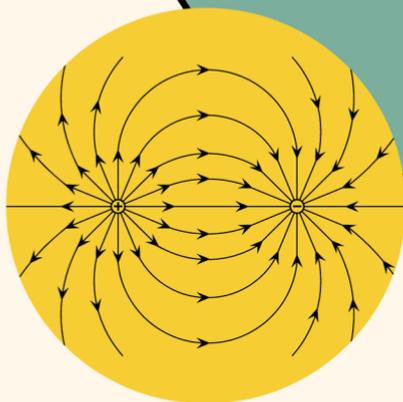


Р. ФЕЙНМАН

Р. ЛЕЙТОН

М. СЭНДС

ФЕЙНМАНОВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ



Том 3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ

УДК 53
ББК 22.3
Ф36

Серия «Фейнмановские лекции по физике»

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS:
THE NEW MILLENNIUM EDITION

Печатается с разрешения издательства Basic Books,
an imprint of Perseus Books, LLC,
a subsidiary of Hachette Book Group, Inc. (США) при содействии
Агентства Александра Корженевского (Россия).

Компьютерный дизайн *В.А. Воронина*

Перевод с английского *Г.И. Копылова, Ю.А. Симонова,*
под редакцией *Я.А. Смородинского*

Фейнман, Ричард.

Ф36 Фейнмановские лекции по физике. Т. III (5) / Ричард Фейнман, Роберт Лейтон, Мэтью Сэндс; [перевод с английского]. — Москва : Издательство АСТ, 2020. — 304 с. — (Фейнмановские лекции по физике).

ISBN 978-5-17-113011-4

Американский физик Ричард Фейнман — один из величайших ученых XX века, лауреат Нобелевской премии по физике.

В свое время преподаватели Калифорнийского технологического университета задумались о том, как можно было бы перестроить курс физики, чтобы сделать его более занимательным и современным. Ричард Фейнман с энтузиазмом подхватил эту идею и согласился прочитать авторский двухгодичный курс лекций по общей физике, но только один раз. Университет, для которого это событие стало историческим, организовал запись лекций, и затем команда физиков подготовила издание в нескольких томах, которое и поныне считается одним из лучших вводных курсов по физике.

В настоящий том вошли лекции, посвященные электричеству и магнетизму.

УДК 53
ББК 22.3

© California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer, 1964, 2006, 2010

© Перевод. Г.И. Копылов, наследники, 2018

© Перевод. Ю.А. Симонов, 2018

© Примечания. Я.А. Смородинский, наследники, 2018

© Издание на русском языке AST Publishers, 2020

Оглавление

От редактора	5
Предисловие	7

ВЫПУСК 5

Глава 1. Электромагнетизм	9
§ 1. Электрические силы	9
§ 2. Электрические и магнитные поля	13
§ 3. Характеристики векторных полей	15
§ 4. Законы электромагнетизма	18
§ 5. Что это такое — «поля»?	24
§ 6. Электромагнетизм в науке и технике	27
Глава 2. Дифференциальное исчисление векторных полей	28
§ 1. Понимание физики	28
§ 2. Скалярные и векторные поля — T и \mathbf{h}	31
§ 3. Производные полей — градиент	33
§ 4. Оператор ∇	37
§ 5. Операция с ∇	38
§ 6. Дифференциальное уравнение потока тепла	40
§ 7. Вторые производные векторных полей	42
§ 8. Подвохи	45
Глава 3. Интегральное исчисление векторов	47
§ 1. Векторные интегралы; криволинейный интеграл от $\nabla\psi$	47
§ 2. Поток векторного поля	50
§ 3. Поток из куба; теорема Гаусса	53
§ 4. Теплопроводность; уравнение диффузии	55
§ 5. Циркуляция векторного поля	59
§ 6. Циркуляция по квадрату; теорема Стокса	61
§ 7. Поля без роторов и поля без дивергенций	64
§ 8. Итоги	66
Глава 4. Электростатика	68
§ 1. Статика	68

§ 2. Закон Кулона; наложение сил	70
§ 3. Электрический потенциал	73
§ 4. $E = -\nabla\varphi$	77
§ 5. Поток поля E	79
§ 6. Закон Гаусса; дивергенция поля E	83
§ 7. Поле заряженного шара	85
§ 8. Линии поля; эквипотенциальные поверхности	86
Глава 5 Применения закона Гаусса	90
§ 1. Электростатика — это есть закон Гаусса плюс	90
§ 2. Равновесие в электростатическом поле	90
§ 3. Равновесие с проводниками	93
§ 4. Устойчивость атомов	93
§ 5. Поле заряженной прямой линии	95
§ 6. Заряженная плоскость; пара плоскостей	96
§ 7. Однородно заряженный шар; заряженная сфера	98
§ 8. Точен ли закон Кулона?	99
§ 9. Поля проводника	104
§ 10. Поле внутри полости проводника	106
Глава 6. Электрическое поле в разных физических условиях 109	109
§ 1. Уравнения электростатического потенциала	109
§ 2. Электрический диполь	110
§ 3. Замечания о векторных уравнениях	114
§ 4. Дипольный потенциал как градиент	115
§ 5. Дипольное приближение для произвольного распределения	118
§ 6. Поля заряженных проводников	120
§ 7. Метод изображений	121
§ 8. Точечный заряд у проводящей плоскости	123
§ 9. Точечный заряд у проводящей сферы	125
§ 10. Конденсаторы; параллельные пластины	127
§ 11. Пробой при высоком напряжении	130
§ 12. Ионный микроскоп	132
Глава 7. Электрическое поле в разных физических условиях (продолжение)	135
§ 1. Методы определения электростатического поля	135
§ 2. Двумерные поля; функции комплексного переменного 137	137
§ 3. Колебания плазмы	142
§ 4. Коллоидные частицы в электролите	146
§ 5. Электростатическое поле сетки	149
Глава 8. Электростатическая энергия	152
§ 1. Электростатическая энергия зарядов. Однородный шар	152
§ 2. Энергия конденсатора. Силы, действующие на заряженные проводники	154

