41</sup> Abraham 1905: 389; Lorentz 1904a: 197; Kaufmann 1905, 1906; Лоренц к Пуанкаре (реакция на Кауфмана), 8 марта 1906 года, в Miller 1980: 83-84.

<sup>42</sup> Poincare 1906: 572 (о Кауфмане); 497 (цитата).

<sup>43</sup> Wien 1905: 24.

## 9.4 Альтернативные теории

### 9.4.1. Теория Кона

Электродинамические теории первых лет века, как правило, исходили из теории Лоренца и модифицировали ее в соответствии с электромагнитным мировоззрением или необнаружимостью движения Земли. Однако были и два интересных исключения. Наиболее важным из них была электродинамика движущихся тел, разработанная Коном, начатая в 1900 году и усовершенствованная в 1904 году. Во имя экономии мысли Маха Кон избегал микрофизических спекуляций и излагал теорию Максвелла на основе феноменологически определенных понятий. Такая позиция позволила исключить эфир, особенно понятие скорости эфира, из оптики и электродинамики. Она также имела Максвелловский подтекст: взгляд на электропроводность как на распад силовых линий и стратегия модификации макроскопических уравнений поля для решения экспериментальных задач.<sup>44</sup>

Тогда электродинамику движущихся тел Герца можно было совместить с экспериментом Физо, заменив уравнения Герца макроскопическими уравнениями поля Лоренца. Если Лоренц вывел эти уравнения, усреднив свои микрофизические уравнения по макроскопическим элементам объема, то Кон рассматривал их как феноменологические уравнения, форма которых диктовалась звездной aberrацией и результатом Физо. На втором этапе Кон столкнулся с несовместимостью макроскопических уравнений Лоренца с экспериментом Майкельсона-

Морли 1887 года. И отверг лоренцево сокращение, т.к. оно опиралось на молекулярный механизм. Вместо этого он предложил модификацию второго порядка макроскопических уравнений поля Лоренца, которая позволила учесть эксперимент Майкельсона-Морли, не нарушая согласия с результатом Физо и другими экспериментами первого порядка.<sup>45</sup>

Для неподвижных звезд циркулярные уравнения Кона имеют вид (в единицах Герца):

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= - (1/c) D/Dt [\mu \mathbf{H} + (1/c) \mathbf{v} \times \mathbf{E}], \\ \nabla \times \mathbf{H} &= (1/c) D/Dt [\epsilon \mathbf{E} - (1/c) \mathbf{v} \times \mathbf{H}] + \mathbf{j}/c\end{aligned}\quad (9.12)$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  - силы, действующие на единичный электрический или магнитный полюс, связанный с движущимся веществом,

$D/Dt$  - конвективная производная для потоков,  $\mathbf{v}$  - скорость движения вещества (или нуль в идеальном вакууме).

Эти уравнения отличаются от уравнений Герца поправкой первого порядка на потоки  $\epsilon \mathbf{E}$  и  $\mu \mathbf{H}$ . От уравнений Лоренца они отличаются поправкой второго порядка  $c^2 \mathbf{v} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{E})$  к электрическому смещению. На Земле скорость  $\mathbf{v}$  вещества мало отличается от скорости  $\mathbf{u}$  Земли. Тогда преобразования  $x - ut$  и  $t' = t - ux/c^2$  возвращают уравнения к тому виду, который они имели бы, если бы Земля не двигалась; и это справедливо при любом порядке по  $u/c$  (см. Приложение 12). Это "соответствие" объясняет, почему теория Кона объясняет результат Майкельсона-Морли без сокращения длин.<sup>46</sup>

Элегантная теория Кона согласовывалась с энергетическим принципом и объясняла все современные эксперименты по электродинамике и оптике движущихся тел. Однако она предполагала нарушение принципа реакции и не исключала полностью эффекты движения Земли: она просто делала их недоступными для наблюдения. Это беспокоило Кона не больше, чем обычного теоретика электрона. Кон отвергал редукционистские взгляды и поэтому не ожидал применения механических принципов к электродинамике. По его мнению, абсолютная скорость может быть определена в электродинамике даже в отсутствие эфира, поскольку неподвижные звезды представляют собой естественную систему отсчета.

В 1904 г. Кон ознакомился с голландским мемуаром Лоренца по теории электронов. Он обнаружил, что макроскопические уравнения на Земле в обеих теориях одинаковы, вплоть до растяжения –сжатия пространственно-временных координат и полей (см. Приложение 12). Другими словами, в теории Лоренца можно найти систему уравнений Кона, но в другой интерпретации. В интерпретации Кона пространственно-временные координаты, входящие в уравнения, являются истинными, в терминах которых должна описываться эволюция системы. В интерпретации Лоренца координаты Кона отличаются от

истинных координат расширением  $x' = \gamma x$  и сжатием  $t' = \gamma^{-1} t$  и относятся к эволюции фиктивной системы, полученной путем представления исходной системы, приведенной к абсолютному покою. Это так, поскольку Лоренц предполагал продольное сокращение длин и (неявно) замедление процессов в движущейся системе. Кон отметил далее, что последние эффекты означают, что в теории Лоренца пространство и время, измеряемые с помощью часов и стержней, привязанных к Земле, задаются координатами Кона и, следовательно, отличаются от истинного пространства и времени Лоренца. Он прокомментировал это следующим образом:<sup>47</sup>

*Концепция Лоренца требует различать измеренные длину и время и истинные длину и время. Однако она не дает экспериментальных средств для решения этой проблемы даже при использовании идеальных измерительных приборах.*

Далее Кон рассмотрел операционное значение местного времени, которое в пространственно-временных координатах Кона равно  $t - ix/c^2$ , а в пространственно-временных координатах Лоренца  $\gamma^{-1} t - \gamma ix/c^2$ . В терминах местного времени распространение света на Земле становится изотропным. Кон продолжил:

*"В оптике мы определяем одинаковые моменты времени, предполагая сферическое распространение в любой изотропной среде, находящейся в покое [относительно Земли]".*

Поэтому местное время - это время, определяемое оптически синхронизированными часами, как заметил еще Пуанкаре. Кон использовал это замечание для облегчения доказательства того, что оптические явления на Земле не зависят от движения Земли. При этом он не имел в виду, что время  $t$ , входящее в его уравнения, не имеет физического значения. Согласно его концепции, законы механики могут быть строго действительны для общего времени  $t$ , так что это время будет тем, которое дает механическая синхронизация.<sup>48</sup>

Несколькими месяцами ранее Вин предложил следующий эксперимент для обнаружения движения Земли относительно эфира. Два зубчатых колеса вращаются с одинаковой скоростью с одинаковой фазой вокруг одной оси, параллельной скорости вращения Земли. Между зубьями двух колес посылается свет с одинаковой начальной интенсивностью в параллельном и антипараллельном направлениях, и сравниваются конечные интенсивности лучей (рис. 9.1).

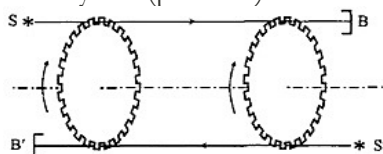


Рис. 9.1. Прибор Вина для обнаружения движения Земли в эфире.

S и S' - два источника света одинаковой интенсивности,  
B и B' - два болометра.



В неподвижном эфире, полагал Вин, время прохождения света между двумя колесами зависит от направления распространения, поэтому конечные интенсивности двух лучей должны быть различными. Исходя из анализа местного времени, Кон заметил, что результат опыта зависит от процедуры синхронизации вращения двух колес. Оптическая синхронизация должна была дать отрицательный результат, поскольку предполагала изотропное распространение. Напротив, механическая процедура, по мнению Кона, могла дать положительный результат. Для сторонника электромагнитного мировоззрения или для верующего в принцип относительности вторая процедура может быть согласна только с первой, а эксперимент может дать только отрицательный результат. Как ни странно, Вин, инициатор электромагнитного мировоззрения, упустил этот момент из виду.<sup>49</sup>

Континентальные специалисты, среди которых были Лоренц, Вин, Планк, Абрахам, восприняли теорию Кона всерьез, хотя и заметили некоторые трудности. Наиболее серьезную критику высказал Лоренц: теория Кона предполагала неправдоподобный разрыв между свойствами очень разбавленного вещества и вакуума. Например, эксперимент Майкельсона-Морли должен был дать отрицательный результат в воздухе, каким бы низким ни было давление, и положительный результат в идеальном вакууме. Кон ответил, что его теория феноменологична и поэтому не применима к случаю экстремальных разбавлений, для которых важна атомная структура вещества. В 1905 году Ричард Ганс, следуя предложению Планка, попытался применить уравнения Кона в электронном масштабе. На тот момент лидеры отрасли еще уважали теорию Кона. Лоренц и Абрахам подробно изложили ее в своих современных обзорах электродинамики движущихся тел.<sup>50</sup>

<sup>44</sup> Cohn 1900b, 1902. 1904. См. также Hirose 1966: 31-37; Miller 1981a: 181-182; Darrigol 1995b

<sup>45</sup> Cohn 1900b. 1902.

<sup>46</sup> Cohn 1902. 1904.

<sup>47</sup> Cohn 1904: 1299-1300.

<sup>48</sup> Cohn 1904: 1408

<sup>49</sup> Wien 1904a; Cohn 1904: 1408-1409.

<sup>50</sup> Lorentz 1904b: 274-275; Cohn 1904: 1302; Abraham 1905: 389-391.

#### **9.4.2. Теория Бухерера**

Еще один вызов основной теории электронов был брошен Альфредом Бухерером из Бонна. В 1902 г. этот физик воскресил старую идею Физо для обнаружения движения Земли через эфир. Интенсивность света, излучаемого земным источником, сравнивалась для двух поглотителей, расположенных на одинаковом расстоянии от источника, но в противоположных направлениях. Интуитивно понятно, что интенсивность должна быть меньше, если поглотитель расположен в

направлении движения Земли. Однако после обмена несколькими письмами Бухерер и Лоренц убедились, что теория Лоренца вообще не дает никакого эффекта. Пауль Нордмайер, проводивший эксперимент под руководством Бухерера, подтвердил отсутствие эффекта.<sup>51</sup>

Бухерер интерпретировал этот результат как еще один намек на то, что *"электрические и магнитные явления, а также явления излучения могут быть подвержены влиянию только при движении вещества относительно вещества"*.

Он продолжил:

*Тот, кто последовательно придерживается этой точки зрения, должен отказаться от эфирной картины временного распространения электромагнитных возмущений. Но насколько значим этот отказ против того, что гипотеза покоящегося эфира противоречит как эксперименту Майкельсона-Морли, так и важному принципу механики - сохранению центра масс? С принципом: существуют только действия вещества на вещество, мы вернем веществу свойства, искусственно приданные эфиру, и тем самым перейдем от дуалистической к монистической концепции природы.*

Эфир был лишь "строительными лесами", которые помогли при построении электромагнитной теории и объединении физики. Пришло время *"обрушить строительные леса и показать величие и красоту монумента"*.<sup>52</sup>

Бухерер предложил формально сохранить уравнения Лоренца, но переосмыслить скорости, входящие в решения, как относительные скорости от вещества к веществу. Эта же идея в другой форме содержится в его хорошо принятой брошюре по теории электронов 1904 года: уравнения Лоренца должны быть справедливы для любой системы, находящейся в равномерном поступательном движении. Бухерер утверждал, что таким образом он может воспроизвести все известные законы оптики и электродинамики движущихся тел без "сложных и очень искусственных предположений Лоренца об изменении размеров тел". Однако он не объяснил, как можно использовать одни и те же уравнения Лоренца в каждой инерциальной системе и при этом сохранять обычные галилеевы преобразования координат пространства-времени.<sup>53</sup>

К этому времени Бухерер знал о голландском мемуаре Лоренца 1904 г. и также пытался, более консервативно, усовершенствовать модель сокращающегося электрона. Он считал сокращение Лоренца очень неправдоподобным, поскольку оно требовало искусственных сил сцепления и предполагало бесконечную электрическую плотность для скоростей, близких к световой. В качестве замены он предложил электрон постоянного объема. Равновесная форма движущегося электрона по-прежнему была эллипсоидной, а соотношение между главной и малой осями было таким же, как и для электрона Лоренца. Бухерер полагал, что таким образом он может получить все предсказания Лоренца для оптики движущихся тел, хотя его выражения для масс электрона были другими.<sup>54</sup>

В то время, в середине 1904 года, данные Кауфмана были одинаково совместимы с предсказаниями Абрахама, Лоренца и Бухерера. Однако новые данные 1905 г. были совместимы только с электронами Абрахама и Бухерера. Поскольку теория Абрахама противоречила результатам Рэлея-Брейса, Бухерер считал, что его модель - единственная, выдержавшая конкуренцию. Однако вскоре ему стало ясно, что электрон постоянного объема также противоречит результату Рэлея-Брейса: только выражения Лоренца для электромагнитных масс колеблющихся ионов обеспечивают необходимую компенсацию сокращения диспергирующего тела. В марте 1906 г. на научном конгрессе Бухерер заявил, что вся прежняя динамика электрона, включая эйнштейновскую, потерпела неудачу; вернувшись к своим идеям 1903 г., он изложил новую теорию, основанную на принципе, что "существуют только действия вещества на вещество".<sup>55</sup>

Бухерер придерживался обычной кинематики и исходил из следующего предположения:

*"Всякий раз, когда мы говорим о динамическом взаимодействии систем, мы оговариваем, что система, на которую воздействуют [...], испытывает ту же силу, что и в максвелловской теории при предположении, что она находится в покое в эфире, а другая система движется относительно нее".*

Полученная теория похожа на теорию излучения, в которой роли излучателя и приемника перевернуты. Для двух электрических или магнитных полюсов, находящихся в равномерном относительном движении - единственный случай, который исследовал Бухерер, - возникающее взаимодействие автоматически удовлетворяет принципу относительности и принципу реакции, в то время как теория Лоренца нарушает последний принцип. Как и Пуанкаре в 1900 г., Бухерер почувствовал тесную связь между этими двумя принципами, но только в случае равномерного относительного движения. Рассмотрим электрон А, удаляющийся от другого электрона В с постоянной скоростью  $v$ . Согласно принципу относительности, силы, действующие между двумя электронами, должны быть одинаковыми в симметричной ситуации, когда электрон А находится в покое, а электрон В движется со скоростью  $-v$ . Поэтому действие должно быть равно и противоположно реакции.<sup>56</sup>

Хотя Бухерер использовал уравнения Максвелла-Лоренца, он сделал это таким образом, что исключил эфир. В его теории поля зависят от рассчитываемой силы. Например, при относительном движении электрона и магнита, он использовал электрическое поле для расчета силы, действующей на электрон, и магнитное поле для расчета силы, действующей на магнит.<sup>57</sup>

В качестве замены эфира Бухерер предложил понятие физических "связей" между электронами и даже представил замкнутые связи, начинающиеся и заканчивающиеся на одном и том же электроне, чтобы

объяснить излучение и самовзаимодействие. Чтобы допустить замкнутые связи, пространство должно было быть римановым, что в то время было модным предположением. За исключением этой весьма туманной картины, Бухерер рассматривал свою теорию как

*"феноменологический метод расчета электромагнитных эффектов, который должен согласовываться со всеми фактами наблюдения, оставляя на долю дальнейших усилий найти физическую интерпретацию этого метода".<sup>58</sup>*

Бухереру не повезло с его неуклюже сформулированной теорией. Главный редактор журнала *"Annalen der Physik"* Макс Планк совершенно не понял представленную Бухерером рукопись. Уже поглощенный эйнштейновской теорией относительности, Планк обвинил Бухерера в использовании уравнений Максвелла в разных системах отсчета, не меняя кинематики. На самом деле обвинение было необоснованным, поскольку, как мы только что видели, поля Бухерера были лишь вычислительными средствами, а не физическими сущностями, как в теории Эйнштейна. После отклонения *Annalen* Бухереру удалось опубликовать свою работу в более терпимом *Physikalische Zeitschrift* и улучшенный вариант в *Philosophical Magazine*. Английский глашатай эйнштейновской относительности Эбенезар Каннингем повторил путаницу Планка и вызвал публичную полемику. Смертельный удар нанес Вальтер Ритц, показавший в 1908 году в своем мемуаре по теории излучения, что теория Бухерера противоречит стандартной электродинамике замкнутых токов. Однако Бухерер черпал не только горечь из своих одиночных рассуждений. В 1908 году его экспериментальные попытки проверить их последствия привели к очевидному подтверждению теории Лоренца-Эйнштейна, за что он стал знаменитостью.<sup>59</sup>

Подводя итог, можно сказать, что теория Лоренца не осталась неоспоренной в начале нашего века. Высокоуважаемый электродинамик Эмиль Кон избегал эфира, атомов, электронов и сокращения Лоренца. По его мнению, лоренцево сокращение длин и неявное замедление времени были не только искусственными, но и приводили к различию между истинными и измеренными координатами пространства и времени, которое не имело эмпирического аналога. В качестве замены Кон предложил уравнения макроскопического поля, учитывавшие оптику и электродинамику движущихся тел, но при этом допускали практически ненаблюдаемые нарушения принципа относительности. Бухерер не разделял неприязни Кона к атомистическому подходу. Он согласился с тем, что эфир следует исключить, но по другим причинам: Кон ссылался на экономию мышления, Бухерер - на принцип относительности и на свою убежденность в том, что старая немецкая концепция электричества во многих отношениях вернее максвелловского или лоренцевского подходов. В теории Бухерера, как и в более поздней теории излучения Ритца, поля были лишь вычислительными средствами, а ЭМ

взаимодействия удовлетворяли принципу относительности, несмотря на отсутствие галилеевой инвариантности уравнений поля.

Теперь рассмотрим третьего физика, отказавшегося от эфира.

<sup>51</sup> Bucherer 1903; Бухерер Лоренцу (15. 02, 6. 08 и 8. 12 1902 года), ANQP; Nordmeyer, 1903 г. У Бухерера была английская мать, он получил частичное образование в США и был другом G. F. C. Searle: см. Goldberg: 1970c.

<sup>52</sup> Bucherer 1903: 282; 1904: 131

<sup>53</sup> Bucherer 1903: 282-283; 1904: 13

<sup>54</sup> Bucherer 1904: 57-59.

<sup>55</sup> Bucherer 1905; Обсуждение Планка 1906: 760.

<sup>56</sup> Bucherer 1906, 1907: 414.

<sup>57</sup> Возможно, аргумент напоминал тот, который был найден в начале Einstein 1905b.

<sup>58</sup> Bucherer 1906. 1908a: 316. См. также Miller 1981a: 267.

<sup>59</sup> Planck to Wien, 29 ноября 1906 года, ANQP, обсуждается в Ryenson 1985: 201; Cunningham 1907, 1908; Bucherer 1908a; Ritz 1908: 204; Bucherer 1908b. О последнем эксперименте, см. также Миллер 1981a: 345-349. Позже результат был поставлен под сомнение, и прошло почти 10 лет, до окончательной проверки формулы массы Лоренца-Эйнштейна: см. Stachel *et al.*, ECP 2: 272.

## **9.5 Эйнштейн об электродинамике**

### **9.5.1 Тайна электрического тока**

Электричество было диковинкой для многих детей, родившихся в конце XIX века. Оно было удивительным и для юного Альберта Эйнштейна, семья которого владела небольшой электротехнической компанией. Открытие Герцем электромагнитных волн и подтверждение Максвеллом теории поля произвели на него такое сильное впечатление, что в 1895 году - ему тогда было 16 лет - он написал небольшое эссе о состоянии эфира в магнитном поле. Это состояние он представлял себе как упругую деформацию, которая должна влиять на распространение света. Экспериментальное исследование этого эффекта позволило бы получить информацию о структуре эфира и, косвенно, пролить свет на "загадочную природу электрического тока". Эйнштейн также пришел к выводу, что сохранение упругой энергии в эфире предполагает "пассивное сопротивление" колебаниям электрического тока.<sup>60</sup>

В то время знания Эйнштейна по электродинамике были фрагментарными и дилетантскими: предсказанное им "пассивное сопротивление" уже было хорошо известно как самоиндукция, а против статической интерпретации магнитного поля имелось множество аргументов. Однако его эссе отражает две характерные черты немецкой электродинамики середины 1890-х годов: веру в существование электромагнитного эфира и отсутствие физической картины электрического тока.<sup>61</sup>

В 1896 г. Эйнштейн поступил в Цюрихский политехникум. Там он изучал стандартную континентальную электродинамику у Генриха Вебера. Весной 1898 года он изучал теорию Максвелла по книге Друде

Если бы к тому времени он все еще придерживался механистической концепции эфира, то эта книга стала бы хорошим лекарством. Еще до прочтения Маха Эйнштейн мог почерпнуть у Друде принцип экономии мышления и критического отношения к механицизму. Феноменология Друде исключала представление об эфирных процессах и предлагала переосмыслить эфир как пространство, наделенное особыми физическими свойствами. В его книге отсутствовала электродинамика движущихся тел Герца и не использовалось понятие скорости эфира. Его трактовка индукции в движущихся проводниках основывалась на эмпирическом правиле Фарадея о пересекающихся силовых линиях и не требовала никакой скорости, кроме скорости движущегося вещества. В вопросе о природе электрического тока Друде разделял агностическую позицию Герца.

Летом 1899 г. Эйнштейн ознакомился с книгой Герца "*Untersuchungen*", ("*Исследования*"), содержащей его экспериментальные работы по электрическим колебаниям, теоретические работы по теории Максвелла и историческое введение со сравнением различных представлений об электричестве. После этого он написал Милеве Марич:<sup>63</sup>

*Я все больше убеждаюсь в том, что электродинамика движущихся тел в том виде, в котором она представлена сегодня, не соответствует истине и что ее можно было бы представить более простым способом. Введение названия "эфир" в электрические теории привело к представлению о движении среды, о которой можно говорить, не имея, физического смысла в этом утверждении. Я считаю, что электрические силы могут быть определены только для пустого пространства, что подчеркивал и Герц. Далее, электрические токи придется рассматривать не как "исчезновение электрической поляризации во времени", а как движение истинных электрических масс, физическая реальность которых, по-видимому, вытекает из электрохимических эквивалентов [...]. При этом электродинамика станет наукой о движениях в пустом пространстве движущихся электричеств и магнетизмов.*

Первое предложение этой очень плотной цитаты отражает мнение самого Герца по этому вопросу. Герц упомянул, что его электродинамика движущихся тел противоречит некоторым результатам оптики движущихся тел (хотя он не сказал, каким именно), а также требованию здравого смысла, согласно которому на эфир в вакууме не должна действовать никакая сила. Далее Эйнштейн пишет об "имени "ЭФИР" ("*den Namen "Aether"*") , вероятно, имея в виду высказывание Герца о том, что электрический заряд и ток - это только "имена", облегчающие общение между физиками, но ничего не добавляющие к фундаменту теории. Однако Герц не считал эфир именем. Эфир, представление об электрических и магнитных силах, отражающих состояние эфира, и дифференциальные уравнения, управляющие этими силами, были



основными понятиями его теории. По-видимому, Эйнштейн намеревался избавить эфир от его самого грубо материалистического атрибута - скорости. До него аналогичную сдержанность в отношении движения эфира выражал Хевисайд; Друде и немецкий поклонник Хевисайда Фоппль просто избегали подозрительной концепции.

Отрицание движения эфира наносит первый удар по максвелловскому представлению о единой среде, которая должна двигаться везде, где есть движущаяся материя. Далее Эйнштейн приводит второй, операционалистический аргумент против максвелловской точки зрения: прямое, операциональное определение электрической силы **Е** возможно только в вакууме. Это намек на процедуру Герца, основанную на измерении механической силы, действующей на пробный заряд. В веществе Герц следовал старому рецепту Уильяма Томсона, который предусматривал вырезание цилиндрической полости перед введением пробного заряда. Следовательно, то, что непосредственно измеряется, всегда является силой в вакууме. Только теория может сказать, что вырезание не возмущает значения **Е**. Герц не видел здесь никаких трудностей. Однако он подозревал, что электродинамика будущего разделит эфир и вещество: *"Правильной теорией может [...] быть теория, которая в каждой точке отличает состояния эфира от состояний вещества"*.<sup>64</sup>

Письмо Эйнштейна продолжается отказом от максвелловской концепции электрического тока как распада электрической поляризации. Перед изучением Герца, Эйнштейн читал третий том научных трудов Гельмгольца, в который вошли лекции Фарадея 1881 года и теория электромагнитного рассеяния 1893 года. В первом тексте Гельмгольц пришел к выводу, что законы электролиза предполагают существование "атомов электричества", а во втором он возложил ответственность за явление дисперсии на упруго связанные ионы. Эйнштейн каким-то образом привил атомистическое представление Гельмгольца об электричестве к неподвижному эфиру Друде и таким образом пришел к концепции электродинамики как *"науки о движении электрических и магнитных масс в пустом пространстве"*, то есть к представлению, аналогичному представлениям Лоренца и Вихерта.<sup>65</sup>

Когда Эйнштейн писал эти слова, он вполне мог слышать о теории Лоренца, которая в то время широко обсуждалась. Во всяком случае, его рассуждения отражали современный интерес к ионным теориям, а также естественный характер предположений Лоренца и Вихерта. Еще более удивительно, что Эйнштейн, по-видимому, был знаком с максвелловской концепцией электрического тока. Этого не было ни в книгах Друде и Герца, ни тем более в курсе Генриха Вебера в Высшей технической школе, который строго придерживался субстанциалистского взгляда на электричество.<sup>66</sup> Возможно, Эйнштейн читал *"Трактат"* Максвелла или

Фоппла, пересказавшего Максвелла. Или, возможно, максвелловские идеи витали в воздухе Цюриха.

В молодости Эйнштейн всегда сопровождал свои теоретические рассуждения предложениями по экспериментальной проверке. Его предложение о новой электродинамике заканчивалось словами: *"Какая из двух концепций должна быть выбрана, решат эксперименты с излучением"*. Эйнштейн не уточнил, какие именно эксперименты он имел в виду. Возможно, это было сравнение интенсивностей света, излучаемого одним и тем же источником в двух противоположных направлениях, которое, как он вспоминал впоследствии, он планировал еще в студенческие годы. Эта идея возникла у Физо еще в 1854 году, а Нордмайер реализовал ее в 1903 году под руководством Бухерера. Эйнштейн, вероятно, рассуждал так: неподвижный эфир подразумевает разные длины пути и, следовательно, разные интенсивности, тогда как полностью затягиваемый эфир Максвелла и Герца дает нулевой результат.<sup>67</sup>

В сентябре 1899 г. Эйнштейн задумал еще один важнейший эксперимент:

*"В Ааху мне пришла в голову хорошая идея исследовать, какое влияние оказывает относительное движение тел по отношению к светящемуся эфиру на скорость распространения света в прозрачных телах. Кроме того, мне пришла в голову теория этого вопроса, которая кажется мне весьма вероятной"*.

По-видимому, Эйнштейн имел в виду эксперимент, аналогичный измерению Физо по затягиванию световых волн бегущей водой. Возможно, его теория была похожа на вывод коэффициента Френеля Лоренцем или Рейфом. Несомненно то, что Эйнштейн ожидал эффектов движения вещества относительно эфира и рассматривал их как подтверждение своей новой концепции электродинамики. Очевидно также, что Эйнштейн был совершенно не осведомлен о современных результатах в области оптики движущихся тел.<sup>68</sup>

Эйнштейн изложил свои идеи и представил их Генриху Веберу. Профессор знал о теории Лоренца и недавних дискуссиях о движении эфира и поэтому отреагировал на них *"stiefmutterlich"* ("как мачеха") Он посоветовал Эйнштейну прочитать обзор проблемы движения эфира, выполненным Вином в 1898 г., в котором содержалось краткое описание точки зрения Лоренца и достаточно полный список соответствующих экспериментов, включая эксперименты Физо, Майкельсона и Морли. Эйнштейн нашел это "очень интересным" и написал Вину о своих идеях (письмо утеряно). Можно предположить, что результат Физо особенно порадовал его: он дал желаемое опровержение электродинамики Герца для движущихся тел и подтвердил картину взаимодействия ионов через неподвижный эфир. Однако, как подчеркивал сам Вин, существовала серьезная трудность: неподвижный эфир означал положительный результат для эксперимента Майкельсона-Морли, если только не



предполагалось специальное сокращение длин. Первая реакция Эйнштейна на это затруднение, по-видимому, была скептической. Через год после прочтения книги Вина он все еще пытался представить себе простой метод поиска движения эфира по отношению к веществу.<sup>69</sup>

Подводя итог, можно сказать, что на раннем этапе своих размышлений об электродинамике Эйнштейн был очень чувствителен к историческим переходам электродинамики конца XIX века. Он в полной мере оценил влияние открытия Герца на немецкую электродинамику и размышлял об остающихся трудностях: загадках электрического тока и электродинамике движущихся тел. Он осознал современную потребность в интеграции атомистической концепции электричества и использовал ее для решения возникших трудностей. Стремясь быть в авангарде физики, он уделял внимание самым новым, самым модным теориям и отслеживал суждения специалистов о сохраняющихся трудностях и возможных направлениях развития. Его размышления были необычайно глубокими и смелыми для новичка. Однако по крайней мере до 1901 г. они не были по-настоящему оригинальными: они принадлежали к растущему направлению исследований, пионерами которого были Гельмгольц, Лоренц и Вихерт.

Размышления Эйнштейна включали критические замечания по поводу обоснования физических понятий. Это раннее эпистемологическое осознание не могло быть следствием его чтения Маха и Юма, которое произошло позже.<sup>70</sup> Его источник находится в предшествующей истории электродинамики: открытие Герца вызвало концептуальную революцию, которая, в свою очередь, привела к размышлениям о целях и основаниях физической теории. Сам Герц был озабочен устранением ненужных украшений, однозначным обозначением символов, входящих в фундаментальные уравнения, и соблюдением общих принципов механики. Он отводил эпистемологическим критериям значительную роль в критике теорий. Друге аналогично использовал принцип Маха об экономии мышления. В соответствии с этими взглядами критика Эйнштейном движения эфира основывалась на соображениях физического смысла и операциональной определенности. Он искал экспериментальное опровержение электродинамики движущихся тел Герца, подтверждающее его предположения о неподвижности эфира.

В то время Эйнштейн избегал механистической концепции эфира; он рассматривал его как название того, в чем распространяются световые волны. Однако его критическое отношение не зашло настолько далеко, чтобы полностью отвергнуть эфир, по крайней мере, до 1901 года. Он считал движение материи относительно эфира вполне определенным и ожидал наблюдаемых эффектов. В связи с этим результаты, которые он нашел в мемуарах Вина 1898 года, должны были его озадачить: если эксперимент Физо подтверждал один из этих эффектов, то эксперимент

Майкельсона-Морли опровергал другой.

<sup>60</sup> Einstein [1895]. По делу Эйнштейна см. Ryenson 1982; Hughes 1993/1993 года. Этот раздел включает в себя выдержки из Darrigol 1996, с любезного разрешения издательства Калифорнийского университета.

<sup>61</sup> Известное воспоминание о погоне за лучом света (Einstein 1949: 52-53) относится к тому же периоду. Историки должны отказаться от любой интерпретации этого мысленного эксперимента, которая противоречит только что приведенным доказательствам того, что Эйнштейн в то время верил в конкретное существование эфира.

<sup>62</sup> Drude 1894. См. также Einstein to Maric (Эйнштейн к Марич), апрель 1898 года, *ЕСР* 1: 213.

<sup>63</sup> Einstein to Maric (Эйнштейн к Марич), август 1899 г., *ЕСР* 1: 225-227.

<sup>64</sup> Hertz 1892a: 211-212, 285. Критика Эйнштейна сродни Boltzmann 1893: 13-14.

<sup>65</sup> Helmholtz 1881a, 1893a. Об Эйнштейне, прочитавшем Гельмгольца, см. Einstein to Maric [August 1899] (Эйнштейн к Марич [август 1899]), *ЕСР* 1: 226.

<sup>66</sup> ср. Лекционные заметки Эйнштейна в *ЕСР* 1: 148-210.

<sup>67</sup> Einstein to Maric [August 1899] (Эйнштейн к Марич [август 1899 г.]). *ЕСР* 1: 227.

Воспоминание об эксперименте типа Нордмейера содержится в Einstein [1922]: 45-47.

<sup>68</sup> Einstein to Maric, 10 September 1899 (Эйнштейн к Марич, 10 сентября 1899 года). *ЕСР* 1: 229-230.

<sup>69</sup> Einstein to Maric, 28? September 1899 (Эйнштейн к Марич, 28(?) сентября 1899 года), *ЕСР* 1: 233-235; Einstein to Grossmann, 6? September 1901 (Эйнштейн Гроссману, 6 (?) сентября 1901), *ЕСР* 1: 315-316: «Для поиска относительного движения вещества относительно светового эфира я подумал о гораздо более простом методе, основанном на обычных экспериментах с интерференцией».

<sup>70</sup> Эйнштейн прочитал Маха предположительно, **Механику**, в сентябре 1899 г.: см. Einstein to Maric, 10 September 1899 (Эйнштейн к Марич, 10 сентября 1899 года), *ЕСР* 1: 230 и редакционная записка 8, там же. Он прочитал **«Трактат о человеческой природе»** Юма незадолго до открытия теории относительности, вероятно, для «Академии Олимпии», которая была образована в 1902 году: см. Einstein to Schlick, 14 декабря 1915 г., цитата из *ЕСР* 2 xxiv, примечание 37.

### 9.5.2. Теория эмиссии

В какой-то момент Эйнштейн перестал искать эффекты эфирного ветра, а предположил в общем случае их несуществование. Другими словами, он принял принцип относительности. К сожалению, ни одно известное письмо или рукопись не документируют этот капитальный переход. Однако мы можем обратиться к мотивам современных верующих в принцип относительности и выяснить, разделял ли их Эйнштейн. Можно рассмотреть и опубликованные позднее аргументы Эйнштейна и понять, могли ли они быть сделаны в начале века.

В начале века только два известных электродинамиста верили в общую справедливость принципа относительности. Один из них - Пуанкаре. Его убежденность, датированная 1895 годом, имела тройное происхождение: скептическое отношение к эфиру, вера в общие принципы механики и неудача попыток обнаружить движение Земли в эфире. Короче говоря, он полагал, что эфир, будучи лишь условным обозначением явлений распространения, не должен считаться телом при применении принципа

относительного движения к системе тел. Невозможность обнаружить эффекты первого и второго порядка от движения Земли в эфире подтвердила эту интуицию. Другой приверженец принципа относительности, Бухерер, также рассматривал эфир как строительные леса и интерпретировал неоднократные неудачи в обнаружении движения Земли в нем как свидетельство общей справедливости принципа относительности. Он добавил, что полное устранение эфира позволит вернуться к старой доброй концепции электричества и завершить отход Лоренца от максвелловской концепции.

Эйнштейн называл эфир "именем" и учился более древнему понятию - электричеству. Поэтому он вполне мог следовать той же линии рассуждений, что и Пуанкаре и Бухерер. Действительно, во всех своих ранних изложениях принципа относительности Эйнштейн ссылался на неудачу попыток обнаружить движение Земли через эфир. В работе по теории относительности, опубликованной в 1905 г., он в глобальном плане ссылается на *"неудачные попытки обнаружить какое-либо движение Земли относительно 'легкой среды'"*. В более поздних работах 1907 и 1910 гг. он описал результат Майкельсона и Морли. Эйнштейн, как и Пуанкаре, настаивал, что принцип относительности - это принцип механики, управляющий и электромагнитными явлениями. Возможно, аргументы Пуанкаре сыграли определенную роль в формировании убежденности Эйнштейна. Выступление Пуанкаре на Парижском конгрессе 1900 года было опубликовано в *Physikalische Zeitschrift*, а большая его часть вошла в книгу *La science et l'hypothese* (1902), которую Эйнштейн прочитал до 1905 года. Однако, похоже, что Эйнштейн использовал и свой собственный эпистемологический аргумент.<sup>71</sup>

Как отмечают многие комментаторы, статья Эйнштейна об относительности начинается не с общей неспособности обнаружить движение Земли относительно эфира, а с критики электродинамики Максвелла *"в ее современном понимании"*, т.е. электродинамики Лоренца. Магнитоиндукционный ток, напомнил Эйнштейн своему читателю, зависит только от относительного движения проводника и магнита. Однако теория дает два различных описания этого явления в зависимости от того, что движется в эфире - магнит или проводник. В первом случае за индукционный ток отвечает электрическое поле с определенной плотностью энергии, в другом случае электрического поля нет, и индукционный ток приписывается электродвижущей силе, не имеющей соответствующей энергии поля. В более общем случае, когда теория Лоренца применяется к явлениям, связанным с движущимися телами, она приводит к асимметриям, не имеющим эмпирического аналога.<sup>72</sup>

Эйнштейн был далеко не первым физиком, отметившим асимметрию в теоретических представлениях явления индукции. В 1885 г. Хевисайд

отметил "*огромное различие*" между случаем движущегося магнита и случаем движущегося проводника. В 1894 г. Фоппл сделал аналогичное замечание, подчеркнув при этом, что зависимость индукции только от относительного движения является эмпирическим результатом, не вытекающим из уже существовавших теоретических представлений.

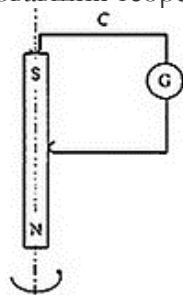


Рис. 9.2. Устройство Фарадея для униполярной индукции.

Цилиндрический магнит вращается вокруг своей оси;  
провод С и гальванометр G неподвижны.

В 1885 году инженер-телеграфист Толвер Престон также заметил, что описание Фарадеем униполярной индукции (рис. 9.2) отличается в зависимости от того, что вращается - магнит или проводник. Еще один вопиющий случай асимметрии проявился в отчетах Дюссельдорфского совещания 1898 года, которые читал Эйнштейн. В нем Вин отметил, что Рентгену не удалось обнаружить силу между магнитом и электрическим зарядом (оба покоятся в лаборатории), которую, как казалось, должно было вызвать движение Земли. Лоренц немедленно ответил, что его теория предполагает компенсационную электризацию магнита. Остается очевидная теоретическая асимметрия между случаем, когда магнит и заряд находятся в покое, и случаем, когда они движутся вместе.<sup>73</sup>

Среди этих авторов Престон был единственным, кто стремился устранить теоретическую асимметрию. Хевисайд и Фоппл считали, что источник асимметрии - эфир или абсолютное пространство - действительно существует, и что другие электродинамические явления или более тонкие детали явления индукции будут зависеть от абсолютного движения. Вина и Лоренца заботило единственно, чтобы асимметрия не имела нежелательных экспериментальных последствий. Уместен вопрос не о том, как Эйнштейн узнал об асимметриях, не имеющих эмпирического аналога, а о том, что сделало их для него столь непереносимыми.

Можно сослаться, по крайней мере, на три фактора. Во-первых, теория Лоренца с его неподвижным эфиром значительно усилила асимметрию: в теории Максвелла не было различия между ЭДС и электрическими полями, несущими энергию. Во-вторых, на рубеже веков эффекты абсолютного движения, которые оправдывали бы асимметрию, все еще отсутствовали, несмотря

на экспериментальные попытки их обнаружить, а во многих случаях теория Лоренца предполагала отсутствие таких эффектов. В-третьих, и это самое главное, Эйнштейн требовал, чтобы соответствие между теоретическим представлением и явлениями было однозначным. Здесь мы стоим на чисто эпистемологических основаниях. Позднее Эйнштейн ссылался на то, что читал Маха и Юма. Экономия мышления Маха действительно запрещала теоретические различия без эмпирических аналогов. Однако можно сослаться и на Герца. В предисловии к своим "*Untersuchungen*" Герц писал:

*"В этом изложении я попытался свести к минимуму число представлений, которые мы произвольно вводим в явления, и допустить только такие элементы, которые нельзя удалить или изменить без одновременного изменения возможных экспериментов".*

Начальные поиски Эйнштейном операционального определения полевых величин и его требование недвусмысленности можно рассматривать как проявление этой озабоченности.<sup>74</sup>

Таким образом, вера Эйнштейна в принцип относительности имела множество источников, включая неудачные попытки обнаружить движение Земли относительно эфира, веру в общие принципы механики и эпистемологическое понимание, которое он мог получить, читая Герца и Маха и др. Отсутствие современных документов оставляет открытым вопрос об относительной важности этих источников и о том, когда возникло это убеждение. Согласно его лекции в Киото в 1922 году, Эйнштейн убедился в общности принципа относительности вскоре после того, как узнал о результате Майкельсона-Морли, т.е. вскоре после сентября 1899 года. Мы уверены лишь в том, что в конце 1901 года Эйнштейн работал над "капитальным мемуаром" по электродинамике движущихся тел. Возможно, это была его первая попытка создания теории, основанной на принципе относительности.<sup>75</sup>

Эксперимент Физо является парадигмой, а эксперимент Майкельсона-Морли – парадокс в предположении наличия неподвижного эфира, а в предположении принципа относительности ситуация обратная. Согласно этому принципу, законы распространения света в прозрачном теле, в том числе и значение скорости света относительно тела, не должны зависеть от равномерного движения тела, и свет должен полностью затягиваться движущимся прозрачным телом, что противоречит результату Физо. Более того, если законы распространения света одинаковы в двух инерциальных системах, то скорость света должна быть одинаковой в каждой из них, что противоречит закону сложения скоростей.

Как мы видели, Пуанкаре рассуждал подобным образом на рубеже веков, как и Эйнштейн, согласно его Киотской лекции. Оба они осознавали трудность создания теории, которая бы удовлетворяла и

принципу относительности, и результату Физо, и оба отрицали, что теория Лоренца, объясняющая результат Физо, удовлетворяет принципу относительности. Однако они искали разные способы решения этой проблемы. Если Пуанкаре считал, что адекватная модификация теории Лоренца согласуется с принципом относительности, то Эйнштейн сразу стремился исключить эфир. По его мнению, любая теория эфира, соответствующая принципу относительности, обязательно приведет к неприятным асимметриям, обнаруженным в теории электромагнитной индукции Лоренца. Если Пуанкаре считал, что адекватная модификация теории Лоренца согласуется с принципом относительности, то Эйнштейн сразу стремился устранить эфир. По его мнению, любая теория эфира, соответствующая принципу относительности, обязательно приведет к неприятным асимметриям, обнаруженным в теории электромагнитной индукции Лоренца.

Таким образом, Эйнштейн был вынужден представить теорию распространения электромагнитного излучения, которая бы соблюдала принцип относительности, не нарушая подтвержденных предсказаний теории Лоренца. Как и Бухерер, он решил изменить выражение запаздывающего взаимодействия между двумя частицами так, чтобы оно зависело только от относительного движения частиц. Он поступил так, как впоследствии Ритц в теории излучения, т.е. поставил скорость распространения в зависимость от скорости источника в момент излучения. Тогда парадоксы стационарного эфира исчезли. Сохранялся обычный состав скоростей, так как скорость света определялась только относительно его источника, а результат Физо переставал быть парадоксальным, так как скорость света в прозрачном теле зависела не только от строения тела, но и от скорости источника света относительно тела. Хотя письменных следов этой попытки не сохранилось, несомненно, что Эйнштейн упоминал о ней впоследствии.<sup>76</sup>

<sup>71</sup> Einstein 1905b: 891; 1907a: 412; 1910: 11-13; Poincare 1901b.

<sup>72</sup> Einstein 1905b: 891. Я согласен с Paty 1993: 54-55, что аргумент Эйнштейна был эпистемологическим а не эстетический.

<sup>73</sup> Heaviside 1885-1887: 446; Fappl 1894: 311; Preston 1885: 134; Wien 1898: 55 (VDNA); Lorentz 1898b: 59. См. также Darrigol 1993b: 311 (Heaviside), 329-30 (Fappl), 299-300 (Preston), 333-335 (ожидания рассуждений Лоренца Финдджеральдом и Баддом).

<sup>74</sup> Einstein 1949: 52: «*Критическое рассуждение, необходимое для открытия этой центральной точки [что одновременность является относительным понятием], было решительно поддержано, в моем случае, особенно чтением философских сочинений Дэвида Юма и Эрнста Маха*»; Hertz 1892a: 30.

<sup>75</sup> Einstein [1922]; Einstein to Maric, 17 December 1901, *ECP1*: 325-6. Наши знания о содержании лекции в Киото являются косвенными (из заметок Ишвары), и некоторые ее части были сочтены сомнительными по другим причинам (см. Holton 1988: 479-80); однако некоторые из вопросов, поставленных историками, были подтверждены перепиской Эйнштейна-Марич.

