

касается важного вопроса, подлежащего рассмотрению, то он заключается только в том, имеют ли линии магнитной силы физическое существование или нет». Ответ Фарадея — положительный. Во введении к своему «Трактату об электричестве и магнетизме» Максвелл писал: «Фарадей своим мысленным взором видел линии сил, проходящие через все пространство там, где математики видели центры сил, притягивающиеся на расстоянии. Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния. Фарадей искал источник явлений в реальных процессах, происходящих в среде. Они же были удовлетворены тем, что нашли его в действующей на расстоянии силе, приложенной к электрическим флюидам».

Но интуитивно ясные соображения Фарадея не могли убедить его современников. Одно дело — его экспериментальные результаты, другое — теоретическая интерпретация. «Я заявляю, что с трудом могу себе представить, чтобы кто-нибудь, кто практически и количественно знает совпадение наблюдений и вычислений, основанных на законе действия на расстоянии, мог хотя бы мгновенно колебаться в выборе между этим простым и точным действием, с одной стороны, и чем-то столь неясным и неопределенным, как линия сил, с другой стороны», — утверждал известный ученый Эри в своем письме, датированном 1855 г. Это мнение разделяло большинство физиков, стремившихся объяснить электромагнитные явления на основе законов действия на расстоянии. Требовалось перевести качественные соображения Фарадея на математический язык, на язык уравнений, что и было сделано великим шотландцем Джеймсом Кларком Максвеллом.

### Электромагнитное поле

Итак, в середине XIX в. выявились два противоположных подхода к описанию электромагнитных явлений. Встал вопрос о том, действуют ли магниты или заряженные тела непосредственно на расстоянии, или существует некоторая среда, передающая магнитное воздействие одного магнита (или провода с током) другому, от одного электрически заряженного тела другому.

«Когда мы наблюдаем, что одно тело действует на другое на расстоянии, то прежде чем принять, что это действие прямое и непосредственное, мы обыкновенно исследуем, нет ли между телами какой-нибудь материальной связи; и если находим, что тела соединены нитями, стержнями или каким-либо механизмом, способным дать нам отчет о наблюдаемых действиях одного тела на другое, мы предпочитаем скорее объяснить действия при помощи этих промежуточных звеньев, нежели допустить понятие о прямом действии на расстоянии.

Так, когда мы, дергая за веревку, заставляем звонить колокольчик, то последовательные части веревки сначала натягиваются, а затем приходят в движение, пока, наконец, звонок не зазвонит на расстоянии посредством процесса, в котором принимали участие все промежуточные частицы веревки одна за другой. Мы можем заставить колокольчик звонить на расстоянии и иначе: нагнетая воздух в длинную трубку, на другом конце которой находится цилиндр с поршнем, движение которого передается звонку. Мы можем также пользоваться проволокой, вместо того, чтобы дергать ее, можем соединить ее на одном конце с электрической батареей, а на другом — с электромагнитом, и таким образом заставим колокольчик звонить посредством электричества.

Здесь мы указали три различных способа приводить звонок в движение. Но во всех этих способах есть то общее, что между звонящим лицом и звонком находится непрерывная соединительная линия и что в каждой точке этой линии совершается некоторый физический процесс, посредством которого действие передается с одного конца линии на другой. Процесс передачи не мгновенный, а постепенный; так что после того, как на одном конце соединительной линии дан импульс, проходит некоторый промежуток времени, в течение которого этот импульс совершает свой путь, пока не достигнет другого конца», — писал Максвелл в своей статье «О действиях на расстоянии». И далее отмечал: «Кому свойства воздуха не знакомы, тому передача силы посредством этой невидимой среды будет казаться столь же непонятной, как и всякий другой пример действия на расстоянии, и, однако, в этом случае мы можем объяснить весь процесс и опреде-

лительность скорости, с которой действие передается от одного участка среды до другого.

Почему же мы не можем допустить, что знакомый нам способ сообщения движения посредством толчка и тяги нашими руками является видом и наглядным примером всякого действия между телами, даже в тех случаях, когда мы не можем заметить между телами ничего такого, что видимо принимало бы участие в этом действии».