§ 3. Электростатическая энергия ионного кристалла	159
§ 4. Электростатическая энергия ядра	162
§ 5. Энергия в электростатическом поле	168
§ 6. Энергия точечного заряда	172
Глава 9. Электричество в атмосфере	174
§ 1. Градиент электрического потенциала в атмосфере	174
§ 2. Электрические токи в атмосфере	176
§ 3. Происхождение токов в атмосфере	180
§ 4. Грозы	181
§ 5. Механизм распределения зарядов	188
§ 6. Молния	194
Глава 10. Диэлектрики	199
§ 1. Диэлектрическая проницаемость	199
§ 2. Вектор поляризации \mathbf{P}	202
§ 3. Поляризационные заряды	204
§ 4. Уравнения электростатики для диэлектриков	208
§ 5. Поля и силы в присутствии диэлектриков	210
Глава 11. Внутреннее устройство диэлектриков	215
§ 1. Молекулярные диполи	215
§ 2. Электронная поляризация	216
§ 3. Полярные молекулы; ориентационная поляризация	219
§ 4. Электрические поля в пустотах диэлектрика	223
§ 5. Диэлектрическая проницаемость жидкостей; формула Клаузиуса — Моссотти	226
§ 6. Твердые диэлектрики	228
§ 7. Сегнетоэлектричество; титанат бария	230
Глава 12. Электростатические аналогии	235
§ 1. Одинаковые уравнения — одинаковые решения	236
§ 2. Поток тепла; точечный источник вблизи бесконечной плоской границы	237
§ 3. Натянутая мембрана	243
§ 4. Диффузия нейтронов; сферически-симметричный источник в однородной среде	246
§ 5. Безвихревое течение жидкости; обтекание шара	249
§ 6. Освещение; равномерное освещение плоскости	253
§ 7. «Фундаментальное единство» природы	256
Глава 13. Магнитостатика	258
§ 1. Магнитное поле	258
§ 2. Электрический ток; сохранение заряда	259
§ 3. Магнитная сила, действующая на ток	261
§ 4. Магнитное поле постоянного тока; закон Ампера	263

§ 5	Магнитное поле прямого провода и соленоида; атомные токи	266
§ 6.	Относительность магнитных и электрических полей .	269
§ 7.	Преобразование токов и зарядов	277
§ 8.	Суперпозиция; правило правой руки	278
Глава 14. Магнитное поле в разных случаях		280
§ 1.	Векторный потенциал	280
§ 2.	Векторный потенциал заданных токов	284
§ 3.	Прямой провод	286
§ 4.	Длинный соленоид	287
§ 5.	Поле маленькой петли; магнитный диполь	290
§ 6.	Векторный потенциал цепи	293
§ 7.	Закон Био — Савара	294

Глава 1

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 1. Электрические силы

Рассмотрим силу, которая, подобно тяготению, меняется обратно квадрату расстояния, но только в миллион миллиардов миллиардов раз более сильную. И которая отличается еще в одном. Пусть существуют два сорта «вещества», которые можно назвать положительным и отрицательным. Пусть одинаковые сорта отталкиваются, а разные — притягиваются в отличие от тяготения, при котором происходит только притяжение. Что же тогда случится?

Все положительное оттолкнется со страшной силой и разлетится в разные стороны. Все отрицательное — тоже. Но совсем другое произойдет, если положительное и отрицательное перемешать поровну. Тогда они с огромной силой притянутся друг к другу, и в итоге эти невероятные силы почти нацело сбалансируются, образуя плотные, «мелкозернистые» смеси положительного и отрицательного; между двумя грудками таких смесей практически не будет ощущаться ни притяжения, ни отталкивания.

Такая сила существует: это электрическая сила. И все вещество является смесью положительных протонов и отрицательных электронов, притягивающихся и отталкивающихся с неимоверной силой. Однако баланс между ними столь совершенен, что, когда вы стоите возле кого-нибудь, вы не ощущаете никакого действия этой силы. А если бы баланс нарушился хоть немножко, вы бы это сразу почувствовали. Если бы в вашем теле или в теле вашего соседа (стоящего от вас на расстоянии вытянутой руки) электронов оказалось бы всего на 1% больше, чем протонов, то сила

§ 1. Электрические силы

§ 2. Электрические и магнитные поля

§ 3. Характеристики векторных полей

§ 4. Законы электромагнетизма

§ 5. Что это такое — «поля»?

§ 6. Электромагнетизм в науке и технике

Повторить: гл. 12
(вып. 1) «Характеристики силы»

вашего отталкивания была бы невообразимо большой. Насколько большой? Достаточной, чтобы поднять небоскреб? Больше! Достаточной, чтобы поднять гору Эверест? Больше! Силы отталкивания хватило бы, чтобы поднять «вес», равный весу нашей Земли!

Раз такие огромные силы в этих тонких смесях столь совершенно сбалансированы, то нетрудно понять, что вещество, стремясь удержать свои положительные и отрицательные заряды в тончайшем равновесии, должно обладать большой жесткостью и прочностью. Верхушка небоскреба, скажем, отклоняется при порывах ветра лишь на пару метров, потому что электрические силы удерживают каждый электрон и каждый протон более или менее на своих местах. А с другой стороны, если рассмотреть достаточно малое количество вещества так, чтобы в нем насчитывалось лишь немного атомов, то там необязательно будет равное число положительных и отрицательных зарядов, и могут проявиться большие остаточные электрические силы. Даже если числа тех и других зарядов одинаковы, все равно между соседними областями может действовать значительная электрическая сила. Потому что силы, действующие между отдельными зарядами, изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний между ними и может оказаться, что отрицательные заряды одной части вещества ближе к положительным зарядам (другой части), чем к отрицательным. Силы притяжения тогда превзойдут силы отталкивания, и в итоге возникнет притяжение между двумя частями вещества, в которых нет избыточного заряда. Сила, удерживающая атомы, и химические силы, скрепляющие между собой молекулы,— все это силы электрические, действующие там, где число зарядов неодинаково или где промежутки между ними малы.

Вы знаете, конечно, что в атоме имеются положительные протоны в ядре и электроны вне ядра. Вы можете спросить: «Если эти электрические силы так велики, то почему же протоны и электроны не налезают друг на друга? Если они стремятся образовать тесную компанию, почему бы ей не стать еще теснее?» Ответ связан с квантовыми эффектами. Если попытаться заключить наши электроны в малый объем, окружающий протон, то, согласно принципу неопределенности, у них должен возникнуть среднеквадратичный импульс, тем больший, чем сильнее мы их ограничим. Именно это движение (требуемое законами квантовой механики) мешает электрическому притяжению еще больше сблизить заряды.

Тут возникает другой вопрос: «Что скрепляет ядро?» В ядре имеется несколько протонов, и все они положительно заряжены. Почему же они не разлетаются? Оказывается, что в ядре, помимо электрических сил, еще действуют и неэлек-

трические силы, называемые *ядерными*. Эти силы более мощные, чем электрические, и они способны, несмотря на электрическое отталкивание, удерживать протоны вместе. Действие ядерных сил, однако, простирается недалеко; оно падает гораздо быстрее, чем $1/r^2$. И это приводит к важному результату. Если в ядре имеется слишком много протонов, то ядро становится чересчур большим и оно уже не может удержаться. Примером может служить уран с его 92 протонами. Ядерные силы действуют в основном между протоном (или нейтроном) и его ближайшим соседом, а электрические силы действуют на большие расстояния и вызывают отталкивание каждого протона в ядре от всех остальных. Чем больше в ядре протонов, тем сильнее электрическое отталкивание, пока (как у урана) равновесие не станет столь шатким, что ядру почти ничего не стоит разлететься от действия электрического отталкивания. Стоит его чуть-чуть «толкнуть» (например, пошлав внутрь медленный нейтрон) — и оно разваливается надвое, на две положительно заряженные части, разлетающиеся врозь в результате электрического отталкивания. Энергия, которая при этом высвобождается, — это энергия атомной бомбы. Ее обычно именуют «ядерной» энергией, хотя на самом деле это «электрическая» энергия, высвобождаемая, как только электрические силы превзойдут ядерные силы притяжения.

