

Г. Е. Зильберман

Электричество и магнетизм

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Г11

Г11 **Г. Е. Зильберман**
Электричество и магнетизм / Г. Е. Зильберман – М.: Книга по Требованию, 2013. – 382 с.

ISBN 978-5-458-32504-2

Книга не что оригинальное среди прочей литературы классических курсов электричества и магнетизма. Пособие излагает материал при помощи дедуктивного метода, так, изначально приведены фундаментальные сведения относительно поля, описаны его источники и вихри, материал рассмотрен с точки зрения векторного поля. Такого рода оригинальное построение материала позволяет при сжатых объемах не упустить важные моменты, рассмотреть широкий круг вопросов, а также изложить все необходимое для современной теории электричества и магнетизма, а также относительно электронной теории. В деталях описана электронная теория металлов, полупроводников, диэлектриков и плазмы. Целевая аудитория этой книги – студенты младших курсов, преподаватели, школьники, которые планируют связать свою дальнейшую жизнь с физикой.

ISBN 978-5-458-32504-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное учение об электричестве и магнетизме основано на уравнениях Максвелла, определяющих поля через их источники и вихри. В вузовских курсах общей физики, и тем более в школьных учебниках, об этих понятиях векторного анализа не говорится совсем. Из-за этого остается неясным смысл даже таких фундаментальных величин, как напряженности электрического и магнитного полей, векторы магнитной и электрической индукции. Однако современная теория электричества и магнетизма является одной из наиболее детально разработанных частей физики и вполне может быть изложена наглядно и вместе с тем достаточно строго. В предлагаемой книге делается попытка такого изложения.

Первые три главы содержат обзор основных понятий электричества и магнетизма. В остальных главах детально рассмотрен широкий круг вопросов электричества и магнетизма, в частности современной электронной теории металлов, полупроводников и плазмы. Главное внимание уделено не математическим выводам, а разъяснению качественной, физической стороны вопроса. Задача такого изложения очень трудна, и книга поэтому не может быть лишена множества недостатков. Замечания читателей будут встречены с благодарностью.

В каждом параграфе имеются ссылки на материал, изложенный ранее. Формулы записываются параллельно в системах СИ и СГС (гауссовой).

Книга рассчитана на студентов первых курсов университетов, технических вузов, на учителей физики, а также на учащихся старших классов специализированных физико-математических школ.

Автор весьма признателен Ф. И. Ицковичу, М. Я. Минцу, Ю. А. Соколовичу и своим рецензентам: проф. М. И. Каганову, проф. Б. М. Яворскому и М. И. Блудову за доброжелательную критику и множество ценных замечаний.

Г. Зильберман

ГЛАВА I

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА

§ 1. Взаимодействие тел

В основе всех физических явлений лежит взаимодействие между телами или частицами, участвующими в этих явлениях. Земля движется вокруг Солнца из-за того, что взаимодействует с ним. Этим взаимодействием является притяжение Земли и Солнца по закону всемирного тяготения. Притяжение или отталкивание двух электрических зарядов — это их электрическое взаимодействие. Отталкивание или притяжение магнитных полюсов или токов — это магнитное взаимодействие. Столкновение бильiardных шаров, сжатие человеком пружины, давление подошвы на землю — все это примеры взаимодействия тел.

Согласно представлениям современной физики всякое взаимодействие передается через некоторое поле. Земля взаимодействует с Солнцем через гравитационное поле. Солнце создает гравитационное поле, которое действует на Землю. Земля, в свою очередь, создает поле, которое действует на Солнце. Это второе поле гораздо слабее первого, но зато помещенное в него тело (Солнце) гораздо больше. В результате оказывается, что силы, действующие на оба тела, равны в соответствии с третьим законом Ньютона.

Электрические заряды взаимодействуют через электрическое поле, которое они создают, магниты и электрические токи — через магнитное поле. Частицы в атомном ядре — протоны и нейтроны — взаимодействуют через

так называемое π -мезонное поле. Каждая частица создает поле, и это поле уже действует на другую частицу.

Если всякое взаимодействие передается через поле, то спрашивается, через какое же поле взаимодействуют рука и камень, пружина и связывающая ее веревка, бильiardные шары, подошва и земля, т. е. чем объясняется существование обычных сил, возникающих при соприкосновении предметов? Оказывается, это электромагнитное взаимодействие. Атомы соприкасающихся тел сближаются на расстояния порядка размеров самих атомов. Быстро вращающиеся вокруг ядер отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные ядра создают электромагнитное поле, которое и осуществляет взаимодействие при соприкосновении.