<sup>76</sup> Einstein to Ehrenfest, 25 April 1912, цитируется в *ECP2*: 263: «*Концепция Ритца*



[теория излучения], которая до теории относительности была также моей»; Другие письма, упомянутые в ECP2: 264, примечание 64; Вероятное упоминание в Einstein [1922] о попытке сделать уравнения Лоренца действительными в движущейся системе отсчета (привязанной к источнику?). См. также Schankland 1963; Stachel 1982.

### 9.5.3 Новая кинематика

Позднее Эйнштейн вспоминал, что в своей теории излучения он столкнулся с двумя трудностями. Он не смог найти систему дифференциальных уравнений, на которой можно было бы построить теорию, и обнаружил, что свет, излучаемый ускоренным источником, будет очень "запутанным" из-за зависимости фазы от скорости источника. В некоторых случаях свет может даже "отражаться от самого себя".<sup>77</sup>

Эта неудача отчасти объясняет то, что между первым проектом Эйнштейна по электродинамике движущихся тел и его первой публикацией на эту тему прошло шесть лет. Однако в этот период у Эйнштейна было много других интересов. Читая "великолепного" Больцмана в 1900 г., он увлекся кинетической теорией теплоты, "дальнейшим шагом к динамическому объяснению физических явлений". Особенно ему нравились рассуждения, объединяющие кинетическую теорию, электроны и излучение, что объясняет его восторженную реакцию на электронную теорию металлов Друде в 1901 г.: *"Der Drude ist ein genialer Kerl"*. Первые публикации Эйнштейна были посвящены молекулярным силам и основам статистической термодинамики.<sup>78</sup>

В начале 1903 г. Эйнштейн запланировал "всестороннее изучение теории электронов". Вероятно, его привлекло электромагнитное мировоззрение Вина и электронная теория Абрахама. Несмотря на свою склонность к унифицированным, монистическим теориям, Эйнштейн не мог испытывать симпатии к новым электронным теориям, по крайней мере, по трем причинам.

- ни их форма, ни их эмпирические предсказания не соответствовали принципу относительности.

- их математическая изощренность была чужда его стилю физики.<sup>79</sup>

- между 1900 и 1905 гг, заинтересовавшись термостатистическими проблемам, Эйнштейн убедился, что существующие законы электродинамики не работают при взаимодействии вещества с высокочастотным излучением. Это сделало исследования структуры электрона преждевременными, а то и вовсе бессмысленными.<sup>80</sup>

И все же представляется вероятным, что Эйнштейн знакомился с литературой по теории электронов, а также со всем, что ему удавалось найти по электродинамике движущихся тел. В таком случае он должен был знать до конца 1904 г. о голландском мемуаре Лоренца, включающем преобразования Лоренца, хотя почти наверняка не читал этот мемуар. В современной литературе встречается несколько упоминаний о теории

Лоренца и преобразованиях Лоренца. Например, в статье Вина об электродинамике движущихся тел, опубликованной в марте 1904 года в журнале *Annalen der Physik*, преобразование координат Лоренца, хотя и в упрощенном виде, присутствует. В номере *Physikalische Zeitschrift* за июль 1904 г. была опубликована статья того же автора по теории электронов, содержащая полное выражение преобразования Лоренца для полей и координат и ссылку на голландский мемуар Лоренца. В своей брошюре по теории электронов, опубликованной в том же году, Бухерер обобщил новые результаты Лоренца и также привел полное преобразование Лоренца. Если бы Эйнштейн действительно прочитал один из этих источников, он бы, как и Пуанкаре, заподозрил, что полная относительность может быть достигнута в рамках уравнений Максвелла-Лоренца. Он также узнал бы о формальных свойствах инвариантности этих уравнений и, таким образом, остался бы перед задачей улучшения связи между этой инвариантностью и принципом относительности.<sup>81</sup>

Эйнштейн не знал последней работы Пуанкаре по этой проблеме, поскольку ее первая публикация в кратком изложении состоялась в июне 1905 года. Однако он читал и восхищался работой "*Наука и гипотеза*", в которой Пуанкаре критиковал накопление гипотез Лоренца, давал основания верить в общую справедливость принципа относительности и заявлял:<sup>82</sup>

*Абсолютное время не существует. Утверждение о равенстве двух длительностей само по себе не имеет смысла и может приобрести его только по соглашению. Мы не только не имеем непосредственной интуиции равенства двух длительностей, но даже не имеем непосредственной интуиции одновременности двух событий, происходящих в разных местах: это я объяснил в статье "Измерение времени" (*La mesure du temps*).*

Самое главное, что Эйнштейн наверняка читал мемуар Пуанкаре к юбилею Лоренца в 1900 году. Он хорошо знал его в 1906 году, так как использовал его для нового вывода эквивалентности массы и энергии. Весьма вероятно, что он изучал этот текст до 1905 года, поскольку теоретики электрона часто ссылались на него как на источник понятия электромагнитного импульса. Здесь Пуанкаре дал определение одновременности, которое Эйнштейн использовал в 1905 году, и показал, что по первому порядку местное время Лоренца - это время, измеренное движущимися часами, синхронизированными в соответствии с этим определением.<sup>83</sup>

Это последнее открытие, по-видимому, не привлекло внимания других теоретиков в течение нескольких лет. Однако в 1904 г. Кон утверждал, что местное время Лоренца - это время, для которого распространение света изотропно, а в начале 1905 г. Абрахам показал, что оптически синхронизированные часы дают местное время Лоренца любого порядка, если только предполагается сокращение Лоренца.<sup>84</sup> Эйнштейн не мог



прочитать книгу Абрахама до написания статьи об относительности. Но он вполне мог ознакомиться с работами Кона и оценить его исключение эфира, а также замечание о том, что теория Лоренца вводит эмпирически бессмысленное различие между истинными и кажущимися координатами.<sup>85</sup>

Как Кон и Абрахам, Эйнштейн, по всей вероятности, познакомился с интерпретацией Пуанкаре локального времени Лоренца и соответствующих состояний. Эта интерпретация позволяла установить прямую связь между инвариантностью уравнений Максвелла-Лоренца и принципом относительности, поскольку преобразованными координатами и полями теперь были измерены в естественных условиях. В тот момент Эйнштейн мог знать или не знать, что результат, доказанный Пуанкаре лишь с точностью до первого порядка, является точным, если использовать точную форму преобразования Лоренца. В любом случае его не могло устраивать текущее положение дел. Его концепция принципа относительности, иллюстрируемая обсуждением электромагнитной индукции, требовала не только инвариантности наблюдаемых явлений, но и неизменности теоретического представления этих явлений. Пуанкаре, напротив, поддерживал идею эфира и различал истинные состояния, относящиеся к эфиру, и кажущиеся - для движущихся наблюдателей.

Следующий шаг Эйнштейна был чисто эпистемологическим: он решил, что пространство и время, измеряемые в любой инерциальной системе, находятся на одной ступени, что эфир больше не может служить привилегированной системой. От идеи среды распространения он взял только требование, чтобы в данной инерциальной системе скорость света была постоянной, не зависящей от его источника. Из этого принципа вместе с принципом относительности следует, что скорость света является постоянной и такой же постоянной в любой другой инерциальной системе. Этот результат заменяет положение Пуанкаре о том, что движущиеся наблюдатели делают это так, как если бы скорость света была постоянной. Таким образом, Эйнштейн основал новое учение о пространстве и времени, в котором скорости больше не складываются, а время зависит от системы отсчета. Естественно, что эта новая кинематика должна была лечь в основу всех последующих теорий.<sup>86</sup>

Теперь мы можем следовать порядку изложения работы по теории относительности 1905 года. Эйнштейн расширил рассуждения Пуанкаре о синхронизации так, что они привели к преобразованию Лоренца для времени и пространства. Он дал физическую интерпретацию этого преобразования, а также закон композиции скоростей. Затем он проверил, что уравнения Максвелла-Лоренца инвариантны при таких преобразованиях. На этих двух этапах предварительное знание

преобразований могло бы помочь, но оно не было необходимым. Далее Эйнштейн вывел эффект Доплера, звездную aberrацию, закон преобразования для энергии излучения и давления. Наконец, он вывел уравнения новой механики, которая соответствовала новой кинематике и хорошо согласуется со старой механикой для медленных движений.<sup>87</sup>

По сравнению с предыдущими теориями электронов наиболее очевидной особенностью теории Эйнштейна является то, что в ее основе лежат два общих принципа, которые совершенно не касаются структуры вещества и излучения. Соответствующая кинематика эффективно ограничивает построение теории, что и продемонстрировал Эйнштейн, выведя зависимость массы электрона от скорости без каких-либо предположений о структуре электрона. Это было важным достижением для того, кто считал, что свойства высокочастотного излучения противоречат известным теориям электрона. Возможно, Эйнштейн сознательно искал "*теорию принципов*", не зависящую от сомнительных деталей электромагнитных взаимодействий, как предполагалось в его автобиографии.<sup>88</sup> Во всяком случае, исключение эфира из представлений Пуанкаре о кажущемся пространстве и времени само по себе привело к новой кинематике, основанной на двух принципах.

<sup>87</sup> Сообщено в Schankland, 1963. См. также Einstein to Ehrenfest, 20 June 1912, *ECP*5: #409.

<sup>88</sup> Einstein to Marie, 4 April 1901, *ECP*1: 284. См. также Abiko 1991 and Renn 1993.

<sup>79</sup> см. McCormach 1976; Pyenson 1980. 1985.

<sup>80</sup> см. Klein 1967; McCormach 1970a.

<sup>81</sup> Wien 1904b. 1904c; Bucherer 1904: 229. Abraham 1904 содержал отчет о сократительном электроне Лоренца, но без преобразования Лоренца. Его книга 1905 года давала преобразование Лоренца, но вышла слишком поздно (весной), чтобы его использовал Эйнштейн. Можно напомнить, что преобразование Лоренца уже появилось в Lorentz 1899 и в Larmor 1900a.

<sup>82</sup> Poincare 1902: III. То, что Эйнштейн прочитал этот текст до 1905 года, засвидетельствовано в Solovine 1956: vii-viii: "*Эта книга произвела на нас глубокое впечатление и не давала покоя несколько недель подряд*". См. также Эйнштейн к Бессо. 6 марта 1952 г. в Speziali 1972: 464.

<sup>83</sup> Einstein 1906: 627: "*Простые формальные соображения, которые должны быть разработаны, чтобы доказать это утверждение [что сохранение движения центра масс для системы, включающей электромагнитное излучение, подразумевает связь между массой и содержанием энергии], уже основная часть, содержащаяся в работе Пуанкаре*". Ср. также Darrigol 1995a.

<sup>84</sup> Cohn 1904: 1299-300; Abraham 1905: 366-79. Ни Авраам, ни Кон не ссылались на Пуанкаре. В 1908 году Абрахам отклонил расширение времени и, скорее, имел  $t' = t - vx/c^2$  для кажущегося времени и  $c' = c(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  для скорости света в движущейся системе (Abraham 1908: 368-369).

<sup>85</sup> Эйнштейн, 1907a: 413 относится к "*проницательным работам Э. Кона, которые, однако, я здесь не использовал*".

<sup>86</sup> Einstein 1905b: 892-903. Согласно Einstein [1922], идея изменить кинематику пришла во время разговора со своим другом Мишелем Бессо за несколько недель до того, как он закончил работу над теорией относительности.

<sup>87</sup> Einstein 1905b. Некоторые из наиболее важных комментариев к этой работе см. в

### 9.5.4 Инерция энергии

В 1900 году Пуанкаре показал, что в теории Лоренца наблюдателями, один из которых привязан к источнику, а другой движется со скоростью  $u$  в направлении испускания, применение сохранения энергии к испусканию приводит к очевидному нарушению принципа относительности. Если излучение  $J$  испускалось в одном направлении, то оценки импульса отдачи двумя наблюдателями отличались на  $Ju/c^2$  (сила Лиенара). Впоследствии Пуанкаре, похоже, забыл об этом парадоксе, довольствуясь показом на электронном уровне, что теория Лоренца может быть совместима с принципом относительности.<sup>89</sup>

В 1905 г. Эйнштейн столкнулся с подобным парадоксом, обсуждая динамические следствия собственной теории относительности. Как и Пуанкаре, он рассматривал излучение света с двух разных точек зрения. Он предпочел симметричный процесс, для которого не существует отдачи источника: одно и то же количество света  $J/2$  испускается в двух противоположных направлениях. Для наблюдателя, движущегося со скоростью  $u$  по линии излучения, излученная энергия, отсчитываемая от преобразованного по Лоренцу электромагнитного поля, равна

$$J' = \gamma (1 + u/c)J/2 + \gamma(1 - u/c) J/2 \sim J + (1/2)(J/c^2)u^2 \quad (9.13)$$

Эйнштейн видел только один способ избежать нарушения принципа относительности: допустить, что в процессе излучения масса излучателя уменьшилась на  $J/c^2$ . Тогда для движущегося наблюдателя кинетическая энергия излучателя уменьшится на  $(1/2)(J/c^2)u^2$ , что и объясняет разницу в излучаемой энергии.<sup>90</sup>

Эйнштейн предположил, что в общем случае масса тела зависит от его энергосодержания. Следовательно, огромным энергиям, участвующим в радиоактивных превращениях, должны соответствовать заметные дефекты массы: *"Об этом приятно думать, - заметил Эйнштейн своему другу, - но не смеется ли над этим Бог и не дергает ли он меня за нос ?"*<sup>91</sup>

Заметим, что предположение Эйнштейна одинаково хорошо работает и для однонаправленного процесса Пуанкаре: там уменьшение массы излучателя влечет за собой для движущегося наблюдателя изменение  $(J/c^2)u$  импульса, что в точности уравнивает действие силы Лиенара.

Баланс импульса можно обсудить и в эйнштейновском случае двойного излучения. Именно так Ланжевэн в 1906 году, независимо от Эйнштейна, пришел к инерции энергии. Для движущегося наблюдателя полный импульс испускаемого излучения равен, по первому порядку,

$$(1 - u/c)(J/2c) - (1 + u/c)(J/2c) = -Ju/c^2 \quad (9.14)$$

Из сохранения импульса следует, что импульс источника изменяется на противоположную величину,  $uJ/c^2$ . Поскольку скорость  $(-u)$  источника не

меняется, его масса должна уменьшиться на  $J/c^2$ .<sup>92</sup>

В 1906 г. Эйнштейн еще раз показал, что инерция энергии сохраняет теорему о центре масс. Впервые он прямо сослался на работу Пуанкаре 1900 года, из которой он заимствовал "*соответствующие формальные соображения*". Пуанкаре показал, что равномерное движение центра масс электродинамической системы можно получить, только включив в него вклад фиктивной жидкости, плотность которой равна энергии электромагнитного поля, деленной на  $c^2$ . По его мнению, этот результат подтвердил нарушение теоремы об истинном центре масс. Эйнштейн прочитал те же формулы как подразумевающие изменение массы источников поля при испускании или поглощении излучения и предложил мысленный эксперимент в духе аргумента Пуанкаре с двумя взаимодействующими телами, соединенными жестким стержнем.<sup>93</sup>

Источник излучения и поглотитель обращены друг к другу и принадлежат одному и тому же твердому телу. В них происходит следующий циклический процесс. Источник излучения испускает импульс излучения с энергией  $J$  в направлении поглотителя, что влечет за собой ложность импульса отдачи для твердого тела. Когда импульс достигает поглотителя, твердое тело возвращается в состояние покоя. Затем безмассовый носитель возвращает энергию  $J$  излучателю, завершая цикл. За все время работы твердое тело смещается примерно на величину  $-(J/Mc)(L/c)$ , где  $M$  - масса твердого тела, а  $L$  - расстояние между излучателем и поглотителем. Это некомпенсированное смещение представляет собой своего рода вечный двигатель. Эйнштейн избежал этого, предположив, что при возвращении энергии  $J$  к излучателю происходит перенос массы  $J/c^2$ .

Этот перенос предполагает глобальное смещение твердого тела на величину  $(J/c^2)L/M$ , компенсирующую смещение в первой фазе цикла.<sup>94</sup>

Эйнштейн и Пуанкаре разделяли озабоченность общими принципами и схожую способность проникать мысленным экспериментом в последствия их нарушения. С помощью таких рассуждений Пуанкаре обнаружил главный парадокс электродинамики Лоренца, а Эйнштейн решил его пять лет спустя, придумав инерцию энергии. Такая длительная задержка не так уж удивительна, если учесть необычность проблемы Пуанкаре и радикальный пересмотр представлений о массе и энергии, который принесло с собой предложение Эйнштейна.<sup>95</sup>

<sup>89</sup> Poincare 1900a. Смотри выше, стр. 404-405. Для краткости я немного изменил выражение парадокса.

<sup>90</sup> Einstein 1905c.

<sup>91</sup> Эйнштейн Хабихту (без даты, июнь-сентябрь 1905 г.), в ECP5: # 28.

<sup>92</sup> P. Langevin 1913: 418-419. Там же: 414, Ланжевэн утверждает, что его соображения были независимы от соображений Эйнштейна и были включены в его курс в Коллеж де Франс 1906 года. См. также показания Э. Бауэра в Andre Langevin 1971: 58-59.

<sup>93</sup> Poincare 1900a; Einstein, 1906 год. См. также Darrigol 1995a: 41-44.

<sup>94</sup> Аргумент Эйнштейна слегка ошибочен, потому что поглощение излучения обычно подразумевает рассеивание энергии. Это остается верно, что эквивалентность массы-энергии устраняет нарушение теоремы о центре масс в первой части цикла: передача световой энергии теперь включает перенос массы, так что центр масс не перемещается, несмотря на глобальный сдвиг тела.

<sup>95</sup> Нет прямых доказательств того, что Пуанкаре принял эквивалентность массы и энергии после 1905 года. Нет и доказательств обратного. Его заявление 1908 года (P09: 568) о том, что *'l'énergie n'a pas de masse'* имело место при обсуждении нарушения принципа реакции в радиационных процессах; это только означало, что у энергии не было механической массы. В следующем параграфе (P09: 571, 573) Пуанкаре напомнил, что в соответствии с новой механикой не будет никакой механической массы вообще, и что каждая масса будет иметь электромагнитное происхождение.

### 9.5.5 Предполагаемое превосходство теории Эйнштейна

Изучающий современную физику может оценить центральную роль специальной относительности в формулировке фундаментальных теорий. Его также учат презирать неуклюжесть старых теорий эфира и преклоняться перед удивительной простотой революционных представлений Эйнштейна о пространстве и времени. Соответственно, историки обычно склонны считать превосходство подхода Эйнштейна очевидным уже в 1905 году. Сопротивление относительности объясняется слепотой или консерватизмом. Развитие электродинамической теории, предшествовавшее вмешательству Эйнштейна, часто рассматривается как умеренно полезные усилия в неверном направлении. Связи с теорией Эйнштейна или сходство с ней игнорируются или преуменьшаются. Приведем лишь один пример: большинство историков теории относительности не знают, что физическая интерпретация местного времени Пуанкаре была впервые опубликована в 1900 г. в том, который читали все специалисты в этой области.<sup>96</sup>

Иная картина генезиса теории относительности вырисовывается из настоящего изложения. Размышления Эйнштейна об электродинамике движущихся тел начались с немецкой максвелловской точки зрения и прошли несколько этапов: критика движения эфира, введение заряженных частиц в неподвижном эфире, принятие принципа относительности, неудачная попытка теории излучения, осознание того, что местное время Лоренца вытекает из простой процедуры синхронизации, и введение новой кинематики. Если судить по степени отхода от первоначальной максвелловской точки зрения, то все эти шаги сопоставимы по величине. Сам Эйнштейн в своей автобиографии настаивал на том, что первый шаг, который он приписывал Лоренцу, был радикальным:

*"Физик нынешнего поколения рассматривает точку зрения, достигнутую Лоренцем, как единственно возможную; однако в то время это был неожиданный и дерзкий шаг, без которого последующее развитие было бы невозможно".<sup>97</sup>*

Не только этот шаг, но и все остальные, кроме последнего, имеют предшественников или параллели в современных электродинамических исследованиях, а некоторые из них, вполне вероятно, являются производными от этих предшественников. В основном мышление Эйнштейна не было уникальным, оно очень хорошо вписывалось в бурное развитие электродинамики на рубеже веков.

К 1906 году электродинамика движущихся тел стала объектом нескольких конкурирующих теорий. Я проиллюстрирую позиции различных участников на примере вымышленной дискуссии между Коном, Эйнштейном, Пуанкаре, Абрахамом, Бухерером и Лоренцем. В сносках указывается степень вымышленности диалога.

**Кон.** Я прочитал интересный мемуар д-ра Эйнштейна об электродинамике движущихся тел. На мой взгляд, он имеет прекрасный смысл и превосходит последние работы профессора Лоренца. Как Вы, вероятно, знаете, я сам пытался исключить эфир, следуя изречению Маха, что мы никогда не должны забывать о происхождении наших понятий и придавать им ту необходимость, которой они не обладают. Однако изменение наших представлений о пространстве и времени - это очень радикальный шаг. Я не вижу в нем необходимости на современном этапе развития физики. Я считаю, что мой подход более экономичен, так как основан на простой модификации уравнений Максвелла и не требует никаких предположений о строении материи, тогда как электродинамическая часть Вашей статьи неявно предполагает редукционистский подход проф. Лоренца. Более того, моя теория представляет собой полную электродинамику макроскопических движущихся тел, тогда как Вы не рассматриваете макроскопические следствия своих микроскопических предположений. Например, Вы не вывели результат Физо о затягивании световых волн.<sup>98</sup>

**Эйнштейн.** Я признаю, что еще не дал полного изложения электродинамики движущихся тел в макроскопическом смысле. Для ясности и краткости я не обсуждал в своей работе движущиеся диэлектрики. Но я верю, что это не трудно сделать, используя процедуру усреднения профессора Лоренца. Что касается результата Физо, то я могу легко перенести объяснение проф. Лоренца, заменив слово "эфир" на фразу "условно выбранная система покоя" и провести те же расчеты в этой системе. Принцип относительности и мой новый закон композиции скоростей прямо приводят к результату Физо: достаточно сложить относительную скорость  $c/n$  света в воде со скоростью воды.<sup>99</sup> В итоге моя теория окажется более полной, чем ваша. Ведь вы игнорируете атомы и электроны, и вам нечего сказать о динамике электрона, которая доступна эксперименту.

**Кон.** Я согласен, что моя теория является только феноменологической, и что недавний прогресс атомистики, вероятно, потребует



последовательной связи между атомным и макроскопическим уровнями. Один из моих бывших студентов уже попытался применить мои уравнения на электронном уровне.<sup>100</sup> О результатах судить пока рано. Между тем я не чувствую себя обязанным принять Вашу теорию и отказаться от абсолютного пространства и времени.

**Эйнштейн:** Какую бы теорию вы ни выбрали, вы должны признать, что время движущихся часов, синхронизированных оптическим способом, идентично местному времени профессора Лоренца. Кроме того, я не понимаю, как Вы, поклонник Маха, с такой готовностью допускаете в своей теории абсолютное пространство. Неужели Вы не понимаете, что если нет эфира, как мы оба предполагаем, то мы можем говорить только о движении вещества по отношению к веществу?

**Кон:** Что касается первого пункта, то я был бы осторожнее, чем вы. Оптическая синхронизация - только один вариант. Вполне возможно, что механическая процедура синхронизации даст абсолютное время. Это, конечно, нарушило бы принцип относительности, поскольку можно было бы обнаружить движение Земли, просто сравнив оптически и механически синхронизированные часы. Но я не разделяю Вашей веры в неограниченную силу этого принципа. Ведь это всего лишь принцип механики. Можно и отказаться от него, раз уже отказались от других механистических понятий, таких как эфире. Я, конечно, согласен с Вами и с Махом, что существует только движение материи относительно материи. Но под абсолютным пространством я понимаю систему, определяемую неподвижными звездами, которые являются материей.

**Пуанкаре:** Истинность принципа относительности, как мы с д-ром Эйнштейном его определяем, не может быть выведена ни из его механического происхождения, ни из грамматики "относительного движения". Этот принцип является индуктивным обобщением экспериментальных результатов, как и энергетический принцип.<sup>101</sup> Однако количество оптических и электродинамических экспериментов, подтверждающих принцип относительности, настолько велико, что представляется разумным принять этот принцип за постулат и попытаться построить теорию, которая бы ему соответствовала. Я сам это сделал, опираясь на недавние голландские мемуары профессора Лоренца. Полученная теория полностью эквивалентна теории д-ра Эйнштейна в том, что касается экспериментальных предсказаний и ограничений на построение теории. Например, мы оба согласны с формулами массы электрона, и мы оба ожидаем, что будущие теории будут инвариантны по группе Лоренца. Однако я не разделяю мнение доктора Эйнштейна о том, что мы должны принять новое учение о пространстве и времени. Мы можем, не нарушая логики, сохранить идею привилегированной системы отсчета, называемой эфиром, к которой относятся истинное

пространство, истинное время и истинное поле. Тогда моё соглашение о синхронизации часов и сокращении Лоренца дадут кажущееся пространство и время для движущихся наблюдателей.<sup>102</sup>

**Эйнштейн.** Хотя точка зрения профессора Пуанкаре совершенно последовательна, я не могу сделать ее своей. Адекватная теория не должна вводить различия, не имеющие эмпирического аналога. Различие между кажущимся и истинным временем как раз такого рода. Если принять принцип относительности, то необходимо не только предположить, что законы физики одинаковы в любой инерциальной системе, но и то, что их теоретическое выражение инвариантно. Сохранение эфира вносит ненужное усложнение. Более того, мне кажется неудовлетворительным принимать в качестве предпосылки теории сокращение Лоренца - не совсем естественную идею.

**Пуанкаре.** Сначала я отвечу на Ваш последний вопрос. По моим последним представлениям, сокращение Лоренца больше не является дополнительным предположением. Оно фактически вытекает из соглашения об измерении длины - такого же, как в Вашей работе, - вместе с принципом относительности.<sup>103</sup> Ваше исключение эфира не означает такой большей логической простоты. При выводе преобразования Лоренца вы вводите для удобства изложения "систему, находящуюся в покое".<sup>104</sup> Чтобы сделать ваши выводы совместимыми с моей точкой зрения, мне достаточно заменить "систему в покое" на "эфир" и назвать "кажущейся" любую величину, относящуюся к системе в движении. Разве это непомерное усложнение? Кроме того, я считаю, что введение Вами новой кинематики может быть вредно с педагогической точки зрения. Обычные физические явления очень хорошо укладываются в обычную кинематику и геометрию, и так будет всегда. Должны ли мы менять глубокие привычки мышления только потому, что в некоторых экстремальных ситуациях, связанных с очень малыми эффектами или скоростями, приближающимися к скорости света, мы находим их более удобными? Я так не думаю.<sup>105</sup> Выбирая между двумя одинаково допустимыми соглашениями конвенциями, следует выбрать ту, которая наиболее удобна. А удобство - это не только вопрос логической простоты, это и психология, и педагогика, и традиции.<sup>106</sup> Многие великие физики прошлого не разделяли Ваш эпистемологический критерий недвусмысленности представления теории. Например, физики, использовавшие механические модели в электродинамике, имели бесконечное число вариантов моделей. Кроме того, электромагнитные потенциалы, играющие центральную роль в теории Максвелла, принципиально неоднозначны.

**Абрахам.** Проф. Пуанкаре и д-р Эйнштейн могут расходиться во мнениях по эпистемологическим вопросам, но они предсказывают одни и те же значения массы электрона, то есть значения проф. Лоренца.



Последние эксперименты д-ра Кауфмана противоречат этому предсказанию и согласуются с моей теорией жесткого, сферического электрона. Я должен добавить, что аргументы проф. Пуанкаре в пользу принципа относительности меня совершенно не убеждают. Пока мы действительно не знаем ни одного исключения из этого принципа. Но это противоречит электромагнитному мировоззрению.<sup>107</sup> Эта точка зрения дает столь большую надежду на новую, единую физику, что мы должны устоять перед искушением принести ее в жертву на алтарь старомодного принципа механики. Проф. Пуанкаре считает г-на Эйнштейна слишком иконоборцем, я же, напротив, нахожу его слишком консервативным.<sup>108</sup> Ситуация несколько сравнима с тем, что мы видели в случае принципа энтропии. Некоторое время индуктивное обобщение убеждало физиков, что последний принцип является общим и абсолютным. Однако такая точка зрения противоречит кинетической теории и атомистической концепции вещества, которая сегодня рассматривается как привилегированный путь к объединению физики.

**Пуанкаре:** Мы все знаем о результатах д-ра Кауфмана. Однако нельзя слишком доверять одному сложному эксперименту, даже если он выполнен таким искусным человеком, как д-р Кауфман. Мы должны подождать, прежде чем делать окончательный вывод.<sup>109</sup>

**Эйнштейн:** По моему мнению, вероятность теории относительности настолько велика, что результаты д-ра Кауфмана имеют все шансы быть опровергнутыми.<sup>110</sup> Аргумент д-ра Абрахама против принципа относительности просто не выдерживает критики. Электромагнитный взгляд на природу, возможно, и внушал большие надежды, когда был впервые представлен, но в своем нынешнем виде он противоречит тому, что мы знаем об излучении черного тела, как я показал в своей работе "**Об эвристической точке зрения...**" Поэтому я не считаю, что у нас пока есть удовлетворительная основа для обсуждения состава электрона. Временно мы можем использовать принцип относительности, чтобы вывести динамические свойства электрона, не зависящие от его строения. Помимо этого, я даже не знаю, какой может быть модель жесткого электрона, поскольку у нас пока нет понятия жесткости, совместимого с принципом относительности.<sup>111</sup>

**Бухерер:** Проф. Пуанкаре и д-р Эйнштейн считают само собой разумеющимся, что их теория является единственной, которая соблюдает принцип относительности и учитывает установленные законы электродинамики. Я не могу согласиться с этим мнением. Я показал, что взаимодействия между электрическими или магнитными полюсами, предсказываемые теорией проф. Лоренца, могут быть изменены таким образом, чтобы соответствовать принципу относительности, не выходя за рамки обычной кинематики. Я согласен с эпистемологическим

требованием д-ра Эйнштейна о недвусмысленности представления. Я также согласен с ним в том, что эфир должен быть полностью исключен из электромагнитной теории. Однако это можно сделать, не вводя странную доктрину пространства и времени д-ра Эйнштейна.

**Эйнштейн.** Я с пониманием отношусь к попытке д-ра Бухерера. Более того, у меня самого некоторое время назад была подобная идея. Однако у меня есть сильное подозрение, что теория д-ра Бухерера, будучи достаточно развитой, приведет к абсурду, что и произошло в моей прошлой попытке. Более того, моя нынешняя теория проще, чем его, поскольку в данной системе отсчета она сохраняет простые предписания профессора Лоренца для расчета взаимодействий между электронами.<sup>112</sup>

**Лоренц.** Завершая эту дискуссию, я хотел бы сделать несколько замечаний. По поводу новых экспериментов д-ра Кауфмана у меня нет определенного мнения. Моей первой реакцией в письме к проф. Пуанкаре было полное отчаяние. Теперь я узнал о некоторых дефектах устройства д-ра Кауфмана, ставящих под сомнение его выводы.<sup>113</sup> Тогда моя теория остается возможной. Попытка д-ра Абрахама представляется менее удачной. Даже если бы оказалось, что масса электрона согласуется с его теорией, он все равно столкнулся бы с противоречием с нулевым результатом Рэлея и Брейса. Теория проф. Кона пока ничего не говорит о динамике электрона и имеет несколько странных последствий: например, эксперимент Майкельсона-Морли, проведенный в идеальном вакууме, дал бы положительный результат. Теория д-ра Бухерера настолько слабо развита, что я разделяю мнение д-ра Эйнштейна в том, что она в конечном итоге потерпит неудачу. Остается моя собственная теория. Здесь я должен поблагодарить проф. Пуанкаре и д-ра Эйнштейна за значительное упрощение, которое они внесли в мои первоначальные идеи. Если мои "соответствующие состояния" были лишь формальными промежуточными звеньями, то в руках проф. Пуанкаре и д-ра Эйнштейна они приобрели физический смысл. Самое важное, что пространственно-временные координаты, задаваемые тем, что профессор Пуанкаре любезно называет "преобразованием Лоренца", являются координатами, измеряемыми движущимися наблюдателями, которые принимают допущение, что свет имеет постоянную скорость  $c$ . При такой интерпретации становится очевидным, что из формальной инвариантности теории вытекает ее физическая инвариантность. На этом этапе мы можем либо оставить эфир и отличать кажущееся пространство и время от истинного, либо, как предлагает д-р Эйнштейн, рассматривать все системы отсчета как абсолютно эквивалентные. Разница между этими двумя точками зрения чисто эпистемологическая. С точки зрения физических предсказаний и построения теорий они полностью эквивалентны. Со своей стороны, я предпочитаю точку зрения проф. Пуанкаре, поскольку привык мыслить в

терминах эфира и абсолютного времени и не вижу никакой пользы в отказе от этих привычных понятий.<sup>114</sup>

Это воображаемое обсуждение электродинамики движущихся тел может помочь оценить относительную силу позиций различных континентальных экспертов. В 1906 году ни одна из их теорий не была однозначно опровергнута, и все они могли быть рационально обоснованы. Однако легче всего было защищать теории Пуанкаре и Эйнштейна. Абрахам по-прежнему занимал сильную позицию, в основном благодаря последнему результату Кауфмана. Авторитет Кона и Бухерера зависел от их способности завершить свои теории, которые не охватывали столь обширного круга вопросов, как у их конкурентов. Их попытки были, по сути, изолированными, в то время как теории Пуанкаре, Эйнштейна и Лоренца были глубоко взаимосвязаны, а теория Абрахама имела ряд последователей в Геттингене и других местах. Таким образом, для неавантюрного теоретика 1906 года оставались бы две экспериментально различимые возможности: электромагнитное мировоззрение Абрахама или принцип относительности Пуанкаре-Эйнштейна-Лоренца.

У сторонников принципа относительности оставался выбор между двумя альтернативами: новой кинематикой Эйнштейна и теорией эфира Пуанкаре-Лоренца. В улучшенном варианте, представленном в Сорбоннских лекциях Пуанкаре 1906-7 гг. и в большинстве последующих работ Лоренца, последняя теория была эквивалентна эйнштейновской как эмпирически, так и программно. Например, Пуанкаре больше не обращался к уравнениям Максвелла-Лоренца для вывода преобразования Лоренца: теперь он объединил свою процедуру синхронизации с сокращением Лоренца. И он больше не основывал свою электронную динамику электрона на конкретной модели электрона: как и Эйнштейн, он напрямую использовал инвариантность Лоренца. Единственное оставшееся различие заключалось в сохранении эфира как привилегированной системы отсчета. Это было делом эпистемологического вкуса.

Теперь должно быть понятно, что превосходство взглядов Эйнштейна только ретроспективно. В 1906 г. можно было обоснованно придерживаться ряда альтернативных точек зрения в соответствии с расходящимися интересами основных действующих лиц. В соответствии с этим фактом современные историки происхождения СТО отказались рассматривать основополагающий текст Эйнштейна как самоочевидную истину. Хотя умные читатели Эйнштейна, вероятно, поняли большинство его замыслов, они вполне могли отвергнуть часть из них и отсеять те аспекты, которые могли бы быть с пользой использованы в их собственных исследованиях. Процесс завоевания новой кинематикой

немецкой элиты был постепенным, сложным и окольным. Он включал в себя такие разные обстоятельства, как оперативная поддержка Макса Планка, эксперименты Бухерера с электронным отклонением в 1908 году, предложенный в том же году четырехмерный мир Германа Минковского и предварительные приложения к моделям электрона. Объяснения требует не предполагаемая слепота читателей Эйнштейна, а те факторы, которые в конечном итоге сделали подход Эйнштейна более привлекательным, чем другие обоснованные подходы.<sup>115</sup>

<sup>96</sup> Исключениями являются Scribner 1964; Cuvaj 1970a: 77-78; и Stachel et al., *ECP2*: 308n.

<sup>97</sup> Einstein 1949: 34-36.

<sup>98</sup> Ранняя реакция Кона на статью Эйнштейна неизвестна. В дискуссии, состоявшейся в Цюрихе в 1911 году, Эйнштейн подчеркнул разницу между Лоренцем и Коном: "Теорию Кона следует рассматривать как принципиально отличную» (*ECP3*: 445, после преумножения разницы между Лоренцем и Минорским). Эйнштейн считал Cohn 1913 года «превосходным изложением» теории относительности: см. Miller 1981a: 182.

<sup>99</sup> Это рассуждение было впервые дано в Laue 1907 и воспроизведено в Einstein 1907a: 426. См. также Miller 1981a: 278-280.

<sup>100</sup> см. Gans, 1905 год. Лауэ критикует расчеты Ганса: см. Darrigol 1995b: примечание 37.

<sup>101</sup> Пуанкаре приводил доводы в пользу индуктивного характера принципов, например, в Poincare 1904b: 301: «Эти принципы – результаты обобщения экспериментов; но они, кажется, извлекают из своей общности высокую степень уверенности

<sup>102</sup> Пуанкаре никогда публично не комментировал теорию Эйнштейна. После встречи с ним на конференции в Сольве в 1911 году Эйнштейн сообщил своему другу Цангеру: «Пуанкаре [sic] в целом был просто антагонистичен и, несмотря на всю свою остроту, демонстрировал слабое понимание ситуации» (Einstein to Zangger, 15 November 1911, *ECP5*: 308)

<sup>103</sup> см. Poincare 1908: 567. Точнее, Пуанкаре вывел сокращение Лоренца из соглашения о том, что длины измеряются по времени, которое проходит свет, чтобы пройти через них, и по отрицательному результату эксперимента Майкельсона-Морли. Однако последний результат может быть получен из принципа относительности.

<sup>104</sup> Einstein 1905b: 892: «Для того, чтобы словесно отличить эту систему координат от других, которые будут введены позже, и для точности представления (*Vorstellung*) мы называем это «системой в состоянии покоя».

<sup>105</sup> Пуанкаре в 1908 году рассуждал аналогичным образом для защиты ньютоновской механики.

<sup>106</sup> Похоже, что Пуанкаре рассуждал в этих терминах по аналогии с защитой евклидовой геометрии: см. Pate 1993: 264-271.

<sup>107</sup> Такие аргументы можно найти, например, в Abraham 1908.

<sup>108</sup> В *Naturforscherversammlung* 1906 года Планк был единственным физиком, поддержавшим теорию Эйнштейна. Другие предпочитали электромагнитное мировоззрение, которое они считали более прогрессивным. Зоммерфельд заявил: «Я подозреваю, что джентльмены в возрасте до 40 лет предпочли бы электродинамический постулат, а те, кто старше сорока – постулат механико-релятивистский». (PZ7 (1906): 759-761). См. также Jungnickel and McCormmach 1986, Vol. 2: 250.

<sup>109</sup> Это мнение выражено в Poincare 1908: 572.

<sup>110</sup> см. Einstein 1907a: 439: "По моему мнению, небольшая вероятность должна быть приписана этим теориям [Абрахама и Бухерера], поскольку их фундаментальные предположения о массе движущегося электрона не подтверждаются теоретическими

системами которые охватывают более широкие комплексы явлений. "

<sup>111</sup> Einstein, 1905a. Эта точка зрения выражена в Einstein 1907b.

<sup>112</sup> Нет комментариев Эйнштейна по теории относительности Бухерера.

<sup>113</sup> ср. Планк 1906: 753-761.

<sup>114</sup> Реакция Лоренца на теорию относительности Бухерера неизвестна. Тем не менее, он имел хорошее мнение о работах Бухерера в целом, как показывает отчет, который он написал после 1908 года (АНQR, после писем Бухерера-Лоренца). Возражение Лоренца в отношении электрона Абрахама содержится в Lorentz 1909: 218-419. За его (запоздалое) мнение о вкладе Пуанкаре, см. Lorentz, 1914: 258-66. За его мнение о теории Эйнштейна, см., например, Lorentz 1909: 223-30; и 1920: 23, цитируемый в Pais 1982: 166: "Совершенно очевидно, что эти концепции относительности, в том числе относящиеся ко времени, нашли такое быстрое признание. Принятие этих концепций относится главным образом к эпистемологии [...]. Несомненно, однако, что это в значительной степени зависит от того, как человек привык думать, больше всего его привлекает та или иная интерпретация. Что касается этого лектора, он находит определенное удовлетворение в более старых интерпретациях, согласно которым эфир обладает, по крайней мере, некоторой материальностью, пространство и время могут быть резко отделены, и об одновременности без дальнейшего уточнения можно говорить". О интерпретации Лоренцем преобразования Лоренца после 1905 года, см. Janssen 1995: 240-290.

<sup>115</sup> см. Warwick 1989, 1992, 1993a; Staley 1992; Walter 1996, 1999.

## 9.6 Выводы

На рубеже веков теория Лоренца считалась наилучшей основой для интеграции атомизма в электродинамику. Однако отношение физиков к этой теории существенно различалось. Понять это разнообразие можно, лишь обратившись к предшествующей истории континентальной электродинамики.

Прежде всего, вспомнить старое противопоставление конструктивных, микрофизических подходов к электродинамике (Вебер) и более феноменологических (Нейман, Кирхгоф). В конце века аналогичный контраст существовал и в немецкой физике в целом. Хорошо известны горячие споры о пользе кинетической теории молекул. В электродинамике был похожий антагонизм между неовеберизмом Лоренца и Вихерта с одной стороны, и позитивизмом Кона и Фойгта, с другой. Если электронные теории были нацелены на детальную микроскопическую картину мира, то Кон избегал любых микрофизических предположений и модифицировал макроскопические уравнения поля в соответствии с экспериментальными потребностями. С помощью этой стратегии он получил электродинамику, включающую все классические результаты оптики движущихся тел, в том числе результаты Физо и Майкельсона-Морли. Другие эксперты уважали эту теорию, хотя они обычно принимали электронную картину материи.

Континентальная электродинамика также отметилась столкновением отечественных и максвелловских концепций. Противостояние с радикальной новизной британских полевых концепций вызвало

эпистемологические размышления и возобновило проблему механического редукционизма. Большинство континентальных физиков скептически отнеслись к британским попыткам детальной механической картины эфира. Некоторые из них, как Кон, отвергали любую редукцию во имя экономии мышления Маха. Чаще всего они принимали умеренный вид механического редукционизма, начало которому положили Максвелл и Гельмгольц. Максвелл и Гельмгольц стремились подвести физику под общие принципы механики: сохранение энергии, наименьшее действие, равенство действия и реакции.

В конце века Анри Пуанкаре стал наиболее глубоким защитником этой "физики принципов". Весьма оригинально он сочетал веру в общие принципы механики со скептицизмом в отношении эфира. По его мнению, эфир не может обладать такими грубыми материальными атрибутами, как инерция и импульс. Он требовал, чтобы принцип относительности и принцип реакции распространялись только на вещность. С помощью этого критерия он диагностировал серьезный кризис электродинамики: ни одна из известных теорий, даже теория Лоренца, не могла объяснить эксперимент Физо, не противореча двум принципам. Вера Пуанкаре в принцип относительности имела и другое следствие. Он увидел, что скорость света, измеренная движущимися наблюдателями, может быть такой же, как и у наблюдателей, находящихся в покое, и использовал этот критерий для определения кажущейся одновременности в движущейся системе осей. Таким образом, он придал фиктивным координатам Лоренца физическое содержание и значительно упростил методику определения соответствующих состояний. Другие физики охотнее приписывали эфиру материальные атрибуты и рассматривали неудачу с обнаружением земных эффектов эфирного ветра временной. Некоторые из них, в первую очередь Вильгельм Вин и Макс Абрахам, пытались свести механику материи к электромагнетизму. Они рассматривали всю материю как состоящую из электронов, а импульс движущихся электронов - как полностью обусловленный соответствующим возмущением эфира.

Экспериментальная зависимость массы электрона от скорости, казалось, подтверждала это электромагнитное мировоззрение. Несколько молодых немецких физиков с энтузиазмом приняли его как революционную замену распадающемуся механическому мировоззрению.