Наконец, можно спросить, чем скрепляется отрицательно заряженный электрон (ведь в нем нет ядерных сил)? Если электрон весь состоит из вещества одного сорта, то каждая его часть должна отталкивать остальные. Тогда почему же они не разлетаются в разные стороны? А точно ли существуют у электрона «части»? Может быть, следует считать электрон просто точкой и говорить, что электрические силы действуют только между *разными* точечными зарядами, так что электрон не действует сам на себя? Возможно. Единственно, что можно сейчас сказать, — что вопрос о том, чем скреплен электрон, вызвал много трудностей при попытке создать полную теорию электромагнетизма. И ответа на этот вопрос так и не получили. Мы займемся обсуждением его немного позже.

Как мы видели, можно надеяться, что сочетание электрических сил и квантовомеханических эффектов определит структуру больших количеств вещества и, следовательно, их свойства. Одни материалы — твердые, другие — мягкие. Некоторые из них — электрические «проводники», потому что их электроны свободны и могут двигаться; другие — «изоляторы», их электроны привязаны каждый к своему атому. Позже мы выясним, откуда появляются такие свойства, но вопрос этот очень сложен, поэтому рассмотрим сначала электрические силы в самых простых ситуациях. Начнем с изучения

одних только законов электричества, включив сюда и магнетизм, так как и то и другое в действительности суть явления одной и той же природы.

Мы сказали, что электрические силы, как и силы тяготения, уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами. Это соотношение называется законом Кулона. Однако этот закон перестает выполняться точно, если заряды движутся. Электрические силы зависят также сложным образом и от движения зарядов. Одну из частей силы, действующей между движущимися зарядами, мы называем *магнитной* силой. На самом же деле это только одно из проявлений электрического действия. Потому мы и говорим об «электромагнетизме».

Существует важный общий принцип, позволяющий относительно просто изучать электромагнитные силы. Мы обнаруживаем экспериментально, что сила, действующая на отдельный заряд (независимо от того, сколько там еще есть зарядов или как они движутся), зависит только от положения этого отдельного заряда, от его скорости и величины. Силу \mathbf{F} , действующую на заряд q , движущийся со скоростью \mathbf{v} , мы можем написать в виде

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}); \quad (1.1)$$

здесь \mathbf{E} — *электрическое поле* в точке расположения заряда, а \mathbf{B} — *магнитное поле*. Существенно, что электрические силы, действующие со стороны всех прочих зарядов Вселенной, складываются и дают как раз эти два вектора. Значения их зависят от того, *где* находится заряд, и могут меняться со *временем*. Если мы заменим этот заряд другим, то сила, действующая на новый заряд, изменяется точно пропорционально величине заряда, если только все прочие заряды мира не меняют своего движения или положения. (В реальных условиях, конечно, каждый заряд действует на все прочие расположенные по соседству заряды и может заставить их двигаться, так что иногда при замене одного данного заряда другим поля *могут* измениться.)

Из материала, изложенного в первом томе, мы знаем, как определить движение частицы, если сила, действующая на нее, известна. Уравнение (1.1) в сочетании с уравнением движения дает

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{m\mathbf{v}}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \right] = \mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1.2)$$

Значит, если \mathbf{E} и \mathbf{B} известны, то можно определить движение зарядов. Остается только узнать, как получаются \mathbf{E} и \mathbf{B} .

Один из самых важных принципов, упрощающих получение величины полей, состоит в следующем. Пусть некоторое количество движущихся каким-то образом зарядов создает

поле E_1 , а другая совокупность зарядов — поле E_2 . Если действуют оба набора зарядов одновременно (сохраняя те же свои положения и движения, какими они обладали, когда рассматривались порознь), то возникающее поле равно в точности сумме

$$E = E_1 + E_2. \quad (1.3)$$

Этот факт называется *принципом наложения* полей (или *принципом суперпозиции*). Он выполняется и для магнитных полей.

Принцип этот означает, что если нам известен закон для электрического и магнитного полей, образуемых *одиночным* зарядом, движущимся произвольным образом, то, значит, нам известны все законы электродинамики. Если мы хотим знать силу, действующую на заряд A , нам нужно только рассчитать величину полей E и B , созданных каждым из зарядов B , C , D и т. д., и сложить все эти E и B ; тем самым мы найдем поля, а из них — силы, действующие на A . Если бы оказалось, что поле, создаваемое одиночным зарядом, отличается простотой, то это стало бы самым изящным способом описания законов электродинамики. Но мы уже описывали этот закон (см. вып. 3, гл. 28), и, к сожалению, он довольно сложен.

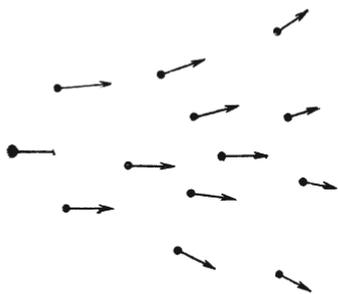
Оказывается, что форма, в которой законы электродинамики становятся простыми, совсем не такая, какой можно было бы ожидать. Она *не* проста, если мы захотим иметь формулу для силы, с которой один заряд действует на другой. Правда, когда заряды покоятся, закон силы — закон Кулона — прост, но когда заряды движутся, соотношения усложняются из-за запаздывания во времени, влияния ускорения и т. п. В итоге лучше не пытаться строить электродинамику с помощью одних лишь законов сил, действующих между зарядами; гораздо более приемлема другая точка зрения, при которой с законами электродинамики легче управляться.

§ 2. Электрические и магнитные поля

Первым делом нужно несколько расширить наши представления об электрическом и магнитном векторах E и B . Мы определили их через силы, действующие на заряд. Теперь мы

НАИБОЛЕЕ ЧАСТО УПОТРЕБЛЯЕМЫЕ ГРЕЧЕСКИЕ БУКВЫ

α	— альфа
β	— бета
$\Gamma\gamma$	— гамма
$\Delta\delta$	— дельта
ϵ	— эпсилон
ζ	— дзета
η	— эта
$\Theta\theta$	— тэта
ι	— йота
κ	— каппа
$\Lambda\lambda$	— ламбда
μ	— мю
ν	— ню
$\Xi\xi$	— кси
\omicron	— омикрон
$\Pi\pi$	— пи
ρ	— ро
$\Sigma\sigma$	— сигма
τ	— тау
$\Upsilon\upsilon$	— ипсилон
$\Phi\phi$	— фи
χ	— хи
$\Psi\psi$	— пси
$\Omega\omega$	— омега



Ф и г. 1.1. Векторное поле, представленное множеством стрелок, длина и направление которых отмечают величину векторного поля в тех точках, откуда выходят стрелки.

