

## § 1. Действие на расстоянии и полевое взаимодействие

1. Опыт показывает, что между электрически заряженными и намагниченными телами, а также телами, по которым текут электрические токи, действуют силы, называемые *электродинамическими* или *электромагнитными*. Отвлекаясь от деталей, можно сказать, что относительно природы этих сил в науке выдвигались две противоположные точки зрения. Более старая из них исходила из представления о *непосредственном действии тел на расстоянии*, без участия каких бы то ни было промежуточных материальных посредников. Более новая точка зрения, принятая в настоящее время, исходит из представления, что взаимодействия передаются с помощью особого материального посредника, называемого *электромагнитным полем*.

2. Теория действия на расстоянии в учении об электрических и магнитных явлениях господствовала примерно до последней четверти 19 века. Основная идея этой теории была заимствована из учения о всемирном тяготении. Громадные успехи небесной механики, основанной на законе всемирного тяготения Ньютона (1643—1727), — с одной стороны — и полная неудача как-то объяснить тяготение — с другой — привели многих ученых к представлению, что тяготение, а также электрические и магнитные силы не нуждаются в объяснении, а являются неотъемлемыми, врожденными свойствами материи. По мнению этих ученых, задача теории электричества состояла в том, чтобы установить *элементарные законы* электрических и магнитных сил и на их основе объяснить все электрические и магнитные явления. Под элементарными законами понимали законы, определяющие силы взаимодействия на расстоянии между точечными *электрическими зарядами*, точечными *магнитными полюсами* и *элементами тока*, т. е. между бесконечно короткими участками бесконечно тонких проводов, по которым текут электрические токи. По своему содержанию и форме эти законы напоминали, а часто прямо копировали ньютонов закон всемирного тяготения. Таковы были, например, *законы Кулона* (1736—1806) о взаимодействии электрических зарядов или магнитных полюсов.

В математическом отношении теория действия на расстоянии достигла высокой степени совершенства благодаря трудам Лапласа

(1749—1827), Ампера (1775—1836), Пуассона (1781—1840), Гаусса (1777—1855), М. В. Остроградского (1801—1862), Грина (1793—1841), Франца Неймана (1798—1895), Карла Неймана (1832—1925), Вильгельма Вебера (1804—1891), Кирхгофа (1824—1887) и многих других математиков и физиков. Теория отличалась формальной простотой и ясностью исходных математических положений, математической строгостью, стройностью и конкретностью. Она совершенно не вводила сомнительных гипотетических представлений относительно физической природы электрических и магнитных сил, а основывалась только на эмпирически прочно установленных фактах и их обобщениях. Количественные выводы теории были прочно обоснованными и достоверными (разумеется, в пределах той области, в которой элементарные законы подтверждены опытом). Не удивительно, что теории действия на расстоянии придерживалось большинство физиков вплоть до последней четверти 19 века. Однако количественное согласие теории с опытом в исследованной области явлений не может считаться достаточным доказательством правильности концепции непосредственного действия на расстоянии.

3. Среди физиков 19 века, для которых концепция непосредственного действия на расстоянии была неприемлема, возвышается почти одиноко фигура гениального Фарадея (1791—1867) — основоположника физической теории электромагнитного поля. Над ним не довлели формальные идеи математиков. Его самобытный ум был свободен от укоренившихся представлений и не мог примириться с мыслью, что тело может производить непосредственное действие в тех местах, в которых оно не находится и которые отделены от него абсолютно пустым пространством. Согласно Фарадею, действие одного тела на другое может осуществляться либо непосредственным соприкосновением, либо передаваться через промежуточную среду.

В случае электромагнитных взаимодействий роль такой среды играл гипотетический мировой эфир, заполняющий все пространство между телами и мельчайшими частицами, из которых они состоят. При электризации и намагничивании тел в окружающем эфире возникают, согласно Фарадею, какие-то изменения, напоминающие упругие деформации и связанные с ними натяжения и давления. Такими натяжениями и давлениями Фарадей и объяснял электромагнитные взаимодействия тел. Центр тяжести с изучения зарядов и токов, являвшихся в теории действия на расстоянии центрами сил, переносился на изучение окружающего пространства. Это пространство с действующими в нем силами называется *электромагнитным полем*.

Яркую характеристику воззрений Фарадея дал Генрих Герц (1857—1894). В докладе, прочитанном в Гейдельберге в 1889 г., он говорил:

«Фарадею говорили, что при электризации тела в него что-то вносят, но он видел, что возникающие изменения обнаруживаются лишь вне тела, а отнюдь не внутри. Фарадея учили, что силы просто перескакивают через пространство, но он видел, какое большое влияние оказывает на эти силы то вещество, которым заполнено это якобы перескакиваемое пространство. Фарадей читал, что электричество существует наверное, но что о его силах спорят. Он видел, однако, насколько осозательно выступают в своих действиях эти силы, в то время как самого электричества он никак не мог обнаружить. И тогда все обернулось в его представлении. Электрические и магнитные силы стали для него существующими, действительными, осязаемыми, а электричество, магнетизм сделались вещами, о существовании которых можно спорить. Силовые линии, как он называл силы, мыслимые самостоятельно, стояли перед его умственным взором в пространстве как состояния последнего, как напряжения, как вихри, как течения, как многое другое, что и сам он не мог определить, но они стояли там, действуя друг на друга, сдвигая и толкая тела туда и сюда, распространяясь и сообщая друг через друга возбуждение от точки к точке».