Но не только взаимодействие между различными телами, а и само существование твердых и жидких тел обусловлено взаимодействием между атомами. Именно благодаря этому взаимодействию твердые и жидкие тела не распадаются на отдельные атомы.

§ 2. Металлы и диэлектрики

Металлы. Валентные электроны металла слабо связаны со своими атомами. Когда атомы металла, конденсируясь из металлического пара, образуют жидкий или твердый металл, внешние электроны оказываются уже не связанными с отдельными атомами и могут свободно перемещаться по всему телу. Эти электроны обуславливают хорошо известную значительную проводимость металлов, они так и называются электронами проводимости.

Атомы металла, лишенные своих валентных электронов, т. е. положительные ионы, составляют кристаллическую решетку. В кристаллической решетке ионы совершают хаотические колебания около своих положений равновесия, называемых узлами решетки. Эти колебания представляют собой тепловое движение решетки и усиливаются с повышением температуры.

Электроны проводимости в отсутствие электрического поля в металле совершают беспорядочное движение со скоростями порядка тысяч километров в секунду. При приложении напряжения к металлическому проводнику электроны проводимости, не ослабляя своего хаотического движения, сравнительно медленно «сносятся»

электрическим полем вдоль проводника. При таком сносе все электроны получают, дополнительно к хаотической скорости, еще и небольшую скорость упорядоченного движения (порядка, например, миллиметров в секунду). Именно это слабое упорядоченное движение и обуславливает электрический ток в проводнике.

Диэлектрики. Совсем иначе обстоит дело в других веществах, которые носят название изоляторов (на языке физики — диэлектриков). В диэлектриках атомы точно так же колеблются вокруг положений равновесия, как и в металлах, но они имеют полный комплект электронов. Внешние электроны атомов диэлектрика сильно связаны со своими атомами, и разлучить их не так-то просто. Для этого нужно значительно поднять температуру диэлектрика или подвергнуть его какому-нибудь интенсивному облучению, которое смогло бы оторвать электроны от атомов. В обычном же состоянии электронов проводимости в диэлектрике нет, и диэлектрики не пропускают тока.

Большая часть диэлектриков является не атомными, а молекулярными кристаллами или жидкостями. Это значит, что в узлах решетки находятся не атомы, а молекулы. Многие молекулы состоят из двух групп атомов или просто из двух атомов, один из которых электрически положителен, а другой отрицателен (такие молекулы называются полярными). Например, у молекулы воды положительной частью являются оба атома водорода, а отрицательной — атом кислорода, около которого большую часть времени вращаются электроны водородных атомов.

Два заряда, равные по величине, но противоположные по знаку, находящиеся на очень малом расстоянии друг от друга, называются *диполем*. Полярные молекулы представляют собой пример диполей. Если молекулы не состоят из противоположных по заряду ионов (заряженных атомов), т. е. не являются полярными и не представляют собой диполей, то они *становятся* диполями под действием электрического поля. Электрическое поле тянет положительные заряды, входящие в состав молекулы (например, ядра), в одну сторону, а отрицательные — в другую и, раздвигая их, создает диполи. Такие диполи называются упругими — поле растягивает их, как пружину. Поведение диэлектрика с неполярными

молекулами мало отличается от поведения диэлектрика с полярными молекулами, и в дальнейшем мы всегда будем считать, что молекулы диэлектрика являются диполями.

Если кусок диэлектрика поместить в электрическое поле, т. е. поднести к диэлектрику электрически заряженное тело, обладающее, например, положительным зарядом, отрицательные концы молекул-диполей будут притягиваться к этому заряду, а положительные — отталкиваться. Из-за этого молекулы-диполи будут поворачиваться. Этот поворот называют ориентацией. Ориентация не представляет собой полного поворота всех молекул диэлектрика. Взятая наугад молекула в данный момент может оказаться повернутой против поля, и только в среднем у большого числа молекул существует слабая ориентация в сторону поля (т. е. больше молекул повернуто в сторону поля, чем в противоположную сторону). Ориентации препятствует тепловое движение — хаотические колебания молекул вокруг их положений равновесия. Чем ниже температура, тем сильнее ориентация молекул, вызываемая данным полем. С другой стороны, при данной температуре ориентация, естественно, тем сильнее, чем больше поле.

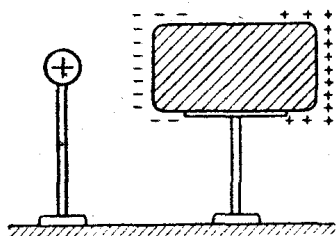


Рис. 1.