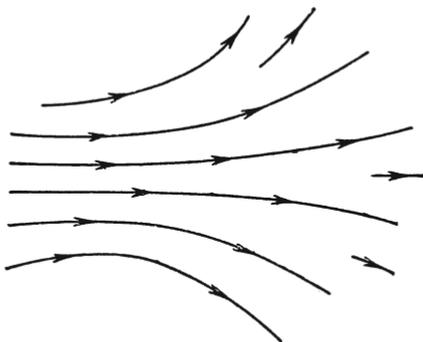
намереемся говорить об электрическом и магнитном полях в точке, даже если там нет никакого заряда. Следовательно, мы утверждаем, что раз на заряд «действуют» силы, то в том месте, где он стоял, остается «нечто» и тогда, когда заряд оттуда убрали. Если заряд, расположенный в точке (x, y, z) , в момент t ощущает действие силы \mathbf{F} , согласно уравнению (1.1), то мы связываем векторы \mathbf{E} и \mathbf{B} с точкой (x, y, z) в пространстве. Можно считать, что $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ и $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ дают силы, действие которых ощутит в момент t заряд, расположенный в (x, y, z) , при условии, что помещение заряда в этой точке не потревожит ни расположения, ни движения всех прочих зарядов, ответственных за поля.

Следуя этому представлению, мы связываем с каждой точкой (x, y, z) пространства два вектора \mathbf{E} и \mathbf{B} , способных меняться со временем. Электрические и магнитные поля тогда рассматриваются как *векторные функции* от x, y, z и t . Поскольку вектор определяется своими компонентами, то каждое из полей $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ и $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ представляет собой три математические функции от x, y, z и t .

Именно потому, что \mathbf{E} (или \mathbf{B}) может быть определено для каждой точки пространства, его и называют «полем». Поле — это любая физическая величина, которая в разных точках пространства принимает различные значения. Скажем, температура — это поле (в этом случае скалярное), которое можно записать в виде $T(x, y, z)$. Кроме того, температура может меняться и во времени, тогда мы скажем, что температурное поле зависит от времени, и напомним $T(x, y, z, t)$. Другим примером поля может служить «поле скоростей» текущей жидкости. Мы записываем скорость жидкости в любой точке пространства в момент t в виде $\mathbf{v}(x, y, z, t)$. Поле это векторное.

Вернемся к электромагнитным полям. Хотя формулы, по которым они создаются зарядами, и сложны, у них есть следующее важное свойство: связь между значениями полей

Фиг. 1.2. Векторное поле, представленное линиями, касательными к направлению векторного поля в каждой точке. Плотность линий указывает величину вектора поля.

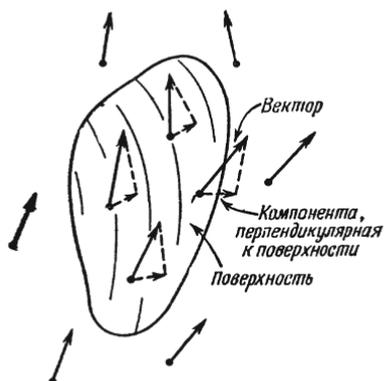


в некоторой точке и значениями их в соседней точке очень проста. Нескольких таких соотношений (в форме дифференциальных уравнений) достаточно, чтобы полностью описать поля. Именно в такой форме законы электродинамики и выглядят особенно просто.

Немало изобретательности было потрачено на то, чтобы помочь людям мысленно представить поведение полей. И самая правильная точка зрения — это самая отвлеченная: надо просто рассматривать поля как математические функции координат и времени. Можно также попытаться получить мысленную картину поля, начертив во многих точках пространства по вектору так, чтобы каждый из них показывал напряженность и направление поля в этой точке. Такое представление приводится на фиг. 1.1. Можно пойти и дальше: начертить линии, которые в любой точке будут касательными к этим векторам. Они как бы следуют за стрелками и сохраняют направление поля. Если это сделать, то сведения о *длине* векторов будут утеряны, но их можно сохранить, если в тех местах, где напряженность поля мала, провести линии пореже, а где велика — погуще. Договоримся, что *число линий на единицу площади*, расположенной поперек линий, будет пропорционально *напряженности поля*. Это, конечно, всего лишь приближение; иногда нам придется добавлять новые линии, чтобы их количество отвечало напряженности поля. Поле, изображенное на фиг. 1.1, представлено линиями поля на фиг. 1.2.

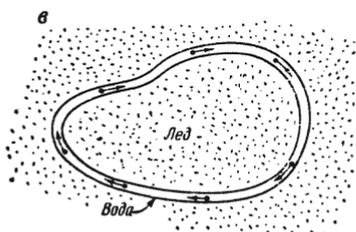
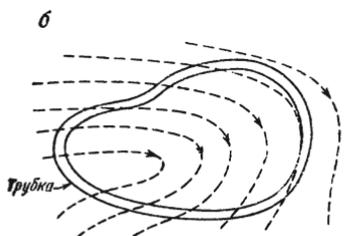
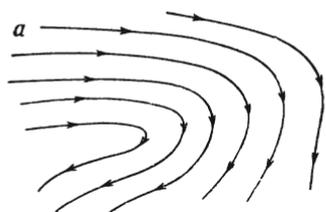
§ 3. Характеристики векторных полей

Векторные поля обладают двумя математически важными свойствами, которыми мы будем пользоваться при описании законов электричества с полевой точки зрения. Представим себе замкнутую поверхность и зададим вопрос, вытекает ли из нее «нечто», т. е. обладает ли поле свойством «истечения»?



Ф и г. 1.3. Поток векторного поля через поверхность, определяемый как произведение среднего значения перпендикулярной составляющей вектора на площадь этой поверхности.

Скажем, для поля скоростей мы можем поинтересоваться, всегда ли скорость направлена от поверхности, или, в более общем случае, вытекает ли из поверхности больше жидкости (в единицу времени), нежели втекает. Общее количество жидкости, вытекающее через поверхность, мы назовем «поток скорости» через поверхность за единицу времени. Поток через элемент поверхности равен составляющей скорости, перпендикулярной к элементу, умноженной на его площадь.



Для произвольной замкнутой поверхности суммарный поток равен среднему значению нормальной компоненты скорости (отсчитываемой наружу), умноженному на площадь поверхности:

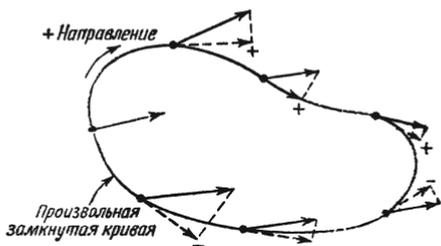
$$\text{Поток} = (\text{Средняя нормальная компонента}) \cdot (\text{Площадь поверхности}). \quad (1.4)$$

В случае электрического поля можно математически разделить понятие, сходное с потоком жидкости; мы тоже

Ф и г. 1.4. Поле скоростей в жидкости (а).