Пуанкаре и Лоренц скептически относились к полной электромагнитной редукции и больше внимания уделяли продолжающимся неудачам в экспериментах с эфирным ветром. Однако они одобрили новый акцент на внутреннем строении и динамике электрона и приняли понятия электромагнитного импульса и массы. Благодаря модели сокращающегося электрона и расширению ранее созданной им техники соответствующих состояний в 1904 году Лоренцу удалось доказать



инвариантность оптических экспериментов любого порядка (но в дипольном приближении). В 1905 году Пуанкаре усовершенствовал новую теорию Лоренца, добившись точной совместимости с "постулатом относительности". Он определил группу Лоренца и потребовал, чтобы все взаимодействия, включая неэлектромагнитные, были инвариантны относительно этой группы. При этом он сохранил эфир как привилегированную, но не обнаруживаемую систему отсчета для определения "истинного" пространства и времени.

К 1905 году электродинамика движущихся тел стала популярной темой с широким спектром подходов. Физики не соглашались по таким фундаментальным вопросам, как существование эфира, необходимость чисто микроскопической теории, обоснованность принципа относительности и актуальность электромагнитного мировоззрения. Среди различных противоречивых схем были:

- чисто электромагнитная теория жесткого электрона Абрахама,
- теория сократимого электрона Лоренца,
- ее релятивистская переформулировка Пуанкаре,
- безэфирная макроскопическая теория поля без эфира Кона,
- микроскопическая теория Бухерера без поля.

В этом контексте электродинамика Эйнштейна 1905 года уже не выглядит как единичная, изолированная попытка. Большинство компонентов этой теории можно найти в современной литературе:

- Кон и Бухерер уже отвергли концепцию эфира;
- Кон критиковал различие между истинным и измеренным временем в теории Лоренца;
- Пуанкаре и Бухерер выразили свою веру в общую обоснованность принципа относительности;
- Пуанкаре имел физическую интерпретацию местного времени Лоренца и полную форму преобразования Лоренца; он обнаружил парадоксы, которые Эйнштейн позже разрешил, введя инерцию энергии. Хотя общая организация теории Эйнштейна была уникальной, ее единственным важным новшеством была реформа основных концепций пространства и времени. К этому можно добавить новый вывод преобразований Лоренца без ссылки на уравнения Максвелла, и новый вывод динамики электрона без конкретной модели. Впрочем, Пуанкаре самостоятельно использовал подобные рассуждения в своих лекциях в Сорбонне в 1906-7 гг.

Теория Эйнштейна была лишь одним из возможных вариантов. Нулевой результат Рэлея-Брейса и измерения Кауфмана на быстрых электронах не позволили резко разграничить электромагнитное мировоззрение Абрахама и принцип относительности. Ни один эксперимент в настоящем или будущем не мог в принципе решить

вопрос о понимании принципа относительности Пуанкаре и Эйнштейном, поскольку эфир Пуанкаре был строго необнаружим. Кон и Бухерер все еще надеялись, что будущие разработки заполняют пробелы в их теориях. В истории электродинамики 1905 год был годом изобилия, а не завершения. Однако представляется уместным закрыть занавес в то время, когда противоречивые исторические силы электродинамики XIX века еще продолжали действовать.

## Приложения

### Приложение 1. Силы Ампера.

#### Силы между двумя элементами тока

Формула Ампера для силы, действующей между двумя элементами тока, имеет вид

$$d^2f = (ii'(ds ds' / r^2)(\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - 1/2 \cos \alpha \cos \beta), \quad (A.1)$$

где  $i$  и  $i'$  - интенсивность двух токов в электродинамических единицах (см. Приложение 2),

$ds$  и  $ds'$  - длины двух элементов,

$r$  - расстояние между ними,

$\alpha$  и  $\beta$  - углы между элементами и соединяющей их прямой,

$\gamma$  - угол между двумя плоскостями, проходящими через эту прямую и содержащими один из элементов (см. рис. 1.3, стр. 26).

В системе Ампера сила положительна, если она притягивающая.<sup>1</sup>

Эта сила может быть пересчитана в современной векторной системе с помощью векторов  $\mathbf{l}$  и  $\mathbf{l}'$ , задающих положение двух элементов на соответствующих контурах. Вектор  $\mathbf{r}$  обозначает разность  $\mathbf{l} - \mathbf{l}'$ . По определению углов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  имеем

$$\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l} = r ds \cos \alpha,$$

$$\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}' = r ds' \cos \beta,$$

$$d\mathbf{l} \cdot d\mathbf{l}' = ds ds' (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma). \quad (A.2)$$

Следовательно, векторная форма силы Ампера, действующей на элемент  $d\mathbf{l}$ , имеет вид

$$d^2\mathbf{f} = (ii'/r)[(d\mathbf{l} \cdot d\mathbf{l}'/r^2) - 3/2(\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l})(\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}')/r^4]. \quad (A.3)$$

Третья форма закона Ампера, данная самим Ампером, использует производные расстояния  $r$  относительно криволинейных абсцисс  $s$  и  $s'$  вдоль траекторий двух линейных токов. Дифференцируя тождество  $r^2 = (\mathbf{l} - \mathbf{l}')^2$  относительно  $s$  и  $s'$ , получаем

$$\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l} = r ds \partial r / \partial s$$

$$-\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}' = r ds' \partial r / \partial s' \quad (A.4)$$

Дифференцируя первое из этих двух тождеств относительно  $s'$ , получаем

$$d\mathbf{l} \cdot d\mathbf{l}' = ds ds' [(\partial r / \partial s)(\partial r / \partial s') + r(\partial^2 r / \partial s \partial s')], \quad (A.5)$$

Следовательно, формула (A.3) эквивалентна формуле

$$d^2f = -ii' ds ds' / r^2 [r(\partial^2 r / \partial s \partial s') - 1/2(\partial r / \partial s)(\partial r / \partial s')], \quad (A.6)$$

что Амперу нравилось рассматривать как<sup>2</sup>

$$d^2f = -ii' ds ds' (2/\sqrt{r})(\partial^2 \sqrt{r} / \partial s \partial s') \quad (A.7)$$



Формуле Ампера Грассманн предпочел формулу вида

$$d^2\mathbf{f}_G = \frac{1}{2} i d\mathbf{l} \times (i d\mathbf{l}' \times \mathbf{r}) / r^3 \quad (\text{A.8})$$

которая была более простой с точки зрения его теории удлинения. При замыкании второго линейного тока эта формула эквивалентна формуле Ампера, так как разность

$$d^2\mathbf{f} - d^2\mathbf{f}_G = (d\mathbf{l}' \cdot \nabla') [\frac{1}{2} i i' \mathbf{r} (\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}) / r^3] \quad (\text{A9})$$

исчезает при интегрировании по  $\mathbf{l}'$ . Формулы (1.6) и (1.7) главы 1 непосредственно следуют из этой эквивалентности.<sup>3</sup>

В отличие от формулы Ампера, формула Грассмана не удовлетворяет равенству действия и реакции. Однако она согласуется с современной электродинамикой в приближении стационарных токов. Действительно, в электромагнитных единицах магнитное поле, создаваемое элементом тока  $i' d\mathbf{l}'$ , имеет вид

$$d\mathbf{H} = (i' d\mathbf{l}' \times \mathbf{r}) / r^3 \quad (\text{A.10})$$

а сила  $d\mathbf{f}$ , действующая на элемент тока  $i d\mathbf{l}$ , помещенный в магнитное поле  $\mathbf{H}$ , равна

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{H}. \quad (\text{A. 11})$$

Объединение этих двух формул дает формулу Грассмана (A.8) с точностью до половины коэффициента, соответствующего переходу от электродинамических единиц к электромагнитным (см. Приложение 2). В остальных частях данного приложения используются электромагнитные единицы.

<sup>1</sup> Ampere 1822d: 418; Ampere 1826b: 21,44.

<sup>2</sup> Ampere [1822c]: 1826b: 44.

<sup>3</sup> Grassmann 1845.

### Эквивалентность между магнитами и системами токов

Теория магнитов Ампера основывалась на эквивалентности концов бесконечно тонких соленоидов и магнитных полюсов. Эта эквивалентность вытекает из более фундаментального факта: механические действия между двумя жесткими бесконечно малыми токовыми контурами идентичны действиям между двумя магнитными диполями. Если рассматривать соленоид как совокупность мелких контуров, то он эквивалентен линейной последовательности диполей постоянной силы или двум полюсам, расположенным на его концах.<sup>4</sup>

Основной факт может быть доказан в два этапа. Сначала рассмотрим действие произвольной замкнутой системы токов на бесконечно малом, жестком и плоском контуре. Оно задается интегрированием формулы (A.11), причем вектор  $\mathbf{H}$  задается интегрированием (A.10) (теоретико-полевая интерпретация  $\mathbf{H}$  здесь не нужна). Рассмотрим, несколько анахронично, работу  $\delta W$ , производимую силами (A. 11), когда контур подвергается смещению высшего бесконечно малого порядка (перевод, поворот или то и другое). Называя  $d\mathbf{l}$  смещением элемента  $d\mathbf{l}$  контура при

этом смещении, имеем

$$\delta W = \oint i \delta \mathbf{l} \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{H}) = \oint i \mathbf{H} \cdot (\delta \mathbf{l} \times d\mathbf{l}). \quad (\text{A.12})$$

Последний интеграл представляет собой поток вектора  $i\mathbf{H}$ , входящий в поверхность, охваченную контуром при его перемещении (см. рис. А.1).

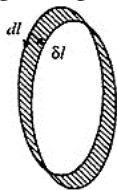


Рис. А. 1. Смещенная петля.

Поскольку  $\mathbf{H}$  бездивергентен, этот поток также равен изменению потока  $i d\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}$  по поверхности  $d\mathbf{S}$  уонтура во время его смещения. Следовательно, механическое воздействие на контур происходит от потенциала  $-i d\mathbf{S} \cdot \mathbf{H}$ , который равен потенциалу магнитного диполя  $\mathbf{M} = i d\mathbf{S}$  в магнитном поле  $\mathbf{H}$ .

На втором шаге мы далее предполагаем, что ток  $i'$  проходит по второму бесконечно малому, плоскому и жесткому контуру. Мы передадим этот цикл переводу  $\delta \mathbf{l}'$  высшего бесконечно малого порядка. Имеют место следующие тождества:

$$\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{l}' = \oint i' \delta \mathbf{l}' \cdot (d\mathbf{l}' \times \mathbf{r}) / r^3 = (\oint i' \mathbf{r} / r^3) (\delta \mathbf{l}' \times d\mathbf{l}') \quad (\text{A.13})$$

Поле  $\mathbf{r} / r^3$  бездивергентное в окрестности петли, последний интеграл равен изменению потока  $i' d\mathbf{S}' \cdot \mathbf{r} / r^3$  через поверхность  $d\mathbf{S}'$  контура во время его перемещения. Следовательно,  $\mathbf{H}$  является градиентом этой величины относительно  $\mathbf{l}'$  или градиентом ее противоположности относительно  $\mathbf{l}$ . Поэтому  $\mathbf{H}$  имеет ту же форму, что и сила магнитного диполя  $\mathbf{M}' = i' d\mathbf{S}'$ , которая выводится из потенциала  $\mathbf{M}' \cdot \nabla' (1/r) = \mathbf{M}' \cdot \mathbf{r} / r^3$ . Этот результат завершает доказательство эквивалентности.

<sup>4</sup> Ampère 1826b: 73-83.

## Приложение 2. Абсолютные единицы

В электростатической системе единиц единица заряда такова, что сила  $f$  между двумя точечными зарядами  $q$  и  $q'$ , разделенными расстоянием  $r$ , определяется просто  $f = qq' / r^2$ . Тогда единица тока определяется переносом единичного заряда за единицу времени.<sup>5</sup>

В электродинамической системе единиц единица тока такова, что закон Ампера (А.1) выполняется без дополнительного числового коэффициента. Тогда единица заряда определяется как заряд, переносимый единичным током за единицу времени.<sup>6</sup>

В электромагнитной системе сначала определяется единичный магнитный полюс, так что два единичных полюса, разделенные единичной длиной, действуют друг на друга с единичной силой. Затем выбирается единица тока так, чтобы сила  $df$  между магнитным полюсом с силой  $m$  и элементом тока  $i dl$  на расстоянии  $r$  была равна  $midl / r^2$ , когда

элемент нормален к линии, соединяющей его с полюсом. Единица заряда выбирается следующим образом.<sup>7</sup>

Из сравнения уравнения (А.8), вытекающего из закона Ампера в электродинамических единицах, с уравнениями (А.10) и (А.11), справедливыми в электромагнитных единицах, следует, что электромагнитная единица тока в  $\sqrt{2}$  раз больше электродинамической единицы тока. Из анализа размерности закона Ампера и закона Кулона следует, что отношение электромагнитной единицы тока (или заряда) к электростатической единице тока (или заряда) имеет размерность скорости. В данной книге эта константа обозначается буквой  $c$  (это не нотация Вебера!). В теории Максвелла она должна быть равна скорости света в вакууме. Очень большое значение  $c$  ( $3 \times 10^8$  м/с) означает, что заряды, передаваемые гальваническими токами, огромны по сравнению с зарядами, создаваемыми электростатическим способом.

Усложняет ситуацию то, что для электростатической меры тока Вебер рассматривал только поток положительного электричества, который в два раза меньше переноса заряда в картине Фехнера-Вебера, представляющей ток как симметричный двойной поток. Тогда константа  $a$ , которая у Вебера (Weber 1846: 115) давала отношение электродинамической и электростатической меры тока, на самом деле в два раза меньше

обычного определения этого отношения. Следовательно,  $a = 2\sqrt{2}/c$ . В 1850 году (Weber 1850: 268) Вебер использовал константу  $C = 4/a = c\sqrt{2}$ , поскольку сила Вебера между двумя электрическими частицами исчезает, когда их относительная скорость равна  $C$  и их относительное ускорение исчезает. Хотя он обозначил последнюю константу как  $c$ , я назвал ее  $C$ , чтобы избежать путаницы с современным обозначением скорости света.

<sup>5</sup> Weber 1850: 267-270.

<sup>6</sup> Weber 1846: 51-60.

<sup>7</sup> Weber 1846.

### Приложение 3. Потенциал Неймана

Назовем  $\mathbf{E}$  электродвижущей силой, индуцированной в элементе  $d\mathbf{l}$  линейного проводника, движущегося со скоростью  $\mathbf{v}$  вблизи постоянных токов или покоящихся магнитов. В современной векторной системе счисления "элементарный закон Неймана" (уравнение 2.1) имеет вид

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\epsilon \mathbf{v} \cdot d\mathbf{f}_1 \quad (\text{А.14})$$

где  $d\mathbf{f}_1$  - электромагнитная сила, которая действовала бы на элемент, если бы в нем протекал единичный электрический ток. В отличие от Неймана, я выбираю электромагнитные единицы, для которых постоянная  $\epsilon$  равна единице.<sup>8</sup>

При замыкании действующих токов или при наличии магнита, согласно следствию (А.11) из закона Ампера, сила  $d\mathbf{f}_1$  равна  $d\mathbf{l} \times \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{H}$

- сила, действующая на единичный магнитный полюс. Получаем:

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\mathbf{v} \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{H}) = d\mathbf{l} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{H}) \quad (\text{A.15})$$

так что<sup>9</sup>

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{H}. \quad (\text{A.16})$$

Интеграл по времени электродвижущей силы, действующей в незамкнутом линейном проводнике, можно записать так

$$\int_{\Sigma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \iint_{\Sigma} (\mathbf{v} dt \times \mathbf{H}) \cdot d\mathbf{l} = \iint_{\Sigma} \mathbf{H} \cdot (d\mathbf{l} \times \delta\mathbf{l}), \quad (\text{A.17})$$

где  $\delta\mathbf{l}$  - вектор, на который переводится точка проводника за время  $dt$ , а  $\Sigma$  - поверхность, охватываемая проводником. Другими словами, индуцированная ЭДС пропорциональна числу магнитных силовых линий, пересекаемых проводником, в соответствии с правилом Фарадея.

Нейман, естественно, игнорировал подобные представления о поле. Вместо этого он ввел потенциал  $P$ , из которого вытекают силы, действующие на проводник с током. В случае двух взаимодействующих линейных контуров с токами  $i$  и  $i'$  этот потенциал имеет вид

$$P = -ii' \oint \oint d\mathbf{l}' \cdot d\mathbf{l} / |\mathbf{l} - \mathbf{l}'| \quad (\text{A.18})$$

в электромагнитных единицах (Нейман использовал электродинамические единицы Ампера, для которых в формулу потенциала входит коэффициент половина).<sup>10</sup> В общем случае электродинамический потенциал цепи по отношению к другим токам или магнитам имеет вид

$$P = -i \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (\text{A.19})$$

которую Нейман, однако, не использовал. Изменение этого потенциала при виртуальной деформации  $\delta\mathbf{l}$  контура имеет вид

$$\delta P = -i \oint \delta \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} - i \oint \mathbf{A} \cdot d\delta\mathbf{l}. \quad (\text{A.20})$$

Частичное интегрирование второго интеграла дает

$$\delta P = -i \oint \delta\mathbf{l} \cdot [\nabla(\mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}) - (d\mathbf{l} \cdot \nabla)\mathbf{A}] = -i \oint \delta\mathbf{l} \cdot [d\mathbf{l} \times (\nabla \times \mathbf{A})]. \quad (\text{A.21})$$

Следовательно, сила, действующая на элемент  $d\mathbf{l}$ , равна

$$d\mathbf{f} = i d\mathbf{l} \times (\nabla \times \mathbf{A}), \quad (\text{A.22})$$

в соответствии со следствием (A.1) закона Ампера, если  $\mathbf{A}$  выбран так, что

$$\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (\text{A.23})$$

С использованием теоремы Стокса, интегральная электродвижущая сила (A.17) можно переписать как

$$\int_{\gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint_{\gamma} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}, \quad (\text{A.24})$$

где  $\gamma$  обозначает контур  $\Sigma$  (с соответствующей ориентацией). Отсюда следует закон индукции Неймана:

*Интеграл по времени электродвижущей силы, индуцированной в линейном проводнике, равен потенциалу единичного тока, протекающего в воображаемом контуре, состоящем из проводника в начальном положении, проводника в конечном*

положении и следов двух концов проводника во время движения.<sup>11</sup>

Применительно к замкнутому линейному проводнику этот закон означает, что интеграл ЭДС по времени равен изменению потенциала единичного тока в этом проводнике (относительно других проводников или магнитов). Это и есть "принцип Неймана", который действует и в том случае, когда причиной изменения потенциала является изменение или движение действующих токов и магнитов.<sup>12</sup>

<sup>8</sup> Neumann 1846: 13-16.

<sup>9</sup> Здесь **H** совпадает с **B** Максвелла, поскольку проницаемость среды равна единице.

<sup>10</sup> Neumann 1846: ## 10-11.

<sup>11</sup> Neumann 1846: 68.

<sup>12</sup> Neumann 1848

#### **Приложение 4. Формула Вебера и её последствия** **Основной закон**

Основной закон Вебера для пары сил между двумя частицами электрической жидкости  $e$  и  $e'$  равен<sup>13</sup>

$$f = ee'[1 - (1/2c^2)(dr/dt)^2 + (r/c^2)(d^2r/dt^2)], \quad (A.25)$$

где  $r$  - расстояние между двумя частицами и  $c$  - отношение электромагнитной единицы к электростатической единице заряда.

В соглашении Вебера положительное  $f$  означает отталкивание. Две силы направлены на линию, соединяющую две частицы. Как доказал Вебер в 1848 году, они вытекают из потенциала<sup>14</sup>

$$V = (ee'/r)(1 - \dot{r}^2/2) \quad (A.26)$$

если градиент  $dV/dr$  интерпретируется как  $(dV/d\dot{r})/(dr/dt)$ .

Следовательно, работа  $\int dr/dt$ , выполняемая двумя силами в единицу времени, равна  $-(dV/d\dot{r})(dr/dt) = -dV/dt$ . В цикле, для которого  $r$  и  $dr/dt$  возвращаются к своим начальным значениям, эта работа исчезает в соответствии с энергетическим принципом. Более того, силы Вебера подчиняются уравнению Лагранжа<sup>15</sup>

$$f = \partial L / \partial r + (d/dt)(\partial L / \partial \dot{r}) \quad (A.27)$$

где

$$L = (ee'/r)(1 + \dot{r}^2/2c^2) \quad (A.28)$$

#### **Вывод закона Ампера**

Рассмотрим два линейных проводника с токами  $i$  и  $i'$ . Эти токи представляют собой двойные потоки положительного и отрицательного электричества. Используются следующие обозначения:  $\lambda_+$  - плотность положительной жидкости в первом токе,  $u_+$  - ее скорость и т.д. Сила, действующая между двумя элементами тока  $ids$  и  $i'ds'$ , складывается из суммы сил между включенными в нее частицами текучей среды:

$$d^2f = (-ds ds' / r^2) \sum_{ee'} \lambda_e \lambda_{e'} (1 - \dot{r}^2/2c^2 + r \ddot{r}/c^2) \varepsilon \varepsilon' \quad (A.29)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon'$  обозначают знаки частиц текучей среды (глобальное изменение

знака соответствует условию Ампера, согласно которому сила притяжения положительна). С криволинейной нотацией Ампера мы имеем

$$\dot{r} = u_\varepsilon \partial r / \partial s + u'_\varepsilon \partial r / \partial s',$$

$$\ddot{r} = u_\varepsilon^2 \partial^2 r / \partial s^2 + u'^2_\varepsilon \partial^2 r / \partial s'^2 + 2 u_\varepsilon u'_\varepsilon \partial^2 r / \partial s \partial s' + \dot{u}_\varepsilon \partial r / \partial s + \dot{u}'_\varepsilon \partial r / \partial s'. \quad (\text{A.30})$$

Если суммарный заряд двух проводников ( $\lambda_+ + \lambda_- = 0$ ,  $\lambda'_+ + \lambda'_- = 0$ ), то остаются только члены, пропорциональные  $u_\varepsilon u'_\varepsilon$ . Результирующая исчезающая сила имеет вид

$$d^2 f = - (2i\dot{u}/c^2)(ds ds' / r^2) [r (\partial^2 r / \partial s \partial s') - 1/2 (\partial r / \partial s) (\partial r / \partial s')] \quad (\text{A.31})$$

что позволяет получить форму (А.6) закона Ампера с учетом коэффициента  $2/c^2$ , соответствующего различному выбору единиц измерения (электростатические в приведенном выше рассуждении, электродинамические в формуле Ампера). Заметим, что в этом выводе не требуется, чтобы токи были постоянными.<sup>16</sup>

Если суммарный заряд  $\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$  первого проводника не исчезает, то возникают два дополнительных вклада в действующую силу. Первый - от членов, пропорциональных  $du_\varepsilon/dt$ . Эта сила соответствует в теории Максвелла действию электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля тока во втором проводнике. Этот эффект очень мал, поскольку электростатические заряды всегда очень малы, если измерять их в электромагнитных единицах. Вклад дает и член, пропорциональный  $\lambda'_\varepsilon u'^2_\varepsilon$ . Его порядок величины

$$(ds ds' / r^2) (1/c^2 \lambda) (\lambda'_+ u'^2_+ + \lambda'_- u'^2_-) \quad (\text{A.32})$$

Если, как первоначально предполагали Фехнер и Вебер, "+" и "-" электричество движутся с равными и противоположными скоростями, то эта сила исчезает.

Однако в более поздних работах Вебер и его ученики допускали неравенство скоростей. Тогда между покоящимся электрическим зарядом и током должно существовать взаимодействие. Такого взаимодействия не наблюдалось, поэтому Максвелл и Клаузиус утверждали, что несимметричное движение электричества несовместимо с законом Вебера. Они ошибались. Предположим, например, что движется только отрицательное электричество (как это имеет место в металлах). Тогда в электромагнитных единицах новая сила имеет вид

$$qi^2 ds' / r^2 \varrho \cdot S,$$

где  $q$  - заряд первого проводника,

$S$  - сечение второго проводника, и

$\varrho$  - плотность заряда текущей среды в нем.

Приняв значение этой плотности из эффекта Холла в меди ( $\varrho = 10^{10}$  кулон/м<sup>3</sup>), получим силу порядка  $10^{-12}$  ньютонов для типичных лабораторных значений переменных:  $q = 10^{-10}$  кулон,  $i = 1$  ампер,  $ds' = r = 1$  см и  $S = 1$  мм<sup>2</sup>. Эта сила настолько мала, что испытания, проведенные в 1970-х (!), остались безрезультатными. Тем более, она не

могла противоречить закону Вебера в 1870-х.<sup>17</sup>

<sup>13</sup> Weber 1846: 108,119.

<sup>14</sup> Weber 1848a.

<sup>15</sup> См. Riemann 1875 [1861]: 318.

<sup>16</sup> Доказательства Вебера предполагают симметричный двойной поток Фехнера.

Доказательство, данное в Weber 1846: 154-8, не предполагает постоянства токов.

<sup>17</sup> Maxwell 1873a: ## 847-8; Клаузиус 1877a. См. также Assis 1994: 168.

### Электромагнитная индукция переменным током

Электродвижущая сила - это «разделяющая сила» двух электричества, то есть разница между силой, действующей на положительную единицу заряда, минус сила, действующая на отрицательную единицу заряда. В случае двух линейных проводников ЭДС, создаваемая в первом проводнике элементом  $d\mathbf{l}'$  второго проводника, равна

$$dE = (\mathbf{r}/r)(ds'/r^2) \sum_{\epsilon\epsilon'} \lambda'_{\epsilon'} (1 - r^2/2c^2 + \mathbf{r}\dot{\mathbf{r}}'/c^2)_{\epsilon\epsilon'} \quad (\text{A.33})$$

Пока оба проводника находятся в состоянии покоя, мы можем использовать выражения (A.30) для производных по времени от  $r$ . Если предположить симметричное движение двух электричеств

$$(u_+ + u_- = u'_+ + u'_- = 0)$$

и нулевой суммарный заряд второго проводника  $(\lambda'_+ + \lambda'_- = 0)$ , то в сумму войдут только члены, пропорциональные  $\lambda'_{\epsilon'} du'_{\epsilon'}/dt$ . Их сумма равна<sup>18</sup>

$$dE = (1/c^2) (\mathbf{r}/r^3) (d\mathbf{r}'/dt) (\partial r / \partial s') ds' = - (1/c^2) [\partial (\mathbf{r}/r^3) (\mathbf{r} \cdot d\mathbf{l}') / \partial t] \quad \text{A.34}$$

Трехмерное обобщение последней формулы

$$\mathbf{E} = - (1/c^2) (\partial \mathbf{A} / \partial t) \quad (\text{A.35})$$

где

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \int d^3x' [(\mathbf{x} - \mathbf{x}') / |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3] (\mathbf{x} - \mathbf{x}') \cdot \mathbf{j}'(\mathbf{x}') \quad (\text{A.36})$$

Это выражение Кирхгофа векторного потенциала<sup>19</sup> может быть переписан как

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \int [\mathbf{j}(\mathbf{x}') d^3x' / |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|] + \nabla \psi, \quad (\text{A.37})$$

где

$$\psi = - \int [\mathbf{j}(\mathbf{x}') \cdot \nabla (|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|) d^3x' = - \int \nabla' \cdot \mathbf{j}(\mathbf{x}') |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| d^3x'. \quad (\text{A.38})$$

При замыкании индукционных токов последний интеграл исчезает, и теория Вебера дает ту же ЭДС, что и теория Неймана.<sup>20</sup>

Если мы больше не предполагаем симметричного протекания двух электричеств и если собственный электрический заряд второго проводника не исчезает, то появляется несколько новых вкладов в ЭДС. Однако до тех пор, пока скорость движения электрических текущих сред остается малой долей  $c$  (эффект Холла в меди дает скорость  $10^{-4}$  м/с для тока  $1$  а/мм<sup>2</sup>), эти вклады пренебрежимо малы, за исключением чисто электростатических членов, которые в сумме составляют  $-\nabla \phi$ , где  $\phi$  - электростатический потенциал собственного заряда.

## Электромагнитная индукция из-за относительного движения проводников

Пусть элемент  $d\mathbf{l}$  движется со скоростью  $\mathbf{v}$ , а элемент тока  $i'd\mathbf{l}'$  находится в покое, а ток  $i'$  сохраняется постоянным. В этом случае к выражениям (А.30) производных по  $r$  необходимо добавить

$$\begin{aligned}\delta\dot{\mathbf{r}} &= \mathbf{v} \partial r / \partial \sigma, \\ \delta\dot{\mathbf{r}} &= \dot{\mathbf{v}} \partial r / \partial \sigma + v^2 \partial^2 r / \partial \sigma^2 + 2u_\epsilon v \partial^2 r / \partial s \partial \sigma + 2u'_\epsilon v \partial^2 r / \partial s' \partial \sigma'\end{aligned}\quad (\text{А.39})$$

где  $\sigma$  обозначает криволинейную абсциссу на пути элемента  $d\mathbf{l}$   
 $\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{v} \partial \mathbf{v} / \partial \sigma + u'_\epsilon \partial \mathbf{v} / \partial s$ .

Когда второй проводник не имеет собственного заряда, единственными членами, вносящими вклад в ЭДС (А.33), являются члены, пропорциональные  $u'_\epsilon v$ . Они имеют ту же форму, что и члены, пропорциональные  $u_\epsilon u'_\epsilon$ , которые дают силу Ампера. Поэтому ЭДС формально совпадает с силой, действующей на элемент тока  $id\mathbf{l} = \mathbf{v}$  в соответствии с законом Ампера.<sup>21</sup> При замкнутом токе  $i'$  можно воспользоваться формулой Грассмана, и ЭДС будет равна  $\mathbf{v} \times \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{H}$  определяется уравнением (А.10). Этот результат согласуется с результатами Неймана и Максвелла.

Если собственный заряд второго проводника не равен нулю, то дополнительными вкладами в электродвижущую силу можно пренебречь, если только все скорости остаются очень малыми по сравнению с  $c$  и скорость  $v$  очень мало изменяется за время  $r/c$ .

Другой случай индукции движением, когда элемент  $d\mathbf{l}'$  движется, а элемент  $d\mathbf{l}$  находится в покое, не требует отдельного исследования, поскольку силы Вебера зависят только от относительного движения частиц электрической текущей среды.

<sup>18</sup> Weber [846: 144-7.

<sup>19</sup> Kirchhoff 1857b.

<sup>20</sup> см. Helmholtz 1870b.

<sup>21</sup> Weber 1846: 128-132.

### Приложение 5. Конвективные производные. Деформации.

Рассмотрим сплошную среду, которая может деформироваться: упругое твердое тело, жидкость или электромагнитная среда Максвелла. Гельмгольц выделяет три вида величин, определяемых в каждой точке среды в зависимости от их поведения при деформации среды:

1. Плотность - такая, что ее объемные интегралы неизменны.
2. Сила - такая, что ее линейные интегралы неизменны.
3. Поток - такой, что его поверхностные интегралы неизменны.

При этом подразумевается, что области интегрирования следуют за деформацией среды. Среди полевых величин, встречающихся в данной книге, плотность электрического заряда  $\rho$  и плотность энергии являются плотностями; электрическая сила  $\mathbf{E}$ , магнитная сила  $\mathbf{H}$  и векторный



потенциал **A** - силами; электрический ток **j**, электрическое смещение **D** и магнитная индукция **B** – потоками.<sup>22</sup>

При бесконечно малой деформации  $\delta \mathbf{r}$  среды изменение плотности  $\rho$  в фиксированной точке пространства имеет вид

$$\delta \rho = -\nabla (\rho \delta \mathbf{r}), \quad (\text{A.40})$$

Изменение силы **A** равно

$$\delta \mathbf{A} = \delta \mathbf{r} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{r}), \quad (\text{A.41})$$

а изменение потока **B**

$$\delta \mathbf{B} = \nabla \times (\delta \mathbf{r} \times \mathbf{B}) - \delta \mathbf{r} (\nabla \cdot \mathbf{B}) \quad (\text{A.42})$$

Эти теоремы можно доказать следующим образом.<sup>23</sup>

Характеристическое свойство плотности имеет вид

$$0 = \oint_V \rho d\tau = - \oint_V \delta \rho d\tau + \oint_{V'} \rho d\tau - \oint_{V'} \rho \delta \tau, \quad (\text{A.43})$$

где  $V$  и  $V'$  - объемы интегрирования до и после деформации.

Как видно из рис. A.2, имеем

$$\oint_{V'} \rho d\tau - \oint_V \rho d\tau = \oint_{\partial V} \rho d\mathbf{r} \cdot d\mathbf{S} = \oint_V \nabla \cdot (\rho d\mathbf{r}) d\tau, \quad (\text{A.44})$$

где  $\partial V$  обозначает поверхность, ограничивающую  $V$ . Поскольку эти тождества справедливы для любого  $V$ ,  $\delta \rho$  должно быть таким, как указано в уравнении (A40).

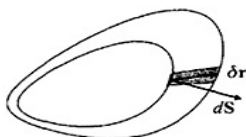


Рис. A.2. Разрез объемной деформации.

Объем заштрихованного элемента составляет  $\delta \mathbf{r} \cdot d\mathbf{S}$ .

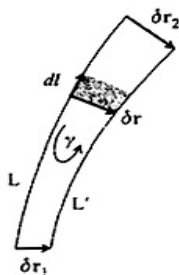


Рис. A.3. Деформация линии L.

Поверхность заштрихованного элемента  $\delta \mathbf{r} \times d\mathbf{l}$ .

Характеристическое свойство силы

$$0 = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \oint_{L'} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} - \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}, \quad (\text{A.45})$$

где  $L$  и  $L'$  - линии интегрирования до и после деформации. Как видно из рис. A.3, мы имеем

$$\oint_{L'} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} - \oint_L \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \oint_\gamma \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} - \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{r}_1 + \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{r}_2 = \oint_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot (\delta \mathbf{r} \times d\mathbf{l}) + \oint_L \nabla (\mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l}, \quad (\text{A.46})$$

где  $\gamma$  - замкнутый путь, состоящий из  $L'$ ,  $-L$ ,  $\delta\mathbf{r}_1$  и  $-\delta\mathbf{r}_2$ , а  $S$  - поверхность, ограниченная этим путем. Интеграл поверхностного интеграла может быть преобразован в соответствии с формулой

$$(\nabla \times \mathbf{A}) \cdot (\delta\mathbf{r} \times d\mathbf{l}) = d\mathbf{l} \cdot [(\nabla \times \mathbf{A}) \times \delta\mathbf{r}]. \quad (\text{A.47})$$

Следовательно, тождество (A.45) будет справедливо для любого  $L$  тогда и только тогда, когда  $\delta\mathbf{B}$  имеет вид, данный в уравнении (A.42)

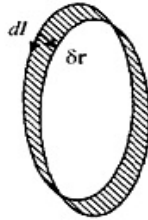


Рис. А.4. Деформация поверхности.

Характеристическое свойство потока имеет вид

$$0 = \delta \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \delta\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} + \int_{S'} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} - \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (\text{A.48})$$

где  $S$  и  $S'$  - поверхности интегрирования до и после деформации. Как видно из рис. А.4, имеем

$$\int_{S'} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} - \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} - \int_{\partial S} \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{l} \times \delta\mathbf{r}), \quad (\text{A.49})$$

где  $\partial S$  - линия, ограничивающая  $S$ ,  $\Sigma$  - замкнутая поверхность, состоящая из  $S$ ,  $S'$  и следа  $\partial S$ . Называя  $V$  объемом, ограниченным  $\Sigma$ , имеем далее

$$\oint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{B} d\tau = \int_S (\nabla \cdot \mathbf{B}) \delta\mathbf{r} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{A.50})$$

и

$$\int_{\partial S} \mathbf{B} \cdot (d\mathbf{l} \times \delta\mathbf{r}) = \int_{\partial S} d\mathbf{l} \cdot (\delta\mathbf{r} \times \mathbf{B}) = \int_{S'} [\nabla \times (\delta\mathbf{r} \times \mathbf{B})] \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{A.51})$$

Объединяя эти тождества, получаем

$$\int_S \delta\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} + \int_S [\delta\mathbf{r}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla \times (\delta\mathbf{r} \times \mathbf{B})] \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{A.52})$$

Это будет справедливо для любой поверхности  $S$  тогда и только тогда, когда справедливы формулы (A.42)

<sup>22</sup> Helmholtz, 1892: 491-497

<sup>23</sup> Формулы для силы и потока неявно содержатся в Maxwell 1861. 479-482. Тем не менее, первое явное доказательство в Maxwell 1873а: # 602 для силы (А), и в Helmholtz 1874а: 730-734 для потока. Следующие доказательства являются моими (Гельмгольц рассуждал о бесконечно малых элементах).

### Производные

Рассмотрим движущуюся среду со скоростью  $\mathbf{v}$ . По определению, конвективная производная величины - это ее производная по времени относительно фиксированной точки среды. Она равна производной по отношению к фиксированной точке пространства (т.е. частной производной  $\partial/\partial t$ ) минус скорость изменения величины за счет деформации среды. Следовательно, конвективная производная :

- ПЛОТНОСТИ

$$D\rho/Dt = \partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}). \quad (\text{A.53})$$

- СИЛЫ

$$D\mathbf{A}/Dt = \partial\mathbf{A}/\partial t - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + \nabla(\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}). \quad (\text{A.54})$$

- ПОТОКА

$$D\mathbf{B}/Dt = \partial\mathbf{B}/\partial t - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{B}). \quad (\text{A.55})$$

### Приложение 6. Система напряжений Максвелла

В соответствии с идеей Фарадея о натяжении вдоль и взаимном отталкивании силовых линий Максвелл вывел механические силы электрического и магнитного происхождения из системы напряжений.<sup>24</sup>

$$\sigma_{ij} = D_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + B_i H_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \quad (\text{A.56})$$

Для изотропной среды результирующая плотность силы равна  $\partial i \sigma_{ij}$  в тензорной записи, или

$$\mathbf{f} = \mathbf{E}(\nabla \cdot \mathbf{D}) + (\nabla \times \mathbf{H}) \times \mathbf{B} + (\nabla \times \mathbf{E}) \times \mathbf{D} - \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} \nabla \varepsilon / \varepsilon - \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \nabla \mu / \mu \quad (\text{A.57})$$

в векторной записи.

Для гомогенной среды в состоянии покоя это составляет

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \partial(\mathbf{D} \times \mathbf{B})/\partial t. \quad (\text{A.58})$$

Первая часть - электрическая сила, вытекающая из максвелловского определения электрического поля  $\mathbf{E}$ .<sup>25</sup>

Вторая часть вместе с  $(\partial \mathbf{D} / \partial t) \times \mathbf{B}$  является электродинамической силой, вытекающей из динамических рассуждений Максвелла. Хевисайд добавил очень малую "магнитоэлектрическую силу"  $\mathbf{D} \times (\partial \mathbf{B} / \partial t)$ , необходимую для баланса энергии, если "магнитная движущая сила"  $\mathbf{D} \times \mathbf{v}$  включена в уравнение магнитной циркуляции.<sup>26</sup>

В более общем виде Герц и Хевисайд показали, что в полной максвелловской электродинамике движущегося тела из сохранения энергии следует, что механические силы электрического и магнитного происхождения вытекают из системы напряжений Максвелла. Общие уравнения поля Хевисайда имеют вид

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mathbf{E} - \mathbf{e}_0) &= -\mathbf{G}, \\ \nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{h}_0) &= \mathbf{J}, \end{aligned} \quad (\text{A.59})$$

где  $\mathbf{e}_0$  и  $\mathbf{h}_0$  - приложенные силы,  $\mathbf{G}$  - полный "магнитный ток",  $\mathbf{J}$  - полный электрический ток. Эти токи определяются как

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= D\mathbf{B}/Dt \\ \mathbf{J} &= \mathbf{j} + D\mathbf{D}/Dt \end{aligned} \quad (\text{A.60})$$

где  $D/Dt$  - конвективная производная (A.55) от потока. Работа вынуждающих сил имеет вид

$$\mathbf{e}_0 \cdot \mathbf{J} + \mathbf{h}_0 \cdot \mathbf{G} = (\mathbf{e}_0 - \mathbf{E}) \cdot \mathbf{J} + (\mathbf{h}_0 - \mathbf{H}) \cdot \mathbf{G} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{G}. \quad (\text{A.61})$$

В двух первых членах правой части заменяем  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{J}$  на  $\text{rot}$  (A.59).

В двух последних членах заменяем их определениями (A.60). Развертывая конвективные производные и перегруппировывая члены, получаем

$$\mathbf{e}_0 \cdot \mathbf{J} + \mathbf{h}_0 \cdot \mathbf{G} = \partial w / \partial t + \nabla \cdot (\mathbf{\Pi} + \mathbf{u} \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - \sigma_{ij} \partial_i \mathbf{v}_j \quad (\text{A.62})$$

где  $w = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$ , (A.63) - плотность энергии поля;

$\mathbf{\Pi} = (\mathbf{E} - \mathbf{e}_0 \times (\mathbf{H} - \mathbf{h}_0))$  (A.64) - вектор Пойнтинга;

$\sigma_{ij}$  (A.56) - система напряжений Максвелла.

Иначе говоря, работа вынуждающих сил в единицу времени равна изменению энергии поля плюс внешний поток энергии тока (включающий конвективную составляющую), плюс тепло Джоуля, выделяемое в проводниках, плюс работа максвелловских напряжений.<sup>27</sup>

<sup>24</sup> Maxwell 1861: 456 для системы магнитных напряжений; Maxwell 1873a: № 105-111 для системы электрических напряжений.

<sup>25</sup> Определение в Maxwell 1873a: # 68. Тем не менее, там же: № 619, Максвелл ошибочно написал -  $\rho \nabla \phi$  вместо E. FitzGerald 1883b исправил его

<sup>26</sup> Heaviside 1885-7: 546; 1886-7: 175.

<sup>27</sup> Hertz 1890b: 275-85; Heaviside 1891-1892. Дифференцирование, приведенное здесь, заимствует конвективную производную Герца и общую форму баланса от Хевисайда. См. также Darrigol 1993b: 321-327.

## Приложение 7

### Электродинамика Гельмгольца

В целях экономии текста для обозначения произведения свертки двух функций используется знак \*:

$$f * g(\mathbf{r}) = \int (\mathbf{r}') g(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\tau'. \quad (\text{A.65})$$

В соответствии с выбором Гельмгольца используются электростатические единицы. В основном тексте электромагнитные единицы использовались для того, чтобы избежать обилия  $c$  в уравнениях электродинамики. Однако электростатические единицы оказываются более удобными при рассмотрении связи между поляризационной теорией Гельмгольца и теорией Максвелла.

Теория Гельмгольца основана на двух потенциалах.

- электростатический потенциал  $\phi$  определяется как

$$\phi = \rho * 1/r \quad (\text{A.66})$$

где  $\rho$  - плотность заряда;

- электродинамический потенциал  $\mathbf{A}$  определяется как

$$\mathbf{A} = \frac{1}{c} \mathbf{j} * 1/r + [(1 - \epsilon)/2] \nabla \xi \quad (\text{A.67})$$

где  $\mathbf{j}$  - ток проводимости, а

$$\xi = -\frac{1}{c} \mathbf{j} * \nabla r = - (1/c) (\nabla \cdot \mathbf{j}) * r \quad (\text{A.68})$$

Для  $\epsilon = 1$  суммарный электродинамический потенциал,

$$P = -(1/2c) \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} d\tau \quad (\text{A.69})$$

это простое расширение потенциальной формулы Неймана (A.18).

Для  $\epsilon = -1$  потенциал  $\mathbf{A}$  - это (уравнение A.36), выведенное Кирхгофом из теории Вебера. Когда все токи замкнуты ( $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ ), все варианты электродинамического потенциала становятся эквивалентными, так как функция  $\xi$  обращается в ноль.<sup>28</sup>

Механические силы электростатического происхождения имеют

объемную плотность

$$\mathbf{f}_s = -\rho \nabla \phi. \quad (\text{A.70})$$

Механические силы электродинамического происхождения имеют плотность  $\mathbf{f}_d$ , удовлетворяющую

$$-\int \mathbf{f}_d \cdot \delta \mathbf{r} = \delta P = -(1/c) \int \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{j}, \quad (\text{A.71})$$

для любой деформации  $\delta \mathbf{r}$  материальной среды.