4. Применяя изложенные воззрения к конкретным случаям, Фарадей довольствовался преимущественно качественной стороной явлений. Он никогда не пользовался точным языком математических формул. Рассуждения и доказательства Фарадея воспринимались с трудом и даже отвергались его современниками. Зато среди убежденных приверженцев Фарадея был гениальный Максвелл (1831—1879), в совершенстве владевший математическими методами своего времени. Максвелл облек основные идеи Фарадея в математическую форму. Он обобщил имеющиеся опытные факты и пополнил их новыми. Таким путем в начале 60-х годов 19 века ему удалось сформулировать систему уравнений, в которой в сжатой и точной форме содержатся все количественные законы электромагнитного поля. Установление этих уравнений, пожалуй, является наиболее крупным открытием физики 19 века.

5. Сначала теория Максвелла не получила признания. Это связано главным образом с тем, что вплоть до последней четверти 19 века электродинамика занималась изучением только *постоянных* или *почти постоянных* электрических и магнитных полей. А в этих случаях уравнения Максвелла переходят в уравнения теории действия на расстоянии. Здесь фактические выводы обеих теорий совпадают. Поэтому никакие опыты с постоянными электромагнитными полями не могут ответить на вопрос, какое из двух представлений о силах взаимодействия верно или, точнее, заведомо неверно. Для этого надо было обратиться к изучению *переменных полей*. Максвелл показал, что из его уравнений следует существование *электромагнитных волн*, и вычислил скорость их распространения. Оказалось, что в вакууме эта скорость совпадает со скоростью света (300 000 км/с), т. е. очень велика. Громадный круг явлений воспринимается так, как если бы скорость распространения электромагнитных возмущений была *бесконечна*, т. е. так, как если бы была справедлива теория действия на расстоянии. Электромагнитные волны впервые были получены и экспериментально исследованы в знаменитых опытах Герца в 1887—1888 гг. Их свойства оказались

в точности такими, какие предсказывала теория Максвелла. С точки зрения теории действия на расстоянии существование электромагнитных волн абсолютно непонятно. Поэтому после опытов Герца вопрос о характере электродинамических взаимодействий был однозначно решен в пользу теории поля. Громадную роль в деле распространения и развития теории Максвелла сыграло великое изобретение радио А. С. Поповым (1859—1905), которое в конце концов преобразило науку, технику и саму жизнь человека.

6. Физики 19 века были убеждены, что явления электричества и магнетизма могут быть поняты до конца только тогда, когда они будут сведены к механическим причинам, например к упругим натяжениям, давлениям или каким-то другим механическим изменениям в окружающей среде. Таковой в теории Фарадея — Максвелла считался *мировой эфир*. Было затрачено много усилий для построения механической теории электрических и магнитных явлений. Сам Максвелл положил этому начало. В первых работах по теории электричества он широко пользовался механическими моделями для представления электромагнитного поля. Однако для представления различных свойств поля потребовались разные модели, противоречащие друг другу. Механические же модели в теории Максвелла сыграли лишь роль лесов строящегося здания. После того как здание построено, леса убираются. Так и в завершенном варианте теории Максвелла, опубликованном им в «Трактате по электричеству и магнетизму» (1873), механические модели совсем не используются. Все усилия построения непротиворечивой механической теории электрических и магнитных явлений потерпели неудачу. Они убедили физиков последующих поколений в *принципиальной невозможности механической картины мира*. Атомно-молекулярная теория показала, что упругие силы сами являются результатом электрического взаимодействия между электрически заряженными частицами, из которых построены тела. Упругость была сведена к электричеству. После этого программа сведения электрических сил к упругим потеряла всякий смысл. Электрические силы оказались более «простыми» и «понятными», чем силы упругие. Современная физика не связывает с понятием электромагнитного поля никаких «наглядных» картин типа упругих деформаций, натяжений, давлений и пр. Она утверждает лишь, что поле *реально существует* и в этом смысле, наряду с веществом, является *одним из видов материи*. Поле обладает энергией, импульсом и другими физическими свойствами. Посредством полей осуществляются электромагнитные взаимодействия тел. Заряженное тело *A* возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Оно проявляется в силе, действующей на другое заряженное тело *B*, вносимое в это поле. Но поле, возбуждаемое зарядами тела *A*, реально существует в каждой точке пространства, *даже если в нее не помещено никакое другое тело B*. В этом отличие точек зрения теории поля

и теории непосредственного действия на расстоянии. Последняя также пользуется понятием поля. Однако в ней поле выступает не как физическая реальность, а как *вспомогательное математическое понятие*, вводимое лишь для удобства описания электромагнитных взаимодействий. По теории действия на расстоянии не имеет смысла говорить о поле в той или иной точке пространства, пока в нее не внесено заряженное тело, на которое действует электромагнитная сила.

