



## ГЛАВА 5

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учение об электричестве и магнетизме гораздо моложе, чем механика и оптика. Кроме слова «магнит» и нескольких элементарных наблюдений над натертым янтарем древность не оставила ничего больше. (В Китае уже во втором столетии н. э. знали компас, но в Европу он попал только в XIII столетии.) Средние века дали знание того, что каждая часть магнита образует опять полный магнит. Достойным внимания является, может быть, страх, с которым воспринимал Христофор Колумб во время своего путешествия в 1492 г. перемену существовавшего в Южной Европе восточного отклонения компаса на западное. Даже в первые полтора столетия развития современной физики история физических идей мало направлялась в эту область, несмотря на несомненную заслугу Вильяма Гильберта (1540—1603), который исследовал при помощи небольшой магнитной стрелки изменение силовых линий вблизи намагниченных стальных шаров и установил совершенную аналогию их действия с действием Земли на компас, покончив тем самым со всеми преданиями о великих магнитных горах на Северном полюсе или о силе, исходящей из Полярной звезды. Он первый применил термин «электричество». Ничего не изменили также исследования Отто Герике, который заметил отталкивание одинаково заряженных тел и построил первую машину, производящую электричество путем трения, а также открыл намагничивание кусочков железа магнитным полем Земли. В механике,

оптике, учении о теплоте и химии происходило глубокое сознательное исследование древних сокровищ донаучного опыта, который имел определенное значение. Но в области электричества и магнетизма лишь предстояло пройти соответствующую «доисторическую» стадию, прежде чем можно было придти к ясным идеям. Исследователи XVII и начала XVIII веков сталкивались с такими сложными явлениями, как электризация путем трения, образование искры, влияние влажности воздуха и др., которые невозможно было объяснить из-за отсутствия основных понятий электростатики.

Все же в эту эпоху возник ряд важных качественных наблюдений. Различение проводников электричества и изоляторов провел в 1731 г. Стефан Грей (1670—1736); Франц Эпинус (1724—1802) показал в 1759 г., что между ними существуют переходы всех ступеней. Оба наблюдали впервые индукционные действия заряженных тел на изолированные проводники. Случайные наблюдения привели в 1745 г. Эвальда Георга фон Клейста (родился вскоре после 1700 г., умер в 1748 г.) в Каммине (Померания) и Питера Мушенброка (1692—1761) в Лейдене к открытию лейденской банки — первоначальной формы электрического конденсатора, над пониманием которой трудился, кроме Эпинуса, также Вениамин Франклин (1706—1790). Франклин дал термины «положительное» и «отрицательное» электричество. В связи с этим открытием Иоганн Карл Вильке (1732—1796) обнаружил в 1758 г. поляризацию диэлектрика — типичный пример рано появившегося и поэтому потерянного открытия. Электрофор, из которого должна была позднее развиться индукционная электростатическая машина, был изобретен Александром Вольта (1745—1827). Экспериментальное доказательство давно предполагавшейся электрической природы грозы, данное в 1752 г. Франклином, произвело большую и оправданную сенсацию.

Понятие «количество электричества», повидимому, уже с XVII столетия было общим достоянием и с самого начала без специального обоснования было

связано с представлением о том, что ничто не может быть создано или уничтожено. Еще не мог быть решенным спор о том, существуют ли два электрических «флюида», компенсирующих действия друг друга, или только один, имеющийся в электрически нейтральных телах в определенном «нормальном» количестве. Наш современный взгляд дуалистичен, поскольку положительные и отрицательные заряды приписываются носителям различной природы, и в то же время унитарен, поскольку существеннейшей составной частью материи объявляются атомные ядра — главные носители положительного электричества.

В области магнетизма в середине XVIII столетия было известно лишь одно, опять преждевременное и потому не имевшее влияния, открытие явления диамагнетизма, которое было обнаружено в 1778 г. Антоном Бругмансом (1732—1789) при отталкивании висмута магнитом.

---

Учение об электричестве стало наукой только после установления закона Кулона, согласно которому сила, действующая между двумя зарядами, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Этот закон имеет своеобразную историю. Она началась с предположений об его существовании в связи с ньютоновским законом тяготения. В 1767 г. Пристли (1733—1804) вполне ясно видел убедительное доказательство этого закона в установленном им и другими, например Генри Кавендишем (1731—1810), явлении: заряд проводника находится целиком на его поверхности, в то время как внутренность проводника совершенно свободна от электрических действий. Однако на эти наблюдения не обращали никакого внимания. В 1785 г. Огюст Кулон (1736—1806) произвел опыты с помощью крутильных весов. Он непосредственно измерил силу между двумя маленькими заряженными шариками, частично по статическому отклонению весов, частично по колебаниям подвешенного к этим весам

шара. В следующей работе 1786 г. Кулон, не зная о своих предшественниках, сообщил о защитном действии проводников и видел также в этом доказательство закона электрических сил. Однако эта часть его работы была совершенно забыта, так что мы теперь большей частью связываем защитное действие проводников с именем Фарадея. На современников Кулона произвели большое впечатление только действительно наглядные измерения посредством крутильных весов, благодаря которым закон носит имя Кулона.