Сторонники действия на расстоянии связывали с именем Ньютона традицию описания физических процессов непосредственным действием тел на расстоянии. Полемизируя с ними, Фарадей цитировал письмо Ньютона к Бентли\*), из которого следовало, насколько чуждым было самому Ньютону представление о непосредственном действии на расстоянии одного тела на другое:

«Непонятно, каким образом неодушевленная косная материя, без посредства чего-либо иного, что нематериально, могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения, как это должно было бы иметь место, если бы тяготение, в смысле Эпикура, было присуще материи и с нею нераздельно... Что тяготение должно быть врожденным, присущим и необходимым свойством материи, так что одно тело может взаимодействовать с другим на расстоянии через пустоту, без участия чего-то постороннего, при посредстве чего и через что их действие и сила могли бы передвигаться от одного к другому, — это мне кажется столь большим абсурдом, что я не представляю себе, чтобы кто-либо, владеющий способностью компетентно мыслить в области вопросов философского характера, мог к этому прийти».

Ньютон упорно искал среду, передающую гравитационное воздействие, и только потому, что не смог дать удовлетворительного доказательства ее существования и способов ее действия, не публиковал сообщений об этих поисках.

---

\*) Бентли — любопытная фигура. Духовное лицо, он активно занимался пропагандой научных знаний. Свои проповеди превращал в научно-популярные лекции. Не случайно вопрос о гравитационной неустойчивости равномерно распределенного вещества впервые обсуждался Ньютоном в письме к Бентли в связи с вопросом о вечности Вселенной или о сотворении Вселенной.

Максвелл, уверенный в существовании такой среды, передающей электромагнитное воздействие, разрабатывает математическое описание электромагнитных явлений на основе предсказания о близкодействии, на основе формализма *теории поля*, как мы ее называем сегодня, или динамической теории электромагнитного поля, как он ее назвал. Придавая идеям Фарадея форму математических уравнений, Максвелл создает физическую теорию, основанную на фундаментальном единстве электричества и магнетизма.

Работы Фарадея и Максвелла утверждали физическую реальность электромагнитного поля. Пространство, окружающее заряды, как бы оживало. Оно оказывалось в особом состоянии, обладало особыми свойствами. Открытие электромагнитной индукции позволило к этим свойствам подойти. Электрические и магнитные явления оказывались действительно взаимосвязаны. Но связь эта раскрывалась только в нестационарных процессах, через изменение со временем электрических и магнитных характеристик.

Покоящийся заряд окружает только электрическое поле. Движущийся заряд окружают и электрическое поле этого заряда и магнитное поле его тока. Движущийся заряд обладает и магнитным полем. Обычно в повседневной жизни — в металлических проводах электроосвещения или телефона — мы имеем дело со случаем равного количества положительных и отрицательных зарядов. Их электрические поля компенсируются, но их движения приводят к появлению магнитного поля. Такое поле действует, в свою очередь, только на движущиеся заряды — на токи. Таким образом, поле постоянного тока осуществляет только магнитное действие токов. Иное дело — случай переменного тока. В этом случае магнитное поле тоже оказывается переменным. И закон электромагнитной индукции определяет электрическое действие такого поля. Переменное магнитное поле — следствие переменного тока — оказывается источником электрического поля, движущего заряды в проводе и вызывающего в этом проводе электрический ток.

Мы пришли к понятию электрического поля, обсуждая свойства пространства, окружающего неподвижный заряд. Но теперь оказывается, что сами изменения свойств пространства, окружающего заряды движущиеся (электрический ток), — изменения маг-

нитного поля, в свою очередь, меняют свойства этого пространства — создают электрическое поле\*). Оказывается, электрическое поле может существовать и вне прямой связи с зарядами — его источником может быть и переменное магнитное поле. Такое электрическое поле также вызывает силу, действующую на заряды. Значит, это поле можно характеризовать силой, действующей на малый пробный заряд и отнесенной к величине этого заряда — электрической напряженностью. И сила эта будет совершать работу над пробным электрическим зарядом, помещенным в такое

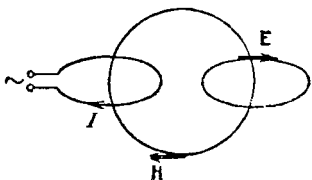


Рис. 2. Вихревое электрическое поле. Виток переменного тока создает переменное магнитное поле  $H$ , которое, в свою очередь, создает вихревое электрическое поле  $E$

электрическое поле. Заряженная частица будет ускоряться в таком поле так же, как она ускорится в поле неподвижного заряда. Но в отличие от случая неподвижного заряда, в электрическом поле переменного магнитного поля работа электрической силы зависит от пути, по которому пробный заряд перемещается. В этом поле с замкнутыми силовыми линиями (рис. 2)

работа по замкнутому контуру не равна нулю. Поэтому с каждой точкой пространства нельзя связать величину ее электрического потенциала — работы по перемещению пробного заряда в эту точку. Такая величина не имеет смысла — ведь в рассматриваемом случае работа зависит от пути перемещения заряда. Электрическое поле, возникающее при электромагнитной индукции, нельзя характеризовать электрическим потенциалом. Это поле — *непотенциальное*. Циркуляция напряженности этого поля (см. Математическое дополнение, с. 211) — ненулевая. Поле электромагнитной индукции является циркулирующим — *вихревым*.