На основании Приложения 5 изменение  $\delta \mathbf{j}$  потока  $\mathbf{j}$  является

$$\delta \mathbf{j} = \nabla \times (\delta \mathbf{r} \times \mathbf{j}) - (\nabla \cdot \mathbf{j}) \delta \mathbf{r}. \quad (\text{A.72})$$

Подставляя это выражение в предыдущую формулу и интегрируя вклад первой части по частям, получаем<sup>29</sup>

$$\mathbf{f}_d = (1/c) \mathbf{j} \times (\nabla \times \mathbf{A}) - (1/c) \mathbf{A} (\nabla \cdot \mathbf{j}) \quad (\text{A.73})$$

Движение электричества определяется законом Ома

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (\text{A.74})$$

и электродвижущей силой

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi - (1/c)(D\mathbf{A}/Dt) + \mathbf{E}_0, \quad (\text{A.75})$$

где  $\mathbf{E}_0$  - внешняя ЭДС (например, химического происхождения);

$D/Dt$  - конвективная производная (A.54) силы.

Это движение дополнительно ограничено сохранением электричества,

$$\nabla \cdot \mathbf{j} + D\rho/Dt = \nabla \cdot (\mathbf{j} + \rho \mathbf{v}) + \partial \rho / \partial t = 0, \quad (\text{A.76})$$

где  $\mathbf{v}$  обозначает скорость вещества.<sup>30</sup>

<sup>28</sup> Helmholtz 1870b: 568-569.

<sup>29</sup> Helmholtz, 1874a: 730-4.

<sup>30</sup> Helmholtz 1870b, 1874a: 742-5 (для движущихся тел).

### Сохранение энергии

Работа системы, обеспечиваемая внешним источником ЭДС в единицу времени, заключается в использовании Закона Ома,

$$\int \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}_0 d\tau = \int j^2 / 2\sigma + \int \mathbf{j} \cdot \nabla \phi d\tau + (1/c) \int \mathbf{j} \cdot (D\mathbf{A}/Dt) d\tau. \quad (\text{A.77})$$

Первый интеграл представляет тепло Джоуля. Интегрируя второй по частям и используя уравнения (A.76) для сохранения электроэнергии мы получаем

$$\int \mathbf{j} \cdot \nabla \phi d\tau = -\int \phi (\nabla \cdot \mathbf{j}) d\tau = \int \phi \partial \rho / \partial t + \int \phi \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) d\tau = 1/2 d \int \rho \phi d\tau / dt + \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{f}_s d\tau \quad (\text{A.78})$$

Здесь мы имеем дело с суммой изменения во времени электростатической энергии и работы электростатических сил.

С использованием определения конвективной производной, третий интеграл уравнения (A.77) приобретает вид

$$\begin{aligned} (1/c) \int \mathbf{j} \cdot (D\mathbf{A}/Dt) d\tau &= (1/c) \int \mathbf{j} \cdot (\partial \mathbf{A} / \partial t) d\tau - (1/c) \int \mathbf{j} \cdot (\delta \mathbf{A} / \delta \mathbf{r}) d\tau \\ &= (1/2c) d \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} d\tau / dt + (1/c) \int \mathbf{A} \cdot (\delta \mathbf{j} / \delta \mathbf{r}) d\tau \end{aligned} \quad (\text{A.79})$$

Последний интеграл равен работе, совершаемой механическими силами электродинамического происхождения, что видно из деления уравнения (A. 71) на  $\delta t$ . Предпоследний интеграл равен  $-dP/dt$ , где  $P$  - полный потенциал (A.69). Если, следуя Гельмгольцу, отождествить  $-P$  с

электродинамической энергией и сложить интерпретации свободных членов уравнения (А.77), то получится следующее утверждение сохранения энергии:

энергия, поступающая от внешних источников, равна джоулеву теплу + приращение электростатической и электродинамической энергий системы + работа электростатических и электродинамических сил.<sup>31</sup>

### **Сравнение с уравнениями Максвелла в отсутствие поляризации**

Если взять дивергенцию уравнения (А.67), то получим

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = (1/c)(\nabla \cdot \mathbf{j}) * 1/r + [(1-k)/2] \Delta \xi \quad (\text{А.80})$$

Сохранение электричества (А.76) и выражение (А.68) для  $\xi$  дают

$$\Delta \xi = -(1/c)(\nabla \cdot \mathbf{j}) * \Delta r = (2/c)(D\rho/Dt) * 1/r \quad (\text{А.81})$$

следовательно, имеем

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = -(k/c) D\rho/Dt * 1/r \quad (\text{А.82})$$

Взяв лапласиан уравнения (А.67), получаем

$$\Delta \mathbf{A} = (4\pi/c) \mathbf{j} + [(1-k)/2] \nabla \Delta \xi = (4\pi/c) \mathbf{j} + [(1-k)/c] D\rho/Dt * \nabla(1/r) \quad (\text{А.83})$$

Следовательно, имеем

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \Delta \mathbf{A} = (4\pi/c) \mathbf{j} - (1/c) D\rho/Dt * \nabla(1/r) \quad (\text{А.84})$$

Когда все тела находятся в покое, последнее уравнение можно переписать как

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = (4\pi/c) \mathbf{j} - (1/c) \partial \nabla \phi / \partial t \quad (\text{А.85})$$

или в отсутствие внешних электродвижущих сил,

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) - (1/c^2) \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 = (4\pi/c) \mathbf{j} + (1/c) \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (\text{А.86})$$

Используя уравнение (А.82), div электродвижущей силы (А.75) читается как

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho + (k/c^2)(\partial^2 \phi / \partial t^2) \quad (\text{А.87})$$

Её rot составляет

$$\nabla \times \mathbf{E} = (1/c)(\partial / \partial t) \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{А.88})$$

Эти уравнения имеют некоторое сходство с уравнениями Максвелла-Герца в случае постоянных и однородных  $\epsilon$  и  $\mu$ . Однако они все еще содержат потенциалы  $\phi$  и  $\mathbf{A}$  в дополнение к силе  $\mathbf{E}$  и  $\nabla \times \mathbf{A}$ . Уравнение (А.86) отличается от максвелловского выражения теоремы Ампера на член  $\partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2$ . Назовем  $l$  и  $\tau$  масштабами пространственных и временных вариаций  $\mathbf{A}$ . Этот дополнительный член становится заметным, когда  $l/\tau$  сравнима со скоростью света. Аналогично, уравнение (А.87) отходит от соответствующего уравнения Максвелла, когда  $k^{1/2}l/\tau$  сравнимо со скоростью света. Как следствие, выбор  $k$  имеет незначительные эмпирические последствия, пока не достигнуты герцевские частоты. Гельмгольц увидел это на конкретных примерах.<sup>32</sup>

Сходство между предсказаниями теорий Максвелла и Гельмгольца еще больше, когда  $k = 0$ . В этом случае дивергенция  $\mathbf{E}$  такая же, как в теории Максвелла, так что никакой заряд не может исчезнуть в проводнике за время, заметно превышающее  $\sigma$ , что для меди составляет около  $10^{-17}$  сек.

Следовательно, для бесконечного проводника член  $-\partial \nabla \phi / \partial t$  в уравнении (А.85) быстро исчезает. В соответствующем уравнении Максвелла этот член заменяется током смещения. Последний очень мал по сравнению с током проводимости, пока изменение электрического поля за время  $\sigma$  пренебрежимо мало. Следовательно, в бесконечном проводнике теории Максвелла даёт то же, что и теория потенциала для  $k = 0$ , вплоть до частот, почти таких же высоких, как оптические частоты.<sup>33</sup>

Но это не так, если проводник конечен, и в этом случае может ощущаться влияние поверхностных зарядов. Рассмотрим, например, двухпластинчатый воздушный конденсатор. Максвелловский ток смещения между пластинами равен току проводимости в металле пластин. В теории Гельмгольца незамкнутый ток проводимости формально замыкается псевдоток  $\partial \nabla \phi / \partial t$  в воздухе. Этот псевдоток отличается от максвелловского тока смещения на  $\partial^2 A / \partial^2 \partial t^2$ , который становится заметным, когда  $l/\tau$  того же порядка, что и  $c$ . Хотя такие быстрые колебания никогда не происходят в обычных конденсаторах, они происходят на герцевских частотах, которые намного ниже оптических частот.

Гораздо более важно различие в эмпирических предсказаниях теории Гельмгольца и Максвелла для механических сил электродинамического происхождения. Второй член формулы Гельмгольца (А.73) – действие на незамкнутые токи, не существующие в теории Максвелла (как и в любой другой известной теории). Тогда выражение Гельмгольца (А.75) для ЭДС в движущемся теле отличается от выражения Максвелла на член  $-(1/c) \nabla(\mathbf{v} \cdot \mathbf{A})$ . Электрокинетическая энергия, развиваемая этой силой, в точности противоположна кинетической энергии, приобретаемой проводниками под действием незамкнутых сил, поскольку

$$\int -\mathbf{j} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}) d\tau = \int \mathbf{v} \cdot \mathbf{A} (\nabla \cdot \mathbf{j}) d\tau. \quad (\text{А.89})$$

Новая электродвижущая сила не оказывает никакого влияния в замкнутых цепях. В разомкнутых цепях она вносит вклад в заряды, накопленные в конце цепи. В электростатических единицах порядок величины этих зарядов является  $v/c$  для обычных магнитных полей. Как объясняется в основном тексте, Гельмгольц проверил эти слабые заряды и тем самым исключил теорию потенциала без поляризации вакуума.<sup>34</sup>

<sup>31</sup> Helmholtz 1874a: 748-51 Гельмгольц не включил в свой анализ движение наэлектризованных тел. При наличии такого движения энергия сохраняется только в том случае, если конвективные токи электродинамически неактивны. Этот вопрос связан с единством электрической силы: cf. Darrigol 1993b: 340-3.

<sup>32</sup> Helmholtz 1870b: 599-61 1. Общие рассуждения мои - автор

<sup>33</sup> См. Helmholtz 1870b: 588, 578, 603.

<sup>34</sup> Helmholtz 1873a, 1873b, 1874a. 1875a.

## Волны поляризации

Если в поляризуемой среде действуют электростатическая и электродинамическая ЭДС, Гельмгольц предполагает поляризацию

$$\mathbf{P} = (\kappa/4\pi)\mathbf{E}. \quad (\text{A.90})$$

Эта поляризация предполагает наличие собственной плотности заряда

$$\rho_p = -\nabla \cdot \mathbf{P}, \quad (\text{A.91})$$

Изменение во времени поляризации влечет за собой ток<sup>35</sup>

$$\mathbf{j}_p = D\mathbf{P}/Dt \quad (\text{A.92})$$

Рассмотрим бесконечный диэлектрик с постоянной, однородной поляризуемостью. Применяя дивергенцию (A.90) и используя выражение (A.87) для  $\nabla \cdot \mathbf{E}$ , получаем

$$(1 + \kappa) - \nabla \cdot \mathbf{P} = (\kappa/4\pi c^2)(\partial^2 \phi / \partial t^2) \quad (\text{A.93})$$

Взяв лапласиан этого уравнения и используя выражение (A.66) для  $\phi$ , получаем

$$[(\kappa/c^2)(\partial^2 / \partial t^2) - (1 + \kappa)]\nabla \cdot \mathbf{P} = 0 \quad (\text{A.94})$$

что подразумевает возможность продольных волн поляризации, со скоростью

$$c_{\parallel} = c\sqrt{(1 + \kappa)/\kappa}. \quad (\text{A.95})$$

Взяв rot от rot уравнения (A.90) и используя выражение (A.75) для  $\mathbf{E}$  и уравнение (A.85), получаем

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{P}) = -(\kappa/c^2)(\partial^2 \mathbf{P} / \partial t^2) + (\kappa/4\pi c^2)(\partial / \partial t)\nabla \phi \quad (\text{A.96})$$

Снова взяв rot этого уравнения, получаем,

$$(\kappa/c^2)(\partial^2 \mathbf{P} / \partial t^2) - \nabla \times \mathbf{P} = 0 \quad (\text{A.97})$$

что подразумевает возможность поперечных волн поляризации со скоростью

$$c_{\perp} = c/\sqrt{\kappa}. \quad (\text{A.98})$$

Как поясняется в главе 6, эти формулы в применении к бесконечно поляризуемому вакууму приводят к исключительно поперечному распространению со скоростью, равной отношению электромагнитной к электростатической единице заряда (с учетом перенормировки заряда).<sup>36</sup>

<sup>35</sup> Helmholtz 1870b: 611-628.

<sup>36</sup> Helmholtz 1870b: 626-8.

### Выведенные уравнения Максвелла-Герца

Теперь мы предположим, что вакуум сам по себе поляризуем, с поляризуемостью  $\kappa_0$ . В веществе поляризуемость  $\kappa = \varepsilon/\kappa_0$ , причем коэффициент  $\varepsilon$  больше единицы. В источниках потенциалов Гельмгольца к обычным зарядам  $\rho$  и токам  $\mathbf{j}$  теперь мы должны добавить поляризационный заряд (A.91) и ток (A.92). Отсюда уравнение (A.84) становится

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \left( \mathbf{j} + \frac{D\mathbf{P}}{Dt} \right) - \frac{1}{c} \left( \frac{D}{Dt} (\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}) \right) * \nabla \frac{1}{r}, \quad (\text{A.99})$$



$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \text{ и } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (\text{A.100})$$

Взятие  $\text{rot}$  ЭДС (A.75) (при  $\mathbf{E}_0 = 0$ ) дает

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(1/c)(D\mathbf{B}/Dt) \quad (\text{A.101})$$

Взятие ее  $\text{div}$  дает

$$\nabla \cdot (1 + \kappa) \mathbf{E} = 4\pi\rho - (1/c)\nabla \cdot (D\mathbf{A}/Dt) \quad (\text{A.102})$$

В этих четырех уравнениях различные величины измеряются по отношению к фиктивной электростатической единице заряда, полученной так, как если бы вакуум не был поляризуемым. Истинная электростатическая единица заряда такова, что между двумя точечными зарядами, разделенными единичным расстоянием в поляризуемом вакууме, действует единичная сила. Как видно из уравнения (A.102), сила в поляризуемом вакууме в  $(1 + \kappa_0)$  раз меньше, чем в неполяризуемой среде. Поэтому истинная единица заряда в  $\gamma$  раз больше фиктивной единицы, причем

$$\gamma = \sqrt{1 + \kappa_0}. \quad (\text{A.103})$$

При отнесении к истинной электростатической единице различные электрические и магнитные величины приобретают вид

$$\rho' = \gamma^{-1}\rho, \quad \mathbf{E}' = \gamma\mathbf{E}, \quad \phi' = \gamma\phi, \quad c' = \gamma^{-1}c, \quad \mathbf{j}' = \gamma^{-1}\mathbf{j}, \quad \mathbf{B}' = \mathbf{B} \quad (\text{A.104})$$

В терминах этих перенормированных величин, уравнения (A.99) - (A.102) становятся

$$\nabla \times \mathbf{B}' = \frac{4\pi}{c'} \left( \mathbf{j}' + \frac{D\kappa_0 \varepsilon \mathbf{E}'}{Dt(1 + \kappa_0)} \right) - \frac{1}{c'} \left[ \frac{D}{Dt} \left( \rho' - \frac{\kappa_0}{1 + \kappa_0} \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}' \right) \right] * \nabla \frac{1}{r}, \quad (\text{A.105})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}' = 0, \quad (\text{A.106})$$

$$\nabla \times \mathbf{E}' = -(1/c') (D\mathbf{B}'/Dt), \quad (\text{A.107})$$

$$\nabla \cdot \frac{1 + \varepsilon \kappa_0}{1 + \kappa_0} \mathbf{E}' = 4\pi\rho' - \frac{\gamma^{-2}}{c'} \nabla \cdot \frac{D\mathbf{A}'}{Dt}. \quad (\text{A.108})$$

В пределе бесконечных  $\kappa_0$  и  $\gamma$  четвертое из этих уравнений переходит в уравнение

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}') = 4\pi\rho'. \quad (\text{A.109})$$

Следовательно, последний член первого уравнения обращается в ноль, и мы имеем

$$\nabla \times \mathbf{B}' = (4\pi/c') (\mathbf{j}' + D\varepsilon \mathbf{E}'/Dt). \quad (\text{A.110})$$

В результате мы получаем уравнения Максвелла-Герца для электродинамики движущихся тел (для  $\mu = 1$ )<sup>37</sup>. Остается выяснить, распространяется ли эта сходимость на пондеромоторные силы. Для простоты мы рассмотрим только случай равномерного  $\varepsilon$ . Тогда сила, действующая на объем элемента среды, имеет три части, соответствующие трем видам энергии, хранящейся в среде.

Электростатическая часть

$$\mathbf{f}_s = -(\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}) \nabla \phi. \quad (\text{A.111})$$

Электродинамическая часть - (сравните с уравнением (А. 73)

$$\mathbf{f}_d = \frac{1}{c} \left( \mathbf{j} + \frac{D\mathbf{P}}{Dt} \right) \times \mathbf{B} + \frac{1}{c} \mathbf{A} \frac{D}{Dt} (\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}). \quad (\text{A.112})$$

Поляризационная часть вытекает из энергии  $^{1/2} \int \mathbf{P} \cdot \mathbf{E} d\tau$ . По аналогии с электродинамической силой (А.73). которая вытекает из  $^{-1/2} \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} d\tau$  получаем

$$\mathbf{f}_p = \mathbf{E}(\nabla \cdot \mathbf{P}) - \mathbf{P} \times (\nabla \times \mathbf{E}). \quad (\text{A.113})$$

После перенормировки и для бесконечной поляризуемости вакуума сумма этих сил имеет вид

$$\mathbf{f} = \rho' \mathbf{E}' + (1/4\pi)(\nabla \times \mathbf{B}') \times \mathbf{B}' + (1/4\pi)(\nabla \times \mathbf{E}') \times \mathbf{E}', \quad (\text{A.114})$$

что в точности соответствует силе, вытекающей из системы напряжений Максвелла.

<sup>37</sup> Это доказательство мое. В печати Гельмгольц рассматривал только отдельные случаи (чистый диэлектрик в Helmholtz 1870b: 611-28, и вращающийся конденсатор в Helmholtz 1875a: 788-90 (см. Darrigol 1993a: 343-346). Рукопись № 622 в архиве Берлинской академии наук, написанная, вероятно, около 1875 года, содержит уравнения для полного электромагнетизма движущихся тел в поляризуемых средах. Доказательство эквивалентности Poincare 1891: Гл. 5 охватывает только случай тел, находящихся в покое, и опирается на концепцию поляризации, отличную от концепции Гельмгольца.

### Приложение 8. Вывод уравнений Максвелла, сделанный Герцем в 1884 году

Рассмотрим систему замкнутых токов в любой из континентальных теорий электродинамики, которые для этой цели эквивалентны. Назовем  $\mathbf{A}$  соответствующим электродинамическим потенциалом, а  $\mathbf{B}$  - его rot. Согласно Герцу, единство электрической силы требует механической силы между "магнитными токами"  $\partial \mathbf{B} / \partial t$  (см. п. 6.4.2). Эта сила является для магнитных токов тем же, чем силы Ампера являются для электрических токов. Более точно,  $-(1/c)(\partial \mathbf{B} / \partial t)$  является аналогом  $(4\pi/c)\mathbf{j}$ , поскольку одна из них представляет собой rot  $\mathbf{E}$ , а другая – rot  $\mathbf{H}$ . Поэтому, рассуждал Герц, новая сила вытекает из потенциала (в электростатических единицах)

$$p = \frac{1}{32\pi^2 c^2} \iint \frac{\dot{\mathbf{B}}(\mathbf{r}) \cdot \dot{\mathbf{B}}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\tau d\tau'. \quad (\text{A.115})$$

Подражая "выводу" Гельмгольца об электромагнитной индукции из сохранения энергии, Герц вывел из нового потенциала существование "магнитоэлектрической" индукции. В символах соответствующая магнитодвижущая сила представлена

$$\mathbf{H}' = \partial \mathbf{a} / \partial t \quad (\text{A.116})$$

где

$$\mathbf{a} = ^{-1/4\pi} \dot{\mathbf{B}} * (1/r) \quad (\text{A.117})$$

Этой новой магнитной силе соответствует новый магнитный поток  $\mathbf{B}'$ , а

значит и новая электродвижущая сила индукции  $\mathbf{E}'$  по закону Фарадея.

Для  $\mu = 1$  мы имеем

$$\mathbf{B}' = \nabla \times \mathbf{A}', \quad \mathbf{E}' = -(1/c) \partial \mathbf{A}' / \partial t \quad (\text{A.118})$$

$$\mathbf{A}' = (1/4\pi c) \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 * 1/r, \quad (\text{A.119})$$

Таким образом, от электрических и магнитных сил, вытекающих из обычного потенциала  $\mathbf{A}_0$ , мы перешли к улучшенной системе сил, вытекающих из потенциала  $\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}'$ . Лучшее приближение получается, если в качестве основы для расчета  $\mathbf{A}'$  взять  $\mathbf{A}_1$  вместо  $\mathbf{A}_0$ .  $n$ -ая итерация дает

$$\mathbf{A}_{n+1} = \mathbf{A}_0 = (1/4\pi c^2) \partial^2 \mathbf{A}_n / \partial t^2 * (1/r) \quad (\text{A.120})$$

Если последовательность сходится (в чем Герц убедился на конкретном примере), то предел  $\mathbf{A}$  удовлетворяет следующим условиям

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 = (1/4\pi c^2) \partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2 * (1/r) \quad (\text{A.121})$$

Применение лапласиана  $\Delta$  к обоим членам этого уравнения дает дифференциальное уравнение

$$\nabla \mathbf{A} = (4\pi/c) \mathbf{j} + (1/c^2) (\partial^2 \mathbf{A} / \partial t^2) \quad (\text{A.122})$$

Для сил  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ , вытекающих из  $\mathbf{A}$ , это дает

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -(1/c) \partial \mathbf{H} / \partial t \\ \nabla \times \mathbf{H} &= (1/c) \partial \mathbf{E} / \partial t + (4\pi/c) \mathbf{j} \end{aligned} \quad (\text{A.123})$$

в соответствии с уравнениями Максвелла для  $\varepsilon = 1$  и  $\mu = 1$ .<sup>38</sup>

<sup>38</sup> Hertz 1884: 302-11. Герц не включает  $\mathbf{j}$  в окончательные уравнения.

## Приложение 9. Электродинамические лагранжианы Электрический ток как обобщенная скорость

Максвелл дает электродинамический лагранжиан системы замкнутых линейных токов  $i_a$  в виде

$$T = 1/2 \sum_{a\beta} M_{a\beta} i_a i_\beta, \quad (\text{A. 124})$$

где  $M_{a\beta}$  - коэффициенты, зависящие от пространственной конфигурации контуров. ЭДС индукции вокруг каждого контура и механические силы электродинамического происхождения задаются уравнениями Лагранжа, соответствующими соответственно обобщенным скоростям  $i_a$  и переменным пространственной конфигурации контуров.<sup>39</sup>

Лоренц и Гельмгольц обобщили динамические рассуждения Максвелла для 3D. Для бездивергентного тока  $\mathbf{J}$  эффективный электродинамический лагранжиан читается (в электромагнитных единицах):

$$T = 1/2 \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{A} d\tau + \int \xi \nabla \cdot \mathbf{J} d\tau \quad (\text{A.125})$$

где  $\mathbf{A}$  - вектор потенциала, такой, что

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) / \mu = \mathbf{J} \quad (\text{A.126})$$

и  $\xi$  является параметром Лагранжа, соответствующим ограничению  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ . Электродвижущая сила индукции - это обобщенная инерционная сила, соответствующая обобщенной скорости  $\mathbf{J}$ :

$$\mathbf{E} = -(\mathbf{D}/D\dot{t})(\delta L/\delta \mathbf{J}) = (D/D\dot{t})(\mathbf{A} - \nabla \xi), \quad (\text{A.127})$$

где  $\delta$  обозначает функциональную производную, а  $\mathbf{D}$  - конвективную производную. Исключив параметр Лагранжа и введя  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ , получаем

$$\nabla \times (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (\text{A.128})$$

что является формой Максвелла-Герца закона индукции Фарадея.<sup>40</sup>

Механические силы получаются путем написания уравнений Лагранжа, соответствующих деформации носителей тока. Следовательно,  $T$  играет роль потенциала Неймана, и мы можем использовать уравнение (A.73), чтобы получить

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (\text{A.129})$$

для плотности силы в случае равномерного  $\mu$

<sup>39</sup> Maxwell 1873a: #578-83.

<sup>40</sup> Lorentz 1892a: 173-88, 206-27 (Лоренц непосредственно использовал принцип  $\Delta^*$ Аламбера); Гельмгольц 1892.

### Сила Лармора

В предыдущем расчете необходимо учесть физическую природу  $\mathbf{J}$  как потока и использовать выражение (A.42) для изменения  $\mathbf{J}$  при деформации носителя тока. Лармор ошибочно рассматривал  $\mathbf{J}$  как плотность. Результирующая вариация,

$$\delta \mathbf{J} = -\mathbf{J}(\nabla \cdot \delta \mathbf{r}) - (\delta \mathbf{r} \cdot \nabla) \mathbf{J}, \quad (\text{A.130})$$

отличается от правильной на  $-(\mathbf{J} \cdot \nabla) \delta \mathbf{r}$ . Этому изменению соответствует вклад

$$\int \mathbf{A} \cdot (-\mathbf{J} \cdot \nabla) \delta \mathbf{r} d\tau = \int \delta \mathbf{r} \cdot (\mathbf{J} \cdot \nabla) \mathbf{A} d\tau \quad (\text{A.131})$$

в изменение  $T$ , которое дает ларморовскую силу  $(\mathbf{J} \cdot \nabla) \mathbf{A}$ .<sup>41</sup>

### Электрическое смещение как обобщенная координата

Как показал Гельмгольц в 1892 году, в случае изолятора динамические рассуждения Максвелла можно дополнить, включив в него потенциальную энергию электрического поля. Соответствующий лагранжиан

$$L = \frac{1}{2} [\mathbf{A} \cdot (\mathbf{D} \mathbf{D} / D\dot{t}) d\tau - \int (D^2 / 2\xi) d\tau + \int \xi \nabla \cdot (\mathbf{D} \mathbf{D} / D\dot{t}) d\tau] \quad (\text{A.132})$$

где  $\mathbf{A}$  такой, что

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) / \mu = \mathbf{D} \mathbf{D} / D\dot{t}, \quad (\text{A.133})$$

и  $\xi$  - параметр Лагранжа, соответствующий ограничению на то, что полный ток  $\mathbf{D} \mathbf{D} / D\dot{t}$  является замкнутым. Варьирование в отношении  $\mathbf{D}$  даст

$$\mathbf{D} / \varepsilon = -(\mathbf{D} / D\dot{t})(\mathbf{A} - \nabla \xi), \quad (\text{A.134})$$

rot которого представляет собой закон индукции Фарадея в форме Максвелла-Герца.<sup>42</sup>

Можно задаться вопросом, почему Максвелл и его британские ученики никогда не использовали этот лагранжиан. Правдоподобная причина заключается в том, что они требовали, чтобы координаты Лагранжа соответствовали положению частиц какого-либо флюида или твердого тела. Это не может быть так для  $\mathbf{D}$  предположение привело бы к непрерывности  $\mathbf{D}$  на границе между двумя различными диэлектриками и

тем самым противоречило бы законам преломления Френеля.

В любом случае, этот лагранжиан не является улучшением максвелловского, поскольку он не позволяет учитывать токи проводимости. По этой причине Гельмгольц перешел к другой вариационной процедуре. Как он знал, уравнения Лагранжа, соответствующие лагранжиану  $L(q, \dot{q})$ , эквивалентны каноническим уравнениям, полученным при варьировании интеграла по времени функции  $\Phi = H(q, p) - p \dot{q}$  относительно  $p$  и  $q$ , если  $H$  - гамильтонова функция, соответствующая  $L$ . В данной задаче обобщенными координатами системы являются значения, которые принимает смещение  $\mathbf{D}$  в различных точках среды, а сопряженные моменты - это значения векторного потенциала  $\mathbf{A}$ . Следовательно, функция  $\Phi$  имеет вид

$$\Phi = \int \frac{1}{2\mu} (\nabla \times \mathbf{A})^2 d\tau + \int \frac{D^2}{2\varepsilon} d\tau - \int \mathbf{A} \cdot \frac{D\mathbf{D}}{Dt} d\tau. \quad (\text{A.135})$$

Переменные  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{D}$  здесь независимы, поэтому не нужно априорно накладывать ограничения на  $D\mathbf{D}/Dt$  и нет необходимости в параметре Лагранжа. Изменение интеграла по времени  $\Phi$  относительно  $\mathbf{A}$  приводит к уравнению (A.133), а изменение относительно  $\mathbf{D}$  при  $\xi = 0$  дает уравнение (A.134). Окончательная формулировка Гельмгольца получается путем добавления к  $\Phi$  внешнего вклада  $\Phi'$  включающий "силы"  $\mathbf{E}_0$ ,  $\mathbf{j}$  и  $-\mathbf{f}$ , действующие соответственно на  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{A}$  и положение  $\mathbf{R}$  частиц среды:

$$\Phi' = - \int \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{D} d\tau - \int \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} d\tau + \int \mathbf{f} \cdot \mathbf{R} d\tau \quad (\text{A.136})$$

Вариации относительно  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{D}$  теперь дают

$$\begin{aligned} \mathbf{D}/\varepsilon &= \mathbf{E}_0 - D\mathbf{A}/Dt \\ \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A})/\mu &= \mathbf{j} + D\mathbf{D}/Dt, \end{aligned} \quad (\text{A.137})$$

из которых вытекают уравнения Хевисайда-Герца для электродинамики движущихся тел<sup>43</sup>.

Вариацию относительно  $\mathbf{R}$  выполнить сложнее. Варьирование  $\mathbf{A}$  как силы (см. уравнение (A.41)) в магнитной энергии дает плотность магнитной силы

$$\mathbf{f}_m = (\nabla \times \mathbf{H}) \times \mathbf{B} - \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \nabla (\nabla \mu / \mu), \quad (\text{A.138})$$

где  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \mu \mathbf{H}$

Изменение  $\mathbf{D}$  как потока (см. уравнение (A.42)) в электрической энергии дает плотность электрической силы

$$\mathbf{f}_e = \mathbf{E}(\nabla \cdot \mathbf{D}) + (\nabla \times \mathbf{E}) \times \mathbf{D} - \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \nabla (\nabla \varepsilon / \varepsilon), \quad (\text{A.139})$$

где  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ .

Эти выражения согласуются с теми, которые дает тензор напряжений Максвелла (см. Приложение 6).

Изменение оставшихся интегралов, соответствующих третьему члену уравнения (A.135) и двум первым членам уравнения (A.136), равно нулю.

Первоначально Гельмгольц проверил это, используя явную форму вариаций подразумеваемых векторов. Полученные вычисления довольно сложны. К счастью, Гельмгольц оставил наброски гораздо более простого доказательства в незаконченной рукописи, написанной в год его смерти. Его рассуждения можно закончить следующим образом.<sup>44</sup>

Первое замечание состоит в том, что конвективная производная потока также является потоком. Действительно, по определению конвективной производной ее поток  $(\mathbf{D}\mathbf{B}/D\hat{t}) \cdot d\mathbf{S}$  через элемент поверхности среды  $d\mathbf{S}$  равен  $d(\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S})/d\hat{t}$ , который, как и  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ , инвариантен относительно деформации среды.

Второе замечание состоит в том, что изменение любого интеграла вида

$$I = \int \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} d\tau \quad (\text{A.140})$$

исчезает, если  $\mathbf{A}$  изменяется как сила, а  $\mathbf{B}$  как поток. Гельмгольц показал это, переписав интеграл  $I$  в виде

$$I = \int [(A_x dx)(B_1 dy dz) + \dots], \quad (\text{A.141})$$

где элемент длины  $dx$  и элемент поверхности  $dy dz$  следуют за движением среды. По определению сил и потоков, произведения  $A_x dx$  и  $B_x dy dz$  инвариантны. Благодаря этим двум замечаниям становится очевидной стационарность интегралов  $\mathbf{A} \cdot (\mathbf{D}\mathbf{D}/D\hat{t})$ ,  $\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{D}$  и  $\mathbf{j} \cdot \mathbf{A}$ .

<sup>41</sup> Larmor 1894: 529; 1895b: 546-50.

<sup>42</sup> Helmholtz 1892

<sup>43</sup> Helmholtz 1892.

<sup>44</sup> Helmholtz [1894].

### Вектор потенциала как обобщенная координата.

Оптический лагранжиан Мак-Каллага

$$L = \frac{1}{2} m [(\partial \xi / \partial \hat{t})]^2 + \frac{1}{2} k (\nabla \times \xi)^2 \quad (\text{A.142})$$

допускает две электромагнитные интерпретации. В первой из них, предложенной Фицджеральдом, вектор  $\xi$  уподобляется векторному потенциалу. Соответствующий электромагнитный лагранжиан имеет вид:

$$L = \frac{1}{2} \varepsilon (\partial \mathbf{A} / \partial \hat{t})^2 + \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A})^2. \quad (\text{A.143})$$

Результирующее уравнение движения имеет вид

$$(\partial / \partial \hat{t}) [\xi (\partial \mathbf{A} / \partial \hat{t})] = -\nabla \times [(\nabla \times \mathbf{A}) / \mu], \quad (\text{A.144})$$

что соответствует Максвелловскому выражению закона Ампера для диэлектриков. Позднее Больцман принял этот лагранжиан, и в настоящее время он является наиболее популярным. Однако Фицджеральд и другие британские максвелловцы отвергли его, т.к. хотели интерпретировать координаты Лагранжа как положение частиц эфира. С помощью векторного потенциала они этого сделать не могли, поскольку для этого потребовалось бы постоянно создавать или аннигилировать эфир вокруг наэлектризованных объектов. Кроме того, такая интерпретация подразумевала бы, что  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{E}$  непрерывны на границе между двумя различными диэлектриками, что несовместимо с бездивергентным

характером  $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ .<sup>45</sup>

### Магнитная сила как скорость

Поэтому Фицджеральд выбрал альтернативную электромагнитную интерпретацию лагранжиана Маккаллахом, для которого магнитная сила  $\mathbf{H}$  является производной по времени  $\xi$ , а электрическое смещение  $\mathbf{D}$  - его rot. Поскольку  $\mathbf{B}$  не имеет дивергенции, поток эфира больше не является парадоксальным. Что касается непрерывности  $\xi$  между двумя различными диэлектриками, то она больше не является уцербной, поскольку для этого требуется только непрерывность  $\mathbf{H}$ , что не противоречит бездивергентному характеру  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  до тех пор, пока  $\mu$  почти одинакова во всех немагнитных диэлектриках. Как обсуждается в главе 8, Лармор принял интерпретацию Фицджеральдом лагранжиана Маккаллаха в своей теории эфира<sup>46</sup>. Проблематичность введение в среду Маккаллаха токов проводимости показал Хевисайд в 1891 году и подтвердил Лармор в своей неудачной попытке в 1894 году<sup>47</sup>.

### Лагранжианы для электронной теории

Лоренц основывал уравнения своей теории электронов на принципе д'Алембера.<sup>48</sup> Однако его рассуждения можно легко перевести в лагранжеву форму. Пусть  $\mathbf{d}$  и  $\mathbf{b}$  - микронапряжённости поля, а  $\rho_m$  - микроплотность заряда в электростатических единицах. Кинетическая энергия поля

$$T = \frac{1}{2} \int b^2 d\tau, \quad (\text{A.145})$$

где  $\mathbf{b}$  – это такой бездивергентный вектор, что

$$\nabla \times \mathbf{b} = \frac{1}{c} (\rho_m \mathbf{v} + \partial \mathbf{d} / \partial t) \quad (\text{A.146})$$

Потенциальная энергия равна

$$U = \frac{1}{2} \int d^2 d\tau \quad (\text{A.147})$$

Благодаря ограничениям  $\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v} + \partial \mathbf{d} / \partial t) = 0$  и  $\rho_m - \nabla \cdot \mathbf{d} = 0$ , эффективный лагранжиан имеет вид

$$L = T - U + \int \xi \nabla \cdot \left( \rho_m \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} \right) d\tau + \int \eta (\rho_m - \nabla \cdot \mathbf{d}) d\tau. \quad (\text{A.148})$$

Варьирование действия в зависимости от  $\mathbf{d}$  дает

$$\mathbf{d} = -\frac{1}{c} \partial \mathbf{a} / \partial t + \nabla (\eta + \partial \xi / \partial t), \quad (\text{A.149})$$

где  $\mathbf{a}$  таково, что  $\mathbf{b} = \nabla \times \mathbf{a}$ . Исключив параметры Лагранжа, получаем

$$\nabla \times \mathbf{d} = -\frac{1}{c} \partial \mathbf{b} / \partial t \quad (\text{A.150})$$

Теперь извлечем из лагранжиана ту часть, которая зависит от положения  $\mathbf{r}$  и скорости  $\mathbf{v}$  данного элемента материального объема  $d\tau$  с неизменным зарядом  $\rho d\tau$ . Это

$$L_{d\tau} = (\rho d\tau) [(\mathbf{v}/c) \cdot \mathbf{a} - \mathbf{v} \cdot \nabla \xi + \eta]. \quad (\text{A.151})$$

Электромагнитная сила, действующая на этот элемент, равна

$$\mathbf{f} d\tau = -(\mathbf{d}/d\tau) (\partial L_{d\tau} / \partial \mathbf{v}) + \partial L_{d\tau} / \partial \mathbf{r} \quad (\text{A.152})$$

или

$$\mathbf{f} = \rho[-\frac{1}{c}\partial\mathbf{a}/\partial t + \nabla(\eta + \partial\xi/\partial t)] + \rho(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{b}. \quad (\text{A.153})$$

Объединяя этот результат с уравнением (A.149), получаем силу Лоренца

$$\mathbf{f} = \rho(\mathbf{d} + (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{b}) \quad (\text{A.154})$$

Другая возможность, использованная Шварцшильдом в 1903 году и сейчас часто применяемая - использование потенциалов в качестве обобщенных координат<sup>49</sup> Соответствующий лагранжиан имеет вид

$$L = \int \{ \frac{1}{2}(B^2 - E^2) + \rho[\phi - (\mathbf{v}/c) \cdot \mathbf{A}] \} d\tau \quad (\text{A.155})$$

где

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{1}{c}\partial\mathbf{A}/\partial t, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{A.156})$$

Изменение относительно  $\phi$  дает

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho. \quad (\text{A.157})$$

Изменение относительно  $\mathbf{A}$  дает

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c}(\rho\mathbf{v} + \partial\mathbf{E}/\partial t) \quad (\text{A.158})$$

Наконец, изменение в зависимости от деформации носителей заряда можно выполнить, как указано выше, выделив вклад материального элемента  $d\tau$ . В результате получается сила Лоренца

$$\mathbf{f} = \rho[\mathbf{E} + (\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}] \quad (\text{A.159})$$

<sup>45</sup> Ср. неопубликованную рукопись Фицджеральда, обсуждаемую в Hunt 1991a: 17.

<sup>46</sup> FitzGerald 1879a; Larmor 1894.

<sup>47</sup> Heaviside 1891, 1893-1912. Vol. 1 243-51; Larmor 1894.. Аргумент Хевисайда см. в Buchwald 1985a: 68-70.

<sup>48</sup> Lorentz 1892a: 230-8.

<sup>49</sup> Schwarzschild 1903.

## Приложение 10. Электрическая конвекция

### Предположения Дж. Дж. Томсона (1881)

Движущаяся заряженная частица, рассуждал Томсон, несет с собой поле смещения, по крайней мере, если скорость не слишком близка к  $c$ . Следовательно, смещение в данной точке пространства изменяется со временем, что, согласно Максвеллу, предполагает наличие магнитоактивных токов.

Томсон рассчитал эти токи для случая равномерно наэлектризованной сферической оболочки. Внутри оболочки смещение равно нулю, а вне ее оно определяется как

Томсон рассчитал эти токи для случая равномерно наэлектризованной сферической оболочки. Внутри оболочки смещение равно нулю, а вне оболочки оно определяется как

$$\mathbf{D} = (q/4\pi)\nabla(1/|\mathbf{r}-\mathbf{R}|), \quad (|\mathbf{r}-\mathbf{R}| > a) \quad (\text{A.160})$$

где  $\mathbf{R}$  - положение центра оболочки в данный момент времени,

$a$  - радиус оболочки. Внутри сферы соответствующий ток смещения отсутствует, а вне сферы равен

$$\partial\mathbf{D}/\partial t = -[\mathbf{v}(\partial/\partial\mathbf{R})]\mathbf{D}. \quad (\text{A.161})$$

Соответствующий векторный потенциал определен как<sup>50</sup>



$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \mu/4\pi \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|>a} \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} (\partial \mathbf{D}/\partial t)(\mathbf{r}') d\tau' \quad (\text{A.162})$$

Но Томсона обеспокоило, что этот потенциал не удовлетворяет условию Максвелла  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ . Вместо того, чтобы найти причину этого затруднения, он добавил к потенциалу член  $\mu qv/6\pi$ , таким образом сделал его бездивергентным. Из этого улучшенного потенциала он вычислил электрокинетическую энергию

$$T = \frac{1}{2} \int_{|\mathbf{r}-\mathbf{R}|>a} \mathbf{A} \cdot (\partial \mathbf{D}/\partial t) d\tau \quad (\text{A.163})$$

И обнаружил, что

$$T = \frac{1}{2} (\delta m) v^2, \text{ где } \delta m = (1/15\pi) (\mu q^2/a) \quad (\text{A.164})$$

Следовательно, движущаяся частица приобретает дополнительную массу  $\delta m$  электромагнитного происхождения. Затем Томсон рассчитал магнитную индукцию  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ , и нашел

$$\mathbf{B} = (\mu/4\pi) q \mathbf{v} \times (\mathbf{r}-\mathbf{R})/|\mathbf{r}-\mathbf{R}|^3, \quad (\text{A.165})$$

что является полем элемента тока  $q\mathbf{v}$ , представляемого как частица.

Наконец, Томсон записал энергию взаимодействия между движущимся зарядом и постоянным магнитом в виде

$$T_1 = (1/2\mu) \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}_0 d\tau = \frac{1}{2\mu} \int \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}_0) d\tau \quad (\text{A.166})$$

где  $\mathbf{B}$  - магнитная индукция, создаваемая частицей, а  $\mathbf{B}_0$  - магнитная индукция, создаваемая магнитом. Интегрирование по частям и следствие

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu q v \delta(\mathbf{r}-\mathbf{R}) \quad (\text{A.167})$$

из уравнения (A.165) дает

$$T_1 = \frac{1}{2} q \mathbf{v} \cdot \mathbf{A}_0(\mathbf{R}). \quad (\text{A.168})$$

Согласно уравнениям Лагранжа, сила, действующая на частицу, равна

$$\mathbf{f} = \partial T_1 / \partial \mathbf{R} - (d/dt) (\partial T_1 / \partial \mathbf{v}) = \frac{1}{2} q \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 \quad (\text{A.169})$$

### Поправки

В этих рассуждениях было несколько заблуждений и просчетов. Во-первых, Томсон неправильно вычислил производную  $\partial \mathbf{D}/\partial t$ , проигнорировав внезапное изменение  $\mathbf{D}$ , которое происходит в точках пространства, через которые проходит поверхность сферы. Фицджеральд исправил эту ошибку и обнаружил, что curl правильно вычисленной производной исчезает. Этого следовало ожидать: производная по времени и curl коммутируют друг с другом, а curl смещения равен нулю, если пренебречь самоиндукцией. Фицджеральд пришел к выводу, что формула Максвелла для полного тока была неполной. Он предложил новый вклад  $\rho \mathbf{v}$ , который учитывал результаты Роуланда для вращающихся электрических дисков. Тогда векторный потенциал движущейся сферы имеет вид

$$\mathbf{A} = (\mu/4\pi) (\rho \mathbf{v}/r) + \nabla \psi, \quad (\text{A.170})$$

что обосновывает выражение Томсона для магнитного поля. В

вычислении Томсоном силы, действующей на частицу, была допущена еще одна ошибка: энергия взаимодействия (А.168) должна быть удвоена. Тогда сила равна  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$ , что согласуется с более поздней формулой Лоренца.<sup>51</sup>

Хевисайд исправил последнюю ошибку в 1889 году. В 1885 году он уже исправил выражение электромагнитной массы, получив

$$\delta m = (1/6\pi)(\mu q^2/a) \quad (\text{А.171})$$

Он также предложил физическое обоснование вклада  $qv$  в общий ток:

*Мы сразу же обнаруживаем [...], что для замыкания тока необходимо рассматривать сам движущийся заряд как элемент тока, момент [т.е. интенсивность] которого равен заряду, умноженному на его скорость [...]. Необходимость рассматривать движущийся заряд как элемент "истинного тока" [curl H] можно также заключить, просто учитывая, что когда заряд q входит в какую-либо область, равное смещение одновременно покидает ее через границу.*

В символах это имеет вид

$$\nabla \cdot (\partial \mathbf{D} / \partial t) = \partial \rho / \partial t = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (\text{А.172})$$

и, следовательно,<sup>52</sup>

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \text{ если } \mathbf{J} = \partial \mathbf{D} / \partial t + \rho \mathbf{v}. \quad (\text{А.173})$$

В другом обосновании конвективного тока  $\rho v$ , предложенном Герцем в 1890 году, электрическое смещение рассматривается как поток внутри движущегося вещества, что согласуется с общей трактовкой Максвеллом эфира и вещества как единой среды с переменными параметрами  $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$  и  $\mathbf{v}$ .<sup>53</sup> Тогда ток смещения является конвективной производной

$$D\mathbf{D}/Dt = \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{D}) - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{D}). \quad (\text{А.174})$$

который содержит член  $\rho v$ . По теореме Ампера третий член дает  $\mathbf{D} \times \mathbf{v}$  - магнитную движущую силу. В случае поверхностно наэлектризованной сферы эта сила исчезает везде, кроме непосредственной близости от поверхности. Следовательно, она не вносит вклад в энергию магнитного поля, из которой вытекают электромагнитная масса и сила Лоренца.