Кулон положил силу, действующую между двумя зарядами, пропорциональной количествам электричества по аналогии с законом Ньютона. Доказательства он не мог дать, так как не имел меры для зарядов. Идею определения этой меры, и именно на основе закона Кулона, мы впервые находим у Гаусса.

Кулон применял свой закон и к магнетизму. Но здесь его опыты менее убедительны, так как накопление магнитных «флюидов» на точечных полюсах представлялось всегда сомнительным, хотя он пытался доказать это заранее подготовленными измерениями. То, что было правильным в этом распространении закона Кулона на магнитные явления, нашло свое точное выражение в применимости дифференциального уравнения Лапласа к магнетизму, на что указал в 1828 г. Джордж Грин (1793—1841). Важным является полученное при помощи крутильных весов доказательство Кулоном того, что магнитное поле Земли сообщает магнитной стрелке вращательный момент, пропорциональный синусу угла отклонения от меридиана. Это является основой для понятия магнитного момента.

Прогресс, вызванный законом Кулона, иллюстрируется применением в 1811 г. Пуассоном (1781—1840) теории потенциала, развитой раньше для тяготения (гл. 3). Действительно, в законе Кулона или в эквивалентном ему дифференциальном уравнении Лапласа — Пуассона, а также в опыте, подтверждающем постоянство потенциала на проводнике, содержится вся электростатика, поскольку диэлектрики

не участвуют в явлениях. Дальнейшей разработкой теории потенциала мы обязаны, кроме Грина, Карлу Фридриху Гауссу (1777—1855), который выступил в 1839 г. со своей знаменитой работой. Эта теория оказала влияние далеко за пределами ее собственной области, так как стала прообразом для многих других областей математической физики.

Гаусс дал упомянутое определение количества электричества на основании закона Кулона. Единицей количества электричества является, соответственно этому закону, то количество, которое отталкивает с силой в 1 дину равное ему количество, находящееся от него на расстоянии в 1 см. Гаусс дал первое абсолютное измерение магнитного момента стального магнита и силы магнитного поля Земли. Его математическая теория этого поля является непосредственным и завершающим продолжением работы В. Гильберта. Гаусс основал также первую рациональную электрическую и магнитную систему мер.

— Но закон сохранения электричества впервые был доказан в 1843 г. Михаилом Фарадеем (1791—1867). В изолированном, соединенном с кондуктором электрометра «ведре для льда» он помещал заряженный металлический шар, висящий на длинной шелковой нити; мерой его заряда являлось расхождение листочков электрометра. Фарадей показал, что это расхождение не зависит от тех предметов, которые еще находятся в «ведре для льда», и от состояния их заряда. Можно этот заряд перенести целиком или частично на другой проводник; это не окажет никакого влияния. Только когда вносят новые заряды в «ведро для льда», отклонение электрометра также изменяется; оно указывает алгебраическую сумму введенных зарядов. Этот опыт, не уступающий по своему значению в это же время полученным доказательствам закона сохранения энергии, не нашел такой же оценки только потому, что представление о неразрушаемых электрических флюидах было уже раньше установлено и не нуждалось в защите.

---

Второй, может быть еще более плодотворный, шаг наука об электричестве совершила тогда, когда Александр Вольта (1745—1827) сделал открытие на основе наблюдений Луиджи Гальвани (1737—1798) над лягушечьей лапкой, которые произвели сенсацию и нашли много последователей. Редко новое наблюдение является столь трудным для понимания, как это; этим открытием была проложена дорога в совершенно неизведанную область.

Первые случайные наблюдения Гальвани над вздрагиванием лягушечьих лапок, соединенных с металлической скобой, вблизи электрических искровых разрядов или при приближении грозы были фактически первым указанием на электрические колебания; лягушечья лапка действовала как «детектор». Но лишь более чем через сто лет физики смогли это использовать. Тогда же (1792 г.) исследование и счастливый случай привели Гальвани к тому, что он смог вызывать вздрагивания лапок лягушки при помощи скобы, сделанной из двух различных металлов. Это был первый гальванический элемент; лягушечья лапка была одновременно его электролитом и индикатором тока. Но это не было осознано самим Гальвани. Он полагал, может быть не совсем неправильно, что перед ним явления животного электричества, которые уже давно были известны у электрического ската и других рыб.

