

М. Планк

Введение в теоретическую физику

Часть 3. Теория электричества и магнетизма

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
М11

М11 **М. Планк**
Введение в теоретическую физику: Часть 3. Теория электричества и магнетизма / М. Планк – М.: Книга по Требованию, 2021. – 181 с.

ISBN 978-5-458-34358-9

Введение в теоретическую физику

ISBN 978-5-458-34358-9

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2021

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, кляксы, 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.

подчеркивание формальной аналогии между электрическим и магнитным векторами, хотя эта аналогия, скорее, внешнего характера. Так же как аналогия между поступательным и вращательным движением, она обязана своим существованием только тому, в известном смысле чисто случайному, обстоятельству, что наше пространство имеет как раз три измерения. Однако как, с одной стороны, несомненно, что эта аналогия сыграла выдающуюся роль в историческом развитии максвелловской теории, так, с другой стороны, конечно, нельзя не признать, что она еще и теперь чрезвычайно удобна для „введения в теорию“ и, во всяком случае, дает полезные мнемонические правила. С этим связано также то обстоятельство, что я здесь везде применяю гауссову систему единиц, которая выделяется среди применяемых в теоретической литературе рациональных систем единиц своим близким родством с практической системой. Сравнительное со-поставление выраженных в различных системах единиц числовых значений некоторых величин, так же как и алфавитный указатель всех определений и важнейших положений, находится в конце книги.

Существенных сокращений в изложении можно было достигнуть при помощи ссылок на известные теоремы механики, выводы которых содержатся в двух первых уже вышедших томах. Так, ссылка 1, (132) означает уравнение (132) в „Общей механике“; ссылка 2, § 15 означает § 15 „Механики деформируемых тел“. Тот, кто до некоторой степени освоился с принципами механики, конечно, в подобных указаниях не нуждается.

Берлин-Груневальд,
Март 1922.

Автор.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие ко второму изданию	5
Предисловие к первому изданию	6
Введение.	9
 <i>Часть первая</i>	
Общие уравнения электромагнитного поля в покоящихся телах	
Глава I. Напряжение электрического и магнитного поля	11
Глава II. Законы электромагнитного поля	14
 <i>Часть вторая</i>	
Статические и стационарные состояния	
Глава I. Электростатическое поле в отсутствии контактной разности потенциалов	29
Глава II. Электростатическое поле в случае контактной разности потенциалов	53
Глава III. Магнитостатическое поле	70
Глава IV. Пондеромоторные действия в статическом поле	81
Глава V. Стационарное электромагнитное поле	93
Глава VI. Молекулярные и пондеромоторные действия в стационарном поле	118
 <i>Часть третья</i>	
Квазистационарные и динамические процессы	
Глава I. Квазистационарные процессы при замкнутых токах	131
Глава II. Квазистационарные процессы при незамкнутых токах	143
Глава III. Динамические процессы в покоящихся телах	150
Глава IV. Динамические процессы в движущихся телах. Границы электродинамики Максвелла-Герца.	169
Сравнительная таблица выраженных в различных системах единиц числовых значений некоторых величин	181
Указатель определений и важнейших положений.	182

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА

§ 1. Механическим явлениям, или движениям материальных точек противостоит как нечто единое, ясно от них ограниченное целое, вся совокупность электрических и магнитных, или электродинамических, явлений. Этими двумя областями исчерпывается вся физика, так как все остальные ее части—акустика, оптика и теплота—могут быть вполне сведены на механику и электродинамику. Окончательное же объединение этих двух последних классов явлений, что представило бы собой увенчание здания теоретической физики, еще приходится предоставить будущему.

Однако уже теперь налицо целый ряд мостов, ведущих из первой области во вторую. Первым и важнейшим из них является принцип сохранения энергии (1, § 49), который поэтому мы здесь и выдвигаем на первый план. Понятно, однако, что этот принцип сам по себе еще не дает достаточного руководства, с помощью которого можно было бы построить определенную теорию электричества. Даже более: различные теории, основанные все на принципе сохранения энергии, с течением времени пришли к противоречащим результатам. Для излагаемой в этой книге теории, основанной Максвеллом, характерно проведение второй основной идеи: принципа близкодействия. По этому принципу в природе не существует действия на расстоянии, т. е. не может случиться так, чтобы действие какого-либо местного события тотчас же проявлялось в каком-нибудь более или менее отдаленном месте, минуя тела межлежащие. Наоборот, всякое действие распространяется в пространстве от точки к точке и при том с конечной скоростью. Отсюда следует, что все происходящее в каком-либо определенном месте и в определенный момент вполне и однозначно определяется теми событиями, которые происходили в непосредственной близости от этого места в непосредственно предшествовавший момент времени.