<sup>50</sup> J. J. Thomson 1881 a.

<sup>51</sup> FitzGerald IRSI. См также. Buchwald 1985a 271.

<sup>52</sup> Heaviside 1885-1887: 446; 1889c: 504 (цитата).

<sup>53</sup> Hertz 1890b: 263-5, 274-5.

### Быстрая конвекция

Когда скорость наэлектризованной частицы приближается к скорости света, электрическое поле частицы уже не равно кулоновскому полю. Возникает незначительный вклад электромагнитной индукции за счет изменяющегося тока смещения. В 1888 году Хевисайд вывел точную формулу для этого эффекта в случае точечного заряда. Его второе доказательство этой формулы выглядит следующим образом.<sup>54</sup>

Сначала Хевисайд написал дуплексные уравнения для движущейся среды без воздействия сил:

$$\begin{cases} \nabla \times (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{D} \times \mathbf{v}) = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} + \rho \mathbf{u} \end{cases} \quad (\text{A.175})$$

где  $\mathbf{v}$  - скорость среды, а  $\mathbf{u}$  - скорость электризации. С максвелловской точки зрения эти две скорости должны быть одинаковыми, поскольку электризация является свойством единой эфирной среды. Однако в 1889 г. он предположил, как впоследствии и Лоренц, что

*движение наэлектризованной частицы нисколько не нарушает движения среды.*

В системе отсчета, связанной с заряженной частицей, эфир движется со скоростью  $-\mathbf{u}$ , и конвективный ток отсутствует, так что уравнения приобретают вид

$$\begin{aligned} \nabla \times (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) &= 0, \\ \nabla \times (\mathbf{H} + \mathbf{D} \times \mathbf{u}) &= 0. \end{aligned} \quad (\text{A.176})$$

Используя  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  и первое уравнение, получаем

$$\nabla \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{D} \times \mathbf{u}) = \mathbf{u} \cdot (\nabla \times \mathbf{D}) = -\epsilon \mathbf{u} \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) = 0. \quad (\text{A.177})$$

Вместе со вторым уравнением поля из этого следует

$$\mathbf{H} = \mathbf{u} \times \mathbf{D}. \quad (\text{A.178})$$

Подставляя это выражение  $\mathbf{H}$  в первое уравнение, получаем

$$\nabla \times [(1 - u^2/c^2)\mathbf{E} + (1/c^2)(\mathbf{u} \cdot \mathbf{E})\mathbf{u}] = 0. \quad (\text{A.179})$$

Если ось  $x$  параллельна  $\mathbf{u}$ , то существует такой псевдопотенциал  $P$ , что

$$E_x = -\gamma^2(\partial P/\partial x), \quad E_y = \partial P/\partial y, \quad E_z = -\partial P/\partial z, \quad (\text{A.180})$$

с

$$\gamma = \sqrt{1 - u^2/c^2} \quad (\text{A.181})$$

тогда уравнение

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho = q\delta(\mathbf{r}) \quad (\text{A.182})$$

дает

$$\gamma^2(\partial^2 P/\partial x^2) + (\partial^2 P/\partial y^2) + (\partial^2 P/\partial z^2) + (q/\epsilon)\delta(\mathbf{r}) = 0. \quad (\text{A.183})$$

Очевидно, что стандартное уравнение Пуассона можно получить с помощью подстановок

$$x' = \gamma'x, y' = y, z' = z, \quad q' = \gamma'q \quad (\text{A.184})$$

Следовательно, псевдопотенциал имеет вид

$$P = q'/4\pi\epsilon r' = (q/4\pi\epsilon\gamma)[x^2\gamma^2 + y^2 + z^2]^{-1/2} \quad (\text{A.185})$$

а соответствующее электрическое поле

$$\mathbf{E} = (q/4\pi\epsilon\gamma)(\mathbf{r}/r'^3). \quad (\text{A.186})$$

Это все еще радиальное поле, но оно более интенсивно в поперечном направлении, чем в продольном, как если бы среда была сжата вдоль направления движения.

<sup>54</sup> Heaviside 1888-1889: 495 (формула). 1889с: 510 (первое доказательство); 1888-1889: часть 4 (второе доказательство).

## Приложение 11. Коэффициент Френеля Предположения Френеля

В оптической теории Френеля свет представляет собой поперечные колебания тонкой упругой среды - эфира.

Предполагается, что упругость эфира одинакова во всех телах, но его плотность зависит от состава тела. Следовательно, скорость света в эфире обратно пропорциональна квадратному корню из его плотности, или плотность прозрачного тела пропорциональна квадрату его оптического индекса.<sup>55</sup>

Френель далее предполагает, что тело, движущееся через эфир, увлекает за собой избыток эфира, который оно содержит<sup>56</sup>. Считая  $\rho$  плотностью эфира в прозрачном теле,  $\rho_0$  плотностью эфира в вакууме,  $v$  скоростью тела, а  $av$  - скоростью центра тяжести эфира в теле, мы имеем

$$\rho av = (\rho - \rho_0)v \quad (A.187)$$

или

$$a = 1 - (\rho_0/\rho) = 1 - 1/n^2 \quad (A.188)$$

### Следствия из законов преломления

Рассмотрим распространение луча света в прозрачной материальной среде с переменным показателем  $n$  и равномерной скоростью  $\mathbf{v}$ . В приближении геометрической оптики путь луча между двумя точками среды - это путь, для которого время прохождения минимально. Назовем  $d\mathbf{l}$  элементом произвольного непрерывного пути,  $ds$  - его длиной, а  $dt$  - временем, которое потребуется свету, чтобы пройти по нему. Скорость света в этом элементе по отношению к удаленным, невозмущенным частям эфира равна

$$c' = c/n + a\mathbf{v} \cdot (d\mathbf{l}/ds), \quad (A.189)$$

где  $a$  - коэффициент затягивания эфира в движущееся вещество.

По отношению к движущейся среде эта скорость равна

$$ds/dt = c' - \mathbf{v} \cdot (d\mathbf{l}/ds) = c/n + (a - 1)\mathbf{v} \cdot (d\mathbf{l}/ds). \quad (A.190)$$

Для первого порядка по  $v/c$  это дает

$$dt = (n/c)ds + (n^2/c^2)(1 - a)\mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}. \quad (A.191)$$

Для полного сопротивления эфира ( $a = 1$ ) условие минимального времени, конечно, идентично принципу Ферма, который дает обычные законы преломления. Для частичного сопротивления те же законы остаются в силе тогда и только тогда, когда коэффициент второго члена  $dt$  не зависит от индекса  $n$ , что требует френелевского значения (A188) сопротивления. Действительно, интеграл от  $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}$  зависит только от конечных точек траектории.<sup>57</sup>

<sup>55</sup> См. Whittaker 1951: 109-10.

<sup>56</sup> Fresnel 1818.

<sup>57</sup> См. Mascart 1893: Том 3, гл. 15.

### Вывод Лоренца (1892-1899)

Для микроскопических полей и сил уравнения Лоренца имеют вид

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{d} &= \rho_m, \quad \nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \\ \nabla \times \mathbf{b} &= \frac{1}{c}(\rho_m \mathbf{v} + \partial \mathbf{d} / \partial t), \quad \nabla \times \mathbf{d} = -\frac{1}{c}(\partial \mathbf{b} / \partial t), \\ \mathbf{f} &= \rho_m(\mathbf{d} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{b})\end{aligned}\quad (\text{A.192})$$

относительно неподвижного эфира (см. стр. 370). Уравнения относительно системы осей, движущихся с постоянной скоростью  $\mathbf{u}$  вдоль оси  $x$ , следуют из галилеевского преобразования  $x \rightarrow x - ut$ , что подразумевает подстановки

$$\partial / \partial t \rightarrow \partial / \partial t - \mathbf{u} \cdot \nabla, \quad \mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v} + \mathbf{u}. \quad (\text{A.193})$$

Эти уравнения читаются так

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{d} &= \rho_m, \quad \nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \quad \nabla \times (\mathbf{b} - \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{d}) = \frac{1}{c}(\rho_m \mathbf{v} + \partial \mathbf{d} / \partial t), \\ \nabla \times (\mathbf{d} + \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{b}) &= -\frac{1}{c} \partial \mathbf{b} / \partial t, \\ \mathbf{f} &= \rho_m(\mathbf{d} + \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{b} + \frac{1}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{b}).\end{aligned}\quad (\text{A.194})$$

Затем Лоренц вводит переменные

$$x' = x, y' = y, z' = z, t' = t - ux/c^2, \quad (\text{A.195})$$

для которых дифференциальные операторы

$$\nabla' = \nabla + (\mathbf{u}/c^2)(\partial / \partial t), \quad \partial / \partial t' = \partial / \partial t \quad (\text{A.196})$$

и он выполняет преобразование поля

$$\mathbf{d}' = \mathbf{d} + \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{b}, \quad \mathbf{h}' = \frac{1}{c} \mathbf{u} \times \mathbf{d}. \quad (\text{A.197})$$

Для первого порядка по  $u/c$  полученные уравнения имеют точно такую же форму, как и уравнения (A.192) для эфира.<sup>58</sup>

Теперь рассмотрим прозрачное тело, движущееся в эфире со скоростью  $\mathbf{u}$ , и предположим, что силы связи ионов и электронов тела не изменяются от его движения (до первого порядка по  $u/c$ ). Тогда уравнения, управляющие упомянутыми выше полями, аналогичны уравнениям для того же тела в состоянии покоя. Следовательно, они допускают решения в виде монохроматических плоских волн с фазой

$$\varphi = \omega t' - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}' = \omega t - (\mathbf{k} + \omega \mathbf{u}/c^2) \cdot \mathbf{r}, \quad (\text{A.198})$$

с  $\omega/k = c/n$ . Соответствующие истинные, неакцентированные поля также являются монохроматическими плоскими волнами со скоростью

$$V = \omega / |\mathbf{k} + \omega \mathbf{u}/c^2| = c/n - (1/n^2 \mathbf{u} \cdot \mathbf{k}/k) + O(u^2/c^2) \quad (\text{A.199})$$

в согласии с уравнениями (A.188) и (A.190) для затягивания Френеля<sup>59</sup>.

<sup>58</sup> См. Lorentz 1899. В предыдущих рассуждениях Лоренц использовал уравнения макроскопического поля.

<sup>59</sup> Lorentz 1895: 95-7 для рассуждений о фазах: Lorentz 1899 для микроскопического подхода.

### Вывод Пуанкаре (1900а)

Согласно Пуанкаре, местное время  $t'$  является кажущимся временем для наблюдателей, движущихся вместе с прозрачным телом. Из принципа относительности следует, что кажущаяся скорость  $d\mathbf{r}'/dt'$  волн такая же, как если бы тело находилось в покое. Это дает

$$c/n = |d\mathbf{r}'/dt'| = |d\mathbf{r}/dt| / |1 - (\mathbf{u}/c^2) \cdot (d\mathbf{r}/dt)| \quad (\text{A.200})$$

из которого следует уравнение (А.199) и сопротивление Френеля первого порядка  $u/c$ .

### Вывод Лауэ (1907)

Рассуждения Лауэ (Laue 1907) формально идентичны рассуждениям Пуанкаре. Однако оно основано на теории относительности Эйнштейна. Следовательно, времена  $t'$  и  $t$  сейчас имеют сопоставимый статус. Они относятся к разным галилеевским системам координат. Не существует эфира, для которого  $t$  имело бы привилегированное значение. Скорость  $d\mathbf{r}/dt$  не более истинна, чем скорость  $d\mathbf{r}'/dt'$ .

<sup>60</sup> Poincare 1900a, 278. Хотя Пуанкаре не приводит вычислений, он отмечает, что результат эксперимента Физо соответствует обычному закону распространения в проточной воде, если это распространение отнести к местному времени.

### Приложение 12. Электродинамика Кона

Циркулярные уравнения Кона имеют вид (в единицах Герца):

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= {}^1/c(\mathbf{D}\mathbf{B}/D\mathbf{t}) \\ \nabla \times \mathbf{H} &= {}^1/c(\mathbf{D}\mathbf{D}/D\mathbf{t} + \mathbf{j}),\end{aligned}\quad (\text{A. 201})$$

с

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} - {}^1/c \mathbf{v} \times \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + {}^1/c \mathbf{v} \times \mathbf{E}, \quad (\text{A. 202})$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  - силы, действующие на единичный электрический или магнитный полюс, связанный с движущейся материей,

$D/D\mathbf{t}$  - конвективная производная для потоков,

$\mathbf{v}$  - скорость материи относительно неподвижных звезд. Эта скорость должна быть хорошо определена даже для очень разреженной материи.

Кон далее предполагает условия<sup>61</sup>

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (\text{A.203})$$

Для тел, покоящихся на Земле, и в системе осей, связанных с Землей, эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= {}^1/c \partial/\partial t (\varepsilon \mathbf{E} - {}^1/u \times \mathbf{H}) \\ \nabla \times \mathbf{H} &= {}^1/c \partial/\partial t (\mu \mathbf{H} + {}^1/u \times \mathbf{E}) + \mathbf{j}/c,\end{aligned}\quad (\text{A.204})$$

с условиями

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E} - {}^1/u \times \mathbf{H}) = \rho, \quad \nabla \cdot (\mu \mathbf{H} + {}^1/u \times \mathbf{E}) = 0, \quad (\text{A.205})$$

Здесь  $\mathbf{u}$  обозначает скорость Земли относительно неподвижных звезд.

Кон вводит местное время  $t' = t - \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}/c^2$ , отметив в 1904 году, что оно дается земными часами, синхронизированными оптическим способом.

Соответствующими дифференциальными операторами являются

$$\partial/\partial t' = \partial/\partial t, \quad \nabla' = \nabla + (\mathbf{u}/c^2)(\partial/\partial t). \quad (\text{A.206})$$

В этих терминах циклические уравнения выглядят следующим образом

$$\begin{aligned}\nabla' \times \mathbf{E} &= {}^1/c \partial \mu \mathbf{H} / \partial t', \\ \nabla' \times \mathbf{H} &= {}^1/c (\partial \varepsilon \mathbf{E} / \partial t' + \mathbf{j}),\end{aligned}\quad (\text{A. 207})$$

и условия гласят

$$\nabla' \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho', \quad \nabla' \cdot (\mu \mathbf{H}) = 0, \quad (\text{A.208})$$

с

$$\rho' = \rho - {}^1/c^2 \mathbf{j} \cdot \mathbf{u} \quad (\text{A.209})$$

Последняя плотность является плотностью, наблюдаемой на Земле, поскольку она соответствует соотношению

$$\partial \rho' / \partial t' + \nabla' \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (\text{A.210})$$

(в этом легко убедиться, взяв дивергенцию второго уравнения окружности). Следовательно, для тел, покоящихся относительно Земли, уравнения, управляющие наблюдаемой эволюцией поля, точно такие же, как если бы Земля не двигалась. Другими словами, наблюдаемое поле не зависит от движения Земли при любом порядке в  $u/c$ .<sup>62</sup>

Этот результат сразу же подразумевает нечувствительность наземных оптических экспериментов к движению Земли. Кон также вывел из своей теории аберрацию звезд и сопротивление Френеля. Для этой цели достаточно отметить, что с первого порядка в  $u/c$  его теория эквивалентна теории Лоренца. Точная связь между этими двумя теориями следующая.

<sup>61</sup> Cohn 1902. Ср. Darrigol 1995b.

<sup>62</sup> Cohn 1900b. 1902, 1904.

### Связь с теорией Лоренца

В этом разделе единицы пространства и времени выбраны так, что  $c = 1$ , и мы предполагаем, что вся материя немагнитна ( $\mu = 1$ ). Для стационарного эфира макроскопические уравнения теории Лоренца имеют вид

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{D}) - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{P}). \quad (\text{A.211})$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  - силы, действующие на единичный заряд или полюс в состоянии покоя;

$\mathbf{P}$  - ионная поляризация;

$\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}$  соответствует электрическому смещению Максвелла;

$\mathbf{B} = \mathbf{H}$  соответствуют магнитной индукции Максвелла

Замены

$$\partial / \partial t \rightarrow \partial / \partial t - \mathbf{u} \cdot \nabla, \quad \mathbf{v} \rightarrow \mathbf{u} + \mathbf{v} \quad (\text{A.212})$$

приводят к уравнениям относительно Земли

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{H}) = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad \nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{u} \times \mathbf{E}) = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \quad (\text{A.213})$$

если все тела на Земле находятся в состоянии покоя.<sup>63</sup>

Кон заметил, что в теории Лоренца продольные размеры движущихся тел сокращаются на коэффициент  $\gamma^{-1}$ , а время эволюции в движущейся системе сокращается на коэффициент

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - u^2 / c^2}. \quad (\text{A.214})$$

Тогда, продолжал Кон, измеренные пространство и время должны быть следующими

$$\mathbf{r}' = (\gamma, \mathbf{l}) \mathbf{r}, \quad t' = \gamma^{-1} t, \quad (\text{A.215})$$

где  $(\alpha, \beta)$  означает умножение на  $\alpha$  компоненты, параллельной  $\mathbf{u}$ , и умножение на  $\beta$  компоненты, перпендикулярной  $\mathbf{u}$ . Для потоков  $\mathbf{j}'$ ,  $\mathbf{B}'$  и  $\mathbf{D}'$  относительно элементов поверхности  $d\mathbf{S}' = (\mathbf{l}, \gamma) d\mathbf{S}$ , мы имеем

$$\mathbf{B}' = (1, \gamma^{-1})\mathbf{B}, \quad \mathbf{D}' = (1, \gamma^{-1})\mathbf{D}, \quad \mathbf{j}' = (1, \gamma^{-1})\mathbf{j}, \quad \mathbf{P}' = (1, \gamma^{-1})\mathbf{P}. \quad (\text{A.216})$$

Для сил  $\mathbf{E}'$  и  $\mathbf{H}'$ , отнесенных к элементам длины-времени  $dl'dt' = (\gamma, 1)\gamma^{-1} = (1, \gamma^{-1})$  и к пробным зарядам и полюсам, движущимся вместе с системой (со скоростью  $\mathbf{u}$ ), имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{E}' &= (1, \gamma)(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{H}), \\ \mathbf{H}' &= (1, \gamma)(\mathbf{H} - \mathbf{u} \times \mathbf{E}), \end{aligned} \quad (\text{A.217})$$

В терминах этих наблюдаемых величин уравнения поля имеют вид

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E}' &= -\partial \mathbf{B}' / \partial t', \\ \nabla \times \mathbf{H}' &= \mathbf{j}' + \partial \mathbf{D}' / \partial t' \end{aligned} \quad (\text{A.218})$$

с

$$\begin{aligned} \mathbf{D}' &= \mathbf{P}' + \mathbf{E}' - \mathbf{u} \times \mathbf{H}', \\ \mathbf{B}' &= \mathbf{H}' + \mathbf{u} \times \mathbf{E}'. \end{aligned} \quad (\text{A.219})$$

Согласно микроскопической картине поляризации Лоренца,  $\mathbf{P}'$  пропорционально  $\mathbf{E}'$  (когда дисперсия пренебрежимо мала). Следовательно, уравнения, управляющие полями, наблюдаемыми на Земле, такие же, как и в теории Кона.<sup>64</sup>

Здесь уместно сделать три замечания.

Во-первых, сам Лоренц не придавал прямого физического значения акцентированным координатам (тем, для которых справедливы уравнения Кона). Для него эти координаты относились к фиктивной системе, полученной путем мысленного приведения движущейся системы в состояние покоя. Поэтому интерпретация Коном акцентированных координат была новым вкладом в теорию Лоренца.

Во-вторых, в теории Кона нет ни сокращения длины, ни расширения времени. Соответственно, уравнения поля Кона относительно неподвижных звезд отличаются от уравнений Лоренца относительно неподвижного эфира. Как мы только что видели, для земных наблюдателей это различие в точности компенсируется эффектами сокращения-расширения Лоренца.

В-третьих, интерпретация Коном акцентированных координат в теории Лоренца не учитывает синхронизацию часов. Если часы оптически синхронизированы, то наблюдаемое время - это местное время  $t'' = t' - \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}' / c^2 = \gamma^{-1}t - \gamma \mathbf{u} \cdot \mathbf{r} / c^2$ , которое дается преобразованием Лоренца (галилеевское преобразование уже включено в  $\mathbf{r}$ )

<sup>63</sup> Lorentz 1895 (для уравнений в системе осей, привязанных к Земле).

### Энергия и механические силы

Циркулярные уравнения (A.201) и выражения (A.202)  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{B}$  предполагают баланс

$$\nabla \cdot \mathbf{\Pi} + [-\partial w / \partial t + \nabla \cdot (w \mathbf{v})] + \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} - \sigma_{ij} \partial_i v_j - \mathbf{v} \cdot (\mathbf{D} / \mathbf{D}t) (\mathbf{\Pi} / c^2) = 0 \quad (\text{A.220})$$

с

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{A.221})$$

$$w = 1/2(\varepsilon E^2 + \mu H^2) + (2/c^2) \mathbf{v} \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \quad (\text{A.222})$$



и

$$\sigma_{ij} = \varepsilon E_i E_j - 1/2 \varepsilon E^2 \delta_{ij} + \mu H_i H_j - 1/2 \mu H^2 \delta_{ij} \quad (\text{A.223})$$

Для *вещественного* элемента объема и в единицу времени последовательные члены этого уравнения дают поток энергии через поверхность элемента, изменение энергии поля в элементе, тепло Джоуля, рассеянное в элементе, работу напряжений на поверхности элемента и работу плотности силы, которая является конвективной производной от  $\Pi/c^2$ <sup>65</sup>. Чистая сила, действующая на объемный элемент, равна

$$f_j = \partial_i \sigma_{ij} - 1/c^2 D\Pi_j/Dt \quad (\text{A.224})$$

или

$$\mathbf{f} = \mathbf{E}(\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}) + \mathbf{H}(\nabla \cdot \mu \mathbf{H}) + (\nabla \times \mathbf{E}) \times \varepsilon \mathbf{E} + (\nabla \times \mathbf{H}) \times \mu \mathbf{H} - 1/2(\nabla \varepsilon)E^2 - 1/2(\nabla \mu)H^2 - (1/c^2)(D\Pi/Dt) \quad (\text{A.225})$$

Когда нет абсолютного движения вещества, эта сила идентична той, которую предсказывает теория Максвелла-Герца, за исключением последнего члена. Благодаря этому члену не существует силы, действующей в вакууме, как и следовало ожидать в теории без эфира.<sup>66</sup>

Однако равенство действия и реакции не выполняется. Общая сила, действующая на материю, равна

$$\int \mathbf{f} d\tau = -(1/c^2) (\partial/\partial t) \int \mathbf{E} \times \mathbf{H} d\tau, \quad (\text{A.226})$$

что в общем случае отлично от нуля. Кон отметил это без комментариев.<sup>67</sup> Он знал, что третий закон Ньютона не применим к теории Лоренца; и у него не было причин поддерживать этот закон в своей теории, которая намеренно избегала механической редукции.

Рассмотрим теперь последствия теории Кона для сил, действующих на тела, покоящиеся относительно Земли. Введем новые пространственные и временные координаты

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{u}t, \quad t' = t - \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}/c^2 \quad (\text{A.227})$$

в уравнение (A.224), получаем

$$f_j = \partial_i \sigma_{ij} - (1/c^2)(\partial\Pi_j/\partial t) - (1/c^2)(\partial/\partial t')(u_i \sigma_{ij}) \quad (\text{A.228})$$

Два первых члена воспроизводят силу, которая существовала бы, если бы Земля не двигалась. Последний член исчезает для постоянных полей, так что обычные электростатические и электродинамические силы вообще не зависят от движения Земли. В случае переменных полей этот член не обязательно исчезает, но, по мнению Кона, он слишком мал, чтобы его можно было обнаружить. Таким образом, только незначительная часть электромеханических сил Кона зависит от движения Земли.<sup>68</sup>

<sup>64</sup> Cohn 1904: 1294-1303

<sup>65</sup> Cohn 1904: 1404-1416.

<sup>66</sup> Cohn 1902 50.

<sup>67</sup> Cohn 1902.

<sup>68</sup> Cohn 1904: 1404-1416.

## Сокращения, используемые в библиографиях

- ACP: *Annales de Chimie et de Physique*. - *Анналы химии и физики*.
- AHES: *Archive for History of Exact Sciences*. - Архив истории точных наук.
- AHQP: *Archive for the History of Quantum Physics*. University of Berkeley, Office for history of science and technology; Paris, Mediatheque d'histoire des sciences de La Villette; and elsewhere.  
*Архив по истории квантовой физики*. Университет Беркли
- AIHS: *Archives Internationales d'Histoire des Sciences*.  
Международные архивы истории наук.
- AJP: *American Journal of Physics*. - *Американский журнал физики*.
- AJS: *American Journal of Science*. - *Американский научный журнал*.
- AN: *Archives Neerlandaises*.
- AP: *Annalen der Physik (und der Chemie)*. - *Анналы физики (и химии)*.
- ASPN: Supplement a la Bibliotheque Universelle de Geneve: Archives des Sciences Physiques et Naturelles. - Дополнение к Универсальной библиотеке Женевы: Архивы. Физические и естественные науки.
- BAR: British Association for the Advancement of Science, Report.  
Британская ассоциация содействия развитию науки. Отчет.
- BB: Akademie der Wissenschaften zu Berlin, mathematisch-physikalische Klasse, *Sitzungsberichte*. - Академия наук в Берлине, Математико-физический класс, *Отчеты о занятиях*.
- BJHS: *British Journal for the History of Science*. -  
*Британский журнал по истории науки*.
- BJPS: *British Journal for the Philosophy of Science*. -  
*Британский журнал по философии науки*.
- CA: Correspondance du grand Ampere. Переписка великого Ампера. Ed. by L. de Launay. 3 Vols. Paris, 1936.
- CDMJ: *The Cambridge and Dublin Mathematical Journal*. -  
*Кембриджский и Дублинский математический журнал*.
- CMF: *The correspondence of Michael Faraday*. Ed. F. James. 2 Vols. Exeter, 1991.  
*Переписка Майкла Фарадея в двух томах*
- CMJ: *The Cambridge Mathematical Journal*.  
*Кембриджский математический журнал*.
- CR: Academie des sciences, Paris, *Comptes-rendus Hebdomadaires des Seances*. Академия наук, Париж, *Сводные отчеты о заседаниях*
- DSB: *Dictionary of scientific biography*. Ed. C. C. Gillispie. 16 Vols. New York, 1970-1980. - *Словарь научных биографий* в 16 томах
- ECP: *The collected papers of Albert Einstein*, Vols. 1-2. Ed. John Stachel et al. Princeton, 1987-1989. EE: *L'Eclairage Electrique*.  
*Собрание сочинений А. Эйнштейна*, тома 1-2.
- FD: Michael Faraday, *Diary*. 8 Vols. London, 1932-1936.  
Майкл Фарадей, *Дневник* в 8 томах. Лондон, 1932-1936.
- FER: Michael Faraday, *Experimental researches*. 3 Vols. London, 1839, 1844,

1855. Майкл Фарадей, *Экспериментальные исследования* в 3 томах.  
 FSW: *The scientific writings of the late George Francis FitzGerald*. Ed. Joseph Larmor. Dublin, 1902. –  
*Научные труды покойного Джорджа Фрэнсиса Фицджеральда*
- GN: Königliche Gesellschaft der Wissenschaften und der Georg August Universität zu Göttingen. *Nachrichten*.  
 Королевское общество естественных и гуманитарных наук и Университет Георга Августа в Гёттингене. *Новости*.
- GW: Carl Friedrich Gauss, *Werke*. 15 Vols. Hildesheim, 1973. –  
 Карл Фридрих Гаусс, *Сочинения* в 15 томов. Хильдесгейм, 1973.
- HEP: Oliver Heaviside, *Electrical papers*. 2 Vols. New York, 1892. –  
 Оливер Хевисайд, *Электрические работы* в 2 томах. Н.-Й., 1892.
- HGW: Heinrich Hertz, *Gesammelte Werke*. 3 Vols. Leipzig, 1894-1895.  
 Генрих Герц, *Собрание сочинений* в 3 томах. Лейпциг, 1894-1895.
- HSPS: *Historical Studies in the Physical (and Biological) Sciences*.  
*Исторические исследования в физических (и биологических) науках*.
- HWA: Hermann von Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen*. 3 Vols. Leipzig, 1882, 1883, 1895. Герман фон Гельмгольц, *Научные труды* в 3 томах
- JP: *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire Naturelle*.  
*Журнал "Физика, химия и естествознание"*.
- JRAM: *Journal für die reine und angewandte Mathematik*.  
*Журнал теоретической и прикладной математики*.
- JSHS: *Japanese Studies in the History of Science*.  
*Японские исследования по истории науки*.
- KGA: Gustav Kirchhoff, *Gesammelte Abhandlungen*. Leipzig, 1882. –  
 Густав Кирхгоф, *Избранные работы*. Лейпциг, 1882.
- KSGA: Königliche Sächsishe Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-physikalische Classe, *Abhandlungen*.  
 Лейпцигское общество научных исследований.  
 Математико-физический класс. *Руководства*.
- KSGB: Königliche Sächsishe Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig, *Berichte über die Verhandlungen*.  
 Лейпцигская школа наук. *Отчеты по итогам переговоров*.
- LCP: Hendrik Antoon Lorentz, *Collected papers*. 9 Vols. The Hague, 1934-1936.  
 Хендрик Антуан Лоренц, *Собрание сочинений* в 9 томах.
- LMPP: Joseph Larmor, *Mathematical and physical papers*. 2 Vols. Cambridge, 1929.  
 Джозеф Лармор, *Математические и физические работы* в 2 томах.
- MRP: *Collection de mémoires relatifs à la physique*. 2 Vols. Paris, 1884, 1885.  
*Сборник памятных записок по физике* в 2 томах. Париж, 1884, 1885.
- MSP: James Clerk Maxwell, *The scientific papers*. 2 Vols. Cambridge, 1890.  
 Джеймс Клерк Максвелл, *Научные труды* в 2 томах.
- NRRS: Royal Society of London, *Notes and Records*.

- Лондонское Научное Королевское общество. *Записки и отчеты.*  
 NTM: *Schriftenreihe für Geschichte der Naturwissenschaften, Technik, und Medizin.*  
*Серия по истории науки, техники и медицины.*  
 PCPS: Cambridge Philosophical Society, *Proceedings.*  
 Кембриджское философское общество. *Научные труды.*  
 PLMS: London Mathematical Society, *Proceedings.*  
 Лондонское математическое общество. *Научные труды.*  
 PM: *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.* Лондонский, Эдинбургский и Дублинский философский журнал и научный журнал.  
 PO: *Oeuvres de Henri Poincaré.* 11 Vols. Paris, 1954.  
*Работы Анри Пуанкаре в 11 томах. Париж, 1954.*  
 PRA: Royal Academy of Amsterdam. *Proceedings.*  
 Королевская академия Амстердама. *Научные труды.*  
 PRDS: Royal Dublin Society, *Scientific Proceedings.*  
 Королевское Дублинское Общество. *Научные труды.*  
 PRI: Royal Institution, *Proceedings.* - Королевский институт. *Научные труды.*  
 PRS: : Royal Society of London, *Proceedings.*  
 Лондонское Королевское Общество. *Научные труды.*  
 PT: Royal Society of London. *Philosophical Transactions.* –  
 Лондонское Королевское Общество. *Философские Труды.*  
 PZ: *Physikalische Zeitschrift.* - Физический журнал  
 QJS: *Quarterly Journal of Science.* - Ежеквартальный научный журнал.  
 RBMV: *Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins.*  
*Результаты наблюдений магнитной ассоциации*  
 RHS: *Revue d'Histoire des Sciences.* - Журнал истории науки.  
 SCMF: *The selected correspondence of Michael Faraday.* Ed. L. P. Williams, 2 Vols.  
 Cambridge, 1971. Избранная переписка Майкла Фарадея. в 2 томах  
 SHMP: *Studies in History and Philosophy of Modern Physics.*  
*Исследования по истории и философии современной физики.*  
 SHPS: *Studies in History and Philosophy of Science.*  
*Исследования по истории и философии науки.*  
 SLPM: *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell.* Ed. Peter Harman.  
 Vols.1-2. Cambridge, 1990-1995. -  
*Научные письма и статьи Джеймса Клерка Максвелла. Тома 1-2.*  
 TCPS: Cambridge Philosophical Society, *Transactions.* –  
 Кембриджское философское общество. *Труды.*  
 TMPP: William Thomson, *Mathematical and physical papers.* 6 Vols. Cambridge,  
 1882-1911. У. Томсон, Математические и физические работы в 6 томах  
 TPEM: William Thomson, *Reprint of papers on electrostatics and magnetism.* London,  
 1872. У. Томсон, Репринт статей по электростатике и магнетизму.  
 TRDS: Royal Dublin Society, *Scientific Transactions.*  
 Королевское Дублинское Общество. *Научные труды.*

VDNA: Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Aertze, *Verhandlungen*.

Общество немецких естествоиспытателей и врачей, *Переговоры*

VKA: Koninklijke Akademie van Wetenschappen, Amsterdam, *Verslagen*.

Королевская академия Ветенаппен, Амстердам, *Издания*.

WW: Wilhelm Weber. *Werke*. 6 Vols. Berlin, 1892-1894. –

Вильгельм Вебер. *Работы* в 6 томах. Берлин, 1892-1894 гг.

Примечание: Ссылки на Томсона и Видеманна, без упоминания имени, соответствуют Уильяму Томсону и Густаву Видеманну.

### **Библиография основной литературы**

#### **Abraham, Max**

1902. Dynamik des Elektrons. GN (1902): 20-41.

1904. Die Grundhypothesen der Elektronentheorie. PZ 5: 576-579.

1905. Theorie der Elektrizität: Elektromagnetische Theorie der Strahlung.

1908. Second edition of Abraham 1905.

#### **Ampere, Andre Marie**

1801. Fragment of an untitled memoir on electricity and magnetism. Archives de l'Academie des Sciences, carton X, chemise 203, printed in Blondel 1982: 175-6.

1820a. Analyse des memoires lus par M. Ampere a l'Academie des sciences, dans les seances du 18 et 25 septembre, des 9 et 30 octobre 1820. Annales Generales des Sciences Physiques 6: 238-57.

1820b. Sur l' action mutuelle entre deux courans electriques, entre un courant electrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimans. ACP: 59-76, 170-208.

1820c. Untitled manuscript, Archives de l'Academie des Sciences, carton VIII, chemise 158, printed in Blondel 1978.

[1820d]. Memoire lu a l'Academie Royale des Sciences le 4 decembre 1820, Archives, carton VIII, chemise 162. In MRP 2: 128-35.

1820e. Note sur un memoire lu a l'Academie Royale des Sciences, dans la seance du 4 decembre 1820. JP 91: 226-30.

1820f. Note sur deux memoires lus le 26 decembre 1820 et le deuxieme les 8 et 15 janvier 1821. JP 92: 160-5.

1820g. Note sur les experiences electro-magnetiques de MM. Oersted, Ampere, Arago et Biot. Annales des Mines 5: 535-58.

1821a. Note sur un appareil apartir duquel on peut verifier toutes les proprietes des conducteurs de l'electricite voltaïque. ACP 16: 88-107, 313-33.

1821b. Notes relatives au memoire de M. Faraday, par MM. Savary et Ampere. ACP 18: 370-9.

1821c. Reponse a la lettre de M. van Beck sur une nouvelle experience electromagnetique. JP 93: 447-67.

1822a. Notice sur les nouvelles experiences electro-magnetiques faites par differens physiciens, depuis le mois de mars 1821. JP 94: 61-6.

- 1822b. Experiences relatives a de nouveaux phenomenes electro-dynamiques (obtenus par M. Ampere au mois de decembre 1821), extrait des notices lues it l' Academie Royale des Sciences dans les seances des 3 et 10 decembre 1821 et 7 janvier 1822. ACP 20: 60-74.
- 1822c. Recueil d'observations electro-dynamiques. Paris.
- 1822d. Memoire sur la determination de la formule qui represente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs volta'iques (10 June 1822). ACP 20: 398-419,419-21 (additional note of 24 June 1822).
- [1822e]. Notice sur quelques experiences nouvelles relatives it l'action mutuelle de deux portions de circuit volta'ique et it la production des courants electriques par influence, et sur les circonstances dans lesquelles l'action electrodynamique doit, d'apres la theorie, produire dans un conducteur mobile autour d'un axe fixe un mouvement de rotation continu, ou donner it ce conducteur une direction fixe (presente a l'Academie Royale des Sciences, le 16 septembre 1822). Unpub. manuscript, in MRP 2: 329-37.
- [1824a]. Sur le mode de transmission des courants electriques et la theorie electrochimique. Manuscript of a memoir read on 5 January 1924, in Blondel 1982: 177-85.
- 1824b. Extrait des seances de l'Academie Royale des Sciences, lundi 5 janvier 1824 (unsigned). ACP 25: 88-90.
- 1826a. Extrait d'un memoire sur l' action exercee par un circuit electrodynamique formant une courbe plane dont les dimensions sont considerees comme infiniment petites; sur la maniere d'y ramener celle d'un circuit ferme, quelles qu'en soi la forme et la grandeur [...]  
Correspondance mathimatique et physique des Pays Bas 2: 35-47.
- 1826b. Memoire sur la theorie mathematique des phenomenes electro-dynamiques, uniquement deduite de l'experience. Paris. Page numbers refer to the edition of 1883 (reprinted in 1958).
1936. Correspondance du grand Ampere. Ed. by L. de Launay. 3 Vols. Paris.

### **Arago, Francois**

1825. L' action que les corps aimantes et ceux qui ne le sont pas exercent les uns sur les autres. ACP 28: 325.
1826. Note concernant les phenomenes magnetiques auxquels le mouvement donne naissance. ACP 32: 213--40.

### **Aulinger, Eduard**

1886. Über das Verhältniss der Weber'schen Theorie der Elektrodynamik zu dem von Hertz aufgestellten Prinzip der Einheit der Electricischen Krafte. AP 27: 119-32.

### **Becquerel, Antoine Cesar**

- 1834-1840. *Traite d'electricite et de magnbisme et des applications de ces sciences*. 7 Vols. Paris.

### **Becquerel, Edmond**

- 1846a. Note sur l'action du magnétisme sur tous les corps. *CR* 22: 952-961.  
1846b. Expériences concernant l'action du magnétisme sur tous les corps.  
*ACP* 17: 437-451.  
1849. Recherches relatives à l'action du magnétisme sur tous les corps.  
*CR* 28: 623-627.  
1850. De l'action du magnétisme sur tous les corps. *ACP* 28: 283-350.

### **Bertrand, Joseph**

1871. Note sur la théorie mathématique de l'électricité dynamique.  
*CR* 73: 965-970.  
1872. Observations sur la théorie des actions électrodynamiques proposée par  
M. Helmholtz. *CR* 75: 860-865.  
1873. Examen de la loi proposée par M. Helmholtz pour représenter l'action  
de deux éléments de courant. *CR* 77: 1049-1054.  
1891. Review of Poincaré 1890. *Journal des Savants*: 742-748.

### **Bessel, Friedrich**

1828. *Untersuchungen über die Länge des einfachen Sekundenpendels*. Berlin.  
Bezold, Wilhelm von  
1870. Untersuchungen über die elektrische Entladung. *AP* 140: 541-52.  
Translated in *PM* 40: 42-51.

### **Biot, Jean-Baptiste**

1824. *Precis elementaire de physique*. 3rd ed., 2 Vols. Paris.

### **Biot, Jean-Baptiste, and Felix Savart**

1820. Sur le magnétisme de la pile de Volta. *ACP* 15: 222.  
1821. Sur l'aimantation imprimée aux métaux par l'électricité en mouvement.  
*Journal des Savants* (April 1821):

### **Blake, Lucien J.**

1883. Über die Entwicklung der elektrischen Neutralität des von ruhigen elektrisierten Flüssigkeitsflächen  
aufsteigenden Dampfes. *AP* 19: 518-534. English in *PM* 16 (1883): 211-  
224 Boltzmann, Ludwig  
1886a. Bemerkung zu dem Aufsatz des Hm. Lorberg über einen Gegenstand  
der Elektrodynamik. *AP* 29: 598-603.  
1886b. Zur Theorie des von Hall entdeckten elektromagnetischen Phänomens.  
Kaiserliche Akademie der Wissenschaften zu Wien, Mathematisch-  
naturwissenschaftliche Classe, Sitzungsberichte 94: 644-669.  
1891-1893. *Vorlesungen über die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität und des Lichtes*,  
2 Vols. Leipzig.  
1895. On certain questions of the theory of gases. *Nature* 51: 413-415.  
1897. Über die Unentbehrlichkeit der Atomistik in der Naturwissenschaften.  
*AP*. Also in Boltzmann 1905: 141-157.  
1899. Über die Entwicklung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer

Zeit. VDNA. Also in Boltzmann 1905: 198-227.

1904. On statistical mechanics. In Theoretical physics and philosophical problems (Dordrecht, 1974): 159-172.

1905. *Populare Schriften*. Leipzig.

**Brace, De Witt Bristol**

1904. On double refraction in matter moving through the aether.  
*PM* 7: 317-29.

**Bradley, James**

1728. A new apparent motion discovered in the fixed stars; its cause assigned; the velocity and equable motion of light deduced. *PRS* 35: 308-321.

**Bucherer, Alfred**

1903. Über den Einfluss der Erdbewegung auf die Intensität des Lichtes.  
*AP* 11: 270-83.

1904. *Mathematische Einführung in die Elektronentheorie*. Leipzig.

1905. Das deformierte Elektron und die Theorie des Elektromagnetismus.  
*PZ* 6: 833-834.

1906. Ein Versuch, den Elektromagnetismus auf Grund der Relativbewegung darzustellen. *PZ* 7: 553-557.

1907. On a new principle of relativity in electromagnetism. *PM* 13: 413-420.

1908a. On the principle of relativity and on the electromagnetic mass of the electron. A reply to Mr. Cunningham. *PM* 15: 316-18.

1908b. Messungen an Becquerelstrahlen. Die experimentelle Bestätigung der Lorentz-Einsteinschen Theorie. *PZ* 9: 755-762.

**Chasles, Michel**

1839. Enoncé de deux théorèmes généraux sur l'attraction des corps et sur la théorie de la chaleur. *CR* 8: 209-211.

**Clausius, Rudolf**

1853. Über einige Stellen der Schrift von Helmholtz 'Über die Erhaltung der Kraft'. *AP* 89: 568-79.

1854. Über einige Stellen der Schrift von Helmholtz 'Über die Erhaltung der Kraft'. Zweite Notiz. *AP* 91: 601-4.

1857. Über die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten. *AP* 101: 338-60.

1868. Über die von Gauss angeregte neue Auffassung der elektrodynamischen Erscheinungen. *AP* 135: 606-21.

1875. Über ein neues Grundgesetz der Elektrodynamik. *AP* 156: 657-60.