Вольта также защищал в 1792 г. это воззрение. Но после длинного ряда опытов он все более и более проникнулся мыслью, что биологический объект — лягушечья лапка или даже человеческий язык — имеют только второстепенное значение. В 1796 г. он совсем исключил этот момент и высказал существенное предположение о «циркуляции» электричества в цепи проводников, когда она состоит из двух (или более) проводников «первого» класса и одного проводника «второго» класса. Он первый ввел эти понятия, так же как понятие стационарного электрического тока. Опираясь на это новое знание, он сконструировал в 1800 г. вольтов столб, этот прототип гальванических элементов,

появившихся в последующие годы и десятилетия, как грибы после дождя. Знаменитым стал также «основной опыт Вольта», который должен был показать заряджение двух металлов при соприкосновении. Современная критика (Эмиль Варбург) его подрывает: между двумя металлическими пластинками имеется всегда еще водяная прослойка, и фактически то, что измерял Вольта, было напряжением на полюсах открытого гальванического элемента. Но правильным и основополагающим было указание Вольта на то, что в чисто металлической среде, сколько бы ни было различных металлов, моментально образуется электрическое равновесие, которое исключает любой ток. Только температурные различия порождают ток (термоэлектричество). Это было обнаружено в 1821 г. Томасом Иоганном Зеебеком (1770—1831).

Электролиз, в котором мы теперь видим причину возникновения гальванического тока, был описан уже в 1797 г. до элемента Вольта Александром Гумбольдтом (1769—1859) (стяжавшим большую славу своими достижениями в описательных естественных науках). Он наблюдал электролиз в цепи одного цинкового и одного серебряного электродов с прослойкой воды между ними. Гениальный фантазер Иоганн Вильгельм Риттер (1776—1810) получил путем электролиза металлическую медь из раствора медного купороса. Он обнаружил также идентичность статического и гальванического электричества, применяя для электролиза разряды лейденской банки. Он первый установил, что химические превращения являются причиной возникновения тока в гальваническом элементе. В 1800 г. Гемфри Дэви (1778—1829) начал свои знаменитые электролитические исследования, которые его привели в 1807 г. к открытию гальванического выделения щелочных металлов. Благодаря количественному измерению массы продуктов электролиза он открыл для исследования направление, которое привело в 1834 г. к закону эквивалентности Михаила Фарадея (1791—1867), в 1853 г. к работам Иоганна Вильгельма Гитторфа (1824—1914)

о передвижении ионов, в 1875 г. к открытию Фридрихом Кольраушем (1840—1910) независимости подвижности ионов, а в 1887 г. к теории электролитической диссоциации Сванте Аррениуса (1859—1927). Замечательное завершение нашел этот знаменитый ряд открытий в теории электродвижущих сил Вальтера Нернста (1864—1941).

Тем самым была завершена теория гальванического тока. Правда, представление о том, что, например, ион натрия должен свободно двигаться в водном растворе, не реагируя химически с окружающей средой, встречало вначале значительное сопротивление; часто не признавали различия между нейтральным атомом и ионом. Но теория получила такие многочисленные подтверждения, что сопротивление постепенно заглохло.

---

Открытие Вольта положило начало ряду еще других линий развития. Гальванические элементы давали токи совсем другой силы и продолжительности, чем те, которые получались путем разряда конденсатора. В 1811 г. Дэви при помощи батареи из 2000 элементов получил вольтову дугу, которая служила электрическим источником света до тех пор, пока в 70-х годах XIX столетия она не была постепенно вытеснена изобретенной Томасом Эдисоном (1847—1931) осветительной лампой. Благодаря элементам стали доступны исследованию магнитные действия тока.