Так как в этом положении заключается существенное ограничение имеющихся налицо возможностей для способа действия физических причин, то принципы дальнодействия и близкодействия нельзя рассматривать как принципы равнозначные. Принцип действия на расстоянии надо признать более общим, а принцип близкодействия—более специальным. В связи с этим и стоит то обстоятельство, что в электродинамике

существовало несколько различных теорий, основанных на принципе действия на расстоянии, и только одна единственная теория, основанная на принципе близкодействия, именно, максвелловская. То, что эта теория в конце концов взяла перевес над всеми другими, произошло, по существу, не от большей ее „верности“, но, главным образом, от ее большей определенности и простоты. Ведь по этой теории при *вычислении процессов* в каком-либо месте нет, в сущности, никакой надобности заботиться о том, что происходит в каком-либо другом, находящемся на конечном расстоянии, месте,—достаточно ограничиться рассмотрением происходящего в непосредственной близости. Между тем, по принципу действия на расстоянии в подобном случае, строго говоря, необходимо исследовать всю вселенную, чтобы убедиться, что нигде не существует ничего такого, что могло бы заметно повлиять на предвычисляемое явление.

И здесь снова оправдывается положение, что не та теория наилучшая, которая наиболее обща. Напротив, чем специальнее теория, чем более определенные ответы дает она на все касающиеся ее вопросы, тем лучше она разрешает свою задачу. Последняя заключается в том, чтобы дать однозначное, чуждо с всякой неопределенности, предсказание ожидаемых явлений,—пункт, который при теоретических построениях, к сожалению, иногда упускают из виду. Чем менее неопределенных постоянных содержит теория, тем более она производительна.

Если, таким образом, мы принуждены при последующем развитии теории с самого начала принципиально отказаться от всяких представлений о действии на расстоянии, то этим все же не исключается, что впоследствии иногда окажется удобным и целесообразным формулировать окончательный вывод сообразно с представлениями о непосредственном действии на расстоянии. В этом нет никакого противоречия с принципом близкодействия. Ведь мы говорим, например, о восходе и заходе солнца, ничуть не утверждая этим, что солнце обращается вокруг земли. Точно так же мы будем впоследствии говорить, что электрически заряженное тело притягивает или отталкивает другое заряженное тело, или что гальванический ток отклоняет компасную стрелку, соединяя с этими выражениями тот смысл, что эти видимые проявления представляют простой конечный результат многочисленных сложных процессов, разыгрывающихся в пространстве между рассматриваемыми телами.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОКОЯЩИХСЯ ТЕЛАХ

ГЛАВА I

НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

§ 2. Если сильно потереть кошачьим мехом палочку из сургуча или эбонита, то она получает способность притягивать к себе небольшие легкие тела, например обрезки бумаги или бузинные шарики. Чтобы истолковать этот опытный факт научно, мы не станем представлять себе, что натертая палочка воздействует на тело с притягательной силой, но будем исходить из точки зрения близкодействия и скажем: натертая палочка, прежде всего, образует в окружающем ее воздухе электрическое поле, которое характеризуется в каждой его точке определенными местными его свойствами. Это электрическое поле, со своей стороны, оказывает действие на всякое находящееся в нем тело, и действие это зависит исключительно от свойств поля как раз в том месте, где находится тело. При этом совершенно не нужно заботиться о том, как возникло электрическое поле или каково оно в других местах. Электрические поля можно создавать самыми разнообразными способами во всех веществах, и в жидких и в твердых телах. Каждое вещество поэтому следует рассматривать как „диэлектрик“. Разумеется, в различных веществах электрические поля обнаруживают различные свойства. В особенности, это относится к их изменчивости во времени.

Главным вопросом является для нас теперь следующий: какой величиной можно охарактеризовать в определенном месте электрическое поле, каким бы способом и в каком бы веществе оно ни было образовано. Чтобы ответить на этот вопрос, введем в соответствующее место поля небольшое, соответственным образом подготовленное, „пробное тело“, например подвешенный на тонкой шелковинке бузинный шарик, предварительно приведенный в соприкосновение с натертой эбонитовой палочкой или же с употребленным для натирания палочки кошачьим мехом, и измерим механическую силу, которая на него в поле действует. Если мы исследуем таким способом все поле, производя во всех его точках означенное измерение, то такое поле

мы будем рассматривать как вполне известное и определенное. Если сила окажется во всех точках поля одинаковой, то такое поле мы назовем „однородным“. Но, вообще, сила может варьироваться от точки к точке как по величине, так и по направлению. Сила изображается вектором. Поэтому электрическое поле в каждой его точке мы будем характеризовать вектором E , который назовем „напряжением электрического поля“, или просто „электрическим напряжением“.

При этом надо принять в соображение, что измеряемая механическая сила зависит не только от свойств поля, но также и от свойств употребленного для измерения пробного шарика, и притом не только по величине, но и по направлению. Именно, сила тем больше, чем сильнее была натерта эбонитовая палочка, служившая для подготовки шарика. Далее, она действует в двух противоположных направлениях, смотря по тому, был ли пробный шарик в соприкосновении с палочкой или с мехом.

Условились (целесообразнее было бы обратное) определять как направление E то, по которому действует сила в том случае, когда пробный шарик был в соприкосновении с кошачьим мехом.

Не так просто определение абсолютной величины $|E|$ электрического напряжения. Чтобы получить ее, прибегнем к понятию об энергии поля. Что электрическое поле содержит некоторый запас энергии, следует из того обстоятельства, что поле может привести в движение тело. Действительно, живая сила движения по закону сохранения энергии может быть получена только за счет электрической энергии, равно как движения упругого тела происходят за счет энергии деформации. Отношение электрической энергии, содержащейся в бесконечно малой части объема, занятого полем, к объему этой части называется „плотностью электрической энергии“. Эта величина выражается в механических единицах, она положительна, если принять энергию электрически нейтрального поля за нуль. На ней мы основываем определение абсолютной величины электрического напряжения, полагая плотность электрической энергии пропорциональной квадрату напряжения электрического поля E^2 , а также пропорциональной положительному множителю, зависящему только от свойств среды (например воздух), ϵ , „диэлектрической постоянной“, определение которой мы дадим ниже (ср. далее, § 7).

Более целесообразно было бы положить плотность электрической энергии равной $\frac{\epsilon}{2} E^2$. Так и поступают в так называемой рациональной системе единиц, которой, в особенности, пользуются в теоретической физике. Историческое развитие учения об электричестве привело к употреблению практической системы единиц. В этой системе плотность электрической энергии выражается следующей величиной:

$$\frac{\epsilon}{8\pi} E^2 \quad (1)$$

и так как эта система единиц обыкновенно употребляется теперь как в экспериментальной, так и в технической физике, то и мы будем ею здесь пользоваться. Особые ее преимущества, между прочим, выясняются только впоследствии (в конце § 41).

Величиной и направлением электрического напряжения E определяются компоненты этого вектора E_x, E_y, E_z относительно правой системы взаимно перпендикулярных осей координат. Согласно этому полная энергия любого электрического поля в однородном теле с диэлектрической постоянной ϵ равна:

$$\frac{\epsilon}{8\pi} \int d\tau (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2), \quad (2)$$

где $d\tau$ обозначает элемент объема тела.

§ 3. Аналогично электрическому полю, хотя и отлично от него по своей природе, магнитное поле. Магнитное поле также может быть создано самыми различными способами. Мы займемся прежде всего лишь вопросом о характерных свойствах какого-либо имеющегося магнитного поля, а не о том способе, с помощью которого оно создано. Для исследования поля в качестве пробного тела мы употребим маленькую, свободно вращающуюся вокруг своего центра тяжести, магнитную стрелку. Действующий со стороны поля на магнитную стрелку механический момент вращения дает нам средство определить „напряжение магнитного поля“ H . Если этот момент вращения везде одинаков, то мы называем магнитное поле „однородным“; в общем случае за направление вектора H мы принимаем то направление, в котором устанавливается пробная стрелка, а именно, считая от ее южного конца к северному. Поэтому, например, в поле на поверхности земли, в так называемом „земном магнитном поле“, направление магнитного напряжения приблизительно совпадает с географическим меридианом. Абсолютная величина напряжения магнитного поля H не может быть определена из величины механического момента вращения пробной стрелки, так как эта величина зависит от свойств стрелки. Поэтому мы определим ее при помощи энергии поля, полагая „плотность магнитной энергии“ равной:

$$\frac{\mu}{8\pi} H^2, \quad (3)$$

где μ — „магнитная проницаемость вещества“ и означает некоторый положительный коэффициент пропорциональности, смысл которого будет выяснен позже.

Величиною и направлением магнитного поля определяются компоненты этого вектора H_x, H_y, H_z относительно правой системы взаимно перпендикулярных осей координат. Полная энергия любого магнитного поля в теле с постоянной магнитной проницаемостью μ отсюда равна:

$$\frac{\mu}{8\pi} \int d\tau (H_x^2 + H_y^2 + H_z^2). \quad (4)$$

Вообще, поле может производить как электрические, так и магнитные действия. Такое поле мы называем поэтому электромагнитным. В каждой точке поля электромагнитное состояние характеризуется обоими векторами E и H , которые совершенно независимы друг от друга; ими определяется и полная энергия электромагнитного поля как сумма выражений (2) и (4). В этом смысле вся вселенная представляет, в целом, одно электромагнитное поле, и все электрические и магнитные явления суть не что иное, как изменения этого поля. Общая задача теории сводится, в конечном счете, к тому, чтобы предвычислить изменения со временем электрического и магнитного напряжения во всех точках пространства, если заданы значения их для какого-нибудь одного момента времени. Так как два вектора E и H определяются шестью независимыми друг от друга величинами, то для вычисления их изменений со временем необходимы шесть уравнений. Эти шесть уравнений, составляющих ядро максвелловской теории, мы установим в следующей главе.

ГЛАВА II

ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

§ 4. Понятно, что дифференциальные уравнения электромагнитного поля нельзя получить чисто дедуктивным путем. Однако они получаются сравнительно просто, если исходить из требования, которое можно этим уравнениям поставить наперед: что они должны, во-первых, удовлетворять принципу сохранения энергии и, во-вторых, принципу близкодействия. Итак, рассмотрим любую часть однородного, все время находящегося в покое, тела, в котором образовано электромагнитное поле. По принципу сохранения энергии электромагнитная энергия этой части тела может измениться только потому, что или происходит обмен энергией с внешними телами, или внутри ее энергия превращается в другие формы. Мы рассмотрим сначала первый процесс, т. е. приток энергии из окружающего пространства или отдачу ему энергии. По принципу близкодействия электромагнитная энергия ни в каком случае не может перескочить прямо из какого-либо места окружающего пространства в какое-либо место внутри рассматриваемого поля,—она может проникать снаружи внутрь только через поверхность рассматриваемой части пространства непрерывным сплошным потоком. Обмен энергией с окружающим пространством регулируется таким образом потоком энергии, аналогичным потоку жидкости, через поверхность этой части пространства, и этот электромагнитный поток вполне определяется в каждой его точке местным электромагнитным состоянием, т. е. значениями E и H в данном месте. Количество энергии, протекающей в элемент времени dt через элемент поверхности $d\sigma$ по нормали v в направлении этой нормали, пропорционально $d\sigma$ и dt ; его мы положим поэтому равным:

$$S_r \cdot d\sigma \cdot dt \quad (5)$$

и назовем конечную величину S , слагающей потока энергии по направлению v . Можно легко обнаружить, что S есть вектор. Именно, применим принцип сохранения энергии к бесконечно-малому тетраэдру, боковые грани которого параллельны трем координатным плоскостям, и притом внутренние их нормали совпадают с положительными направлениями осей координат, четвертая грань в качестве внутренней нормали имеет направление v (совершенно так же, как в § 17). Полное количество энергии, втекающей в элемент времени dt извне внутрь тетраэдра через его поверхность, по (5) равно:

$$(S_x d\sigma_x + S_y d\sigma_y + S_z d\sigma_z + S d_v \sigma) dt, \quad (6)$$

причем площади граней:

$$d\sigma_x = -d\sigma \cdot \cos(v, x), \quad d\sigma_y = -d\sigma \cdot \cos(v, y), \quad d\sigma_z = -d\sigma \cdot \cos(v, z), \quad (7)$$

Выражение (6) представляет на основании принципа сохранения энергии происшедшее за время dt изменение всей содержащейся в тетраэдре энергии. Но, так как эта последняя, во всяком случае, пропорциональна объему тетраэдра, который по своим пространственным размерам является величиной бесконечно малой третьего порядка, между тем как каждый член суммы (6) — величина бесконечно малая второго порядка, то отсюда следует, что сумма (6) равна нулю или на основании (7):

$$S_v = S_x \cos(v, x) + S_y \cos(v, y) + S_z \cos(v, z), \quad (8)$$

т. е. по 1, (40) величина S_v представляет компонент в направлении v вектора S , который определяется своими компонентами по осям координат S_x, S_y, S_z . Этот вектор S , вектор электромагнитного потока энергии, определяется в каждой точке поля по теории близкодействия значениями векторов E и H в данном месте.

§ 5. О зависимости потока энергии S от напряжений поля E и H можно заключить на основании опыта. Оказывается, эта зависимость выражается очень простым законом, который мы и поставим во главу вывода уравнений электромагнитного поля как обобщение всех сделанных до сих пор в этом отношении опытов, именно, законом Пойнтинга, который утверждает, что поток энергии S пропорционален векторному произведению (1, § 87) E и H , т. е.

$$S = \frac{C}{4\pi} [E H], \quad (9)$$

или, что означает то же самое,

$$S_x = \frac{C}{4\pi} (E_y H_z - E_z H_y), \quad S_y = \frac{C}{4\pi} (E_z H_x - E_x H_z), \quad (10)$$

где C — некоторый коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от выбора единиц для E и H .

Из этих соотношений, как мы увидим дальше, простым путем и без привлечения каких-либо особых опытных фактов выводятся

определенные количественные закономерности для всех электрических и магнитных процессов. Этим с избытком покрываеться тот недостаток, что, как можно заметить, соотношения эти не обладают никаким непосредственно наглядным содержанием.

§ 6. На основании принятых нами до сих пор положений мы теперь в состоянии окончательно условиться относительно единиц, которыми будем пользоваться в дальнейшем. Припомним прежде всего в применении к какому-нибудь определенному электромагнитному полю в какой-нибудь определенной среде установленные нами определения. В каждом месте этого поля мы имеем определенную плотность электрической энергии (1), определенную плотность магнитной энергии (3) и определенный поток энергии (9). Хотя эти три величины и не измеряются непосредственно, они представляют собой, однако, совершенно точно определяемые величины, которые выражаются в механической мере. Они содержат кроме обоих переменных напряжений поля E и H еще три коэффициента пропорциональности ϵ , μ и C , в отношении величины которых мы ничем не связаны. Отсюда следует, что две из этих трех констант мы вправе задать совершенно произвольно, тогда как три остальные величины, именно, оба напряжения поля E и H и третья константа, вполне определяются тремя выражениями для энергии. Это определение может быть высказано для каждой отдельной среды совершенно независимо от других сред.

Что же касается различных сред, то оказалось целесообразным множитель пропорциональности C в выражении для потока энергии принять одинаковым для всех сред. Целесообразность этого условия тотчас же становится ясной из простоты той формы, которую принимают граничные условия на границе раздела двух различных сред. Именно, рассмотрим элемент поверхности $d\sigma$ на подобной границе раздела, расположив ось z по направлению одной из нормалей к $d\sigma$. Тогда из (5) по закону сохранения энергии следует, что слагающая по z потока энергии S_z должна иметь одинаковую величину по обе стороны границы раздела. Иначе энергия накапливалась бы в элементе поверхности $d\sigma$ и там уничтожалась бы или создавалась бы из ничего. Таким образом $S_z = S'_z$, или по (10), так как на основании принятого нами условия $C = C'$:

$$E_z H_y - E_y H_x = E'_z H'_y - E'_y H'_x.$$

если штрихом мы отметим соответственные величины во второй среде.

Но, так как компоненты электрического и магнитного напряжения в каждой среде совершенно друг от друга не зависят, то эти уравнения могут быть удовлетворены общим образом только в том случае, если всегда:

$$E_x = E'_x; E_y = E'_y; H_x = H'_x; H_y = H'_y,$$