Представьте себе трубку постоянного сечения, уложенную вдоль произвольной замкнутой кривой (б). Если жидкость внезапно заморозить повсюду, кроме трубки, то жидкость в трубке начнет циркулировать (в).

Ф и г. 1.5. Циркуляция векторного поля, равная произведению средней касательной составляющей вектора (с учетом ее знака по отношению к направлению обхода) на длину контура.



называем его потоком, но, конечно, это уже не течение какой-то жидкости, потому что электрическое поле нельзя считать скоростью чего-то. Оказывается все же, что математическая величина, определяемая как средняя нормальная компонента поля, по-прежнему имеет полезное значение. Тогда мы говорим о *потоке электричества*, также определяемом уравнением (1.4). Наконец, полезно говорить и о потоке не только сквозь замкнутую, но и сквозь любую ограниченную поверхность. Как и прежде, поток сквозь такую поверхность определяется как средняя нормальная компонента вектора, умноженная на площадь поверхности. Эти представления иллюстрируются фиг. 1.3.

Другое свойство векторных полей касается не столько поверхностей, сколько линий. Представим опять поле скоростей, описывающее поток жидкости. Можно задать интересный вопрос: циркулирует ли жидкость? Это значит: существует ли вращательное ее движение вдоль некоторого замкнутого контура (петли)? Вообразите себе, что мы мгновенно заморозили жидкость повсюду, за исключением внутренней части замкнутой в виде петли трубки постоянного сечения (фиг. 1.4). Снаружи трубки жидкость остановится, но внутри она может продолжать двигаться, если в ней (в жидкости) сохранился импульс, т. е. если импульс, который гонит ее в одном направлении, больше импульса в обратном. Мы определяем величину, называемую *циркуляцией*, как скорость жидкости в трубке, умноженную на длину трубки. Опять-таки мы можем расширить наши представления и определить «циркуляцию» для любого векторного поля (даже если там нет ничего движущегося). У всякого векторного поля *циркуляция по любому воображаемому замкнутому контуру* определяется как средняя касательная компонента вектора (с учетом направления обхода), умноженная на протяженность контура (фиг. 1.5).

$$\text{Циркуляция} = (\text{Средняя касательная компонента}) \cdot (\text{Длина пути обхода}) \quad (1.5)$$

Вы видите, что это определение действительно дает число, пропорциональное циркуляции скорости в трубке, просверленной в быстрозамороженной жидкости.

Пользуясь только этими двумя понятиями — понятием о потоке и понятием о циркуляции, — мы способны описать все законы электричества и магнетизма. Вам, быть может, трудно будет отчетливо понять значение законов, но они дадут вам некоторое представление о том, каким способом в конечном счете может быть описана физика электромагнитных явлений.

§ 4. Законы электромагнетизма

Первый закон электромагнетизма описывает поток электрического поля:

$$\text{Поток напряженности } \mathbf{E} \text{ сквозь любую замкнутую поверхность} = \frac{\text{Заряд внутри нее}}{\epsilon_0}, \quad (1.6)$$

где ϵ_0 — некоторая постоянная (читается эpsilon-нуль). Если внутри поверхности нет зарядов, а вне ее (даже совсем рядом) есть, то все равно *средняя* нормальная компонента \mathbf{E} равна нулю, так что никакого потока через поверхность нет. Чтобы показать пользу от такого типа утверждений, мы докажем, что уравнение (1.6) совпадает с законом Кулона, если только учесть, что поле отдельного заряда обязано быть сферически симметричным. Проведем вокруг точечного заряда сферу. Тогда средняя нормальная компонента в точности равна значению \mathbf{E} в любой точке, потому что поле должно быть направлено по радиусу и иметь одну и ту же величину во всех точках сферы. Тогда наше правило утверждает, что поле на поверхности сферы, умноженное на площадь сферы (т. е. вытекающий из сферы поток), пропорционально заряду внутри нее. Если увеличивать радиус сферы, то ее площадь растет, как квадрат радиуса. Произведение средней нормальной компоненты электрического поля на эту площадь должно по-прежнему быть равно внутреннему заряду, значит, поле должно убывать, как квадрат расстояния; так получается поле «обратных квадратов».

Если взять в пространстве произвольную кривую и изменить циркуляцию электрического поля вдоль этой кривой, то окажется, что она в общем случае не равна нулю (хотя в кулоновом поле это так). Вместо этого для электричества справедлив второй закон, утверждающий, что

$$\text{Циркуляция вектора } \mathbf{E} \text{ по контуру } C = \frac{d}{dt} \left(\text{поток вектора } \mathbf{B} \text{ сквозь поверхность } S \right). \quad (1.7)$$

И, наконец, формулировка законов электромагнитного поля будет закончена, если написать два соответствующих уравнения для магнитного поля \mathbf{B} :

$$\text{Поток вектора } \mathbf{B} \text{ сквозь любую замкнутую поверхность} = 0. \quad (1.8)$$

А для поверхности S , ограниченной кривой C :

$$c^2 \text{ (циркуляция вектора } \mathbf{B} \text{ по контуру } C_1) = \frac{d}{dt} \left(\text{поток вектора } \mathbf{E} \text{ сквозь } S \right) + \frac{\text{Электрический ток сквозь } S}{\epsilon_0}. \quad (1.9)$$

Появившаяся в уравнении (1.9) постоянная c^2 — это квадрат скорости света. Ее появление оправдано тем, что магнетизм по существу есть релятивистское проявление электричества. А константа ϵ_0 поставлена для того, чтобы возникли привычные единицы силы электрического тока.

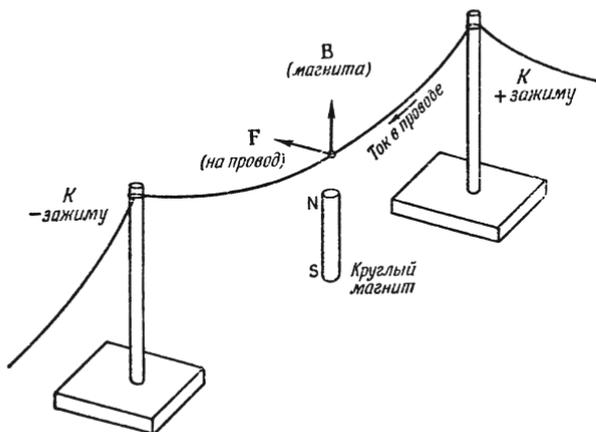
Уравнения (1.6)—(1.9), а также уравнение (1.1)—это все законы электродинамики*. Как вы помните, законы Ньютона написать было очень просто, но из них зато вытекало множество сложных следствий, так что понадобилось немало времени, чтобы изучить их все. Законы электромагнетизма написать несравненно трудней, и мы должны ожидать, что следствия из них будут намного более запутаны, и теперь нам придется очень долго в них разбираться.