С начала XIX века существовало много различных предположений о силах, действующих между электрическими и магнитными флюидами; эти предположения привели к исследованиям взаимодействия между магнитными полюсами и открытыми вольтовыми столбами. Независимо от таких ложных путей и чисто случайно Ганс Христиан Эрстед (1777—1851) натолкнулся в 1820 г. на факт отклонения магнитной стрелки электрическим током и нашел после этого также соответствующее направление силы магнита, действующей на контур с током. Многие физики, особенно фран-



цузские, стали исследовать вновь открытую область, и в течение двух лет были созданы основы электромагнетизма. Сначала Доминик Франсуа Араго (1786—1853) и Жозеф Луи Гей-Люссак (1778—1850) наблюдали намагничивание куска железа под влиянием тока, проходящего по проволоке, намотанной на железо. Это был первый электромагнит. В том же году Андре Мари Ампер (1775—1836) установил свое знаменитое правило пловца для определения направления магнитного силового поля по отношению к проводнику тока и нашел, что одинаково направленные токи притягиваются, а противоположно направленные — отталкиваются. Он показал, что соленоид действует как магнитный стержень. Одновременно Жан Батист Био (1774—1862) и Феликс Савар (1791—1841) на основании результатов опыта сформулировали названный по их имени закон магнитного действия отдельного элемента тока. Фарадей в 1821 г. подверг действию постоянных магнитов подвижные части цепи тока и, наоборот, магниты действию токов. После этого в 1822 г. Ампер показал взаимодействие двух электрических цепей тока и принял его за исходный пункт для своего основного закона электродинамики — термин, который впервые появляется именно у него. Особенное значение имело, правда только через столетие, его объяснение магнетизма уже не посредством двух магнитных флюидов, но действием гипотетических молекулярных токов (1821—1822).

---

Из этих магнитных действий тока была получена мера для силы тока. В 1826 г. Симон Ом (1787—1854) при помощи ясного разделения понятий «электродвижущая сила», «уровни напряжения», «сила тока» вывел названный по его имени закон пропорциональности между силой тока и разностью напряжений, причем коэффициент пропорциональности означал сопротивление проводника. Ом показал, что сопротивление

провода пропорционально длине и обратно пропорционально ее сечению, и заложил этим основы для понятия удельной электропроводности тел. Но это только одна из трех констант, которые характеризуют поведение любого вещества в отношении электричества и магнетизма.

В 1847 г. Р. Кирхгоф (1824—1887) смог разрешить проблему разветвления тока путем установления правил, названных по его имени.

Важнейшее применение электродинамика нашла в телеграфе. В 1833 г. Гаусс и Вильгельм Вебер (1804—1891) дали принцип функционирования телеграфа по одной линии.

---

После 1822 г. наступил перерыв в развитии электромагнетизма, хотя до этого была исследована только половина этой группы явлений.

В 1831 г. Фарадей открыл, что действию токов на магнит соответствует обратное действие магнита на ток. Он наматывал на железное кольцо две катушки из проволоки и пропускал ток через первую катушку; сразу же после включения тока в первой катушке возникал ток во второй; при выключении тока в первой катушке во второй появлялся ток противоположного направления. Тем самым была открыта индукция, и Фарадей в последующие годы выяснил ее различные формы. В 1833 г. его несколько неясные указания о направлении индуцированных движений токов Э. Х. Ленц (1804—1865) соединил в правило, названное по его имени. Вскоре появились индукционные машины, которые вырабатывали электрический ток без применения гальванических элементов. Но особенно большой подъем в этой области начался после 1867 г., когда В. Сименс (1816—1892) заменил используемые в индукционных машинах стальные магниты электромагнитами, которые питались вырабатываемым этими маши-

нами током; именно в этом заключается динамоэлектрический принцип.

Электродинамика дала возможность установить вторую, независимую от закона Кулона, систему мер. Можно, например, в качестве единицы силы тока выбрать такой ток, который, протекая в длинном проводнике на расстоянии одного сантиметра от второго такого же проводника с таким же током, действует на единицу длины последнего с силой в одну дину. Эта электромагнитная единица такова, что равная ей сила тока в течение единицы времени дает конденсатору единицу количества электричества. Это с необходимостью привело к вопросу об отношении к электростатической единице, определенной законом Кулона. Из соответствующих формул увидели, что это отношение имеет размерность скорости. Его значение измерил в 1852 г. Вильгельм Вебер (1804—1891) с удивительным результатом: это есть скорость света, равная  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Джемс Клерк Максвелл (1831—1879) проверил этот результат в 1868—1869 гг. с более высокой точностью, так как это имело основополагающее значение для электромагнитной теории света. В дальнейшем определение этого отношения было так усовершенствовано, что и сейчас считается точным измерением скорости света.

Применяемые в настоящее время в технике электрические единицы — ампер, ом, вольт и др. — были установлены в 1881 г. Интернациональным конгрессом в Париже. В то время, в силу недостаточного предвидения развития техники, не решались принять электромагнитную единицу силы тока как техническую единицу, так как она казалась непрактично большой, и определили ампер как  $1/10$  этой единицы.