Поляризация диэлектрика.

В результате ориентации молекул диэлектрика на поверхность его, обращенную к положительному заряду (рис. 1), выступают отрицательные концы молекул-диполей, а на противоположную поверхность — положительные. На поверхно-

стях диэлектрика образуются электрические заряды. Эти заряды носят название поляризационных, а их возникновение называется процессом *поляризации диэлектрика*.

Как следует из изложенного выше, поляризация, в зависимости от вида диэлектрика, может быть *ориентационной* (ориентируются готовые молекулы-диполи) и *деформационной*, или поляризацией электронного смещения (молекулы в электрическом поле деформируются, превращаясь в диполи).

Может возникнуть вопрос, почему поляризационные заряды образуются только на поверхностях диэлектрика, а не внутри его? Объясняется это тем, что внутри диэлектрика положительные и отрицательные концы молекул-диполей как раз компенсируют друг друга. Компенсация будет отсутствовать только на поверхностях диэлектрика или на границе раздела двух диэлектриков, а также в неоднородном диэлектрике.

Если диэлектрик поляризован, то это не значит, что он заряжен, т. е. что он имеет в целом электрический заряд. При поляризации общий заряд диэлектрика не меняется.

Однако диэлектрику можно сообщить заряд, перенося на него некоторое количество электронов извне или забирая некоторое число его собственных электронов. В первом случае диэлектрик зарядится отрицательно, а во втором — положительно.

Такую электризацию можно произвести, например, путем трения. Если потереть стеклянную палочку о шелк, то палочка и шелк зарядятся противоположными по знаку зарядами (стекло — положительно, шелк — отрицательно)*). У стеклянной палочки при этом будет отобрано некоторое число электронов (весьма малая доля общего числа электронов, принадлежащих всем атомам стеклянной палочки, — что-нибудь около 10^{-11} — 10^{-17}).

Итак, в металлах и других проводниках (например, электролитах) заряды могут свободно перемещаться по всему телу. Диэлектрики же не обладают проводимостью и в них заряды не могут перемещаться на макроскопические (т. е. большие по сравнению с размерами атомов и молекул) расстояния. В электрическом поле диэлектрик только поляризуется.

Классификация зарядов. Заряды, перемещающиеся в проводниках, а также наносимые извне на диэлектрик, мы будем называть *свободными*, а поляризационные заряды, выступающие на поверхностях диэлектрика, — *связанными*.

*) Электризация при трении происходит из-за того, что при контакте двух разнородных веществ некоторое число электронов переходит из одного вещества в другое, трение же увеличивает площадь контакта между соприкасающимися телами.

§ 3. Электрическое поле

В пространстве вокруг заряженного тела (рис. 2) существует электрическое поле. Чтобы убедиться в этом, достаточно поднести к телу пробный заряд. На заряд будет действовать сила. Существование этой силы мы описываем словами: «в пространстве вокруг заряженного тела существует электрическое поле».

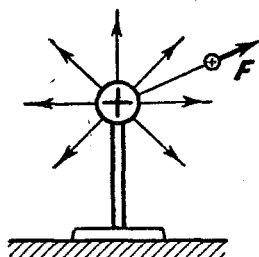


Рис. 2.

Даже в вакууме заряженное тело окружено не пустотой, а электрическим полем. Поле (электрическое, магнитное и другие) представляет собой один из видов материи. Подобно другому виду материи — веществу, состоящему из атомов, — поле обладает массой и, поэтому,

весом. Электрические заряды взаимодействуют между собой через этот особый вид материи. Если очень быстро развести находившиеся первоначально в одной точке равные разноименные заряды, а пробный заряд расположить на достаточно большом расстоянии от них, то сила, действующая на пробный заряд, появится не сразу. Оказывается, поле (в этом случае оно будет электромагнитным, как мы увидим в дальнейшем) распространяется с конечной скоростью и поэтому достигает пробного заряда через конечный промежуток времени. Правда, скорость эта огромна, она равна 300 000 км/сек, однако все же взаимодействие распространяется не мгновенно.

В качестве пробного заряда нужно взять малое по размерам тело, обладающее малым зарядом. Малые размеры нужны для того, чтобы пробный заряд ощущал поле только в одной точке, не захватывая целой области. Его заряд должен быть малым для того, чтобы не смещать заряды, находящиеся на шарике, и тем самым не искажать поле, в которое пробный заряд помещен.

Взаимодействие точечных зарядов. Заряд, помещенный на теле, размеры которого малы по сравнению с расстоянием до других тел, с которыми он взаимодействует, мы будем называть *точечным зарядом*. Название «точечный заряд» не означает, что заряд размещен в математической точке. Все тела обладают конечными размерами, и одни и те же тела в различных случаях могут

считаться точечными или не считаться таковыми. Например, если мы возьмем два тела с размерами порядка сантиметра и будем рассматривать их взаимодействие на расстоянии тоже порядка нескольких сантиметров, то в этом случае точечными их никак нельзя будет считать. А если разнести их на расстояние, например, в несколько метров, то те же тела с достаточной степенью точности можно будет считать точечными. Чем большее (по сравнению с их размерами) расстояние будет между зарядами, тем с большей степенью точности их можно будет считать точечными. При этом форма тел и расположение на них заряда не будут играть роли.

С помощью измерительного прибора (например крутильных весов) можно установить, что сила взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2 всегда направлена по линии, их соединяющей. Величина этой силы пропорциональна произведению зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними (закон Кулона)

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (3.1)$$

Коэффициент пропорциональности k зависит от выбора системы единиц. В системе, называемой гауссовой (или СГС), коэффициент k полагается равным единице и стоящая в знаменателе величина ϵ (смысл ее обсуждается ниже) безразмерна. Тогда, поскольку единица силы (дина) и единица расстояния (сантиметр) уже выбраны, единица заряда определяется из формулы (3.1). В системе СИ коэффициент k не равен единице и обозначается $1/4\pi\epsilon_0$ (см. § 19).

Неточечные заряды (например, две близко расположенные заряженные пластинки) тоже взаимодействуют друг с другом, однако сила их взаимодействия уже непосредственно не выражается формулой (3.1). Кроме того, для справедливости формулы (3.1) требуется, чтобы среда, в которой находятся взаимодействующие точечные заряды, была однородной, изотропной*) и

*) Однородность среды означает, что свойства ее одинаковы во всех ее точках (в частности, всюду одинаков состав и нет никаких вкраплений). Изотропность означает, что свойства этой среды в окрестности каждой ее точки одинаковы во всех направлениях. Изотропность может нарушаться в кристаллах. Кристаллы могут иметь в различных направлениях различную прочность, различный коэффициент теплового расширения или электропроводность.

безграничной. Последнее означает на практике, что размеры однородного образца, в котором находятся заряды, должны во много раз превышать расстояние между ними. В противном случае формула (3.1) будет неточна. В дальнейшем слово «безграничная» мы будем большей частью опускать.

Поле связанных зарядов. Величина ϵ , называемая *диэлектрической проницаемостью*, учитывает влияние среды на силу взаимодействия. В пустоте и приближенно в воздухе величина ϵ в гауссовой системе единиц равна 1. Если поместить заряды в другую среду, например в керосин, который является диэлектрической жидкостью, то сила взаимодействия между ними уменьшится (в керосине — в два раза). Это означает, что диэлектрическая проницаемость керосина равна 2. У стекла $\epsilon=5$, у эбонита 3, у воздуха при нормальных условиях 1,0006. Таким образом, в любой среде $\epsilon>1$ и электрическое поле ослабляется по сравнению с вакуумом.

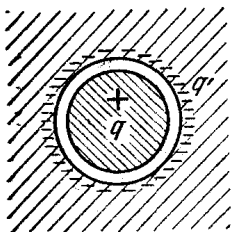


Рис. 3.

Причину этого ослабления объясняет рис. 3. На нем изображен заряженный шарик, окруженный диэлектриком. Для того чтобы лучше разобраться в том, что происходит на границе шарика и среды, мы изобразили маленький промежуток между ними. Поле шарика ориентирует молекулы диэлектрика, и на поверхность диэлектрика, примыкающую к шарiku, выступают отрицательные заряды. Ясно, что поле в любой точке диэлектрика будут создавать две противоположно заряженные сферы — поверхность шарика, заряженная положительно, и примыкающая к ней отрицательно заряженная поверхность диэлектрика. Суммарное поле будет более слабым, чем поле одного шарика. Таким образом, поле в диэлектрике ослабляется в ϵ раз потому, что из поля свободных зарядов вычитается поле поляризационных, связанных зарядов.

Нетрудно найти величину связанного заряда q' , окружающего свободный заряд q (рис. 3). Как видно из закона Кулона, электрическое поле в диэлектрике ослабляется в ϵ раз, т. е. оно будет таким, какое создавал бы заряд q/ϵ . В действительности же это поле создает за-