Мы можем проиллюстрировать некоторые законы электродинамики серией несложных опытов, которые смогут нам показать хотя бы качественно взаимоотношения электрического и магнитного полей. С первым членом в уравнении (1.1) вы знакомитесь, расчесывая себе волосы, так что о нем мы говорить не будем. Второй член в уравнении (1.1) можно продемонстрировать, пропустив ток по проволоке, висящей над магнитным бруском, как показано на фиг. 1.6. При включении тока проволока сдвигается из-за того, что на нее действует сила $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Когда по проводу идет ток, заряды внутри него движутся, т. е. имеют скорость \mathbf{v} , и на них действует магнитное поле магнита, в результате чего провод отходит в сторону.

Когда провод сдвигается влево, можно ожидать, что сам магнит испытает толчок вправо. (Иначе все это устройство можно было бы водрузить на платформу и получить реактивную систему, в которой импульс не сохранялся бы!) Хотя сила чересчур мала, чтобы можно было заметить движение магнитной палочки, однако движение более чувствительного устройства, скажем стрелки компаса, вполне заметно.

Каким же образом ток в проводе толкает магнит? Ток, текущий по проводу, создает вокруг него свое собственное магнитное поле, которое и действует на магнит. В соответствии с последним членом в уравнении (1.9) ток должен приводить к циркуляции вектора \mathbf{B} ; в нашем случае линии поля \mathbf{B}

* Нужно только договориться о выборе знака циркуляции.

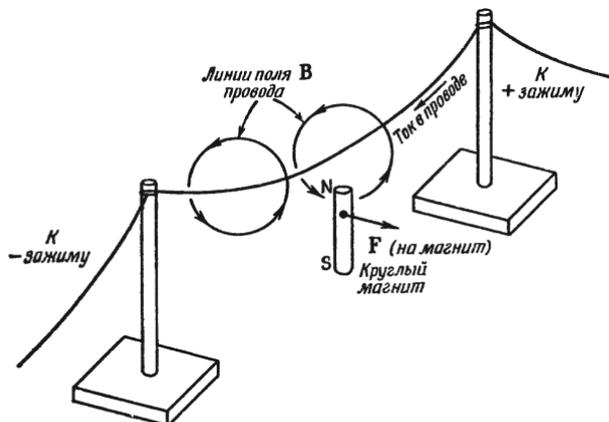


Фиг. 1.6. Магнитная палочка, создающая возле провода поле \mathbf{B} .

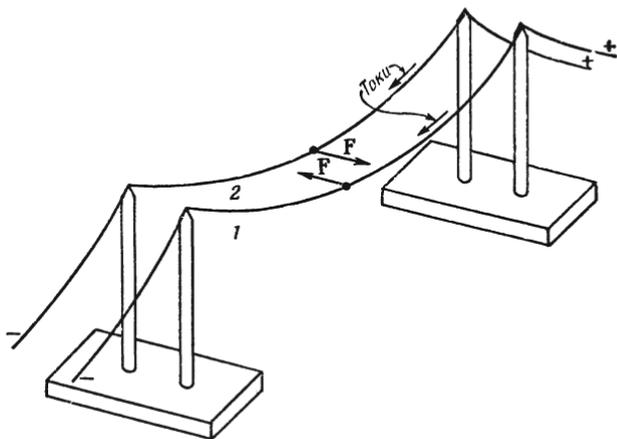
Когда по проводу идет ток, провод смещается из-за действия силы $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

замкнуты вокруг провода, как показано на фиг. 1.7. Именно это поле \mathbf{B} и ответственно за силу, действующую на магнит.

Уравнение (1.9) сообщает нам, что при данной величине тока, текущего по проводу, циркуляция поля \mathbf{B} одинакова для *любой* кривой, окружающей провод. У тех кривых (окружностей, например), которые лежат далеко от провода, длина оказывается больше, так что касательная компонента \mathbf{B} должна убывать. Вы видите, что следует ожидать линейного убывания \mathbf{B} с удалением от длинного прямого провода.



Фиг. 1.7. Магнитное поле тока, текущего по проводу, действует на магнит с некоторой силой.



Ф и г. 1.8. Два провода, по которым течет ток, тоже действуют друг на друга с определенной силой.

Мы сказали, что ток, текущий по проводу, образует вокруг него магнитное поле и что если имеется магнитное поле, то оно действует с некоторой силой на провод, по которому идет ток. Значит, следует думать, что если магнитное поле будет создано током, текущим в одном проводе, то оно будет действовать с некоторой силой и на другой провод, по которому тоже идет ток. Это можно показать, применив два свободно подвешенных провода (фиг. 1.8). Когда направление токов одинаково, провода притягиваются, а когда направления противоположны, — отталкиваются.

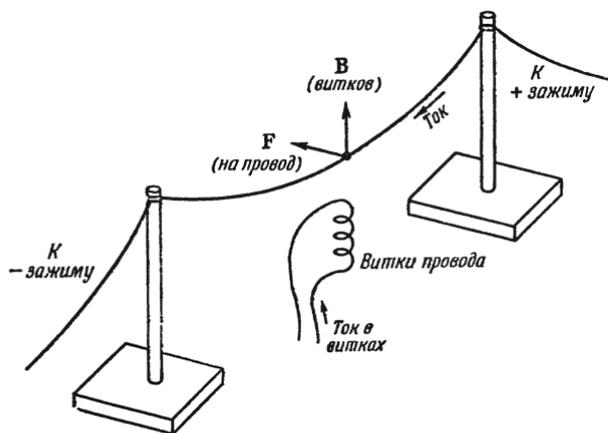
Короче говоря, электрические токи, как и магниты, создают магнитные поля. Но тогда что же такое магнит? Раз магнитные поля создаются движущимися зарядами, то не может ли оказаться, что магнитное поле, созданное куском железа, на самом деле есть результат действия токов? Видимо, так оно и есть. В наших опытах можно заменить магнитную палочку катушкой с навитой проволокой, как показано на фиг. 1.9. Когда ток проходит по катушке (как и по прямому проводу над нею), наблюдается точно такое же движение проводника, как и прежде, когда вместо катушки стоял магнит. Все выглядит так, как если бы внутри куска железа непрерывно циркулировал ток. Действительно, свойства магнитов можно понять как непрерывный ток внутри атомов железа. Сила, действующая на магнит на фиг. 1.7, объясняется вторым членом в уравнении (1.1).

Откуда же берутся эти токи? Один источник — это движение электронов по атомным орбитам. У железа это не так, но у некоторых материалов происхождение магнетизма именно

таково. Кроме вращения вокруг ядра атома, электрон вращается еще вокруг своей собственной оси (что-то похожее на вращение Земли); вот от этого-то вращения и возникает ток, создающий магнитное поле железа. (Мы сказали «что-то похожее на вращение Земли», потому что на самом деле в квантовой механике вопрос столь глубок, что не укладывается достаточно хорошо в классические представления.) В большинстве веществ часть электронов вертится в одну сторону, другая — в другую, так что магнетизм исчезает, а в железе (по таинственной причине, о которой мы поговорим позже) многие электроны вращаются так, что их оси смотрят в одну сторону и это служит источником магнетизма.