Во всех упомянутых до сих пор измерениях имели дело с токами в металлических проводниках. В 1872 г. Генри Роуланд (1848—1901) показал, что конвекционные токи статических зарядов на движущихся телах оказывают точно такое же магнитное действие.

Открытия электродинамики поставили теорию перед задачами, которые в отличие от всех прежних задач не могли быть разрешены рассмотрением центральных сил, действующих между материальными точками и зависящих только от расстояния. Ампер и Франц Эрнст Нейман (1798—1895) и прежде всего Вильгельм Вебер разработали новую теорию. Основной закон Вебера (1846) охватил все, что тогда знали об электричестве, допущением, что сила между двумя зарядами зависит не только от расстояния, но также от скорости и ускорения, что токи являются движущимися зарядами. До 1890 г. закон Вебера играл большую роль в науке. Но все эти теории страдали тем недостатком, что они допускали дальное действие. Поскольку была признана конечная скорость распространения электрических действий, они лишались почвы. Они свидетельствуют еще сегодня о том, как тяжел был путь познания в этой области, к каким большим изменениям всех физических воззрений он привел.

Вождем в разработке правильного понимания электрических и магнитных явлений был Михаил Фарадей. В 1837 г. он обнаружил влияние диэлектриков на электростатические явления; в 1846 и в последующие годы он показал общую распространенность диамагнитных свойств в природе, в то время как парамагнетизм является исключением. Тогда же у него возникло представление, что электрические и магнитные действия не непосредственно идут от тел к телам, а переносятся через лежащий между ними диэлектрик, который становится местом электрического или магнитного «поля», — это понятие также введено Фарадеем. Указанное воззрение развивалось постепенно в процессе его экспериментов.

«Этим объясняется то, что в опубликованных работах он выражает свои идеи в форме, особенно приспособленной для возникающей науки. В самом деле, его манера писания значительно отличается от манеры тех физиков, которые, как Ампер, были призваны облечь ее идеи в математическую форму». Так оценивает

Джемс Клерк Максвелл \*) работы Фарадея и несколько дальше он продолжает: «Может быть для науки является счастливым обстоятельством то, что Фарадей не был собственно математиком, хотя он был в совершенстве знаком с понятиями пространства, времени и силы. Поэтому он не пытался углубляться в интересные, но чисто математические исследования, которых требовали его открытия. Он был далек от того, чтобы облечь свои результаты в математические формулы, либо в те, которые одобрялись современными ему математиками, либо в те, которые могли дать основание новым начинаниям. Благодаря этому он получил досуг, который требовался ему для работы, соответствующей его духовному направлению, смог согласовать идеи с открытыми им фактами и создать если не технический, то естественный язык для выражения своих результатов». О своих собственных исследованиях Максвелл прибавляет следующее: «Я предпринял специально эту работу в надежде, что мне удастся придать его (т. е. Фарадея) идеям и методам математическое выражение».

Действительно, Максвелл в своем первом сочинении 1855—1856 гг. формулирует математически понятие силовых линий Фарадея. Так как он особенно тщательно анализирует характер силовых линий электрического тока, ему удается вывести хорошо известное нам векторное дифференциальное уравнение для стационарных полей, соответственно которому каждая линия тока образует вихревую линию магнитного поля. Но для всего дальнейшего решающим шагом, наиболее своеобразной работой Максвелла была его статья 1862 г. \*\*), в которой он впервые прибавляет к току проводимости ток смещения, возникающий в каждом диэлектрике при изменении напряженности электрического поля и всегда дающий вместе с током проводи-

---

\*) Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, English — Cambridge, 1873; Deutsch von B. Weinstein — Berlin, 1883, т. II, 216.

\*\*) Philosophical Magazine (4) 23, 12 (1862); уравнение (112).

мости замкнутый общий ток. Максвелл пришел к этому посредством гипотетической квазимеханической модели. Никто не рассматривал этот вывод как убедительное доказательство, и Максвелл даже не поместил его в своем обширном учебнике 1873 г. Но очень интересно, что Максвелл именно на этом обходном пути совершил свое решающее открытие. Электромагнитная теория света (гл. 4), т. е. учение о том, что существуют электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью света, была только необходимым следствием; Максвелл вывел его в 1865 г. Перенос силы электромагнитным полем Максвелл свел к напряжениям, которые носят теперь его имя и которые аналогичны упругим напряжениям, исследованным Коши (гл. 2); они отличаются от последних только тем, что не связаны с деформацией материи. Более того, будучи вызваны исключительно полем, они могут иметь место даже в пустоте, в отсутствии всякой материи. В соответствии с этим в чисто электрическом или чисто магнитном поле имеется натяжение вдоль каждой силовой линии, а перпендикулярно к ней — давление той же интенсивности. Лишь напряжения Максвелла привели к уточнению понятия близкодействия.

Так были полностью заложены физические основы современной теории электричества. В 1890 г. Генрих Герц (1857—1894) придал закону индукции Фарадея форму дифференциального уравнения, которое дополняет данное Максвеллом дифференциальное уравнение. Тем самым система уравнений Максвелла, в которой мы вместе с Герцем усматриваем сущность теории Максвелла, приняла такой эстетически совершенный симметричный вид, который, принимая во внимание всеобъемлющее физическое содержание системы, привлекает нас почти как очевидность. Но все же это было только формальным делом. Лишь в 1884 г. возникла теория Пойнтинга о потоке энергии (гл. 5) и появились открытия Г. А. Лорентца и Анри Пуанкаре (1854—1912) относительно связи потока электромаг-

нитной энергии с электромагнитным импульсом. Это означало, однако, только некоторое дополнение, а не существенное изменение основ теории Максвелла.

---

Несмотря на свою внутреннюю замкнутость и полное соответствие с опытом, теория Максвелла только постепенно находила признание среди физиков. Слишком необычными были ее идеи. Даже люди масштаба Гельмгольца и Больцмана много лет потратили на овладение ею.

В 1879 г. Берлинская Академия поставила конкурсную задачу: экспериментально доказать влияние диэлектрика на магнитную индукцию; в 1887 г. ее разрешил Г. Герц посредством быстрых колебаний. Важным результатом подобных размышлений явилось также исследование Конрада Рентгена (1845—1923) в 1888 г. Он обнаружил, что магнитные действия движущегося электрически поляризованного диэлектрика таковы же, как действия электрического тока. Это соответствует идее Фарадея. Мы называем установленный эффект током Рентгена. Открытие в 1888 г. электромагнитных волн Герцем положило конец всем сомнениям. Из числа колебаний и длины волн он непосредственно определил скорость их распространения и нашел ее равной скорости света.

Предистория этого открытия связана с сочинением Гельмгольца «О сохранении силы» (1847, гл. 6). Из различных наблюдений над разрядами лейденских банок и особенно из независимости порождаемого при этом джоулева тепла от всех особенностей проволоки, замыкающей контур, Гельмгольц заключил о колебательном характере разряда. Точно так же в связи с принципом сохранения энергии Вильям Томсон (лорд Кельвин) дал в 1853 г. математическую теорию этого явления, к которой мы едва ли что-нибудь можем прибавить. Беренд Вильгельм Феддерсен (1832—1918) наблюдал с 1858 до 1862 г. эти колебания в виде

разрядной искры во вращающемся зеркале. В 1870 г. Фридрих Вильгельм Безольд (1837—1907) явно обнаружил колебания в проводящих проволоках со свободным концом и в цепи резонатора с разомкнутым искровым промежутком. Но впервые в руках Герца подобные резонаторы стали средством исследования волн в атмосфере, средством доказательства их поляризации, отражения, преломления, а также интерференции; они дали возможность также измерить длины волн и тем самым скорость распространения.

Волны, с которыми экспериментировал Герц, были сильно затухающими. Если мы теперь можем повторить его опыты с незатухающими волнами и, следовательно, с большей точностью, то этим мы обязаны технике. Но эта техника прошла трудный путь до 1913 г. и позже, пока научились получать незатухающие волны на основе принципа обратной связи (гл. 1), что было использовано для беспроволочного телеграфа и других подобных целей.

---

Как за Ньютоном последовала эпоха математического оформления механики, так отныне наступила пора математической обработки теории Максвелла. Для представления магнитных вихревых полей стационарных токов уже в прежние времена был введен вектор-потенциал. Теперь ему и скалярному потенциалу электростатики был противопоставлен западающий потенциал, введенный в 1898 г. Альфредом Мари Лиенаром и в 1900 г. Эмилем Вихертом (1861—1928). В этом потенциале конечная скорость распространения электромагнитных волн находит свое наиболее четкое выражение. Перечисление всех исследователей, которые математически решали важные научные и технические проблемы переменных электрических полей, выходит далеко за рамки данной книги. В современном изложении теория Максвелла является замечательным творением, равноценным механике.