1876. Über das Verhalten des elektrodynamischen Grundgesetzes zum Princip von der Erhaltung der Energie und über eine neue weitere Vereinfachung des ersteren. *AP* 157: 489-94.

1877a. Über die Ableitung eines neuen elektrodynamischen Grundgesetzes.  
*JRAM* 82: 85-130.

1877b. Über die Behandlung der zwischen linearen Strömen und Leitern stattfindenden ponderomotorischen und elektromotorischen Kräfte nach dem elektrodynamischen Grundgesetze. *AP* I: 14-39.



1879. *Die mechanische Behandlung der Elektrizität*. Braunschweig.

**Cohn, Emil**

1890. Zur Systematik der Elektrizitätslehre. *AP* 40: 625-39.

1900a. *Das elektromagnetische Feld. Vorlesungen über die Maxwell'sche Theorie*.

1900b. Über die Gleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. In *Recueil de travaux offerts par les auteurs A. H. A. Lorentz à l'occasion du 25<sup>ème</sup> anniversaire de son doctorat le 11 décembre 1900*: 516-23. The Hague.

1902. Über die Gleichungen des elektromagnetischen Feldes für bewegte Körper. *AP* 7: 29-56.

1904. Zur Elektrodynamik bewegter Systeme. *BB*: 1294-303, 1404-16.

1913. *Physikalisches über Raum und Zeit*. Leipzig.

**Cohn, Emil, and Leo Arons**

1886. Leitungsvermögen und Dielektrizitätskonstante. *AP* 28: 454-77.

**Colladon, Jean-Daniel**

1893. *Souvenirs et mémoires*. Geneva.

**Cornu, Alfred**

[1894-1895]. *Cours de Physique. Acoustique et optique*. Ecole Polytechnique. Mimeographed.

**Coulomb, Charles Augustin**

1784-1788. Sur l'électricité et le magnétisme. Académie Royale des Sciences, *Mémoires*. Also in *MRP* I.

**Crookes, Williams**

1879a. On the illumination of lines of molecular pressure. *PM* 7: 57-64.

1879b. On the illumination of lines of molecular pressure and the trajectory of the molecules (Bakerian lecture). *PT* 170: J35-64.

1879c. Contributions to molecular physics in high vacua. *PT* 170: 641-62.

**Cunningham, Ebenezer**

1907. Electromagnetic mass of the moving electron. *PM* 14: 538-547.

1908. Principle of relativity and electromagnetic mass of the electron. *PM* 16: 423-428.

**Daniell, John Frederic**

1839. On the electrolysis of secondary compounds. *PT*: 97-112.

1840. Second letter on the electrolysis of secondary compounds. *PT*: 209-224.

**Daniell, Frederic, and William Allen Miller**

1844. Additional researches on the electrolysis of secondary compounds. *PT*: 1-20.

**Davy, Humphry**

1807. The Bakerian Lecture on some chemical agencies of Electricity. *PT*: 1-56.

1821. On the magnetic phenomena produced by electricity. In a letter to W. H. Wollaston, M.D., F.R.S. *PT*: 7-19.

1829. An account of some experiments on the Torpedo. *PT*: 15-18.

### **De la Rive, Auguste**

1822. Memoire sur l'action qu'exerce le globe terrestre sur une portion mobile du circuit voltaïque. Societe de Physique et d' Histoire Naturelle de Geneve, *Bibliothèque universelle* 21: 29-48.
1825. Memoire sur quelques uns des phenomenes que presente l' electricite voltaïque dans son passage atravers les conducteurs liquides. *ACP* 28: 190-221.
1853. *A treatise on electricity in theory and practice*. 2 Vols. London.

### **De la Rive, Gaspard**

1821. Notice sur quelques experience electromagnetiques. *Bibliothèque Universelle de Geneve* 16: 201-203.

### **Demonferrand, Jean Baptiste Firmin**

1823. *Manuel d'electricite dynamique, ou traite sur l'action mutuelle des conducteurs electriques et des aimans, et sur la nouvelle theorie du magnerisme; pour faire suite atous les tmites de physique elementaire*. Paris.

### **Des Coudres, Theodor**

1895. Über Kathodenstrahlen unter dem Einflusse magnetischer Schwingungen. Physikalische Gesellschaft zu Göttingen, *Verhandlungen*: 85-87.
1896. Elektrodynamisches tiber Kathodenstrahlen. *VDNA Theil* 2, Halftel: 69.

### **Drude, Paul**

- 1893a. Über magnetooptische Erscheinungen. *AP* 46: 353-422.
- 1893b. Über die Berechnung magnetooptischer Erscheinungen. *AP* 48: 122-125.
- 1893c. Zur Theorie magnetooptischer Erscheinungen. *AP* 49: 690-696.
1894. *Physik des Aethers auf eiektromagnetischer Grundlage*. Stuttgart.
- 1900a. Lehrbuch der Optik. Leipzig.
- 1900b. Zur Ionentheorie der Metalle. *PZ* I: 161-165.
- 1900c. Zur Elektronentheorie der Metalle. *AP* 1: 566-613; *AP* 3: 369-402.

### **Duhem, Pierre**

1902. *Les Theories electriques de 1. Clerk Maxwell: Etude historique et critique*. Paris.
1914. *La tjeorie physique: Son objet, sa structure*. 2nd ed. Paris.

### **Edlund, Eric**

1882. Über den elektrischen Widerstands des Vacuums. *AP* 15: 514-533.

### **Eichenwald, Alexander**

1903. Über die magnetische Wirkungen bewegter Karper im elektrostatischen Felde. *AP* 11: 1-30,421-441.

### **Einstein, Albert**

- [1895]. Über die Untersuchung des Aetherzustandes im magnetischen Felde. In *ECP* 1: 6-9.
- 1905a. Über einen die Erzeugung und die Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *AP* 17: 132-148.
- 1905b. Zur Elektrodynamik bewegter Karper. *AP* 17: 891-921.

- 1905c. Ist die Tragheit eines Karper von seinem Energieinhalt abhängig ?  
*AP* 18: 639-641.
1906. Das Prinzip der Erhaltung des Schwerpunktsbewegung und die Tragheit der Energie. *AP* 20: 627-33.
- 1907a. Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und der Elektronik* 4: 411-462.
- 1907b. Bemerkungen zu der Notiz von Hm. Paul Ehrenfest: 'Die Translation deformierbaren Elektronen und der Flächensatz'. *AP* 23: 206-208.
1910. Le principe de relativité et ses conséquences. *ASPN* 29: 5-28, 125-144.
1919. Time, space, and gravitation. London *Times*, 28 November 1919: 13.
1922. How I created the theory of relativity? (from notes taken by Jun Ishiwara from Einstein's lecture in Kyoto on 14 December 1922)  
*Physics Today* 35 (8): 45-47.
1949. Autobiographisches. In *Albert Einstein: Philosopher-scientist*, ed. P. A. Schilpp: 1-94. Evanston.
- 1985-1993. *Oeuvres choisies*. Ed. Françoise Balibar et al. 6 Vols. Paris.
- 1987-1989. *The collected papers of Albert Einstein*. Ed. John Stachel et al. 2 Vols. Princeton.

### **Eisenlohr, Wilhelm**

1870. Lehrbuch der Physik zum Gebrauch bei Vorlesungen und zum Selbstunterricht. 10th ed. Stuttgart.

### **Elster, Julius, and Hans Geitel**

1883. Über die Electricitätserregung beim Contact von Gasen und glühenden Körpern. *AP* 19: 588-624.
1889. Über die Electricitätserregung beim Contact verdünnter Gase mit galvanisch glühenden Drahten. *AP* 37: 315-329.

### **Erman, Paul**

1801. Über die electroskopischen Phänomene der Galvanischen Saule. *AP* 8: 197-215.

### **Faraday, Michael**

1821. Historical sketch of electromagnetism. *Annals of Philosophy* 18: 195-200, 274-290.
- 1822a. Historical sketch of electromagnetism. Part 2. *Annals of Philosophy* 19: 107-117.
- 1822b. On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism. *QJS*. Also in *FER* 2: 127-147.
- 1822c. Description of an electro-magnetical apparatus for the exhibition of rotary motion. *QJS*. Also in *FER* 2: 148-151.
1823. Historical statement respecting electro-magnetic rotation. *QJS*. Also in *FER* 2: 159-162.
- 1932-1936. *Faraday's diary*. Ed. Thomas Martin. 8 Vols. London.
1839. *Experimental researches in electricity*. Vol. 1. London.

1844a. A speculation touching Electric conduction and the Nature of Matter.  
*PM*. Also in *FER* 2: 284-293.

1844b. Experimental researches in electricity. Vol. 2. London.

1846. Thoughts on ray-vibrations. *PM*. Also in *FER* 3: 447-52.

1854. On electric induction-Associated cases of current and static effects.  
*PRJ*. Also in *FER* 3: 508-23.

1855. *Experimental researches in electricity*. Vol. 3. London.

1856. Letter to P. Riess on the action of non-conducting bodies in electric induction. *PM* 11: 10-17.

1971. *The selected correspondence of Michael Faraday*. Ed. L. P. Williams, 2 Vols. Cambridge.

1991. *The correspondence of Michael Faraday*. Ed. F. James. 2 Vols. Exeter.

### **Fechner, Gustav Theodor**

1845. Über die Verknüpfung der Faraday'schen Inductions-Erscheinungen mit dem Ampere-schen elektro- dynamischen Erscheinungen. *AP* 64: 337-345.

### **Feddersen, Berend Wilhelm**

1857. *Beiträge zur Kenntniss des elektrischen Funkens*. Dissertation. Kiel.

1858. Beiträge zur Kenntniss des elektrischen Funkens.  
*AP* 103: 69-88,151-157.

1859. Über elektrische Wellenbewegung. *AP* 108: 497-501.

1908. *Entladung der Leidener Flasche, intermittierende, kontinuierliche, oszillatorische Entladung und dabei geltende Gesetze*. Ed. Th. Des Coudres. Ostwalds Klassiker der exacten Wissenschaften. Vol. 166. Leipzig.

### **FitzGerald, George Francis**

1876. On the rotation of the plane of polarization of light by reflection from the pole of a magnet. *PRS*. Also in FitzGerald 1902: 9-14.

1879a. On the electromagnetic theory of the reflection and the refraction of light. *PT*. Also in *FSW*: 45-73.

1879b. On the possibility of originating wave disturbances in the ether by means of electric forces. *TRDS*. Also in *FSW*: 90-92.

1880. On the possibility of originating wave disturbances in the ether by means of electric forces. Part 2. *TRDS*. Also in *FSW*: 93-98.

1881. Note on Mr. J. J. Thomson's Investigation of the electromagnetic action of a moving electrified sphere. *TRDS* 3: 250-254.

1882. On the possibility of originating wave disturbances in the ether by means of electric forces. Corrections and additions. *TRDS*. Also in *FSW*: 99-101.

1883a. On the quantity of energy transferred to the ether by a variable current. *TRDS*. Also in *FSW*: 122-126.

1883b. On Maxwell's equations for the electromagnetic action of moving electricity. *BAR*. Also in *FSW*: 127.

1885a. On a model illustrating some properties of the ether. *PRDS*. Also in *FSW*: 142-156.

1885b. On the structure of mechanical models illustrating some properties of

the ether. *PM*. Also in *FSW*: 157-162.

1888. Address to the mathematical and physical section of the British Association. *BAR*. Also in *FSW*: 229-40.

1889a. On an electromagnetic interpretation of turbulent liquid motion. *Nature*. Also in *FSW*: 254-261.

1889b. The ether and the earth's atmosphere. *Science* 13: 390.

1890. On an episode in the life of } (Hertz's solution of Maxwell's equations). *BAR*: 755-757.

1892. M. Poincare and Maxwell. *Nature* 45: 532-533.

1893. Heaviside's electrical papers. *The Electrician*. Also in *FSW*: 292-300.

1896. Helmholtz memorial lecture. Chemical Society, *Transactions*. Also in *FSW*: 340-377.

1899. On a hydrodynamical hypothesis as to electromagnetic actions. *PRDS*. Also in *FSW*: 472-477.

1902. *The scientific writings of the late George Francis FitzGerald*. Ed. 1. Larmor. Dublin 1902.

### **FitzGerald, George Francis, and Frederick Trouton**

1886. On the accuracy of Ohm's law in electrolytes. *BAR*: 312-314.

1887. On Ohm's law in electrolytes. *BAR*: 345-346.

### **Fizeau, Hippolyte**

1851. Sur les hypotheses relatives a l'ether lumineux, et sur une experience qui paraît demontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumiere se propage dans leur interieur. *CR* 33: 349-355.

### **Fappl, August**

1894. *Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität*. Leipzig.

### **Fourier, Joseph**

1822. *Theorie analytique de la chaleur*. Paris.

### **Fresnel, Augustin**

1818. Lettre d' Augustin Fresnel a François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phenomenes d'optique. *ACP* 9. Also in *Oeuvres Completes*, Paris (1868), Vol. 2: 627-36.

### **Gans, Richard**

1905. Zur Elektrodynamik bewegter Medien. *AP* 16: 516-34, and *AP* 18: 172-96.

### **Gauss, Carl Friedrich**

1832a. Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata. *Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Göttingensis*. Also in *GW* 5: 81-118.

1832b. Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata. (German summary). *Göttingische gelehrte Anzeigen*. Also in *GW* 5: 293-308.

1835. *Nachricht* in *Göttingische gelehrte Anzeigen* of 7 March 1835. Also in *GW* 5: 528-536.

1836a. Introduction to *RBMV im Jahre* 1836. Also in *GW* 5: 345-351.

- 1836b. Erdmagnetismus und Magnetometer. H. C. Schuhmacher, *Jahrbuch*.  
Also in *GW* 5: 315-344.
1837. Über ein neues, zunächst zur unmittelbaren Beobachtung der  
Veränderungen in der Intensität des horizontalen Theils des  
Erdmagnetismus bestimmtes Instrument. *RBMV*.  
Also in *GW* 5: 357- 373.
1838. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. *RBMV*.  
Also in *GW* 5: 119-175.
1839. Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse  
des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungs-  
Kräfte. *RBMV*. Also in *GW* 5: 196-242. 1973. *Werke*. 2 Vols. Hildesheim.

**Gauss, Carl Friedrich, and Wilhelm Weber**

1837. Das Inductions-Inclinatorium. *RBMV*: Sec. V.
- Giese, Walther**
1882. Experimentelle Beiträge zur Kenntnis vom elektrischen Leistungsvermögen  
der Flammengase. *AP* 17: 1-41, 236-256, 518-49.
1889. Grundzüge einer einheitlichen Theorie der Electricitätsleitung.  
*AP* 37: 576-606.

**Glazebrook, Richard T.**

1881. On the molecular vortex theory of electromagnetic action.  
*PM* 11: 397-413.
1885. Report on optical theories. *BAR*: 157-261.
1893. On a mechanical analogue of dispersion. *BAR*: 688-690.

**Goldstein, Eugen**

1876. Vorläufige Mittheilungen über elektrische Entladungen in verdünnten  
Gasen. Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin.  
*Monatsberichte*: 279-295.
- 1880a. Über die Entladung der Electricität in verdünnten Gasen (signed 1878).  
*AP* 11: 832-858.
- 1880b. *Untersuchungen über elektrischell Entladungen in Gasen I: Eine neue Form  
elektrischer Abstossung*. Berlin.
- 1881a. Über elektrische Lichterscheinungen in Gasen. *AP* 12: 90-109.
- 1881b. Über die Entladung der Electricität in verdünnten Gase.  
*AP* 12: 249-279.
1882. On the electric discharge in rarefied gases (transl. of Goldstein 1881b,  
with minor additions), *PM* 14:366-387.
1886. Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode  
inducirter Entladungen. *BB*: 691-99.

**Gordon, J. E. H.**

1880. *A physical treatise on electricity and magnetism*. 2 Vols. London.

**Grassmann, Heinrich Gunther**

1845. Neue Theorie der Elektrodynamik. *AP* 64: 1-18.

### **Gray, Andrew**

1891. Review of Poincare 1890. *Nature* 44: 296-9.

### **Green, George**

1828. *An essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism*. Nottingham. Also in Green 1871: 1-115.

1838. On the laws of reflexion and refraction of light at the common surface of two noncrystallized media. *PT*. Also in Green 1871: 243-69.

1871. *Mathematical papers of the late George Green*. Ed. N. M. Ferrers. London.

### **Grotthus, Theodor von**

1806. Sur la decomposition de l'eau et des corps qu'elle tient en dissolution a l'aide de l'electricite galvanique. *ACP* 58: 54-74. English in *PM* 25: 330-9.

### **Hall, Edwin**

1879. On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics* 2: 287-92. Also in *PM* 9 (1880): 225-230.

1880a. On the new action of magnetism on a permanent electric current. *PM* 10: 301-308.

1880b. On Boltzmann's method for determining the velocity of an electric current. *PM* 10: 136-138.

### **Harris, William Snow**

1834. On some elementary laws of electricity. *PT*: 213-246.

### **Heaviside, Oliver**

1876. On the extra current. *PM*. Also in Heaviside 1892, Vol. 1: 53-61.

1878. On electromagnets, etc. *Journal of the Society of Telegraphic Engineers*. Also in *HEP* 1: 95-112.

1881. On induction between parallel wires. *Journal of the Society of Telegraphic Engineers* 9: 427-458.

1882-1883. The relations between magnetic force and electric current. *The Electrician*. Also in *HEP* 1: 195-255.

1883. Some electrostatic and magnetic relations. *The Electrician*. Also in *HEP* 1: 255-277.

1883-1884. The energy of the electric current. *The Electrician*. Also in *HEP* 1: 277-353.

1884-1885. The induction of currents in cores. *The Electrician*. Also in *HEP* 1: 353-416.

1885. Remarks on the Volta-force, etc. *Journal of the Society of Telegraphic Engineers*. Also in *HEP* 1: 416-428.

1885-1887. Electromagnetic induction and its propagation. *The Electrician*. Also in *HEP* 1: 429-560, Vol. 2: 39-155.

1886-1887. On the self-induction of wires. *PM*. Also in *HEP* 2: 168-323.

1888-1889. Electromagnetic waves, the propagation of potential, and the electromagnetic effects of a moving charge. *The Electrician*. Also in *HEP* 2: 490-499.

- 1889a. *Electromagnetic waves*. London.
- 1889b. The general solution of Maxwell's electromagnetic equations in a homogeneous isotropic medium, especially in regard to the derivation of special solutions, and the formulae for plane waves. *PM*. Also in *HEP* 2: 468-485.
- 1889c. On the electromagnetic effects due to the motion of electrification through a dielectric. *PM*. Also in *HEP* 2: 504-518.
1891. The rotational ether in its application to electromagnetism. *The Electrician* 26: 360-361.
- 1891-1892. On the forces, stresses, and fluxes of energy in the electromagnetic field. *PRS*. Also in *HEP* 2: 521-574.
1892. *Electrical papers*. 2 Vols. London.
- 1893-1912. *Electromagnetic theory*. 3 Vols. London.

### **Helmholtz, Hermann von**

1847. *Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung*. Berlin. Also in *HWA* I: 12-68.
- 1850a. Messungen über den zeitlichen Verlauf der Zuckung animalischer Muskeln und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Reizung in den Nerven. *Archiv für Anatomie und Physiologie*. Also in *HWA* 2: 764-843.
- 1850b. Über die Methoden, kleinste Zeittheile zu messen, und ihre Anwendung für physiologische Zwecke. *Königsberger wissenschaftliche Unterhaltungen*. Also in *HWA* 2: 862-880.
1851. Über die Dauer und den Verlauf der durch Stromesschwankungen inducirten elektrischen Ströme. *AP*. Also in *HWA* 1: 429-462.
1854. Erwiderung auf die Bemerkungen von Hrn. Clausius. *AP*. Also in *HWA* 1: 76-93.
1868. Sur le mouvement le plus general d'un fluide. *CR* 47: 215-222, 754-757.
- 1869a. Über die physiologische Wirkung kurz dauernder elektrischer Schläge im Innern von ausgedehnten leitenden Massen. Naturhistorisch-medicinischer Verein zu Heidelberg, *Verhandlungen*. Also in *HWA* 1: 526-530.
- 1869b. Über elektrische Oscillationen. Naturhistorisch-medicinischer Verein zu Heidelberg, *Verhandlungen*. Also in *HWA* 1: 531-36.
- 1870a. Über die physiologische Wirkung kurzdauernder elektrischer Schläge im Innern von ausgedehnten Leitern. Naturhistorisch-medicinischer Verein zu Heidelberg, *Verhandlungen*. Also in *HWA* 1: 526-530.
- 1870b. Über die Theorie der Elektrodynamik. Erste Abhandlung: Über die Bewegungsgleichungen der Elektricität für ruhende Körper. *AP*. Also in *HWA* 1: 545-628.
1871. Über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen. Königl. Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, *Monatsberichte*. Also in *HWA* 1: 629-635.
1872. Über die Theorie der Elektrodynamik. Vorläufiger Bericht. Königl.



Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, *Monatsberichte*.

Also in *HW A* 1: 636-646.

1873a. Über die Theorie der Elektrodynamik. Zweite Abhandlung: Kritisches. *JRAM*. Also in *HW A* 1: 647-687.

1873b. Vergleich des Ampere'schen und des Neumann'schen Gesetzes für die Elektrodynamischen Kräfte. Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, *Monatsberichte*. Also in *HW A* 1: 688-701.

1873c. On later views of the connection of electricity and magnetism. Board of Regents of the Smithsonian Institution, *Annual Report*: 247-253.

1874a. Über die Theorie der Elektrodynamik. Dritte Abhandlung: Die Elektrodynamischen Kräfte in bewegten Leitern. *JRAM*.  
Also in *HW A* 1: 702-762.

1874b. Kritisches zur Elektrodynamik. *AP*. Also in *HW A* 1: 763-773.

1875a. Versuche über die im ungeschlossenen Kreise durch Bewegung inducirten elektromotorischen Kräfte. *AP*. Also in *HW A* 1: 774-90.

1875b. Zur Theorie der anomalen Dispersion. *AP* 154: 582-596.

1876. Bericht betreffend Versuche über die magnetische Wirkung elektrischer Convection, ausgeführt von Hm. Henry A. Rowland. *AP*.  
Also in *HW A* 1: 791-797.

1877. Über galvanische Ströme, verursacht durch Konzentrationsunterschiede; Folgerungen aus der mechanischen Wärmetheorie. *AP*.  
Also in *HW A* 1: 840-854.

1879. Studien über elektrische Grenzschichten. *AP*. Also in *HW A* 1: 855-898.

1880. Über Bewegungsströme am polarisirten Platina. *HW A* 1: 899-921.

1881 a. On the modern development of Faraday's conception of electricity. *Journal of the Chemical Society*. Also in *HW A* 3: 53-87.

1881b. Zusätze zu Helmholtz 1847. In *HW A* 1: 68-75.

1881c. Zusatz zu Helmholtz 1873a. In *HW A* 1: 684-687.

1881 d. Über galvanische Polarisation des Quecksilbers und darauf bezügliche Versuche des Hm. Arthur König. Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin, *Monatsberichte*. Also in *HW A* 1: 925-938.

1882-1895. *Wissenschaftliche Abhandlungen*. 3 Vols. Leipzig.

1882a. Die Thermodynamik chemischer Vorgänge. *BB*.  
Also in *HW A* 2: 958-78.

1882b. Zur Thermodynamik chemischer Vorgänge. *BB*.  
Also in *HW A* 2: 979-92.

1883a. On galvanic currents passing through a very thin stratum of an electrolyte. Royal Society of Edinburgh, *Proceedings*.  
Also in *HW A* 3: 88-91.

1883b. Zur Thermodynamik chemischer Vorgänge. III. *BB*.  
Also in *HW A* 3: 92-114.

1885. Sir William Thomson's 'Mathematical and physical papers'. *Nature*.

Also in *HW A* 3: 587-596.

1886. Über die physikalische Bedeutung des Princip der kleinsten Wirkung. *JRAM*. Also in *HW A* 3: 203-248.

1892. Das Prinzip der kleinsten Wirkung in der Elektrodynamik. *AP*.  
Also in *HW A* 3: 476-504.

1893a. Elektromagnetische Theorie der Farbenzerstreuung. *BB*, *AP*.  
Also in *HW A* 3: 505-525.

1893b. Folgerungen aus Maxwell'scher Theorie über die Bewegung des reinen Aethers. *BB*, *AP*. Also in *HW A* 3: 526-535.

[1894]. Unfinished addendum to Helmholtz 1892. In *HW A* 3: 597-604.

1897. *Vorlesungen über die elektromagnetische Theorie des Lichtes*. Ed. by A. König and C. Runge (from the Berlin lectures of 1892-1893). Hamburg.

### **Helmholtz, Robert von**

1887. Versuch mit einem Dampfstrahl. *AP* 32: 1-19.

### **Herschel, John**

1832. Mechanism of the heavens. *Quarterly Review*. Also in *Essays from the Edinburgh and Quarterly Reviews, with essays and other pieces* (London, 1857): 21-62.

### **Hertz, Heinrich**

[1879]. Nachweis elektrischer Wirkungen in Dielectricitat. August-October 1879. Manuscript preserved at the London Science Museum.  
Introductory section reproduced in O'Hara and Pricha 1987: 123-125.

1880a. Versuche zu Feststellung einer oberen Grenze für die kinetische Energie der elektrischen Strömung. *AP* 10: 414-448.  
Also in Hertz 1895: 1-36.

1880b. Über die Induktion in rotierenden Kugeln. Dissertation.  
In Hertz 1895: 37-134.

1881. Obere Grenze für die kinetische Energie der bewegten Electricitat. *AP* 14: 581-590. Also in Hertz 1895: 145-54.

1883. Versuche über die Glimmentladung. *AP* 19: 782-816.

1884. Über die Beziehungen zwischen den Maxwell'schen elektrodynamischen Grundgleichungen und den Grundgleichungen der gegnerischen Elektrodynamik. *AP*. Also in Hertz 1895: 294-314.

1887a. Über sehr schnelle elektrische Schwingungen. *AP*.  
Also in Hertz 1892a: 32-58.

1887b. Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *AP*. Also in Hertz 1892a: 68-86.

1887c. Über Induktionserscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren. *BB*. Augmented *AP* version in Hertz 1892a: 102-114.

1888a. Über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektrodynamischen Wirkungen. *BB*. Augmented *AP* version in Hertz 1892a: 115-132.

1888b. Über die Einwirkung einer geradlinigen elektrischen Schwingung auf

- eine benachbarte Strombahn. *AP*. Also in Hertz 1892a: 86-101.
- 1888c. Über elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion. *AP*. Also in Hertz 1892a: 133-46.
- 1889a. Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie. *AP*. Also in Hertz 1892a: 147-170.
- 1889b. Über Strahlen elektrischer Kraft. BB, AP.  
Also in Hertz 1892a: 184-198.
- 1889c. Über die Fortleitung elektrischer Wellen durch Drahte. *AP*.  
Also in Hertz 1892a: 171-183.
- 1889d. Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität. Bonn.  
Also in Hertz 1895: 339-354.
- 1890a. Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper. *AP*. Also in Hertz 1892a: 208-255.
- 1890b. Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. *AP*. Also in Hertz 1892a: 256-85.
1891. Über die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen. *AP*.  
Also in Hertz 1892a: 199-207.
- 1892a. *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft*. Leipzig.
- 1892b. Über den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten. *AP* 45: 28-32.
1893. *Electric waves: Being researches on the propagation of electric action with finite velocity*. Translation of Hertz 1892a by D. E. Jones, with a preface by Lord Kelvin. London.
1894. *Die Principien der Mechanik im neuen Zusammenhang dargestellt*. Leipzig.
1895. *Schriften vermischten Inhalts (Gesammelte Werke, Band I)*. Ed. P. Lenard. Leipzig.
1896. *Miscellaneous papers*. Translation of Hertz 1895 by D. E. Jones and G. A. Schott. London.
1977. *Errinerungen. Briefe. Tagebücher; Memoirs. Letters. Diaries*. Arranged by Johanna Hertz. Second enlarged edition prepared by Mathilde Hertz and Charles Stisskind. San Francisco.

### **Herwig, Hermann**

1874. Über eine Modification des elektromagnetischen Drehversuches. *AP* 153: 262-7.

### **Hicks, William Mitchinson**

1888. A vortex analogue to static electricity. *BAR*: 577-8.

### **Hittorf, Wilhelm**

1853. Über die Wanderung der Ionen während der Elektrolyse. *AP* 89: 177-211.
1856. Über die Wanderung der Ionen während der Elektrolyse. Zweite Mitteilung. *AP* 98: 1-33.
1858. Rechtfertigung meiner Mittheilungen 'Über die Wanderungen der Ionen.'

Elektrolyse einer Uisung zweier Salze. *AP* 103: 33-55.

1859. Über die Wanderung der Ionen während der Elektrolyse. Dritte Mitteilung. *AP* 106: 337-411, 513-586.

1869a. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Erste Mitteilung. *AP* 136: 1-31.

1869b. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Zweite Mitteilung. *AP* 136: 197-234.

1878. Rechtfertigung des Satzes: 'Electrolyte sind Salze' als Erwiderung auf Dr. L. Bleekrode's Kritik. *AP* 4: 374-416.

1879. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Dritte Mitteilung. *AP* 7: 553-631.

1883. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Vierte Mitteilung. *AP* 20: 705-55.

### **Hopkinson, John**

1880. Note on Mr. E. H. Hall's experiments on the action of magnetism on a permanent electric current. *PM* 10: 430-1.

### **Hoppe, Edmund**

1884. *Geschichte der Elektrizität*. Leipzig.

### **Jamin, Jules, and Edmond Bouty**

1878-1883. Cours de physique de l'Ecole Polytechnique. 3rd edn. 4 Vols. Paris.

### **Jenkin, Henry Charles Fleeming**

1873. Electricity and magnetism. London.

### **Jenkin, Henry Charles Fleeming, and James Clerk Maxwell**

1863. On the elementary relations between electrical quantities. *BAR* 32: 130-63.

### **Kaufmann, Walther**

1901. Die magnetische und die elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse des Elektrons. *GN*: 143-155.

1902. Die elektromagnetische Masse des Elektrons. *PZ* 4: 54-57.

1903. Über die elektromagnetische Masse der Elektronen. *GN*: 326-330.

1905. Über die Konstitution des Elektrons. *BB*: 949-956.

1906. Über die Konstitution des Elektrons. *AP* 19: 487-553.

### **Kelvin, Lord: see Thomson, William**

### **Kerr, John**

1876. On the rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. *BAR*: 40-41.

1877. On the rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. *PM* 3: 321-43.

### **Ketteler, Eduard**

1873. *Astronomische Undulations-theorie, oder die Lehre von der Aberration des Lichtes*. Bonn.

### **Kirchhoff, Gustav**

1845. Über den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige. *AP*. Also in *KGA*: 1-16.

1847. Über die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei der

Unter'suchung der linearen Vertheilung galvanischer Ströme gefuhrt wird.  
*AP.* Also in *KGA*: 22-32.

1848. Über die Andwendbarkeit der Formeln für die Intensitäten der galvanischen Ströme in einem Systeme linearer Leiter auf Systeme, die zum Theil aus nicht linearen Leitern bestehen. *AP.*

Also in *KGA*: 33--48.

1849a. Bestimmung der Konstante, von welcher die Intensität inducirter elektrischer Ströme abhängt. *AP.* Also in *KGA*: 118-130.

1849b. Über eine Ableitung der Ohm'schen Gesetze, welche sich an die Theorie der Elektrostatik anschliesst. *AP.* Also in *KGA*: 49-55.

1857a. Über die Bewegung der Elektrizität in Drahten. *AP.*

Also in *KGA*: 131-154.

1857b. Über die Bewegung der Elektrizität in Leitern. *AP.*

Also in *KGA*: 154-168.

1864. Zur Theorie der Entladung einer Leydener Flasche. *AP* 121: 551-566.

1876. *Vorlesungen über mathematische Physik. Mechanik.* Leipzig.

1882. *Gesammelte Abhandlungen.* Leipzig.

### **Kohlrausch, Friedrich**

1876a. Das elektrische Leitungsvermögen der Chlor-, Brom- und Jod-Wasserstoffsäure, der Schwefel-, Phosphor-, Oxal-, Wein- und Essigsäure in wässrigen Lösungen. *AP* 159: 233-275.

1876b. Über das Leitungsvermögen der in Wasser gelösten Elektrolyte im Zusammenhang mit der Wanderung ihrer Bestandteile. *Göttinger Berichte.* Also in Kohlrausch 1911, Vol. 2: 142-150.

1879. Das elektrische Leitungsvermögen der wässrigen Lösungen von den Hydraten und Salzen der leichten Metalle, sowie von Kupfervitriol, Zinkvitriol und Silbersalpeter. *AP* 6: 1-51, 145-210.

1910-1911. *Gesammelte Abhandlungen.* 2 Vols. Leipzig.

### **Kohlrausch, Friedrich, and Otto Grotian**

1875. Das elektrische Leitungsvermögen der Chloride von den Alkalien und alkalischen Erden, sowie der Salpetersäure in wässrigen Lösungen. *AP* 154: 1-14, 215-239.

### **Kohlrausch, Friedrich, and Wilhelm August Nippoldt**

1869. Über die Gültigkeit der Ohmschen Gesetze für Elektrolyte und eine numerische Bestimmung des Leitungswiderstandes der verdünnten Schwefelsäure durch alternierende Ströme. *AP* 138: 280-98, 370-390.

### **Korteweg, Diederik Johannes**

1880. Über das ponderomotorische Elementargesetz. *IRAM* 90: 49-70.

### **Lamb, Horace**

1887. On ellipsoidal current sheets. *PT* 178: 131-149.

### **Langevin, Paul**

1913. L'inertie de l'énergie et ses conséquences. *JP.* Also in *Oeuvres scientifiques.*

Paris (1950): 397-426.

**Larmor, Joseph**

- 1884a. Electromagnetic induction in conducting sheets and solid bodies. *PM*.  
Also in *LMPP* 1: 8-28.
- 1884b. On least action as the fundamental formulation in dynamics and physics. *PLMS*. Also in *LMPP* 1: 31-70.
1885. On the molecular theory of galvanic polarization. *PM*.  
Also in *LMPP* 1: 133-145.
1890. Rotary polarization, illustrated by the vibrations of a gyrostatically loaded chains. *PLMS*. Also in *LMPP* 1: 205-213.
- 1891a. The equations of disturbances in gyrostatically loaded media, and the circular polarization of light. *PLMS*. Also in *LMPP* 1: 238-255.
- 1891b. On a generalized theory of electrodynamics. *PRS*.  
Also in *LMPP* 1: 232-247.
1892. On the theory of electrodynamics, as affected by the nature of mechanical stresses in excited dielectrics. *PRS*. Also in *LMPP* 1: 274-287.
- 1893a. The action of magnetism of light: with a critical correlation of the various theories of light-propagation. *BAR*. Also in *LMPP* 1: 310-355.
- 1893b. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium (abstract). *PRS*. Also in *LMPP* 1: 389-413.
1894. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part 1. *PT*.  
Also in *LMPP* 1: 414-535.
- 1895a. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part II: Theory of electrons (abstract). *PRS*. Also in *LMPP* 1: 536-542.
- 1895b. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part II: Theory of electrons. *PT*. Also in *LMPP* 1: 543-597.
1896. On the theory of moving electrons and electric charges. *PM*.  
Also in *LMPP* 1: 615-618.
- 1897a. On the theory of the magnetic influence on spectra; and on the radiation from moving ions. *PM* 44: 503-512.
- 1897b. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part III: Relations with material media (abstract). *PRS*. Also in *LMPP* 1: 624-639.
- 1897c. A dynamical theory of the electric and luminiferous medium. Part III: Relations with material media. *PT*. Also in *LMPP* 2: 11-132.
- 1900a. *Aether and matter*. Cambridge.
- 1900b. The methods of mathematical physics. *BAR*. Also in *LMPP* 1: 192-216.
1904. On the ascertained absence of effects of motion through the aether, in relation to the constitution of matter, and on the FitzGerald hypothesis. *PRS*. Also in *LMPP* 2: 274-280.
1929. *Mathematical and physical papers*. 2 Vols. Cambridge.

**Laue, Max von**

1907. Die Mitföhrung des Lichtes durch bewegte Körper in der Relativitätstheorie. *AP* 23: 989-990.

### **Le Blanc, Max**

1896. *The elements of electrochemistry* (transl. from German 1895 edn.).  
London 1896.

### **Lecher, Ernst**

1890. Eine Studie über elektrische Resonanzerscheinungen. *AP* 41: 850-870.

### **Lenard, Philipp**

- 1894a. Über Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und in  
ausserstem Vacuum. *AP* 51: 225-267.  
1894b. Über die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen. *AP* 52: 23-33.  
1895. Über die Absorption der Kathodenstrahlen. *AP* 56: 255-275.  
1896. On cathode rays and their probable connection with Röntgen rays.  
*BAR*: 709-710.  
1898. Über die elektrostatische Eigenschaften der Kathodenstrahlen.  
*AP* 64: 279-289.  
1920. *Über Kathodenstrahlen* (Nobel-Vortrag). 2nd edn. Berlin und Leipzig.

### **Lenz, Emil**

1834. Über die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische  
Vertheilung erregten galvanischen Strömen. *AP* 3 I: 483-494.

### **Lienard, Alfred**

1896. La theorie de Lorentz. *EE* 14: 417-24, 456-461.  
1898a. Champ électrique et magnétique produit par une charge électrique  
concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque.  
*EE* 16: 5-14, 53-59, 106-2.  
1898b. La théorie de Lorentz et celle de Larmor. *EE* 16: 320-334, 360-365.

### **Lodge, Oliver**

1876. On a model illustrating the passage of electricity through metals,  
electrolytes, and dielectrics, according to Maxwell's theory.  
*PM* 2: 353-74.  
1881. The relation between electricity and light. *Nature* 23: 302-304.  
1885a. The identity of energy: in connection with Mr. Poynting's paper on the  
transfer of energy in an electromagnetic field; and on the two  
fundamental forms of energy. *PM* 19: 482-497.  
1885b. On electrolysis. *BAR*: 723-772.  
1888a. Protection of buildings from lightning.  
*The Electrician* 21: 204-207, 234-236, 273-276, 302-303.  
1888b. Measurement of the electro-magnetic wave-length.  
*The Electrician* 21: 607-609.  
1888c. On the theory of lightning conductors. *PM* 26: 217-230.  
1889. *Modern views of electricity*. London.  
1892. On the present state of our knowledge of the connection between ether  
and matter. An historical summary. *Nature* 46: 164-165.  
1893. Aberration problems. *PT* 184A: 727-804.

1897a. The latest discoveries in physics (February 1897).

*The Electrician* 38: 58-570.

1897b. A few notes on Zeeman's discovery. *The Electrician* 38: 643-644.

1909. *The ether of space*. London.

1931. *Past years: An autobiography*. London.

Lodge, Oliver, and James Howard

1890. On electric radiation and its concentration by lenses. *PRS* 10: 143-163.

### **Lorberg, Hermann**

1878. Über das clcktrodynamische Grundgcsetz. *JRAM* 84: 305-331.

1886. Bemerkung zu zwei Aufsätzen von Hertz und Aulinger tiber einen Gegenstand der Elektrodynamik. *AP* 29: 666-72.

1887. Erwiderung auf die Bemerkungen des Herrn Boltzmanns zu meiner Kritik zweier Aufsätze von Hertz und Aulinger. *AP* 31: 131-137.

### **Lorentz, Hendrik Antoon**

1875. Over de theorie der retugkaatsing en brking van het licht. *Akademisch proefschrift*. Transl. as 'Sur la theorie de la reflexion et de la refraction de la lumiere' in *LCP* 1: 193-383.

1878a. De moleculaire theorien in de natuurkunde (Leiden lecture). Transl. as 'Molecular theories in physics' in *LCP* 9: 26-49.

1878b. Over het verband tusschen de voortplantings sneltheit en samestelling der midden stoffen. *VKA*. Transl. as 'Concerning the relation between the velocity of propagation of light and the density and composition of media' in *LCP* 2: 3-119.

1882. De grondformules der electrodynamica. *AN* 17: 83-100.

1884. Le phenomene decouvert par Hall et la rotation electromagnetique du plan de polarisation de la lumiere. *AN* 19: 123-152.

1886. Over den invloed dien de beweging der aarde op de lichtverschijnselen uitofent. *VKA* 2. Transl. as 'De l'influence du mouvement de la terre sur les phenomenes lumineux' in *AN* (1887) and *LCP* 4: 153-214.

1891. Electriciteit en ether. Nederl. Natuur- en Geneesk. Congres, 4 April

1891. *Verhandelingen*. Also in *LCP* 9: 89-101.

1892a. La theorie electromagnetique de Maxwell et son application aux corps mouvants. *AN*. Also in *LCP* 2: 164-321.

1892b. On the reflexion of light by moving bodies. *VKA*. Also in *LCP* 4: 215-218.

1892c. De relative beweging van der aarde en den aether. *VKA*. Transl. as 'The relative motion of the earth and the ether,' in *LCP* 4: 220-3.

1895. Versuch einer Theorie del' elektrischen und optischen Ersclzeinungen in bewegten Korpern. Leiden. Also in *LCP* 5: 1-139.

1896. De doo Prof. Rontgen ontdekte Stralen. De gids. Also in *LCP* 9: 149-65.

1898a. Optische verschinitjnelsen die met de lading en de massa der ionen in verband staan. *VKA*. Transl. as 'Optical phenomena connected with the charge and mass of ions' in *LCP* 3: 17-39.



- 1898b. Die Fragen welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen (Düsseldorf meeting). *VDNA*. Also in *LCP* 7: 101-115.
1899. Vereenvoudigde theorie der elektrische en optische verschijnselen in lichamen die zich bewegen. *VKA*. Transl. as 'Theorie simplifiée des phénomènes électriques et optiques dans les corps en mouvement' in *AN* (1902) and in *LCP* 5: 139-155.
- 1900a. Theorie des phénomènes magneto-optiques récemment découverts. In *Rapports présentés au congrès international de physique de 1900* (4 Vols., Paris), Vol. 3: 1-33.
- 1900b. Considerations sur la pesanteur. *VKA*. Also in *LCP* 5: 198-215.
1901. Über die scheinbare Masse der Ionen. *PZ*. Also in *LCP* 3: 113-116.
1902. The fundamental equations for electromagnetic phenomena in ponderable bodies deduced from the theory of electrons. *AN*. Also in *LCP* 3: 116-131.
- 1904a. Electromagnetische verschijnselen in een stelsel dat zich met willekeurige snelheid, kleiner dan die van het licht, beweegt. *VKA* 12: 986-1009. Transl. as 'Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than light' in *PR4* and in *LCP* 5: 172-197.
- 1904b. Weiterbildung der Maxwellschen Theorie. Elektronentheorie. In *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*. Vol. 5, part 2: 145-280. Leipzig.
1909. *The theory of electrons and its applications to the phenomena of light and radiant heat* (Columbia University lectures, Spring 1906, with additions). Leipzig.
1914. Deux mémoires de Henri Poincaré sur la physique mathématique. *Acta Mathematica*. Also in *LCP* 7: 258-273.
1920. *Das Relativitätsprinzip*. Leipzig.
- 1934-39. *Collected Papers*. 9 Vols. The Hague.

### **Lorenz, Ludvig Valentin**

- 1867a. Über die Identität der Schwingungen des Lichtes mit den elektrischen Strömen. *AP* 131: 243-263.
- 1867b. On the identity of the vibrations of light with electrical currents. *PM* 34: 287-301.
1879. Fortpflanzung der Electricität. *AP* 7: 161-193.

### **MacCullagh, James**

1839. An essay towards a dynamical theory of crystalline reflexion and refraction. Royal Irish Academy, *Transactions*. Also in MacCullagh 1880: 145-184.
1880. *The collected works of James MacCullagh*. Ed. S. Haughton and J. H. Jellett. Dublin.

### **Mach, Ernst**

1901. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt*, 4th edn. Leipzig.

### **Marianini, Stefano**

1837. Sulla teoria degli elettromotori, Memoria IV: Esame di alcune sperienze addotte dal Sig. Faraday per provare che l'elettricit  voltaica nasce dall'azione chimica dei liquidi sui metalli. Con un' appendice sopra un' anomalia che presentario alcune metallic nella decomposizione dell'Ioduro di Potassio operata dall'elettricità, Memorie della *Societ  Italiana delle Scienze residente in Modena*, 21: 205-246.

### **Mascart, Eleuthere**

1872. Sur les modifications qu'eprouve la lumiere par suite du mouvement de la source et du mouvement de l'observateur. *Annules de l'Ecole Normale* 1: 157-214.
1874. Sur les modifications qu'eprouve la lumiere par suite du mouvement de la source et du mouvement de l'observateur. *Annales de l'Ecole Normale* 3 (1874): 363-420.
1893. *Traite d'optique*. 3 Vols. Paris.

### **Mascart, Eleuthere, and Jules Joubert**

- 1882-1886. *Lecons sur l'electricite et le magnbisme*. 2 Vols. Paris.

### **Maxwell, James Clerk**

1850. On the equilibrium of elastic solids. Royal Society of Edinburgh. *Transactions*. Also in *MSP* 1: 30-71.
- [1854a]. Notes on electricity. Manuscript fragment. In *MSLP*]: 251-253.
- 1854b. On the transformation of surfaces by bending. *TCPS*.  
Also in *MSP* 1: 80-114.
- [1855]. On Faraday's lines of force. Abstract. Unpublished manuscript.  
In *MSLP* 1: 353-356.
- 1856a. Abstract of paper 'On Faraday's lines of force' (Part II). *PCPS*.  
Also in *MSLP* 1: 370-375.
- 1856b. On Faraday's lines of force. *TCPS*. Also in *MSP* 1: 155-229.
1861. On physical lines of force. Parts I and II. *PM*. Also in *MSP* 1: 451-488.
1862. On physical lines of force. Parts III and IV. *PM*. Also in *MSP* 1: 489-513.
1864. A dynamical theory of the electromagnetic field. Abstract. *PRS*.  
Also in *MSLP* 2: 189-196.
1865. A dynamical theory of the electromagnetic field. *PT*.  
Also in *MSP* 1: 586-597.
- 1868a. On a method of making a direct comparison of electrostatic with electromagnetic force; with a note on the electromagnetic theory of light. *PT*. Also in *MSP* 2: 125-143.
- 1868b. On the absorption and dispersion of light. Unpublished MS.  
In *MSLP* 2: 419-420.
1869. Mathematical Tripos question, in *The cambridge calendarfor the year 1869*: 502. Also in *MSLP* 2: 420-421.
1870. Remarks on the mathematical classification of physical quantities. Mathematical Society of London, *Proceedings*. Also in *MSP* 2: 257-266.

- 1873a. *A treatise on electricity and magnetism*. 2 Vols. Oxford.  
 [1873b]. Unpublished and untitled manuscript on the theory of anomalous dispersion. In *MSLP* 2: 864-867.
- 1873c. 'Elements of Natural Philosophy.' By Professors Sir W. Thomson and P. G. Tait. *Nature*. Also in *MSP* 2: 324-328.
1875. Atom. *Encyclopedia britannica*. Also in *MSP* 2: 445-584.
1878. Ether. *Encyclopedia britannica*. 9th edn., Vol. 8. Also in *MSP* 2: 763-775.
1879. Thomson and Tait's Natural Philosophy. *Nature*. Also in *MSP* 2: 776-85.
1881. *An elementary treatise on electricity*. Ed. W. Garnett. Oxford.
- 1885-1889. *Traite d'electricite et de magnhisme* (Translation of Maxwell 1873a). 2 Vols. Paris.
1890. *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Ed. W. D. Niven. 2 Vols. Cambridge.
- 1890-1895. *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell*. Ed. P. Harman. Vols. 1, 2. Cambridge.
1891. *A treatise on electricity and magnetism*. 3rd edn. Oxford.

### **Michelson, Albert Abraham**

1881. The relative motion of the earth and the luminiferous ether. *AJS* 22: 120-129.
1882. Sur le mouvement relatif de la terre et de l'ether. *CR* 94: 520-3.

### **Michelson, Albert A., and Edward W. Morley**

1886. Influence of the motion of the medium on the velocity of light. *AJS* 31: 377-386.
1887. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. *AJS* 34: 333-345.

### **Mie, Gustav**

1899. Über mögliche Aetherbewegungen. *AP* 68: 129-134.
- 1901a. Über mögliche Aetherbewegungen. *PZ* 2: 181-182.
- 1901b. Über die Bewegungen eines als flüssig angenommenen Aethers. *PZ* 2: 318-325.

### **Mossotti, Ottaviano**

1847. Recherches theoriques sur l'induction electrostatique, envisagee d'apres les idees de Faraday. *ASPN* 6:193-198.
1850. Discussione analitica sull'influenza che l'azione di un mezzo dielettrico ha sulla distribuzione dell' elettricita alia superficie di pili carpi elettrici disseminati in esso. *Memorie di matematica e di fisica della soeietà italiana delle scienze residente in Modena* 24 (2): 49-74.

### **Müller, Johann Heinrich Jacob, and Claude Pouillet**

- 1888-1890. *Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik und Meteorologie*. Neunte umgearbeitete und vermehrte Auflage von Leop. Pfaundler. 3 Vols. Braunschweig.

### Neumann, Carl

1858. *Explicare tentatur quomodo fiat ut lueis planum polarisationis per vires electricas vel magneticas declinetur.* Halle.
1863. *Die magnetische Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. Versuch einer mathematischen Theorie.* Halle.
- 1868a. *Die Principien der Elektrodynamik.* Tübingen. Reprinted with a postscript in *Mathematische Annalen* 17 (1880): 400-434.
- 1868b. *Resultate einer Untersuchung über die Principien der Elektrodynamik.* GN: 223-234.
1869. Notizen über einer ktirzlich erschienenen Schrift über die Principien der Elektrodynamik. *Mathematische Annalen* 1: 317-324.
- 1871a. Elektrodynamische Untersuchungen mit besonderer Rücksicht auf das Princip der Energie. *KSGB* 23: 386-449.
- 1871b. Über die von Helmholtz in die Theorie der elektrischen Vorgänge eingeführten Prämissen, mit besonderer Rücksicht auf das Princip der Energie. *KSGB* 23: 450-478.
- 1873a. *Die Elektrischen Kriifte. Darlegung und Erweiterung der von A. Ampere, F. Neumann, W Weber; G. Kirchhoff entwickelten mathematischen Theorien. ErsterTheil. Die durch die Arbeiten von A. Ampere und F. Neumann angebahnte Richtung.* Leipzig.
- 1873b. Über gewisse von Helmholtz für die Magnctoiduktion und Voltainduktion gegebenen Formeln. *Mathematische Annalen* 6: 342-349.
- 1873c. Über die den Kraften elektromagnetischen Ursprungs zuzuschreibenden Elementargesetze. *KSGB* 10: 417-524.
1874. Über die Helmholtz'sche Constante  $k$ . *KSGB* 26: 132-152.
1875. Über die gegen das Weber'sche Gesetz erhobenen Einwände. *AP*: 211-230.
1877. Über die gegen das Weber'sche Gesetz erhobenen Einwände. *Mathematische Annalen* 11: 318-340.

### Neumann, Franz

1826. *De lege zonarum principio evolutionis systematum crystallinorum.* Dissertation. Berlin. Also in *Gesammelte Werke*, Vol. I (Leipzig, 1928): 323-352.
1846. *Die mathematische Gesetze der inducirten elektrischen Ströme* (read at the Berlin Academy of Sciences on 27 October 1845). Berlin.
1848. Über ein allgemeines Princip der mathematischen Theorie inducirter elektrischer Ströme (read on 9 August 1847). Berlin.
1883. *Einleitung in die Theoretische Physik.* Ed. C. Pape. Leipzig.
- 1906-1928. *Franz Neumanns Gesammelte Werke.* Ed. by his students. 3 Vols. Leipzig.

### Nobili, Leopoldo, and V. Antinori

1831. Sur la force electro-motrice du magnetisme. *ACP* 48: 412-430.

### Nordmeyer, Paul

1903. Über den Einfluss der Erdbewegung auf die Verteilung der Intensitat der

Licht und Wärmestrahlung. *AP* 11: 421-441.

**Oersted, Hans Christian**

1812. *Ansichten der chemischen Naturgesetze*. Berlin.

1813. *Recherches sur l'identite des forces chimiques et teletriques*. Paris.

1820. *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*. Copenhagen.

Also in Oersted 1920, Vol. 2: 214-8. English transl. in *Annals of Philosophy* 16: 273-276. French transl. in *ACP* 14: 417-425.

1821. Betrachtungen über den Electromagnetismus. *Journal für Chemie und Physik*. Also in Oersted 1920: 223-245.

1920. *Naturvidenskabelige skrifter*. Copenhagen.

**Ohm, Georg Simon**

1826a. Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelectricität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaischen Apparates und des Schweigger'schen Multipliers. *Journal für Chemie und Physik* 46: 137-166.

1826b. Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorgebrachten electroscopischen Erscheinungen. *AP* 6: 459-469.

1827. *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. Berlin.

**Perrin, Jean**

1895. Nouvelle propriete des rayons cathodiques. *CR* 121: 1130-1134.

**Pfaff, Christian**

1824. *Der Elektro-Magnetismus, eine historisch-kritische Darstellung der bisherigen Entdeckungen auf dem Gebiete desselben, nebst eigenthümlichen Versuchen*. Hamburg.

**Planck, Max**

1906. Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der  $\beta$ -Strahlen in ihrer Bedeutung für die Dynamik der Elektronen. Address at the *Naturforscherversammlung*. *PZ* 7: 753-759; and discussion, *ibid.*: 759-761.

**Plücker, Julius**

1858a. Über die Einwirkung des Magneten auf die elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen. *AP* 103: 88-106, 151-157; 104: 113-128.

1858b. Über einen neuen Gesichtspunkt, die Einwirkung des Magneten auf den Elektrischen Strom betreffend. *AP* 104: 622-630.

1858c. Fortgesetzte Betrachtungen über die elektrische Entladung. *AP* 105: 67-84.

1859. Fortgesetzte Betrachtungen über die elektrische Entladung in gasverdünnten Räumen. *AP* 107: 77-113.

1860. Abstract of a series of papers and notes concerning the electric discharge through rarefied gases and vapours. *PM* 10: 256-269.

1896. *Gesammelte physikalische Abhandlungen*. Leipzig.

**Poincare, Henri**

1889. *Theorie mathematique de la lumiere* (Sorbonne lectures, 1887-1888).

Ed. 1. Blondin. Paris.

1890. *Electricité et optique I. Les théories de Maxwell et la théorie électromagnétique de la lumière* (Sorbonne lectures, 1888). Ed. J. Blondin. Paris.
1891. *Electricité et optique II. Les théories de Helmholtz et les expériences de Hertz* (Sorbonne lectures, 1889-1890). Ed. B. Bruhnes. Paris.
1894. *Les Oscillations Électriques* (Sorbonne lectures, 1892-1893). Ed. C. Maurain. Paris.
1895. A propos de la théorie de Larmor. *La Lumière Électrique*.  
Also in PO 9: 369-426.
1898. La mesure du temps. *Revue de Métaphysique et de Morale* 6: 371-384. Transl. In Poincaré 1913: 223-234.
- 1900a. La théorie de Lorentz et le principe de la réaction. In *Recueil de travaux offerts par les auteurs à H.A.Lorentz à l'occasion du 25ème anniversaire de son doctorat le 11 décembre 1900*, AN 5: 252-278. The Hague.
- 1900b. Sur les rapports de la physique expérimentale et de la physique mathématique. In *Rapports présentés au congrès international de physique réuni à Paris en 1900*, Vol. 1, Paris.
- 1901a. *Electricité et optique. La lumière et les théories électrodynamiques* (Sorbonne lectures of 1888, 1890, and 1899). Eds. J. Blondin and E. Neculcea. Paris.
- 1901b. Über die Beziehungen zwischen der experimentellen und der mathematischen Physik (transl. of Poincaré 1900b)  
PZ 2: 166-71, 182-6, 196-201.
- 1901c. Sur les principes de la mécanique. In *Bibliothèque du congrès international de philosophie tenu à Paris du 6 au 12 août 1900*. Paris.  
Also in Poincaré 1902: Ch. 6.
1902. *La Science et l'Hypothèse*. Paris.
- 1904a. *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes. La télégraphie sans fil*. Paris.
- 1904b. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique (Saint-Louis lecture). *Bulletin des Sciences Mathématiques* 28: 302-24. Transl. in Poincaré 1913: 297-320.
1905. Sur la dynamique de l'électron. CR 140: 1504-1508.
1906. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*.  
Also in PO 9: 494-550.
- [1906-1907]. Les limites de la loi de Newton. Sorbonne lectures.  
Ed. H. Vergne in *Bulletin Astronomique Publié par l'Observatoire de Paris* 17 (1953): 121-365.
1908. La dynamique de l'électron. *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées*.  
Also in PO 9: 551-586.
1913. *The Foundations of Science. Transl. of La science et l'hypothèse* (Paris, 1902), *La valeur de la science* (Paris, 1905), and *Science et méthode* (Paris, 1908).  
New York.
1954. *Oeuvres de Henri Poincaré*. 11 Vols. Paris.

### **Poisson, Simeon Denis**

1811. Memoire sur la distribution de l' electricite a la surface des corps conducteurs. Classe des sciences mathematiques de l'Institut de France, *Memoires* 12: 1-92, 163-274.
1813. Remarques sur une equation qui se presente dans la theorie des attractions des Spheroides. *Nouveau Bulletin de la Socie Philomatique de Paris* 3: 388-392.
1826. Deux memoires sur la theorie du magnetisme. Academie Royale des Sciences, *Memoires* for '1821-1822' (actually read in 1823, and pub. in 1826) 5: 247-338, 488-533.

### **Poynting, John Henry**

1884. On the transfer of energy in the electromagnetic field. *PT*.  
Also in Poynting 1920: 175-193.
- 1885a. Note on an elementary method of calculating the velocity of propagation of waves of longitudinal and transverse disturbances by the rate of transfer of energy (read on 8 November 1883). Birmingham Philosophical Society, *Proceedings*. Also in Poynting 1920: 298-303.
- 1885b. On the connection between electric current and the electric and magnetic inductions in the surrounding field. *PT*.  
Also in Poynting 1920: 194-223.
- 1885c. Discharge of electricity in an imperfect insulator. Birmingham Philosophical Society. *Proceedings*. Also in Poynting 1920: 224-236.
1893. An examination of Prof. Lodge's electromagnetic hypothesis. *The Electrician*. Also in Poynting 1920: 250-268.
1895. Molecular electricity. *The Electrician*. Also in Poynting 1920: 269-298.
1920. *Collected scientific papers*. Cambridge.

### **Preston, Samuel Tolver**

1885. On some electromagnetic experiments of Faraday and Plticker. *PM* 19: 131-140.

### **Quincke, Georg Hermann**

1883. Über die DielectriciUitsconstanten isolierender Fltissigkeiten. *AP* 19: 707-729.

### **Rayleigh, Lord (John William Strutt)**

- 1877-1878. *Theory of sound*. 2 Vols. London.
1899. The theory of anomalous dispersion. *PM* 48: 151-152.
1902. Does motion through the aether cause double refraction? *PM* 4: 678-683.

### **Reiff, Richard**

1893. Die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien nach der elektrischen Lichttheorie. *AP* 1: 361-367.

### **Riecke, Eduard**

1873. Über das Weber'sche Grundgesetz der elektrischen Wechselwirkung in seiner Anwendung auf die unitarische Hypothese. *GN*: 536--43.

1881. Über die Bewegung eines electrischen Theilchens in einem homogenen magnetischen Felde und das negative electrische Glimmlicht.

*AP* 13: 191--4.

1898. Zur Theorie des Galvanismus und der Wärme. *GN*: 48-70.

### **Riemann, Bernhard**

[1853]. Fragmentary note on the ether. In Riemann 1892: 526.

1867 [1858]. Ein Beitrag zur Elektrodynamik. *AP* 131: 237-242.

1875. *Schwere, Electricität und Magnetismus* (Göttingen lectures, Summer 1861).

Ed. K. Hattendorff. Hannover.

1892. *Gesammelte mathematische Werke*. 2. Auflage. Leipzig.

### **Riess, Peter Theophil**

1853. *Die Lehre von der Reibungselektricität*. 2 Vols. Berlin.

1854. Über die Wirkung nicht-leitender Körper bei der elektrischen Influenz.

*AP* 92: 337-354. Also in *PM* 9 (1855): 401-413.

1856. Letter to Faraday on the action of non-conducting bodies in electric induction. *PM* 11: 1-10.

### **Ritz, Walther**

1908. Recherches critiques sur l'électrodynamique generale. *ACP* 13: 145-275.  
Röntgen, Wilhelm

1885. Versuche über die elektromagnetische Wirkung der dielektrischen Polarisation. *BB*: 195-198.

1888. Über die durch Bewegung eines im homogenen elektrischen Felde befindlichen Dielektricum hervorgerufene elektrodynamische Kraft.  
*AP* 35: 246-283.

1890. Beschreibung des Apparates, mit welchem die Versuche über die elektrodynamische Wirkung bewegter Dielektrica ausgeführt wurden.  
*AP* 40: 93-108.

1895. Über eine neue Art von Strahlen. Physikalisch-Medizinische Gesellschaft in Würzburg. *Sitzungsberichte*: 132-141. Also in *AP* 64 (1898): 1-11.

1896a. Über eine neue Art von Strahlen. Physikalische Gesellschaft zu Würzburg. *Sitzungsberichte*: 11-19.

1896b. A new kind of rays (transl. of Röntgen 1895). *Nature* 53: 274-276.

### **Rosa, Edward**

1889. Determination of  $v$ , the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit. *PM* 28: 315-332.

### **Rowland, Henry**

1878. On the magnetic effect of electric convection. *AJS* 15: 30-38.

1880a. Preliminary notes on Mr. Hall's recent discoveries. *PM*.

Also in Rowland 1902: 197-199.

1880b. On the general equations of electro-magnetic action, with application to a new theory of magnetic attractions, and to the theory of the magnetic rotation of the plane of polarisation of light. *American Journal of Mathematics* 3: 89-113.



1881. On the theory of magnetic attractions, and the magnetic rotation of polarized light. *PM* 11: 254-271.

1902. *The physical papers of Henry Augustus Rowland*. Baltimore.

**Rumford, Count (Benjamin Thompson)**

1870-1875. *The complete works of Count Rumford*. 4 Vols. Boston.

**Rutherford, Ernest, and Joseph John Thomson**

1896. On the passage of electricity through gases exposed to Rontgen rays. *PM* 42: 392-407.

**Sarasin, Edouard, and Lucien de la Rive**

1890. Sur la resonance multiple des oscillations electriques de M. Hertz se propageant le long des fils conducteurs. *ASPEN* 23: 113-160.

1893. Interference des ondulacions electriques par reflexion normale sur une paroi metallique. Egalite des vitesses de propagation dans l'air et le long de fils conducteurs. *ASPEN* 29: 358-393, 441-470.

**Savary, Felix**

1823. Memoire sur l' application du calcul aux phenomenes electro-dynamiques (read on 3 February 1823). *IP* 96: 1-26, 295-303.

**Schatz, Franz**

1880. *Über das Grundgesetz der Elektrodynamik*. Dissertation. Bonn.

**Schiller, Nicolaj**

1874. Einige experimentelle Untersuchungen über elektrische Schwingungen. *AP* 152: 535-565.

1876. Elektromagnetische Eigenschaften ungeschlossener elektrischer Ströme. *AP* 159: 456-473, 537-553.

**Schuster, Arthur**

1877. On the passage of electricity through gases. *PCPS* 3: 57-61.

1884. Experiments on the discharge of electricity through gases. Sketch of a theory (first Bakerian lecture). *PRS* 37: 317-339.

1885. On Helmholtz's views on electrolysis, and on the electrolysis of gases. *BAR*: 977-978.

1887. Experiments on the discharge of electricity through gases. *The Electrician* 19: 353-355.

1890a. The discharge of electricity through gases. (Preliminary communication.). *PRS* 47: 526-559.

1890b. The discharge of electricity through gases. *Nature* 42: 591-592.

1890c. The disruptive discharge of electricity through gases. *PM* 29: 182-199.

1896. On Rontgen's rays. *Nature* 53: 268.

1897. On the magnetic force acting on moving electrified spheres. *PM* 43: 1-11

1911. *The progress of physics during 33 years* (1875-1908). London.

1932. *Biographical fragments*. London.

**Schwarzschild, Karl**

1903. Zur Elektrodynamik. 1. Zwei Formen des Prinzips der kleinsten

Wirkung in der Elektronentheorie. GN: 126-131.

**Schweigger, Johann**

1821. Zusätze zu Oersted's electromagnetischen Versuchen. *Journal für Chemie und Physik* 31: 1-17, 35-41.

**Seebeck, Thomas**

1822-1823. Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. Preussische Akademie der Wissenschaften, *Abhandlungen*: 265-273.

**Sellmeier, Wolfgang von**

1872. Über die durch Aetherschwingungen erregten Körpertheilchen und deren Rückwirkung auf die ersten, besonders zur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien. *AP* 145: 399-421, 520-549; *AP* 147: 386-408, 525-44.

**Sissingh, Remmelt**

1891. Über das Kerr'sche magneto-optische Phänomen bei äquatorialen Magnetisirung an Eisen. *AP* 42: 115-141.

**Spottiswoode, William, and John Fletcher Mouton**

1880. On the sensitive state of electrical discharges through rarefied gases. *PT* 170: 165-179.

1881. On the sensitive state of vacuum discharges. Part II. *PT* 171: 561-652.

**Stefan, Joseph**

1869. Über die Grundformeln der Elektrodynamik. Kaiserliche Akademie der Wissenschaften, Wien, Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, Abteilung II, *Sitzungsberichte* 59: 693-769.

1874. Über die Gesetze der magnetischen und elektrischen Kräfte in magnetischen und dielektrischen Medien und ihre Beziehung zur Theorie des Lichtes. *Ibid.* 70: 589-644.

**Stenger, Franz**

1893. Die Elektricitätsleitung der Gase. In *Handbuch der Physik*. Ed. A. Winkelmann, 3 Vols., Breslau, Vol. 3: 325-387.

**Stokes, George Gabriel**

1845a. On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. *TCPs*. Also in Stokes 1880-1905, Vol. 1: 75-129.

1845b. On the aberration of light. *PM* 27: 9-55.

1846a. On Fresnel's theory of the aberration of light. *PM* 28: 76-81.

1846b. On the constitution of the luminiferous ether, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light. *PM* 29: 6-10.

1849. On the dynamical theory of diffraction. *TCPs*. Also in Stokes 1880-1905, Vol. 2: 243-328.

1862. Report on double refraction. *BAR*: 253-282.

1876 Argument published in W. Spottiswoode, An experiment on electromagnetic rotation. *PRS* 24 (1876): 403-407.

1880-1905. *Mathematical and physical papers*. 5 Vols. Ed. 1. Larmor. Cambridge.

1907. *Memoirs and scientific correspondence*. 2 Vols. Ed. J. Larmor. Cambridge.

**Stoney, George Johnstone**

1881. On the physical units of nature. *PM* 11: 379-390.

1891. On the cause of double lines and of equidistant satellites in the spectra of gases. *TRDS* 4: 563-608.

**Tait, Peter Guthrie**

1880. Note on the velocity of gaseous particles at the negative pole of a vacuum tube. Royal Society of Edinburgh, *Proceedings* 10: 430-431.

**Thirring, Hans**

1927. Elektrodynamik bewegter Karper und spezielJe Relativitatstheorie. In H. Geiger and K. Scheel (eds.), *Handbuch der Physik*, Vol. 12: 245-348. Berlin.

**Thomson, Joseph John**

1880. On Maxwell's theory of light. *PM* 9: 284-291.

1881a. On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies. *PM* 11: 229-249.

1881b. Prof. Rowland's new theory of magnetic action. *Nature* 24: 205-206.

1883a. *A treatise on the motion of vortex rings*. (Adams prize essay, 1882). London.

1883b. On a theory of the electric discharge in gases. *PM* 15: 427-434.

1884a. Note on the currents induced in a sphere which is rotating in a field of uniform magnetic force. *The Messenger of Mathematics* 14: 37-40.

1884b. On the chemical combination of gases. *PM* 18: 233-267.

1884c. On electrical oscillations and the effects produced by the motion of an electrified sphere. London Mathematical Society, *Proceedings* 15: 197-218.

1885. Report on electrical theories. *BAR*: 97-155.

1886. Some experiments on the electric discharge in a uniform electric field, with some considerations about the passage of electricity through gases. *PCPS* 5: 391- 409.

1887. On the dissociation of some gases by electric discharge (abstract of Bakerian lecture). *PRS* 42: 343-44.

1888. *Applications of dynamics to physics and chemistry*. London.

1890a. The discharge of electricity through gases. *Nature* 42: 295.

1890b. The discharge of electricity through gases. *Nature* 42: 614.

1890c. On the passage of electricity through hot gases. *PM* 29: 358-361, 441-449.

1890d. Some experiments on the velocity of transmission of electric disturbances, and their application to the theory of striated discharge in gases. *PM* 30: 129-140.

1891a. On the illustration of the properties of the electromagnetic field by means of tubes of electrostatic induction. *PM* 31: 149-71.

1891b. On the discharge of electricity through exhausted tubes without electrodes. *PM* 32: 321-336,445-464.

- 1893a. *Notes on recent researches in electricity and magnetism*. Oxford.
- 1893b. The electrolysis of steam. *PRS* 53: 100-109.
- 1894a. The connection between chemical decomposition and discharge of electricity through gases. *BAR*: 482-493.
- 1894b. On the velocity of the cathode rays. *PM* 38: 358-65.
- 1895a. *Elements of the mathematical theory of electricity and magnetism*. London.
- 1895b. The relation between the atom and the charge of electricity carried by it. *PM* 40: 511-544.
- 1896a. The Rontgen rays. *Nature* 53: 391-392.
- 1896b. Untitled. Presidential address at the British Association meeting, 17 September 1896. *BAR*: 699-706.
- 1896c. The Röntgen rays. *Nature* 54: 302-304.
- [1896d] Notes for the Princeton lectures of October 1896. Cambridge University Library MS: Add 7342 T537.
- 1897a. On the cathode rays. *PCPS* 9: 243-244.
- 1897b. Cathode rays (Royal Institution, 30 April 1897). *PRI* 15: 419-32.
- 1897c. Cathode rays. *PM* 44: 293-316.
- 1898a. *The discharge of electricity through gases* (Princeton lectures of October 1896, with additions of August
1897. New York.
- 1898b. On the charge of electricity carried by the ions produced by Rontgen rays. *PM* 46: 528-545.
1899. On the masses of the ions in gases at low pressure. *PM* 48: 547-567.
1900. Indications relatives it la constitution de la matiere fournies par les recherches recentes sur le passage de l'electricite it travers les gaz. In *Rapports Presentes auCongres International de Physique de J900* (4 Vols., Paris), Vol. 3: 138-151.

**Thomson, Joseph John, and John Alexander McClelland**

1896. On the leakage of electricity through dielectrics traversed by Rontgen rays. *PCPS* 9: 126-140.

**Thomson, Joseph John, and Ernest Rutherford**

1896. On the passage of electricity through gases exposed to Rontgen rays. *PM* 42: 396-407

**Thomson, William**

- 1841a. On Fourier's expansions of functions in trigonometrical series. *CMJ*. Also in *TMPP* 1: 1-6.
- 1841b. Note on a passage in Fourier's heat. *CMJ*. Also in *TMPP* 1: 7-8.
1842. On the uniform motion of heat in homogeneous solid botlies, and its connection with the mathematical theory of electricity. *CMJ*. Also in *TPEM*: 1-14.
- 1842-1843. Propositions in the theory of attractions. *CMJ*. Also in *TPEM*: 126-138.
1843. On the equations of the motion of heat referred to curvilinear

- coordinates. *CMJ*. Also in *TMPP* 1: 25-35.
- 1845a. Extrait d'une lettre de M. William Thomson a M. Liouville. *Journal de Mathematiques*. Also in *TPEM*: 144-146.
- 1845b. On the elementary laws of statical electricity. *CDMJ*.  
Also in *TPEM*: 15-37.
- 1847a. On a mechanical representation of electric, magnetic, and galvanic forces. *CDMJ*. Also in *TMPP* 1: 76-79.
- 1847b. On the forces experienced by small spheres under magnetic influence: and on some of the phenomena presented by diamagnetic substances. *CDMJ*. Also in *TPEM*: 493-499.
- 1847c. On a system of magnetic curves. *CDMJ*. Also in *TMPP* 1: 81-82
- 1848a. On the equilibrium of magnetic or diamagnetic bodies of any form, under the influence of the terrestrial magnetic force. *BAR*. Also in *TMPP* 1: 88-90.
- 1848b. On the theory of electro-magnetic induction. *BAR*.  
Also in *TMPP* 1: 91-92.
- 1848c. Theorems with reference to the solution of certain partial differential equations. *CDMJ*. Also in *TPEM*: 139-141.
- 1848d. A statement of the principles on which the mathematical theory of electricity is founded. *CDMJ*. Also in *TPEM*: 42-51.
- 1848-1850. Geometrical investigations with reference to the distribution of electricity on spherical conductors. *CDMJ*. Also in *TPEM*: 52-85.
1849. Notes on hydrodynamics. On the vis-viva of a liquid in motion. *CDMJ*.  
Also in *TMPP* 1: 107-112.
- 1849-1850. A mathematical theory of magnetism. *PT*. Also in *TPEM*: 340-324 (with later additions).
- 1850a. Remarks on the forces experienced by inductively magnetized ferromagnetic or diamagnetic non-crystalline substances. *PM*.  
Also in *TPEM*: 500-13.
- 1850b. On the potential of a closed galvanic circuit of any form. *CDMJ*.  
Also in *TPEM*: 425-431.
- 1851a. On the theory of magnetic induction in crystalline and non-crystalline substances. *PM*. Also in *TPEM*: 465-480.
- 1851b. Applications of the principle of mechanical effect to the measurement of electromotive forces, and of galvanic resistances, in absolute units. *PM*. Also in *TMPP* 1: 490-502.
- 1851c. On the mechanical theory of electrolysis. *PM*. Also in *TMPP* 1: 472-489.
1852. On certain magnetic curves; with applications to problems in the theories of heat, electricity, and fluid motion. *BAR*.  
Also in *TPEM*: 514-515
- 1853a. On the mechanical values of distributions of electricity, magnetism, and galvanism. Glasgow Philosophical Society, *Proceedings*.

- Also in *TMPP* 1: 521-533 (with later additions).
- 1853b. On transient electric currents. *PM*. Also in *TMPP* 1: 540-553.
- 1853c. On the mutual attraction or repulsion between two electrified spherical conductors. *PM*. Also in *TPEM*: 86-97.
1854. Note on the possible density of the luminiferous medium and on the mechanical value of a cubic mile of sunlight. *PM*.  
Also in *TMPP* 2: 28-33.
- 1855a. Elementary demonstrations of propositions in the theory of magnetic force. *PM*. Also in *TPEM*: 526-534.
- 1855b. On the theory of the electric telegraph. *PRS*. Also in *TMPP* 2: 61-76.
1856. Dynamical illustrations of the magnetic and the helicoidal rotatory effects of transparent bodies on polarized light. *PRS*. Also in Thomson 1904: 569-577.
- 1860a. Measurement of the electrostatic force produced by a Daniell's battery. *PRS*. Also in *TPEM*: 238-246.
- 1860b. Measurement of the electromotive force required to produce a spark in air between parallel metal plates at different distances. *PRS*.  
Also in *TPEM*: 247-259.
1862. New proofs of contact electricity. Literary and Philosophical Society of Manchester, *Proceedings*. Also in *TPEM*: 321-322.
1867. Report on electrometers and electrostatic measurements. *BAR*.  
Also in *TPEM*: 260-310.
- 1872a. *Reprint of papers on electrostatics and magnetism*. London.
- 1872b. Diagrams of lines of force; to illustrate magnetic permeability.  
*TPEM*: 486-493.
1880. On maximum and minimum energy in vortex motion. *BAR*: 473.
- 1882-1911. *Mathematical and Physical Papers*. 6 Vols. Cambridge.
1884. *Notes of lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. Delivered at the John Hopkins University Baltimore. Stenographically reported by A. S. Hathaway (page numbers refer to the mimeographed edition of this text).  
Also in Kargon and Achinstein 1987.
1888. Simple hypothesis of electromagnetic induction of incomplete circuits, with consequent equations of electric motion in fixed homogeneous electric matter. *BAR*, *Nature*. Also in *TMPP* 4: 539-544.
1889. Ether, electricity, and ponderable matter. *TMPP* 3: 484-515.
1890. On a gyrostatic adynamic constitution for 'ether'. Royal Society of Edinburgh, *Proceedings* 17. Also in *TMPP* 3: 466-472.
1896. Velocity of propagation of electrostatic stress. *Nature* 53: 316.
1898. Contact theory of metals. *PM* 46: 82-120.
1904. *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. London and Baltimore.

**Thomson, William, and Peter Guthrie Tait**

1867. *Treatise on natural philosophy*. Oxford.

1879-1883. *Treatise on natural philosophy. New edition.* 2 Vols. Cambridge.

**Thompson, Silvanus**

1910. *The life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs.* 2 Vols. London.

**Tumlriz, Ottokar**

1883. *Elektromagnetische Theorie des Lichtes.*

**Tyndall, John**

1856. Further researches on the polarity of the diamagnetic force. *PT*: 237-260.

1868. *Faraday as a discoverer.* London.

1870. *Researches on diamagnetism and magne-crystallic action including the question of diamagnetic polarity.* London.

**Van Loghem, W.**

1883. *Theorie der Reflexion des Lichtes an Magneten.* Dissertation. Leiden University.

**Varley, Cromwell**

1871. Some experiments on the discharge of electricity through rarefied media and the atmosphere. *PRS* 19: 236-242.

**Veltmann, Wilhelm**

1870a. Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrationserscheinungen. *Astronomische Nachrichten* 75: 145-160.

1870b. Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien. *Astronomische Nachrichten* 76: 129-144.

1973. Über die Fortpflanzung des Lichtes in bewegten Medien. *AP* 150: 497-535.

**Verdet, Emile**

1854-1863. Recherches sur les propriétés optiques développées dans les corps transparents par l'action du magnétisme. *ACP* 41 (1854): 370-412; 43 (1855): 37-44; 52 (1858): 129-163; 69 (1863): 415-91.

**Weber, Wilhelm**

1839. Unipolare Induktion. *RBMV*: 63-90.

Also in *AP* 52 (1841): 353-386 (slightly modified).

1846. *Elektrodynamische Maassbestimmungen.* Leipzig.

1848a. Elektrodynamische Maassbestimmungen. *AP* 73: 193-240.

1848b. Über die Erregung und Wirkung des Diamagnetismus nach den Gesetzen der inducirten Ströme. *AP* 73: 241-256.

1850. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Widerstandsmessungen. *KSGA*: 199-382.

1852. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere über Diamagnetismus. *KSGA*: 485-577.

1855. Vorwort (for Weber and Kohlrausch 1857). *KSGA*.  
Also in *WW* 3: 591-596.

1861. Über einheitliche Maasssysteme. *Tübinger Zeitschrift für Staatswissenschaft*.  
Also in *WW* 1: 526-539.

1863. Über die Abhandlung [Weber 1864]. *KSGB*. Also in *WW* 4: 97-103.

1864. Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere tiber elektrische Schwingungen. *KSGA*. Also in *WW* 4: 107-241.
1869. Über einen einfachen Ausspruch des allgemeinen Grundgesetzes der elektrischen Wirkung. *AP*. Also in *WW* 4: 244-246.
1871. Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere tiber das Princip der Erhaltung der Energie. *KSGA*. Also in *WW* 4: 247-299.
1874. Über das Aequivalent lebendiger Krafte. *AP*. Also in *WW* 4: 300-311.
1875. Über die Bewegung der ElektriciUit in Korpem von molekularen Konstitution. *AP*. Also in *WW* 4: 312-57.
1878. Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere tiber die Energie der Wechselwirkung. *KSGA*. Also in *WW* 4: 361-419.
1880. Elektrodynamische Maassbestimmungen, insbesondere tiber den Zusammenhang des elektrischen Grundgesetzes mit dem Gravitationsgesetze. Unpublished MS. In *WW* 4: 479-525.
- 1892-1894 *Werke*. 6 Vols. Berlin. Vol. I: *Akustik, Mechanik, Optik, und Wärmelehre*, ed. W. Voigt. Vol. 2: *Magnetismus*, ed. E. Riecke. Vol. 3: *Galvanismus und Elektrodynamik*, erster Theil, ed. H. Weber. Vol. 4: *Galvanismus und Elektrodynamik*, ::weiter Theil, ed. H. Weber. Vol. 5: cf. Weber and Weber 1825, ed. E. Riecke. Vol. 6: *Mechanik der menschlichen Gebwerkezeuge*, with Eduard Weber.

#### **Weber, Wilhelm, and Rudolph Kohlrausch**

1856. Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Stromen durch den Querschnitt der Kette ftiesst. *AP*. Also in *WW* 3: 597-608.
1857. Elektrodynamische Maassbestimmungen insbesondere Zurttickftührung der Stromintensitats-Messungen auf mechanische Maass. *KSGA*. Also in *WW* 3: 609-76.

#### **Weber, Ernst Heinrich, and Wilhelm Weber**

1825. *Wellenlehre auf Experimente begründet oder über die Wellen tropfbarer Flüssigkeiten mit Anwendung auf die Schall- und Lichtwellen*. Leipzig.

#### **Wiechert, Emil**

1894. Die Bedeutung des Weltathers. Physikalisch- Ökonomische Gesellschaft zu Königsberg. *Schriften* 35: [4]-[11].
- 1896a. Über die Grundlagen der Elektrodynamik. *AP* 59: 283-323.
- 1896b. Die Theorie der Elektrodynamik und die Röntgen'sche Entdeckung. Physikalisch-Ökonomische Gesellschaft zu Königsberg. *Schriften* 37: 1-48.
1897. Über das Wesen der Elektrizitat (Königsberg, 7 January 1897). *Ibid.* 38: 3-16.
- 1898a. Experimentelle Untersuchungen über die Geschwindigkeit und die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen. *GN*: 260-293. Variant in *AP* 69 (1899): 739-766.
- 1898b. Hypothesen für eine Theorie der elektrischen und magnetischen Erscheinungen. *GN*: 87-106.



1899. Grundlagen der Elektrodynamik. In *Festschrift zur Entbiillung des Gauss-WeberDenkmals in Göttingen*: 1-112. Leipzig.
1900. Elektrodynamische Elementar Gesetze. In *Recueil de travaux offerts par les auteurs a H. A. Lorentz a l'occasion du 25eme anniversaire de son doctorat le 11 decembre 1900*, AN 5: 549-573. The Hague.
1901. Elektrodynamische Elementargesetze. AP 4: 667-689.

### **Wiedemann, Eilhard**

1879. Über das Leuchten der Gase durch elektrische Entladungen. Nachtrag zu der Arbeit über die Natur der Spectra. AP 6: 298-302.
1880. Über das thermische und optische Verhalten von Gasen unter dem Einflusse elektrischen Entladungen. 1. Abhandlung. AP 10: 202-257.
1883. Über electriche Entladungen in Gasen. AP 20: 756-798.
1884. On the electric discharge of gases (transl. of E. Wiedemann 1883, with additions). PM 18: 35-54, 85-97.

### **Wiedemann, Gustav**

1863. *Die Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus*. 2 Vols. Braunschweig.
1874. *Die Lehre vom Galvanismus und Elektromagnetismus*. 2nd Ed. 2 Vols. Braunschweig.
- 1882-1885. *Die Lehre der Elektrizität*. 4 Vols. Braunschweig.

### **Wiedemann, Gustav, and Richard Rühlmann**

1872. Über den Durchgang der Elektrizität durch Gase. AP 145: 235-239, 364-399.

### **Wiederkehr, Karl Heinrich**

1960. *Wilhelm Weber's Stellung in der Entwicklung der Elektrizitätslehre*. Dissertation. Hamburg.

### **Wien, Wilhelm**

1898. Über die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen. VDNA 70: 49-56. More detailed version in an appendix to AP 65 (1898): I-XVIII.
1900. Über die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik. In *Recueil de travaux offerts par les auteurs a H. A. Lorentz a l'occasion du 25eme anniversaire de son doctorat le 11 decembre 1900*, AN 5: 96-107. The Hague.
1901. Über mögliche Aetherbewegungen. PZ 2: 148-150.
- 1904a. Über einen Versuch zur Entscheidung der Frage, ob sich der Lichtäther mit der Erde bewegt oder nicht. PZ 5: 585-586.
- 1904b. Über die Differentialgleichungen der Elektrodynamik für bewegte Körper. AP 13: 641-668.
- 1904c. Zur Elektronentheorie. PZ 5: 576-579.
1905. *Über Elektronen*. Leipzig.

### **Wind, Cornelius Harm**

1898. On the theory of magneto-optic phenomena.

*Physical Review* 6: 43-1, 98-113.

1898-1899. Etude theorique des phenomenes magneto-optiques et du phenomene de Hall. *AN* 1-2: 119-125.

**Wollaston, William Hyde**

1801. Experiments on the chemical production and agency of electricity. *PT*: 427-434

1821. On the connexion of electric and magnetic phenomena. *QJS* 10: 361-364.

**Zahn, W. von**

1879. Spectralrohren mit longitudinaler Durchsicht. *AP* 8: 675.

**Zantedeschi, Francesco**

1847. On the motions presented by flame under the electro-magnetic influence. *PM* 21: 421-424.

**Zeeman, Pieter**

1896. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance. Physical laboratory at the University of Leiden, *Communications* 23: 1-19.

1897a. On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance. *PM* 43: 226-239.

1897b. Doublets and triplets in the spectrum produced by external magnetic forces. *PM* 44: 55-60.

**Zöllner, Friedrich**

1872. *Über die Natur der Cometen. Beiträge zur Geschichte und Theorie der Erkenntnis.* Leipzig.

1874. Über einen elektrodynamischen Versuch. *AP* 153: 138-143.

1876. Zur Widerlegung des elementaren Potentialgesetzes von Helmholtz durch elektrodynamische Versuche mit geschlossenen Strömen. *KSGB* 28: 227-239.

**Библиография вспомогательной литературы**

**Abiko, Seiya**

1991. On the chemico-thermal origins of Einstein's special relativity. *HSPS* 22: 1-24.

**Achard, Franck**

1998. La publication du Treatise on electricity and magnetism de James Clerk Maxwell. *Revue de Synthèse* 4: 511-544.

**Aitken, Hugh**

1985. *Syntony and Spark: The Origins of Radio.* Princeton.

**Anderson, David L.**

1964. *The Discovery of the Electron.* Princeton.

**Anderson, Ronald**

1991. *The ontological status of potentials within classical electrodynamics.* Ph.D. dissertation. Boston University.

1993. The referees' assessment of Faraday's electrodynamic induction paper of 1831. *NRRS* 47: 243-256.

1994. The Whewell-Faraday exchange on the application of the concepts of momentum and inertia to electromagnetic phenomena. *SHPS* 25: 577-594.

**Angenheister, Gustav**

1928. Wiechert, Emil. *Deutsches biographisches labrbuch* 10: 294-302

**Appleyard, Rollo**

1930. *Pioneers of Electrical Communication*. London.

**Arabatzis, Theodore**

1992. The discovery of the Zeeman effect: A case study in the interplay between theory and experiment. *SHPS* 23: 365-388.

1996. Rethinking the discovery of the electron. *SHPMP* 27: 405-435.

**Archibald, Thomas**

1986. Carl Neumann versus Rudolf Clausius on the propagation of the electrodynamic potentials. *AJP* 54: 786-790.

1988. Tension and potential from Ohm to Kirchhoff. *Centaurus* 31: 141-163.

1989. Energy and the mathematization of electrodynamics. *AIHS* 39: 276-308.

**Assis, Andre Koch Torres**

1994. *Weber's Electrodynamics*. Dordrecht.

**Atten, Michel**

1988a. Physiciens et telegraphistes fran<ais face ala theorie de Maxwell.

*Recherches sur l'Histoire des Communications* 2: 6-40.

1988b. La nomination d'H. Poincare sur la chaire de physique mathematique de la Sorbonne. In *Cabier du Seminaire d'Histoire des Mathematiques*: 221-229.

1992. *Les theories electriques en France. 1870-1900. La contribution des mathematidens, des physiciens et des ingenieurs a la construction de la theorie de Maxwell.* These de doctorat. EHESS. Paris.

1996. Poincare et la tradition de la physique mathematique francaise. In Greffe, Heinzmann, and Lorenz 1996: 35-44.

**Auwers, A. (ed.)**

1880. *Briefwechsel zwischen Gauss und Bessel*. Leipzig.

**Barkan, Diana**

1990. *Walther Nernst and the transition to modern physical chemistry*.

Ph.D. dissertation. Harvard University.

**Bence Jones, Henry**

1870. *The life and letters of Michael Faraday*. 2 Vols. London.

**Berkson, William**

1974. *Fields of force. The development of a world view from Faraday to Einstein*. London.

**Berman, Morris**

1978. *Social change and scientific organization: The Royal Institution, 1799-1844*. Ithaca.

**Bevilacqua, Fabio**

1983. *The principle of conservation of energy and the history of classical electromagnetic*

*theory*. Pavia.

1993. Helmholtz's *Über die Erhaltung der Kraft*: The emergence of a theoretical physicist. In Cahan 1993: 291-333.

1994. Theoretical and mathematical interpretations of energy conservation: Central forces 1852-54. In Krüger 1994a: 89-105.

**Biagioli, Mario**

1990. The anthropology of incommensurability. *SHPS* 21: 183-209.

**Blondel, Christine**

1978. Sur les premieres recherches de formule electrodynamique par Ampere. *RHS* 31: 64-65.

1982. *Ampere et la creation de l'electrodynamique*. Paris.

1997. Electrical instruments in 19th-century France, between makers and users. *History and Technology* 13: 157-82.

**Blondel, Christine, and Matthias Dorries (eds.)**

1994. *Restaging Coulomb: Usages, controverses et replications autour de la balance de torsion*. Florence.

**Boltzmann, Ludwig**

1898. Comments to his translation of Maxwell 1861, 1862: *Über physikalische Kraftlinien*, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, No 102. Leipzig.

**Bordeau, Sanford**

1982. *Volts to Hertz: The rise of electricity*. Minneapolis.

**Bork, Alfred M.**

1966a. Maxwell and the electromagnetic wave equation. *AJP* 35: 844-849.

1966b. The 'FitzGerald' contraction. *Isis* 57: 199-207.

1967. Maxwell and the vector potential. *Isis* 58: 210-222.

**Bright, Charles**

1898. *Submarine telegraphs. Their history, construction, and working*. London.

**Brock, William H.**

1969. Lockyer and the chemists: The first dissociation hypothesis. *Ambix* 16: 81-99.

1971. Crookes, William. *DSB* 3: 474-482.

**Brogie, Louis de**

1954. Henri Poincare et les theories de la physique. In *PO* II: 62-71.

**Bromberg, Joan**

1967. Maxwell's displacement current and his theory of light. *AHES* 4: 218-34.

1968. Maxwell's electrostatics. *AIP* 36 (1968): 142-151.

1972. Föppl, August. In *DSB* 5: 63-64.

**Brown, Theodore M.**

1969. The electric current in early 19th-century French physics. *HSPS* 1: 61-103.

**Brush, Stephen**

1967. Note on the history of the FitzGerald contraction. *Isis* 58: 230-232

**Bryant, John H.**

1988. *Heinrich Hertz. The beginning of microwaves.* New York.

**Buchheim, Gisela**

1971. Hermann von Helmholtz und die klassische Elektrodynamik.  
*NTM* 8: 26-36.

**Buchwald, Jed**

1985a. *From Maxwell to microphysics: Aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century.* Chicago.

1985b. Modifying the continuum: Methods of Maxwellian electrodynamics.  
In Harman 1985a: 225-241.

1985c. Oliver Heaviside: Maxwell's apostle and Maxwellian apostate.  
*Centaurus* 28: 288-330.

1988. The Michelson experiment in the light of electromagnetic theory before 1900. In Golberg and Stuewer 1988: 55-70.

1989. *The rise of the wave theory of light: Optical theory and experiment in the early nineteenth century.* Chicago.

1993. Electrodynamics in context: Object states, laboratory practice, and anti-idealism. In Cahan 1993: 334-373.

1994. *The creation of scientific effects: Heinrich Hertz and electric waves.* Chicago.

1995. Why Hertz was right about cathode rays. In J. Buchwald (ed.), *Scientific practice: Theories and stories of doing physics*: 151-69. Chicago.

**Cahan, David**

1993 (ed.) *Hermann von Helmholtz and the foundations of nineteenth-century science.* Berkeley.

1994. Anti-Helmholtz, anti-Zollner, anti-Dühring: The freedom of science in Germany during the 1870s. In Krüger 1994a: 330-344.

**Campbell, Lewis, and William Garnett**

1882. *The Life of James Clerk Maxwell.* London.

**Caneva, Kenneth L.**

1974. *Conceptual and generational change in German physics: The case of electricity, 1800-1846.* Ph.D. dissertation. Princeton University.

1978. From galvanism to electrodynamics: The transformation of German physics and its social context. *HSPS* 11: 63-159.

1980. Ampere, the etherians, and the Oersted connection. *BJHS* 13: 121-38.

**Cantor, Geoffrey, and M. J. S. Hodge (eds.)**

1981. *Conceptions of ether: Studies in the history of ether theories, 1740-1900.* New York.

**Carazza, Bruno, and Nadia Robotti**

1996. The first molecular models for an electromagnetic theory of dispersion and some aspects of physics at the end of the nineteenth century. *Annals of Science* 53: 587-607.

**Cassidy, David**

1986. Understanding the history of special relativity. *HSPS* 16: 187-195.

**Cat, Jordi**

1995. *Maxwellsinterpretation ofelectric and magnetic potentials: The methods ofillustration, analogy, and scientific metaphor*. Ph.D. dissertation. University of California at Davis.
1998. Maxwell's problem of understanding the potentials concretely: Contiguous action, illustration and the Coulomb gauge. Max Planck Institut fur Wissenschaftsgeschichte. Preprint 101.

**Cawood, John**

1977. Terrestrial magnetism and the development of international collaboration in early nineteenth century. *Annals of Science* 34: 551-587.

**Cazenobe, Jean**

1980. Comment Hertz a-t-il eu l'idee des ondes hertziennes? *Revue de Synthese* 101: 345-382.
1982. Les incertitudes d'une decouverte: L' onde de Hertz de 1888 a 1900. *AIHS*: 236-265.
1983. *La visee et l'obstacle. Etudes et documents sur la prebistoire de l'onde hertzienne*. Paris.

**Chalmers, Alan F.**

- 1973a. Maxwell's methodology and his application of it to electromagnetism. *SHPS* 4: 107-164.
- 1973b. The limitations of Maxwell's electromagnetic theory. *Isis* 64: 469-483.

**Chatelet, Gilles**

1993. *Les enjeux du mobile. Mathematiques, physique, philosophie*. Paris.

**Chayut, J. J. T.**

1991. The discovery of the electron and the chemists. *Annals of Science* 48: 527-544.

**Chevalley, Catherine**

1991. Glossary, in Niels Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*: 422-442. Paris: Gallimard.

**Coates, Vary, and Bernard Finn**

1979. *A retrospective technology assessment: Submarine telegraphy-the transatlantic cable of 1866*. San Francisco.

**Coelho Abrantes, P.**

1985. *La reception en France des theories de Maxwell concernant l'electricite et le magnetisme*. These de troisieme cycle. Universite de Paris I.

**Crawford, Elizabeth**

1996. *Arrhenius: From ionic theory to the greenhouse effect*. Canton.

**Crosland, Maurice**

1967. *The Society of Arcueil: A view of French science at the time of Napoleon 1*. London.

**Crosland, Maurice, and Crosbie Smith**

1978. The transmission of physics from France to Britain: 1800-1840.  
HSPS 9: 1-61.

**Cross, J. J.**

1985. Integral theorems in Cambridge mathematical physics. In Harman 1985a: 112-148.

**Crowe, Michael**

1967. *A history of vector analysis*. Notre Dame.

**Cushing, James T.**

1981. Electromagnetic mass, relativity, and the Kaufmann experiments.  
*AJP* 49: 1133-1149.

**Cuvaj, Camillo**

1968. Henri Poincare's contributions to relativity and the Poincare stresses.  
*AJP* 36: 1102-1113.

- 1970a. *A history of Relativity. The Role of Henri Poincare and Paul Langevin*. Ph.D. dissertation. Yeshiva University.

- 1970b. Note on Poincare and relativity. *AJP* 38: 774-775.

**D'Agostino, Salvo**

1971. Hertz and Helmholtz on electromagnetic waves. *Scientia* 106: 637-648.

1975. Hertz's researches on electromagnetic wave. *HSPS* 6: 261-323.

1996. Absolute systems of units and dimensions of physical quantities: A link between Weber's electrodynamics and Maxwell's electromagnetic theory of light. *Physis* 33: 5-52.

**Dahl, Per F.**

1997. *Flash of the Cathode Rays: A History ofl. 1. Thomson s Electron*. Bristol.

**Darrieus, M. G.**

1954. Contributions de Henri Poincare it l'electrotechnique. In *PO* 11: 132-139.

**Darrigol, Olivier**

- 1993a. The electrodynamic revolution in Germany as documented by early German expositions of 'Maxwell's theory'. *AHES* 45: 189-280.

- 1993b. The electrodynamics of moving bodies from Faraday to Hertz.  
*Centaurus* 36: 245-360.

- 1994a. The electron theories of Larmor and Lorentz: A comparative study.  
*HSPS* 24: 265-336.

- 1994b. Helmholtz's electrodynamics and the comprehensibility of nature.  
In Krüger 1994a: 216-242.

- 1995a. Henri Poincare's criticism of fin de siècle electrodynamics.  
*SHPMP* 26: 1-44.

- 1995b. Emil Cohn's electrodynamics of moving bodies. *AJP* 63: 908-915.

1996. The electrodynamic origins of relativity theory. *HSPS* 26: 241-312.

1998. Aux confins de l'electrodynamique maxwellienne: Ions et electrons vers 1897. *RHS* 51: 5-34.

1999. Baconian bees in the electromagnetic fields: Experimenter-theorists in nineteenth-century electrodynamics. *SHPMP* 30: 307-345.
- Davis, Edward A., and Isabel Falconer**
1997. *J. J. Thomson and the discovery of the electron*. London.
- Dhombres, Jean, and Jean-Bernard Robert**
1998. Joseph Fourier 1768-1830. Createur de la physique mathematique. Paris.
- Dolby, R. G. A.**
1976. Debates over the theory of solutions: A study of dissent in physical chemistry in the English-speaking world in the late nineteenth and early twentieth centuries. *HSPS* 7: 297-404.
- Doncel, Manuel**
1991. On the process of Hertz's conversion to Hertzian waves. *AHES* 43: 1-27.
1996. Reconsidering Faraday: The process of conversion to his magnetic curves. *Physis* 33: 53-84.
- Doncel, Manuel, and Jose Antonio de Lorenzo**
1996. The electrotonic state, a metaphysical device for Maxwell too? *European Journal of Physics* 17: 6-10.
- Dorries, Matthias**
1991. Prior history and aftereffects: hysteresis and Nachwirkung in 19th-century physics. *HSPS* 22: 25-56.
1994. La standardisation de la balance de torsion dans les projets europeens sur le magnetisme terrestre. In Blondel and Dörries 1994: 121-50.
- Duhem, Pierre**
1902. *Les theories electriques de J. Clerk Maxwell: Etude historique et critique*. Paris.
- Eckert, Michael, et al.**
1992. The roots of solid state physics before quantum mechanics. In L. Hoddeson et al. (eds.), *Out of the crystal maze*: 3-87. New York.
- Epple, Moritz**
1998. Topology, matter, and space, I: Topological notions in 19th-century natural philosophy. *AHES* 52: 397-392.
- Everitt, C. W. F.**
1975. *James Clerk Maxwell. Physicist and natural philosopher*. New York.
1983. Maxwell's scientific creativity. In R. Aris, H. T. Davis, and R. Stuewer (eds.), *Springs of scientific creativity: Essays on founders of modern science*: 73-141. Minneapolis.
- Fahie, J. J.**
1899. *A History of wireless telegraphy. 1838-99*. Edinburgh.
- Falconer, Isabel**
1987. Corpuscles, electrons and cathode rays: J. J. Thomson and the 'discovery of the electron'. *BJHS* 20: 241-276.
1989. J. J. Thomson and Cavendish physics. In Frank A. J. L. James, *The development of the laboratory: Essays in the place of experiment in industrial*



*civilization*: 104-117. Basingstoke.

**Feffer, Stuart**

1989. Arthur Schuster, J. J. Thomson, and the discovery of the electron. *HSPS* 20: 33-61.

**Foising, Albrecht**

1997. *Heinrich Hertz: Eine Biographie*. Hamburg.

**Fox, Robert**

1974. The rise and fall of Laplacian physics. *HSPS* 4: 89-136.

**Frankel, Eugene**

1972. I. B. Biot: the career of a physicist in 19th century France. Ph.D. dissertation. Princeton University.

**Friedman, Robert Marc**

1977. The creation a new science: Joseph Fourier's analytical theory of heat. *HSPS* 8: 73-99.

**Galison, Peter**

1982. Theoretical predispositions in experimental physics: Einstein and the gyromagnetic experiments, 1915-1925. *HSPS* 12: 285-323.

**Gee, Brian**

1990. Faraday's plight and the origins of the magneto-electric spark. *Nuncius* 5: 43-69.

**Gillmor, C. Stewart**

1971. *Coulomb and the evolution of physics in 18th-century France*. Princeton.

**Glasser, Otto**

1959. *Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen*. Berlin.

**Goldberg, Stanley**

1967. Henri Poincare and Einstein's theory of relativity. *AJP* 35: 934-44.

- 1970a. Poincare's silence and Einstein's theory of relativity: The role of theory and experiment in Poincare's physics. *BJHS* 5: 73-84.

- 1970b. The Abraham theory of the electron: The symbiosis of experiment and theory. *AHES* 7: 7-25.

- 1970c. Bucherer, Alfred Heinrich. *DSB* 2: 559-560.

1984. *Understanding relativity: Origin and impact of a scientific revolution*. Boston

**Goldberg, Stanley, and Roger Stuewer (eds.)**

1988. *The Michelson era in American science, 1870-1930*. New York.

**Gooday, Graeme**

1990. Precision measurement and the genesis of physics teaching laboratories in Victorian Britain. *BJHS* 23: 25-51.

**Gooding, David**

1978. Conceptual and experimental bases of Faraday's denial of electrostatic action at a distance. *SHPS* 9: 117-149.

1980. Metaphysics versus measurement: The conversion and conservation of force in Faraday's physics. *Annals of Science* 37: 1-29.

1981. Final steps to the field theory: Faraday's study of magnetic phenomena, 1845-1850. *HSPS* 11: 231-275.
1985. In Nature's school: Faraday as an experimentalist. In Gooding and James 1985: 117-135.
1989. 'Magnetic curves' and the magnetic field: Experimentation and representation in the history of a theory. In Gooding *et al.* 1989: 182-223.
1990. *Experiment and the making of meaning*. Dordrecht.

**Gooding, David, *et al.***

1989. *The uses of experiments*. Cambridge.
- Gooding, David, and Frank James (eds.)**
1985. *Faraday rediscovered: Essays on the life and work of Michael Faraday, 1791-1867*. London.

**Grattan-Guinness, Ivor**

1981. Mathematical physics, 1800-35: Genesis in France, and development in Germany. In H. N. Jahnke and M. Oue (eds.), *Epistemological and social problems of the sciences in the early nineteenth century*: 349-370. Dordrecht.
1985. Mathematics and mathematical physics at Cambridge, 1815-40: A survey of the achievements and of the French influences. In Harman 1985a: 84-111.
1990. *Convolutions in French mathematics, 1800-1840*. 3 Vols. Basel.
1991. Lines of mathematical thought in the electrodynamics of Ampere. *Physica* 28: 114-129.
1995. Why did George Green write his essay of 1828 on electricity and magnetism? *The American Mathematical Monthly* (May 1995): 387-396.

**Greffé, Jean-Louis, Gerhard Heinzmann, and Kuno Lorenz (eds.)**

1996. *Henri Poincaré. Science et philosophie. Congrès international, Nancy, France, 1994*. Berlin and Paris.

**Harman, Peter (formerly Peter Heimann)**

1970. Maxwell and the modes of consistent representation. *AHES* 6: 171-213.
1971. Maxwell, Hertz, and the nature of electricity. *Isis* 62: 149-157.
- 1974a. Helmholtz and Kant: The metaphysical foundations of *Über die Erhaltung der Kraft*. *SHPS* 5: 205-238.
- 1974b. Conversion of forces and the conservation of energy. *Centaurus* 18: 147-161.
1982. *Energy, force, and matter. The conceptual development of nineteenth century physics*. Cambridge.
- 1985a (ed.). *Wranglers and physicists: Studies on Cambridge mathematical physics in the nineteenth century*. Manchester.
- 1985b. Edinburgh philosophy and Cambridge physics: The natural philosophy of James Clerk Maxwell. In Harman 1985a: 202-224.
1987. Mathematics and reality in Maxwell's dynamical physics. In Kargon and Achinstein 1987: 267-297.
1990. Introduction. In Maxwell 1990: 1-32.

- 1995a. Introduction. In Maxwell 1995: 1-37.  
 1995b. Through the looking-glass, and what Maxwell found there. In Kox and Siegel 1995: 79-93.  
 1998. *The Natural philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge.

**Havas, Peter**

1966. A note on Hertz's 'derivation' of Maxwell's equations. *AJP* 34: 667-669.

**Heilbron, John L.**

1964. *A history of the problem of atomic structure from the discovery of the electron to the beginning of quantum mechanics*. Ph.D. dissertation. University of Berkeley.  
 1976. Thomson, Joseph John. *DSB* 13: 362-372.  
 1979. *Electricity in the 17th and 18th centuries: A study of early modern physics*. Berkeley.  
 1981. The electrical field before Faraday. In Cantor and Hodge 1981: 187-213.  
 1982. *Elements of early modern physics*. Berkeley.  
 1993. *Weighing imponderable and other quantitative science around 1800*. *HSPS*: supt. to Vol. 24, part 1.

**Heimann, Peter: see Harman, Peter**

**Hendry, John**

1986. *James Clerk Maxwell and the theory of the electromagnetic field*. Bristol.

**Herivel, John**

1973. The influence of Fourier on British mathematics. *Centaurus* 17: 40-57.

**Hertz, Gerhard, and Manuel Doncel**

1995. Heinrich Hertz's laboratory notes of 1887. *AHES* 49: 197-270.

**Hesse, Mary**

1961. *Forces and fields*. Edinburgh.  
 1966. *Models and analogies in science*. Notre Dame.  
 1973. Logic of discovery in Maxwell's electromagnetic theory. In R. N. Giere and R. S. Westfall (eds.), *Foundations of scientific method: The nineteenth century*: 86-114. Bloomington.

**Hiebert, Erwin**

1978. Nernst, Hermann Walther. *DSB* 15 (supt. 1): 432-453.  
 1995. Electric discharge in rarefied gases: The dominion of experiment. Faraday. Plücker. Hittorf. In Kox and Siegel 1995: 95-134.

**Hirosige, Tetu**

1966. Electrodynamics before the theory of relativity. *JSHS* 5: 1-49.  
 1969. Origins of Lorentz's theory of electrons and the concept of the electromagnetic field. *HSPS* 1: 151-209.  
 1976. The ether problem, the electromagnetic worldview, and the origins of the theory of relativity. *HSPS* 7: 3-82.

**Hofmann, James R.**

- 1987a. Ampere's invention of equilibrium apparatus: A response to experimental anomaly. *BJHS* 20: 309-341.

- 1987b. Ampere, electrodynamics, and experimental evidence. *Osiris* 3: 45-76.  
 1995. *Andre-Marie Ampere*. Oxford: Blackwell.

### **Holton, Gerald**

1964. On the thematic analysis of science: The case of Poincare and relativity. International congress of the history of science. *Actes* 2: 797-800. Also in Holton 1973a: 185-195.  
 1973a. *Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein*. Cambridge.  
 1973b. Influences on Einstein's early works. In Holton 1973a: 197-218.  
 1988. Revised edition of Holton 1973a.

### **Hon, Giora**

1987. 'The electrostatic and electromagnetic properties of the cathode rays are either nil or very feeble' (1883), a case study of an experimental error. *SHPS* 18: 267-282.  
 1995. Is the identification of experimental error contextually dependent? The case of Kaufmann's experiment and its varied reception. In Jed Buchwald (ed.), *Scientific practice: Theories and stories of doing physics*: 170-223. Chicago.

### **Hong, Sungook**

- 1994a. Controversy over Voltaic contact phenomena, 1862-1900. *AHES* 47: 233-289.  
 1994b. Marconi and the Maxwellians: The origins of wireless telegraphy revisited. *Technology and Culture* 35: 717-749.  
 1996. Styles and credit in early radio engineering: Fleming and Marconi on the first transatlantic wireless telegraphy. *Annals of Science* 53: 431-465.

### **Hoppe, Edmund**

1884. *Geschichte der Elektrizität*. Leipzig.

### **Howbold, B., H. J. Howbold, and L. Pyenson**

1988. Michelson's first ether-drift experiment in Berlin and Postdam. In Goldberg and Stuewer 1988: 42-54.

### **Hughes, Thomas P.**

1983. *Networks of power: Electrification in western society, 1880-1930*. Baltimore.  
 1993. Einstein, inventors, and inventions. *Science in Context* 6: 25-42.

### **Hunt, Bruce**

1983. 'Practice vs. theory': The British electrical debate, 1888-1891. *Isis* 74: 341-355.  
 1986. Experimenting on the ether: Oliver J. Lodge and the great whirling machine. *HSPS* 16: 111-134.  
 1987. 'How my model was right': G. F. FitzGerald and the reform of Maxwell's theory. In Kargon and Achinstein 1987: 299-321.  
 1988. The origins of the FitzGerald contraction. *BJHS* 21: 67-76.  
 1991a. *The Maxwellians*. Ithaca and London.  
 1991b. Rigorous discipline: Oliver Heaviside versus the mathematicians. In Peter Dear (ed.), *The literary structure of scientific argument: Historical studies*:

72-95. Philadelphia.

1991c. Michael Faraday, cable telegraphy and the rise of field theory. *History of Technology* 13: 1-19.

1994. The Ohm is where the art is: British telegraph engineers and the development of electrical standards. *Osiris* 9: 48-63.

**James, Frank**

1985. 'The optical mode of investigation': Light and matter in Faraday's natural philosophy. In Gooding and James 1985: 137-162.

**Janssen, Michael**

1995. *A comparison between Lorentz's ether theory and special relativity in the light of the experiments of Trouton and Noble*. Ph.D. dissertation. University of Pittsburgh.

**Janssen, Michael, and John Stachel**

[1999] 'The optics and electrodynamics of moving bodies.' to be published in *Enciclopedia Italiana: Storia della Scienza*, Vols. 6-7.

**Jordan, D. W.**

1982a. The adoption of self-induction in telephony, 1886-1889. *Annals of Science* 39: 433-461.

1982b. D. E. Hughes, self-induction, and the skin-effect. *Centaurus* 26: 123-53.

**Jungnickel, Christa, and Russel McCormmach**

1986. *Intellectual mastery of nature: Theoretical physics from Ohm to Einstein*, Vol. 1: *The Torch of Mathematics*, 1800-70, Vol. 2: *The now mighty theoretical physics*, 1870-1925. Chicago.

**Kaiser, Walter**

1978. Die Zeitliche Ausbreitung von Potentialen in der Elektrodynamik. *Gesnerus* 35: 279-317.

1981. *Theorien der Elektrodynamik im 19. Jahrhundert*. Hildesheim.

1982. Introduction to L. Boltzmann, *Gesamtausgabe*, Vol. 2, Graz.

1987. Early theories of the electron gas. *HSPS* 17: 270-297.

1993. Helmholtz's instrumental role in the formation of classical electrodynamics. In Cahan 1993: 374-402.

**Kangro, Hans**

1972. Geissler, Johann Heinrich Wilhelm. *DSB* 5: 340-341.

**Kargon, Robert**

1969. Models and analogy in Victorian science: Maxwell's critique of the French physicists. *Journal of the History of Ideas* 30: 423-436.

1975. Schuster, Arthur. *DSB* 12: 237-238.

**Kargon, Robert, and Peter Achinstein (eds.)**

1987. *Kelvin's Baltimore lectures and modern theoretical physics: Historical and philosophical perspectives*. Cambridge.

**Keswani, G. H., and C. W. Kilmister**

1983. Intimations of relativity: Relativity before Einstein. *BjPS* 34: 343-354.

**Kim, Dong-Won**

1995. J. J. Thomson and the emergence of the Cavendish school, 1885-90

**Kirsten, Christa, et al. (eds.)**

1986. *Dokumente einer Freundschaft: Briefwechsel zwischen Hermann von Helmholtz und Emil du Bois-Reymond*. Berlin.

**Klein, Martin J.**

1967. Thermodynamics in Einstein's thought. *Science* 157: 509-516.

1972a. Mechanical explanation at the end of the nineteenth century.

*Centaurus* 17: 58-82.

1972b. Gibbs, Josiah Williard. *DSB* 5: 386-393.

**Knight, David**

1996. *Humphry Davy: Science and power*. Cambridge.

**Knudsen, Ole**

1971. From Lord Kelvin's notebook: Ether speculations. *Centaurus* 16: 41-53.

1976. The Faraday effect and physical theory. 1845-1873. *AHES* 15: 235-281.

1978. Electric displacement and the development of optics after Maxwell.

*Centaurus* 22: 53-60.

1985. Mathematics and physical reality in William Thomson's electromagnetic theory. In Harman 1985a: 147-179.

1995. Electromagnetic energy and the early history of the energy principle.

In Kox and Siegel 1995: 55-78. Dordrecht.

**Koenigsberger, Leo**

1902-1903. *Hermann von Helmholtz*. 3 Vols. Braunschweig.

**Kox, Anne J.**

1997. The discovery of the electron: II. The Zeeman effect. *European Journal of Physics* 18: 139-144.

**Kox, Anne J. and Daniel Siegel (eds.)**

1995. *No truth except in the details: Essays in honor of Martin J. Klein*. Dordrecht.

**Kragh, Helge**

1991. Ludvig Lorenz and nineteenth century optical theory: The work of a great Danish scientist. *Applied Optics* 30: 4588-4595.

1993. Between physics and chemistry: Helmholtz's route to a theory of chemical thermodynamics. In Cahan 1993: 403-431.

1997. J. 1. Thomson, the electron, and atomic architecture. *The Physics Teacher* 35: 328-332.

**Kremer, Richard**

1990. *The thermodynamics of life and experimental physiology*. New York.

**Krüger, Lorenz**

1994a (ed.). *Universalgenie Helmholtz. Rückblick nach 100 Jahren*. Berlin.

1994b. Helmholtz über die Begreiflichkeit der Natur. In Krüger 1994a: 201-215.

**Kuhn, Thomas**

1959. Energy conservation as an example of simultaneous discovery. In M.

Clagett (ed.), *Critical problems in the history of science*: 321-356. Madison.

**Langevin, Andre**

1971. *Paul Langevin. mon pere*. Paris.

**Langevin, Paul**

1914. Le physicien (Poincare). In V. Volterra, J. Hadamard, P. Langevin, P. Boutroux, *Henri Poincare. L'Oeuvre scientifique et philosophique*. Paris.

**Lelong, Benoit**

1995. *Vapeurs, foudres et particules: Les pratiques experimentales de l'ionisation des gaz a Paris et a Cambridge, 1895-1914*. These de doctorat. Universite de Paris VII.

1997. Paul Villard, J. J. Thomson et la composition des rayons cathodiques. *RHS* 50: 89-130.

**Lenoir, Timothy**

1982. *The strategy of life: Teleology and mechanics in 19th-century biology*. Dordrecht.

**Levere, Trevor H.**

1968. Faraday, matter, and natural theology. Reflections on an unpublished manuscript. *BJHS* 14: 95-107.

1971. *Affinity and matter: Elements of chemical philosophy, 1800-1865*. Oxford.

**Martin, Thomas**

1949. *Faraday's discovery of electromagnetic induction*. London.

**Mayrargue, Arnaud**

1991. *L'aberration des etoiles et l'ether de Fresnel*. These de Doctoral. Universite de Paris VII.

**McConnmach, Russel**

1970a. Einstein, Lorentz, and the electron theory. *HSPS* 2: 41-87.

1970b. H. A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis* 61: 459-97.

1972. Hertz, Heinrich Rudolf. *DSB* 6: 340-350.

1974. Lorentz, Hendrik Antoon. *DSB* 8: 487-500.

1976. Editor's foreword. *HSPS* 7: xi-xxxv.

**McDonald, James E.**

1965. Maxwellian interpretation of the Laplacian. *AJP* 33: 706-711.

**McGucken, William**

1969. Nineteenth century spectroscopy: Development of the understanding of spectra, 1802-1897. Baltimore.

**McKnight, John L.**

1967. Laboratory notebooks of G. S. Ohm: A case study in experimental method. *AJP* 35: 110-114.

**Mendoza, Eric**

1985. Ampere's experimental proof of his law of induction. *European Journal of Physics* 6: 281-286.

**Meyer, Kirstine**

1920. The scientific life and works of H. C. Oersted. In *Oersted 1920*: 12-166.

**Miller, Arthur 1.**

1973. A study of Henri Poincaré's 'Sur la dynamique de l'électron'.  
*AHES* 10: 207-328.
1974. On Lorentz's methodology. *BJPS* 25: 29-45.
1980. On some other approaches to electrodynamics in 1905. In *Some Strangeness in the Proportion. A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein*. Ed. H. Woolf: 66-91. Reading.
- 1981 a. *Albert Einstein's special relativity: Emergence and early interpretation (1905-1911)*. Reading.
- 1981 b. Unipolar induction: A case study of the interaction between science and technology. *Annals of Science* 3: 155-189.

**Molella, A. P.**

1972. *Philosophy and nineteenth-century electrodynamics: The problem of atomic action at a distance*. Ph.D. dissertation. Cornell University.

**Moyer, Donald**

1973. MacCullagh, James. *DSB* 8: 591-593.
1977. Energy, dynamics, hidden machinery: Rankine, Thomson and Tait, Maxwell. *SHPS* 8: 251-268.
1978. Continuum mechanics and field theory: Thomson and Maxwell. *SHPS* 9: 35-50.

**Mulligan, Joseph**

1997. The personal and professional interactions of J. J. Thomson and A. Schuster. *AJP* 65: 954-963.

**Nahin, Paul**

1988. *Oliver Heaviside: Sage in solitude*. New York.

**Nersessian, Nancy**

1984. *Faraday to Einstein: Constructing meaning in scientific theories*. Dordrecht 1984.
1985. Faraday's field concept. In Gooding and James 1985: 175-187.
1986. Why wasn't Lorentz Einstein? *Centaurus* 29: 205-242.
1988. 'Ad hoc' is not a four-letter word: H. A. Lorentz and the Michelson-Morley experiment. In Goldberg and Stuewer 1988: 71-77.

**Newburg, A.**

1974. Fresnel drag and the principle of relativity. *Isis* 45: 379-386.

**O'Hara, J. G.**

1975. George Johnston Stoney. FR.S., and the concept of the electron. *NRRS* 29: 265-276.

**O'Hara, J. G., and W. Pricha**

1987. *Hertz and the Maxwellians*. London.

**Olesko, Kathryn M.**

1991. *Physics as a calling: Discipline and practice in the Königsberg seminar of physics*. Ithaca and London.
1996. Precision, Tolerance, and consensus: Local cultures in German and British resistance standards. *Archimedes*: 117-156.



**Olesko, Kathryn, and Frederic Holmes**

1993. Experiment, quantification, and discovery. Helmholtz's early physiological researches, 1843-1850. In Cahan 1993: 50-108.

**Ostwald, Wilhelm**

1896. *Elektrochemie: Ihre Geschichte und Lehre*. Leipzig (page numbers refer to the English translation: New Dehli, 1980).

**Pais, Abraham**

1982. *'Subtle is the Lord . . .': The science and life of Albert Einstein*. Oxford.

**Paty, Michel**

1987. The scientific reception of relativity in France. In *The comparative reception of relativity*: 113-67. Ed. T. Glick. Dordrechl.  
1993. *Einstein philosophe: La Physique comme pratique philosophique*. Paris.

**Pietrocola Pinto de Oliveira, Maurizio**

1992. *Elie Mascart et l'optique des corps en mouvement*. These de Doctoral. Universite de Paris VII.

**Pourprix, Bernard**

1989. La mathematisation des phenomenes galvaniques par G. S. Ohm (1825-1827). *RHS* 42: 139-154.

**Pyenson, Lewis**

1979. Physics in the shadow of mathematics: The Göttingen electron-theory seminar of 1905. *AHES* 21: 55-89.  
1980. Einstein's education: Mathematics and the laws of nature. *Isis* 71: 399- 425.  
1982. Audacious enterprise: The Einsteins and electrotechnology in late nineteenth century Munich. *HSPS* 12: 373-92.  
1985. *The young Einstein: The advent of relativity*. Bristol.

**Renn, Jtirgen**

1993. Einstein as a disciple of Galileo: A comparative study of concept development in physics. *Science in Context* 6: 311-341.

**Robotti, Nadia**

1995. J. J. Thomson at the Cavendish laboratory: The history of an electric charge measurement. *Annals of Science* 52: 265-284.

**Robotti, Nadia, and Francesca Pastorino**

1998. Zeeman's discovery and the mass of the electron. *Annals of Science* 55: 161-183.

**Romo, J., and Manuel Doncel**

1994. Faraday's initial mistake concerning the direction of the induced currents, and the manuscript of series I of his researches. *AHES* 47: 291-385.

**Rosenfeld, Leon**

1956. The velocity of light and the evolution of electrodynamics. *Nuovo Cimento*, supt. to Vol. 4: 1630-1669.

**Ross, Sydney**

1961. Faraday consults the scholars: The origin of the terms of electrochemistry. *NRRS* 16: 187-220.  
1965. The search for electromagnetic induction, 1820-1831. *NRRS* 20:184-203.

**Schaefer, Clemens**

1929. Über Gauss' physikalische Arbeiten (Magnetismus, Elektrodynamik, Optik). In *GW*, Vol. 11: 1-217.

**Schaffer, Simon**

1992. Late Victorian metrology and its instrumentation: A manufactory of Ohms. In R. Bud and S. E. Cozzens (eds.), *Invisible connections: Instruments, institutions, and science*. 23-56. Bellingham.  
1995. Accurate measurement is an English science. In N. Wise (ed.), *The values of precision*. 135-72. Princeton.

**Schaffner, Kenneth**

1972. *Nineteenth-century aether theories*. Oxford.  
1976. Space and time in Lorentz, Poincare, and Einstein: Divergent approaches of the special theory of relativity. In P. K. Machamer and R. G. Turnbull (eds.), *Motion and time, space and matter: Interrelations in the history and philosophy of science*. 462-507. Columbus.

**Schagrin, Morton L.**

1963. Resistance to Ohm's law. *ALP* 31: 536-547.

**Schankland, R.**

1963. Conversations with Albert Einstein. *AJP* 31: 47-57.

**Scribner, Charles**

1964. Henri Poincare and the principle of relativity. *AJP* 32: 672-678.

**Searle, G. F. C.**

1950. Oliver Heaviside: A personal sketch. In *Institution of Electrical Engineers, Heaviside centenary* volume: 93-6. London.

**Seelig, Carl**

1960. *Albert Einstein*. Zürich.

**Seeliger, Rudolf**

1922. Elektronentheorie der Metalle. In *Encyklopiidie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen* (6 Vols., 1898-1935), Vol. 5, part 2: 777-872.

**Siegel, Daniel**

1975. Completeness as a goal in Maxwell's electromagnetic theory. *Isis* 66: 361-368.  
1981. Thomson, Maxwell, and the universal ether in Victorian physics. In Cantor and Hodge 1981: 339-268.  
1986. The origins of the displacement current. *HSPS* 17: 99-146.  
1991. *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: Molecular vortices, displacement current, and light*. Cambridge.

**Simpson, Thomas K.**

1966. Maxwell and the direct experimental test of his electromagnetic theory. *Isis* 57: 411-432.
1968. *A critical study of Maxwells dynamical theory of the electromagnetic field in the Treatise on electricity and magnetism*. Ph.D. dissertation. Johns Hopkins.
1970. Some observations on Maxwell's *Treatise on electricity and magnetism*: On the role of the 'dynamical theory of the electromagnetic field' in Part IV of the *Treatise*. *SHPS* 1: 249-263.
1997. *Maxwell on the Electromagnetic Field: A Guided Study*. New Brunswick.

**Smith, Crosbie**

1998. *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. London.

**Smith, Crosbie, and Norton Wise**

1989. *Energy and Empire: A biographical study of Lord Kelvin*. Cambridge.

**Solovine, Maurice (ed.)**

1956. *Albert Einstein: Lettres a Maurice Solovine*. Paris.

**Spencer, J. B.**

1967. Boscovich's theory and its relation to Faraday's researches: An analytic approach. *AHES* 4: 184-202.
1970. The varieties of nineteenth century magneto-optical discovery. *Isis* 61: 34-51.

**Speziali, P. (ed.)**

1972. *Albert Einstein-Michele Besso. Correspondance 1903-1977*. Paris.

**Stachel, John**

1982. Einstein and Michelson: The context of discovery and the context of justification. *Astronomische Nachrichten* 33: 47-53.
1995. History of relativity. In L. Brown, A. Pais, and B. Pippard (eds.), *Twentieth Century Physics*: 249-356. New York.

**Staley, Richard**

1992. *Max Born and the German physics community. The education of a physicist*. Ph.D. dissertation. University of Cambridge.

**Stauffer, R. C.**

1957. Speculation and experiment in the background of Oersted's discovery of electromagnetism. *Isis* 48: 33-50.

**Stein, Howard**

1981. 'Subtler forms of matter' in the period following Maxwell. In Cantor and Hodge 1981: 309-340.

**Steinle, Friedrich**

1994. Experiment, Speculation and Law: Faraday's analysis of Arago's wheel. Philosophy of Science Association, *Proceedings* 1: 293-303.
1995. Looking for a 'simple case': Faraday and electromagnetic rotation. *History of Science* 33: 179-202.

1996. Work, finish, publish? The formation of the second series of Faraday's experimental researches in electricity. *Physis* 33: 141-220.

1998. Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren: Amperes erste Arbeiten zum Elektromagnetismus. In M. Heidelberger and F. Steinle (eds.), *Experimental essays/Versuche zum Experiment*: 272-97. Baden-Baden.

**Stump, David**

1989. Henri Poincare' philosophy of science. *SHPS* 20: 335-363.

**Süsskind, Charles**

1964. Observations of electromagnetic-wave radiation before Hertz. *Isis* 55: 32-42.

1965. Hertz and the technological significance of electromagnetic waves. *Isis* 56: 342-45.

1995. *Heinrich Hertz: A Short Life*. San Francisco.

**Swenson, Loyd**

1972. *The ethereal aether: A history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments, 1880-1930*. Austin.

**Thompson, Silvanus**

1910. *The life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs*. 2 Vols. London.

**Tonnellat, Marie-Antoinette**

1971. *Histoire du principe de relativite*. Paris.

**Topper, David**

1971. Commitment to mechanism: J. J. Thomson, the early years. *AHES* 7: 393-410.

1980. To reason by means of images: J. 1. Thomson and the mechanical picture of nature. *Annals of Science* 37: 31-57.

**Tricker, R. A. R.**

1965. *Early electrodynamics: The first law of circulation*. Elkins Park.

1966. *The contributions of Faraday and Maxwell to electrical science*. Elkins Park.

**Turner, Joseph**

1955. Maxwell on the method of physical analogy. *BJPS* 6: 226-238.

**Turner, Steven**

1972. Helmholtz, Hermann von. *DSB*, Vol. 6: 241-253.

**Voigt, Woldemar**

1895. Gedachtnissrede auf Franz Neumannn. In F. Neumann, *Gesammelte Werke*, Vol. 1 (1928): 3-19. Leipzig.

**Walter, Scott**

1996. *Hermann Minkowski et la mathematisation de la theorie de la relativite restreinte, 1905-1915*. These de doctorat. Universite de Paris 7.

1997. Henri Poincare's student notebooks. *Philosophia Scientiae* 1: 1-17.

1999. Minkowski, mathematicians, and the mathematical theory of relativity. In H. Goenner et al. (eds.), *The expanding worlds of general relativity (Einstein studies, Vol. 7)*: 45-86. Boston.

### **Warwick, Andrew**

1989. *The electrodynamics of moving bodies and the principle of relativity in British physics 1894-1919*. Ph.D. dissertation. Cambridge University.
1991. On the role of the FitzGerald-Lorentz contraction hypothesis in the development of Joseph Larmor's electronic theory of matter. *AHES* 43: 29-91. 1992. Cambridge Mathematics and Cavendish physics: Cunningham, Campbell, and Einstein's relativity 1905-1911. Part 1: The uses of theory. *SHPS* 23: 625-656.
- 1993a. Cambridge Mathematics and Cavendish physics: Cunningham, Campbell, and Einstein's relativity 1905-1911. Part II Comparing traditions in Cambridge physics. *SHPS* 24: 1-25.
- 1993b. Frequency, theorem and formula: Remembering Joseph Larmor in electromagnetic theory. *NRRS* 47: 49-60.
1995. The sturdy protestants of science: Larmor, Trouton, and the earth's motion through the ether. In J. Buchwald (ed.), *Scientific practice: Theories and stories of doing physics*: 300-43. Chicago.
1999. Masters of theory: A pedagogical history of mathematical physics in Cambridge, 1780-1920 (provisional title), manuscript of a book to be published by Cambridge University Press.

### **Wasserman, Neil**

1985. *From invention to innovation: Long-distance telephone transmission at the turn of the century*. Baltimore.

### **Whittaker, Edmund**

1910. *A history of the theories of aether and electricity: From the age of Descartes to the close of the nineteenth century*. London.
1929. Oliver Heaviside. *The Bulletin of the Calcutta Mathematical Society* 20:199-220.
1951. *A history of the theories of aether and electricity*. 2 Vols. London.  
Vol. 1: *The classical theories* (slightly revised version of Whittaker 1910).

### **Wien, Wilhelm**

1954. Die Bedeutung Henri Poincare's fUr die Physik. In *PO* 11: 242-246.

### **Williams, Leslie Pearce**

1965. *Michael Faraday: A biography*. New York.
1983. What were Ampere's earliest discoveries in electrodynamics? *Isis* 74: 492-508.
1985. Faraday and Ampere: A critical dialogue. In Gooding and James 1985: 83-104.
1986. Why Ampere did not discover electromagnetic induction. *AJP* 54: 306-311.

### **Wilson, David B.**

1972. George Gabriel Stokes on stellar aberration and the luminiferous ether. *BJHS* 21: 57-79.
1982. Experimentalists among the mathematicians: Physics in the Cambridge

Natural Sciences Tripos, 1851-1900. *HSPS* 12: 325-371.

1985. The educational matrix: Physics education at early-Victorian Cambridge, Edinburgh, and Glasgow Universities. In Harman 1985: 12-48.

1987. *Kelvin and Stokes: A Comparative study in Victorian physics*. Bristol.

1990. (ed.) *The correspondence between Sir George Gabriel Stokes and Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs*, 2 Vols. Cambridge.

**Wise, Norton**

1979. The mutual embrace of electricity and magnetism. *Science* 203: 1310-1318.

1981a. The flow analogy to electricity and magnetism-Part I: William Thomson's reformulation of action at a distance. *AHES* 25: 19-70.

1981 b. German concepts of force, energy, and electromagnetic ether.  
In Cantor and Hodge 1981: 269-307.

1982. The Maxwell literature and British dynamical theory. *HSPS* 13: 175-205.

**Wise Norton, and Crosbie Smith**

1987. The practical imperative: Kelvin challenges the Maxwellians.  
In Kargon and Achinstein 1987: 323--48.

**Woodruff, Arthur**

1962. Action at a distance in nineteenth century electrodynamics.  
*Isis* 53: 439-459.

1968. The contributions of Hermann von Helmholtz to electrodynamics.  
*Isis* 59: 300-311.

**Yavetz, Ido**

1995. *From obscurity to enigma: The work of Oliver Heaviside, 1872-1889*. Basel.

1996. Between high science and practical engineering: Two studies of lightning by simulation. *Physis* 33: 221-258.