7. Первоначальная теория Максвелла не вводила принципиального различия между материальными средами и вакуумом (эфиром). Вакуум рассматривался в ней как *одна из сред*, отличающаяся от других сред только количественно: значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей и электропроводности. Более глубокую и ясную картину дала *электронная теория*, творцом которой был великий голландский физик Г. А. Лорентц (1853—1928). Она была создана и детально разработана еще до открытия электрона и установления структуры атома. [Электрон был открыт Дж. Дж. Томсоном (1856—1940) в 1897 г., модель атома Резерфорда (1871—1937) появилась в 1911 г., а теория Бора (1885—1962) — в 1913 г.]. На современном языке основную идею электронной теории можно сформулировать следующим образом. Вещество состоит из положительно заряженных атомных ядер и отрицательно заряженных электронов. Для наших целей пока нет необходимости вдаваться в детали строения атомов и атомных ядер. Важно заметить лишь, что вакуум является *универсальной средой*, в которой возбуждается электромагнитное поле. С точки зрения теории электричества всякое вещество следует рассматривать как вакуум, испорченный вкрапленными в него атомными ядрами и электронами. Заряды этих частиц возбуждают электромагнитные поля, накладывающиеся на внешнее поле, в которое внесено вещество. Наложением таких полей и определяется электромагнитное поле в веществе. С этой точки зрения изучение электромагнитного поля в веществе сводится к изучению поля в вакууме. Так мы и поступим в дальнейшем. Сначала изучим электрическое и магнитное поля в вакууме, а затем исследуем, как поле искажается зарядами атомных ядер и электронов вещества. Таким путем электронная теория привела к более глубокому пониманию уравнений Максвелла в веществе. Она явилась рациональной основой для понимания электрических и магнитных свойств вещества с атомистической точки зрения. Сам Лорентц и его последователи, разумеется, пользовались классическими представлениями. Это приводило к трудностям принципиального характера, преодоление которых стало возможным только после того, как электронная теория была перестроена на квантовой основе.

8. *Уравнения Максвелла являются обобщениями опытных фактов. Их доказательство надо искать в сопоставлении с опытом выводимых*

из них следствий. Эти уравнения составляют стержень всей электродинамики. Они могут рассматриваться как *основные аксиомы электродинамики*, играющие в ней такую же роль, какую законы Ньютона играют в классической механике. Поэтому изложение электродинамики можно было бы строить *чисто дедуктивно* на основе постулативно установленных уравнений Максвелла. Однако для первоначального изучения такой путь нецелесообразен. Мы глубже проникаем в сущность электродинамики Максвелла, если изберем *индуктивный метод изложения*. Мы начнем с простейших опытных фактов и явлений, которые правильно описываются не только на языке теории поля, но и на языке теории непосредственного действия на расстоянии. Постепенным обобщением законов этих явлений мы придем к таким результатам, которые уже не укладываются в рамки теории действия на расстоянии, а могут быть истолкованы только с помощью теории поля. В конце концов мы придем к системе уравнений Максвелла, после чего все последующее изложение будет строиться на их основе.

## § 2. Электрический заряд и напряженность электрического поля

1. Важнейшими понятиями в учении об электричестве являются *электрический заряд* и *напряженность электрического поля*. Качественное представление об этих понятиях дают простейшие опыты по электричеству, известные из элементарного курса физики. Здесь мы остановимся только на *количественной* стороне вопроса. Точное количественное определение заряда и напряженности электрического поля, как и всяких других физических величин, сводится к указанию *принципиального способа их измерения*.

2. Будем предполагать сначала, что электрическое поле не изменяется во времени. Такое поле называется *электростатическим*. Оно может быть возбуждено неподвижными электрическими зарядами. Малое электрически заряженное тельце, настолько малое, что оно практически не вызывает (вследствие индукции) перераспределения электрических зарядов на окружающих телах, может служить *пробным телом* или *пробным зарядом*. Возьмем два пробных заряда и будем последовательно помещать их в одну и ту же точку пространства, и притом так, чтобы оба заряда покоились в соответствующей системе отсчета. Так как поле не меняется во времени, то эти заряды будут подвергаться действию одного и того же поля. Пусть  $F_1$  и  $F_2$  — силы, действующие на эти неподвижные заряды. Обобщением опытных фактов является следующий результат. Силы  $F_1$  и  $F_2$  имеют либо одинаковые, либо прямо противоположные направления, а их отношение не зависит от положения точки, в которой помещаются пробные заряды. Отношение  $F_1/F_2$  является поэтому характеристикой *самых только пробных зарядов*, а не поля, в которое они помещены. Это позволяет характеризовать состояние