---



В начале XX века учение об электричестве и магнетизме казалось достаточно завершенным, тем более, что незадолго до этого атомистика внесла порядок и ясность в понимание явлений разряда в разреженных газах. Однако именно в самой существенной области этого учения, в области электропроводности, было открыто новое неожиданное явление. В 1835 г. измерениями Э. Х. Ленца (1804—1865) было показано, что сопротивление металлов при охлаждении уменьшается. Камерлинг-Оннес (1853—1926) исследовал это явление при температуре  $10^{\circ}\text{K}$ , достигнутой в 1908 г. при ожижении гелия. Он нашел, что у металлов, например у золота, серебра, меди, имеется некоторое критическое значение сопротивления, ниже которого оно не падает. Но в 1911 г. он обнаружил сначала у ртути, а затем у свинца, олова и некоторых других металлов внезапное исчезновение сопротивления электрическому току, как только температура падала ниже критической точки, характерной для этих тел. Так была установлена сверхпроводимость. В 1914 г. Камерлинг-Оннес показал, что ток, циркулирующий в сверхпроводящем кольце, не изменялся по величине в течение нескольких дней без приложения какой-либо электродвижущей силы. Наконец, Камерлинг-Оннес нашел также, что при постоянной температуре сверхпроводимость может быть разрушена действием магнитного поля, после чего вступает в свои права закон Ома. Напряженность магнитного поля, при котором еще сохраняется сверхпроводимость, изменяется по мере понижения температуры и у чистых металлов может достигать несколько сот гаусс.

Последующие исследователи прибавили к списку сверхпроводников еще несколько чистых металлов, а также ряд сплавов и химических соединений. В. Гааз и его сотрудники заметили, что критическое значение напряженности поля для сверхпроводящей проволоки зависит от направления магнитного поля по отношению к оси проволоки. Объяснение этому явлению дал в 1932 г. М. Лауэ. Если поместить сверхпроводник

в однородное магнитное поле, то он деформирует это поле, потому что силовые линии обходят его, как это показал на основе теории Максвелла Габриэль Липпман (1845—1921). Но сжатие силовых линий обуславливает усиление поля в определенных точках поверхности; сверхпроводимость разрушается, как только в какой-либо точке достигается критическое значение поля. Это подтвердили в последующие годы измерения Гааза и его сотрудников на сверхпроводниках различной формы.

Но все же сверхпроводник не является проводником в смысле теории Максвелла. Нельзя сказать, что он отличается от других проводников только бесконечно большой проводимостью. Тогда магнитное поле, проникая внутрь проводника, должно было бы «вмораживаться» в нем при падении температуры ниже критической точки. Но в 1933 г. измерения В. Мейснера и Р. Оксенфельда показали, что оно при этом будет вытеснено, причем не существенно, производят ли раньше охлаждение ниже критической точки, а потом возбуждают магнитное поле, или наоборот. Этот эффект Мейснера требует дополнения теории Максвелла на совершенно новых основах.

---

По вопросу об отношении электромагнитного поля к его зарядам взгляды физиков менялись. Подобно тому как Ньютон и его последователи рассматривали гравитацию как причинно обусловленный результат действия масс, так каждый физик первоначально рассматривал электрические силы как результат действия зарядов. Фарадей и Максвелл выдвинули на передний план понятие поля, а заряды были сведены к своего рода сингулярным точкам поля. Но отношение опять перевернулось, когда в связи с электронной теорией на передний план выступили атомные носители электрических элементарных зарядов. Нам кажется, что ни одно из этих воззрений не соответствует фактам. За-

ряды и поле настолько связаны друг с другом, что одно не может существовать без другого. Поэтому наука может с одинаковым успехом как принимать заряды за основу для познания поля, так и заключать о зарядах из изменений электрических силовых линий. Это — логические заключения; они не имеют дела с реальным отношением причины и следствия. То же, конечно, относится к взаимоотношениям между полем тяготения и его массами.

Своеобразны отношения между учением об электричестве и механикой. Как уже говорилось, Максвелл пытался в 1862 г. дать механическую картину магнитного поля. Позднее, в период прогрессирующего признания его теории, многие пытались более рациональным путем представить механику эфира как основу для такой картины. И до известной степени можно подчинить теорию линейных замкнутых (квазистационарных) токов теории циклов, разработанной Гельмгольцем на основе механики. Но это не больше, чем математическая аналогия между различными видами физических процессов. Во всяком случае она характерна для проникновения электродинамических воззрений в широкие круги; последнее иллюстрируется тем, что современный инженер чаще объясняет действие механических машин через соответствующую электрическую схему. Но постепенно к 1900 г. поняли, что общее сведение электродинамики к механике невозможно.

С 1880 г. постепенно выступала противоположная мысль: свести механику к электродинамике. То, что движущийся носитель заряда несет с собой свое электрическое поле и что он имеет количество движения, связано с идеей электромагнитного происхождения инертной массы. Некоторые пытались любую массу рассматривать как электромагнитную массу. В 1902 г. это воззрение нашло свое математическое отражение

в теории Макса Абрагама (1875—1922) относительно импульса движущегося электрона, представляемого в виде заряженного шара; масса получалась зависящей от скорости, и формула Абрагама долгое время конкурировала с релятивистской формулой (гл. 2).

Но и от этой идеи физика отошла. Опыты дали, наконец, однозначное решение в пользу релятивистской формулы; к тому же теория Абрагама получала для пропорциональности между энергией и покоящейся массой другой коэффициент, чем выступающий в эйнштейновском законе инертности энергии, нашедшем полное подтверждение в ядерной физике (гл. 11). Однако в качестве подготовки релятивистской динамики работы Абрагама имели большое значение.

Если релятивистская динамика также совершенно независима от какого-либо представления о природе сил и, таким образом, также независима от электродинамики, то последняя все же играет решающую роль при открытии этой динамики. Из опытов, которые были сконцентрированы в динамике Ньютона, нельзя было придти к теории относительности Эйнштейна; они были недостаточно точны. Поскольку электродинамика привела к связанному с преобразованиями Лорентца принципу относительности, она обусловила также переход от ньютоновской динамики к релятивистской. В этом чисто историческом смысле современная динамика основывается также на электродинамике.

---

Новейшие исследования по магнетизму выходят за пределы чистой электродинамики. Согласно теории Максвелла намагничение пропорционально магнитному полю в соответствии с опытами, относящимися к диамагнитным и слабо парамагнитным телам. В железе, никеле, кобальте и некоторых сплавах, в которых впервые был открыт магнетизм, при растущей силе поля намагничение достигает значения насыщения, которое, конечно, лежит далеко за пределами намагничения у

других веществ. Для твердых металлов, как, например, большинства сортов стали, намагничение вообще гораздо меньше зависит от силы поля, чем от предварительной обработки. В противном случае не было бы постоянного магнита. Для подобных веществ в 1880 г. Эмиль Варбург (1846—1931) обнаружил явление, которое независимо от него открыл в 1882 г. Джемс Альфред Эвинг (1855—1935) и назвал его гистерезисом: в том случае, когда поле возрастает от нуля, намагничение происходит иначе, чем при его убывании до нуля. С намагничением, следовательно, связана работа, которая в магните превращается в теплоту. Еще поразительнее было открытие Пьера Кюри (1859—1906). Он нашел в 1895 г., что диамагнетизм независим от температуры, в то время как парамагнитная восприимчивость, напротив, с увеличением абсолютной температуры уменьшается обратно пропорционально ей. Что касается ферромагнетизма, то при характерной для вещества «температуре Кюри» (для железа она равна  $774^{\circ}\text{C}$ , для никеля  $372^{\circ}\text{C}$ , для кобальта  $1149^{\circ}\text{C}$ ) он переходит в нормальный парамагнетизм, постепенно уменьшающийся с возрастанием температуры. Теоретическое объяснение различного поведения диа- и парамагнитного вещества дал в 1905 г. Поль Ланжевен (1872—1946). В то время как диамагнетизм основывается на индукционном действии магнитного поля на электроны, находящиеся в молекуле, парамагнетизм вызывается свободно вращающимися элементарными магнитами с постоянными моментами; поле заставляет их принять определенное направление вопреки воздействию теплового движения. В 1907 г. Пьер Эрнст Вейс (1865—1940) распространил статистическую термодинамическую теорию на ферромагнетизм, создав гипотезу внутреннего магнитного поля, напряженность которого характерна для тела и для его намагничения и которое наряду с магнитным полем содействует ориентации элементарных магнитов. Какой бы произвольной ни казалась вначале эта гипотеза, Вейс был на правильном пути; в 1927 г. Гейзенберг смог свести

внутреннее поле посредством теории квант к «спину» электронов. Тем самым магнетизм подобно электричеству был сведен к первоначальным свойствам элементарных частиц (гл. 14).

От этой теории до количественного понимания свойств ферромагнетиков путь, конечно, далекий и он еще не вполне проложен. Среди многих обстоятельств при этом играют роль, например, кристаллическая структура, упругие напряжения и примеси.

Как показал Дебай в 1912 г., теория магнетизма Ланжевена без всяких оговорок может быть применена к объяснению зависимости от температуры электрической восприимчивости жидкостей и газов, молекулы которых обладают постоянным электрическим моментом; электрическая восприимчивость также уменьшается обратно пропорционально абсолютной температуре.