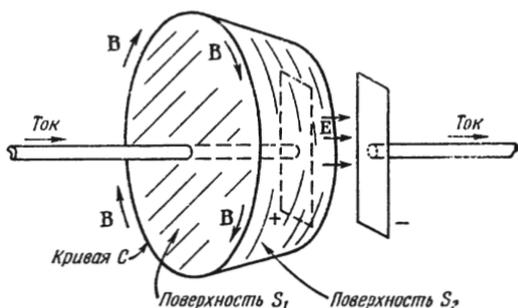
Поскольку поля магнитов порождаются токами, то в уравнения (1.8) и (1.9) нет нужды вставлять добавочные члены, учитывающие существование магнитов. В этих уравнениях речь идет о *всех* токах, включая круговые токи от вращающихся электронов, и закон оказывается правильным. Надо еще отметить, что, согласно уравнению (1.8), магнитных зарядов, подобных электрическим зарядам, стоящим в правой части уравнения (1.6), не существует. Они никогда не были обнаружены.

Первый член в правой части уравнения (1.9) был открыт Максвеллом теоретически; он очень важен. Он говорит, что изменение *электрических* полей вызывает магнитные явления. На самом деле без этого члена уравнение утеряло бы смысл, ведь без него исчезли бы токи в незамкнутых контурах. А на деле такие токи существуют; об этом говорит следующий пример. Представьте конденсатор, составленный из двух



Ф и г. 1.9. Магнитная палочка, показанная на фиг 1.6, может быть заменена катушкой, по которой течет ток. На провод по-прежнему будет действовать сила.

Фиг. 1.10. Циркуляция поля \mathbf{V} по кривой C определяется либо током, текущим сквозь поверхность S_1 , либо быстротой изменения потока поля \mathbf{E} сквозь поверхность S_2



плоских пластин. Он заряжается током, притекающим к одной из пластин и оттекающим от другой, как показано на фиг. 1.10. Проведем вокруг одного из проводов кривую C и натянем на нее поверхность (поверхность S_1), которая пересечет провод. В соответствии с уравнением (1.9) циркуляция поля \mathbf{V} по кривой C дается величиной тока в проводе (умноженной на c^2). Но что будет, если мы натянем на кривую *другую* поверхность S_2 в форме чашки, доньшко которой расположено между пластинами конденсатора и не касается провода? Через такую поверхность никакой ток, конечно, не проходит. Но ведь простое изменение положения и формы воображаемой поверхности не должно изменять реального магнитного поля! Циркуляция поля \mathbf{V} должна остаться прежней. И действительно, первый член в правой части уравнения (1.9) так комбинируется со вторым членом, что для обеих поверхностей S_1 и S_2 возникает одинаковый эффект. Для S_2 циркуляция вектора \mathbf{V} выражается через степень изменения потока вектора \mathbf{E} от одной пластины к другой. И получается, что изменение \mathbf{E} связано с током как раз так, что уравнение (1.9) оказывается выполненным. Максвелл видел необходимость этого и был первым, кто написал полное уравнение.

С помощью устройства, изображенного на фиг. 1.6, можно продемонстрировать другой закон электромагнетизма. Отсоединим концы висящей проволоочки от батарейки и присоединим их к гальванометру — прибору, регистрирующему прохождение тока по проводу. Стоит лишь в поле магнита *качнуть* проволоку, как по ней сразу пойдет ток. Это новое следствие уравнения (1.1): электроны в проводе почувствуют действие силы $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Скорость их сейчас направлена в сторону, потому что они отклоняются вместе с проволочкой. Это \mathbf{v} вместе с вертикально направленным полем \mathbf{B} магнита приводит к силе, действующей на электроны *вдоль* провода, и электроны отправляются к гальванометру.

Положим, однако, что мы оставили проволочку в покое и принялись перемещать магнит. Мы чувствуем, что никакой

разницы быть не должно, ведь относительное движение тоже самое, и впрямь ток по гальванометру идет. Но как же магнитное поле действует на покоящиеся заряды? В соответствии с уравнением (1.1) должно возникнуть электрическое поле. Движущийся магнит должен создавать электрическое поле. На вопрос — как это происходит, отвечает количественно уравнение (1.7). Это уравнение описывает множество практически очень важных явлений, происходящих в электрических генераторах и трансформаторах.

Наиболее замечательное следствие наших уравнений — это то, что, сочетая уравнения (1.7) и (1.9), можно понять, отчего электромагнитные явления распространяются на дальние расстояния. Причина этого, грубо говоря, примерно такова: предположим, что где-то имеется магнитное поле, которое возрастает по величине, скажем, оттого, что внезапно пустили ток по проводу. Тогда из уравнения (1.7) следует, что должна возникнуть циркуляция электрического поля. Когда электрическое поле начинает постепенно возрастать для возникновения циркуляции, тогда, согласно уравнению (1.9), должна возникать и магнитная циркуляция. Но возрастание *этого* магнитного поля создаст новую циркуляцию электрического поля и т. д. Таким способом поля распространяются сквозь пространство, не нуждаясь ни в зарядах, ни в токах нигде, кроме источника полей. Именно таким способом мы *видим* друг друга! Все это спрятано в уравнениях электромагнитного поля.

§ 5. Что это такое — «поля»?

Сделаем теперь несколько замечаний о принятом нами способе рассмотрения этого вопроса. Вы можете сказать: «Все эти потоки и циркуляции чересчур абстрактны. Пусть в каждой точке пространства есть электрическое поле, кроме того, имеются эти самые «законы». Но что же там *на самом деле* происходит? Почему вы не можете объяснять все это, скажем, тем, что что-то, что бы это ни было, протекает между зарядами?» Все зависит от ваших предрассудков. Многие физики часто говорят, что прямое действие сквозь пустоту, сквозь ничто, немислимо. (Как они могут называть идею немислимой, если она уже вымыслена?) Они говорят: «Посмотрите, ведь единственные силы, которые нам известны, — это прямое действие одной части вещества на другую. Невозможно, чтобы существовала сила без чего-то, передающего ее». Но что в действительности происходит, когда мы изучаем «прямое действие» одного куска вещества на другой? Мы обнаруживаем, что первый из них вовсе не «упирается» во второй; они слегка отстоят друг от друга, и между ними существуют электрические силы, действующие в малом