Итак, оказывается, существуют непотенциальные электрические поля. И это имеет важнейшие след-

\*) Здесь речь идет об изменениях поля — особого состояния пространства, а не об изменениях самого пространства, как это имеет место в общей теории относительности. О связи изменений поля и самого пространства речь впереди.

ствия. Именно эти поля обеспечивают работу трансформаторов и электродвигателей.

Замечательно, что изменение магнитного поля создает вихревое электрическое поле и вне проводов. А электрическое поле ускоряет заряженные частицы. Если магнитное поле меняется таким образом, что среднее поле внутри орбиты радиуса  $R$  меняется всегда ровно вдвое быстрее, чем поле на самой орбите, то нетрудно показать, что заряженная частица будет ускоряться под действием вихревого поля, оставаясь все время на той же орбите. Этот принцип ускорения заряженных частиц был использован в одном из первых ускорителей элементарных частиц — бетатроне (рис. 3).

Самостоятельная жизнь взаимосвязанных электрических и магнитных полей играет важнейшую роль и в технике, и в науке. А теперь отметим фундаментальное значение того, что источником электрического поля является переменное, а не постоянное магнитное поле.

Действительно, если бы постоянное магнитное поле было источником электрического поля, то был бы возможен «вечный двигатель». В самом деле провод с постоянным током является источником постоянного магнитного поля. Если бы постоянное магнитное поле было источником электрического поля, то в проводах, помещенных в такое поле, создавался бы ток, который в свою очередь создавал бы магнитное поле, а оно в свою очередь создавало бы ток в новых проводах и т. д. В результате одиночный провод с током становился бы бесконечным резервуаром энергии. Внешний источник тока в первом проводе можно было бы при этом отключить и получилось бы «perpetuum mobile». Поэтому то, что электрическим действием обладает переменное, а не постоянное магнитное поле, с необходимостью следует из невозможности «вечного движения».

Заметим в заключение еще один любопытный вывод. Если магнитное поле нарастает равномерно, т. е.  $H = at + b$ , где  $a$  и  $b$  — постоянные, то, казалось бы, может существовать стационарное вихревое поле. Но в действительности такое вихревое поле не может

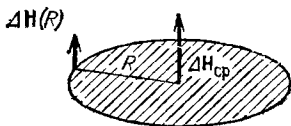


Рис. 3. Бетатрон. Для правильной работы бетатрона нужно, чтобы среднее магнитное поле внутри орбиты росло в два раза быстрее магнитного поля на самой орбите

быть всегда стационарным. Его существование требовало бы постоянного нарастания магнитного поля, поэтому строгая стационарность вихревого электрического поля могла бы обеспечиваться только магнитным полем, нарастающим до бесконечности ( $H \rightarrow \infty$ ), что невозможно.

### Теория Максвелла. Ток смещения

В своих уравнениях Максвелл соединил все известные к тому времени свойства электрических и магнитных явлений. Но записал он законы электрического и магнитного воздействия не через силы, действующие на расстоянии между зарядами и токами, а в терминах теории поля. Электрические и магнитные воздействия записывались как локальная связь (связь в малой окрестности произвольной точки пространства) между зарядами и токами и электрической и магнитной напряженностями, пространственные и временные изменения которых и вызывали воздействие на другие заряды и токи.

На языке теории поля все известные электромагнитные явления можно было описать на основе четырех дифференциальных уравнений, математическая формулировка и обсуждение которых приведены в Математическом дополнении, с 224. Отметим здесь только некоторые важные для дальнейшего изложения качественные черты теории Максвелла. Прежде всего, эта теория единообразно описывает и стационарные, и нестационарные электромагнитные явления, причем в случае нестационарных процессов уравнения Максвелла связывают пространственные и временные изменения электрического и магнитного полей. Соображения размерности требуют, чтобы в этом случае в уравнения входил коэффициент с размерностью скорости (см/с). Роль этого коэффициента, равного скорости света, мы обсудим ниже. А сейчас обратим внимание на другую важную модификацию теории нестационарных электромагнитных процессов, сделанную Максвеллом. Этой модификации требовала физическая картина, стоявшая перед его мысленным взором.

Исходя из симметрии между электричеством и магнетизмом, Максвелл предполагал, что должно существовать новое нестационарное явление, подобное явлению электромагнитной индукции. Если изменение со временем магнитной напряженности вызывает цир-