масштабе. Иначе говоря, мы обнаруживаем, что собрались объяснить так называемое «действие посредством прямого контакта» — при помощи картины электрических сил. Конечно, неразумно пытаться стоять на том, что электрическая сила должна выглядеть так же, как старый привычный мышечный тяни-толкай, если все равно оказывается, что все наши попытки тянуть или толкать приводят к электрическим силам! Единственно разумная постановка вопроса — спросить, какой путь рассмотрения электрических эффектов *наиболее удобен*. Одни предпочитают представлять их как взаимодействие зарядов на расстоянии и пользоваться сложным законом. Другим по душе силовые линии. Они их все время чертят, и им кажется, что писать разные E и V слишком абстрактно. Но линии поля — это всего лишь грубый способ описания поля, и очень трудно сформулировать строгие, количественные законы непосредственно в терминах линий поля. К тому же понятие о линиях поля не содержит глубочайшего из принципов электродинамики — принципа суперпозиции. Даже если мы знаем, как выглядят силовые линии одной совокупности зарядов, затем другой совокупности, мы все равно не получим никакого представления о картине силовых линий, когда обе совокупности зарядов действуют вместе. А с математических позиций наложение проделать легко, надо просто сложить два вектора. У силовых линий есть свои достоинства, они дают наглядную картину, но есть у них и свои недостатки. Способ рассуждений, основанный на понятии о непосредственном взаимодействии (близодействии), тоже обладает большими преимуществами, пока речь идет о покоящихся электрических зарядах, но обладает и большими недостатками, если иметь дело с быстрым движением зарядов.

Лучше всего пользоваться абстрактным представлением о поле. Жаль, конечно, что оно абстрактно, но ничего не поделаешь. Попытки представить электрическое поле как движение каких-то зубчатых колесиков или с помощью силовых линий или как напряжения в каких-то материалах потребовали от физиков больше усилий, чем понадобилось бы для того, чтобы просто получить правильные ответы на задачи электродинамики. Интересно, что правильные уравнения поведения света в кристаллах были выведены Мак-Куллохом еще в 1843 г. Но все ему говорили: «Позвольте, ведь нет же ни одного реального материала, механические свойства которого могли бы удовлетворить этим уравнениям, а поскольку свет — это колебания, которые должны происходить в *чем-то*, постольку мы не можем поверить этим абстрактным уравнениям». Если бы у его современников не было этой предвзятости, они бы поверили в правильные уравнения поведения света в кристаллах намного раньше того, чем это на самом деле случилось.

А что касается магнитных полей, то можно высказать следующее замечание. Предположим, что вам в конце концов удалось нарисовать картину магнитного поля при помощи каких-то линий или каких-то шестеренок, катящихся сквозь пространство. Тогда вы попытаетесь объяснить, что происходит с двумя зарядами, движущимися в пространстве параллельно друг другу и с одинаковыми скоростями. Раз они движутся, то они ведут себя как два тока и обладают связанным с ними магнитным полем (как токи в проводах на фиг. 1.8). Но наблюдатель, который мчится вровень с этими двумя зарядами, будет считать их неподвижными и скажет, что *никакого* магнитного поля там нет. И «шестеренки», и «линии» пропадают, когда вы мчитесь рядом с предметом! Все, чего вы добились, — это изобрели *новую* проблему. Куда могли деваться эти шестерни?! Если вы чертили силовые линии — у вас появится та же забота. Не только нельзя определить, движутся ли эти линии вместе с зарядами или не движутся, но и вообще они могут полностью исчезнуть в какой-то системе координат.

Мы бы еще хотели подчеркнуть, что явление магнетизма — это на самом деле чисто релятивистский эффект. В только что рассмотренном случае двух зарядов, движущихся параллельно друг другу, можно было бы ожидать, что понадобится сделать релятивистские поправки к их движению порядка v^2/c^2 . Эти поправки должны отвечать магнитной силе. Но как быть с силой взаимодействия двух проводников в нашем опыте (фиг. 1.8)? Ведь там магнитная сила — это *вся* действующая сила. Она не очень-то смахивает на «релятивистскую поправку». Кроме того, если оценить скорости электронов в проводе (вы сами можете это проделать), то вы получите, что их средняя скорость вдоль провода составляет около $0,01$ см/сек. Итак, v^2/c^2 равно примерно 10^{-25} . Вполне пренебрежимая «поправка». Но нет! Хоть в этом случае магнитная сила и составляет 10^{-25} от «нормальной» электрической силы, действующей между движущимися электронами, вспомните, что «нормальные» электрические силы исчезли в результате почти идеального баланса из-за того, что количества протонов и электронов в проводах одинаковы. Этот баланс намного более точен, чем $1/10^{25}$, и тот малый релятивистский член, который мы называем магнитной силой, — это единственный остающийся член. Он становится преобладающим.

Почти полное взаимное уничтожение электрических эффектов и позволило физикам изучить релятивистские эффекты (т. е. магнетизм) и открыть правильные уравнения (с точностью до v^2/c^2), даже не зная, что в них происходит. И по этой-то причине после открытия принципа относительности законы электромагнетизма не пришлось менять. В отличие от механики они уже были правильны с точностью до v^2/c^2 .

§ 6. Электромагнетизм в науке и технике

В заключение мне хочется закончить эту главу следующим рассказом. Среди многих явлений, изучавшихся древними греками, были два очень странных. Первое: натертый кусочек янтаря мог поднять маленькие клочки папируса, и второе: близ города Магнезия были удивительные камни, которые притягивали железо. Странно думать, что это были единственные известные грекам явления, в которых проявлялись электричество и магнетизм. А почему только это и было им известно, объясняется прежде всего сказочной точностью, с которой сбалансированы в телах заряды (о чем мы уже упоминали). Ученые, жившие в позднейшие времена, раскрыли одно за другим новые явления, в которых выражались некоторые стороны тех же эффектов, связанных с янтарем и с магнитным камнем. Сейчас нам ясно, что и явления химического взаимодействия и в конечном счете саму жизнь нужно объяснять с помощью понятий электромагнетизма.

И по мере того как развивалось понимание предмета электромагнетизма, появлялись такие технические возможности, о которых древние не могли даже мечтать: стало возможным посылать сигналы по телеграфу на большие расстояния, беседовать с человеком, который находится за много километров от вас, без помощи какой-либо линии связи, включать огромные энергетические системы — большие водяные турбины, соединенные многотысячметровыми линиями проводов с другой машиной, которую пускает в ход один рабочий простым поворотом колеса; многие тысячи разветвляющихся проводов и десятки тысяч машин в тысячах мест приводят в движение различные механизмы на фабриках и в квартирах. Все это вращается, двигается, работает благодаря нашему знанию законов электромагнетизма.

Сегодня мы используем и еще более тонкие эффекты. Гигантские электрические силы можно сделать очень точными, их можно контролировать и использовать на всякий лад. Наши приборы так чувствительны, что мы способны узнать, что сейчас делает человек только по тому, как он воздействует на электроны, заключенные в тонком металлическом прутике за сотни километров от него. Для этого только нужно приспособить этот прутик в качестве телевизионной антенны!

В истории человечества (если посмотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием.