

ВТОРАЯ ЛЕКЦИЯ

(19. XII 1933 г.)

Краткое резюме. Исторический обзор (продолжение): электромагнитная теория Максвелла, проблема электродинамики движущихся тел, опыты Роу-ланда, Рентгена, Эйгенвальда и Вильсона, теория Герца, ее недостатки, формулировка задачи о явлениях в движущихся телах, вопрос о пересчете от одной системы отсчета к другой в механике

Резюмируем сказанное в прошлый раз. По прошествии продолжительного времени после открытия Рёмером конечности скорости света и открытия Брэдлеем явления абберации интерес привлекли оптические явления в движущихся телах. С точки зрения механической волновой оптики здесь особенно резко выявлялось взаимодействие между материей и эфиром, здесь открывалась возможность изучать свойства эфира, а это всегда привлекало исследователей. Ряд опытов показывал, что эфир, заполняющий все межпланетное пространство, покоится, не увлекается Землей, а отсюда следовало, что движущиеся тела должны испытывать «эфирный ветер». Но большое число опытов со всей доступной в то время точностью свидетельствовало о том, что никакого «эфирного ветра» нет. Это трудно было примирить с существованием абберации. Выход указал Френель.

Он принял, что тела увлекают эфир совершенно специальным образом, а именно: скорость света в теле, движущемся относительно эфира со скоростью w , составляет по отношению к этому телу

$$c_1' = c_1 - wn^{-2}.$$

Таким образом, «эфирный ветер» в принципе существует, но в тех явлениях, которые обычно наблюдают и в которых измеряется разность времени пробега или свет проходит туда и обратно (т. е. путь света замкнут), в первом порядке относительно $\frac{w}{c}$ получается компенсация влияния движения тела. Это влияние может быть обнаружено лишь во втором порядке, т. е. для Земли — в порядке $\frac{w^2}{c^2} \approx 10^{-8}$, что лежало далеко за пределами достижимой в то время точности. Правда, был один опыт, будто бы противоречащий теории Френеля. Физо в 1860 г. полагал, что им обнаружено изменение поворота плоскости поляризации при прохождении света через стопку стеклянных пластин, изменение, зависящее от движения Земли. Но, как показал в последнее время Штрассер, Физо просто ошибался.

Френель первый подчеркнул, что в опытах Араго с лучом от звезды и во всех других подобных опытах безразлично, делать ли опыт со звездным светом или с земными источниками, так как с точки зрения волновой теории (в отличие от корпускулярной) скорость света не зависит от движения источника. Замечу, что это одно из основных положений, на которые опирается теория относительности. У Френеля оно было гипотезой, высказанной по аналогии с тем, что было известно о скорости звука. Но теперь мы думаем, что это действительно так.

Когда всерьез взялись за толкование эфира как тела, то ввиду поперечности световых колебаний пришли к необходимости сделать его твердым телом. При этом натолкнулись на трудности в вопросе о свободном прохождении планет, в вопросе об отражении, о преломлении, о двойном лучепреломлении и т. д. Пытались обойти эти трудности, строили эфиры с очень интересными свойствами, создавали чрезвычайно остроумные теории эфира. Но тем временем произошло событие, одно из самых больших событий в истории физики, которое все изменило и направило интерес в другую сторону. Максвелл провозгласил электромагнитную теорию света.

Максвелл занимался не оптикой, а электродинамикой. Он стремился к тому, чтобы дать полную теорию электромагнитных явлений. Разработанная теория существовала и до него, но он ввел ток смещения.

Сказать так, это, конечно, еще ничего не сказать.

Уравнения, к которым он пришел, не только охватывали все известные электромагнитные явления, но давали больше. Из них вытекало, что всякое электромагнитное возмущение распространяется в виде поперечной волны с конечной скоростью. Таких волн не знали, но теория Максвелла позволяла даже *предвычислить скорость их распространения*.

Уже в прежние теории электромагнетизма входил параметр, который связывал электрические явления с магнитными и который равнялся отношению электромагнитной единицы заряда к электростатической. Мерой заряда может служить сила притяжения пластин конденсатора. Электростатическую единицу заряда определяют тем, что в законе Кулона

$$F = k \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

полагают $k = 1$. С другой стороны, между токами тоже существуют силы взаимодействия. Сила взаимодействия двух параллельных элементов ds_1 и ds_2 токов i_1 и i_2 равна

$$F = \beta \frac{i_1 i_2}{r^2} ds_1 ds_2.$$

Кроме того, рассматривая изменение заряда обкладок конденсатора при его зарядке, мы можем определить ток как $i = \frac{de}{dt}$. Тем самым константа β связывает механические действия текущего электричества с механическими действиями статического. Сравнивая те и другие силы, можно определить β . Эта величина имеет размерность $\frac{1}{\text{скорость}^2}$, и значение соответствующей «скорости» на основании чисто электромагнитных измерений Вебера и Кольрауша оказалось равным 310 000 км/сек. Однако ничего общего с какой-либо действительной скоростью эта «скорость» не имела.

Правда, Кирхгоф связал этот параметр с реальной скоростью. Еще из домаксвелловской теории он нашел, что именно с такой скоростью должно происходить волнообразное распространение тока и заряда вдоль кабеля. Все были поражены тогда совпадением полученной скорости со скоростью света, но связать их между собой не представлялось возможным и совпадение казалось случайным.

Из уравнений Максвелла следовало, что возможны электромагнитные волны и что скорость их распространения как раз равна тому параметру c , который был измерен Вебером и Кольраушем посредством чисто электрического опыта. По-видимому, именно это и заставило Максвелла прийти к выводу, что волны света — электромагнитные волны.

Маленькая деталь, сообщаемая Джинсом: Максвелл опубликовал свою теорию в 64—65 гг.; в письме к Фарадею (1861 г.) он пишет, что из данных Вебера и Кольрауша он вычислил упругость эфира в воздухе и нашел, что скорость электромагнитных волн должна равняться 193 088 *миль* в секунду, в то время как Физо получил непосредственным измерением для скорости света 193 118 *миль* в секунду. Откуда он взял эти числа — неизвестно. В опубликованной теории он приводит другие числа — 310 700 и 314 558 км/сек (Физо), дающие гораздо худшее совпадение. Хорошее совпадение, случайно существовавшее между результатами, первоначально известными Максвеллу, несомненно, сыграло чрезвычайно большую роль, ускорив созревание его гипотезы. Обратное случилось с Ньютоном, когда он, располагая неточным значением радиуса Земли, получил для притяжения Луны неправильный результат и на много лет забросил свою теорию всемирного тяготения.

Идеи Максвелла не снимали вопроса о механической теории эфира. Наоборот, проблема расширялась, так как с этих пор уже не было оптических и электрических явлений, не было светового и электромагнитного эфира. Существует один общий эфир, опти-

ка сделалась частью электродинамики, и открылась возможность судить об эфире на основании электромагнитных опытов. Таким образом, вопрос, как сказано, не был снят, а был усложнен, и прошло еще немало времени, прежде чем механические конструкции эфира потеряли интерес. Нужно было объяснить не только волны, но и все остальные электромагнитные явления. Появились работы, в которых эфир рассматривался уже даже не как среда, а как *машина*, строились модели с колесами и т. п. При этом возникали порой комичные трудности: если, например, связать электрическое поле с поступательным движением, то магнитное будет соответствовать вращению. Но тогда при переходе от точки к точке неизбежен разрыв сплошности. Чтобы обойти эту трудность, вводили промежуточные передаточные колеса (рис. 10).

Как замечает Борн, логически все это не могло иметь успеха, так как развитие теории шло в обратном направлении — к тому, чтобы механические свойства тел объяснить электрическим взаимодействием частиц. Но зачем же тогда опять сводить это взаимодействие к механике? В конце концов стали смотреть на эфир так, что он вполне характеризуется своими электромагнитными свойствами и что вредно требовать от него еще и механических свойств.

Не следует думать, что электромагнитная теория света сразу завоевала себе признание. В вопросе об отражении сам Максвелл натолкнулся на затруднения, которые лишь потом были полностью устранены Герцем. Но главное заключалось в том, что

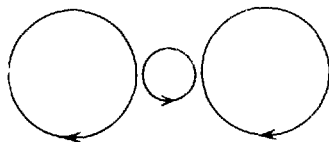


Рис. 10

электромагнитных волн не знали и до опытов Герца теория Максвелла оставалась предположением. (Первоначально Герц допустил ошибку в вычислениях и получил измеренное значение скорости электромагнитных волн на 40% меньше теоретического. Ошибка была указана Пуанкаре, и совпадение получилось прекрасное.)

После опытов Герца положение дела изменилось. Однако В. Томсон еще долгое время не мог примириться с электромагнитной теорией света. В своих лекциях в 1904 г. он говорит, что «так называемая электромагнитная теория света до сих пор нам

ни в чем не помогла»¹. Надо было быть гением (или наоборот), чтобы не соглашаться с электромагнитной теорией... Томсону это было позволительно. К началу этого столетия электромагнитная теория была уже всеми признана.

Нас интересует то обстоятельство, что в вопросе о явлениях в движущихся телах вышли на сцену электромагнитные явления. Конечно, частные вопросы такого рода возникали и раньше. Еще в 1838 г. Фарадей писал, что если посреди комнаты подвесить заряженный шар и потом заставить его двигаться в каком-либо направлении, то эффект будет тот же, как если бы мы возбудили ток в направлении движения. Однако Фарадей не смог доказать этого на опыте. Лишь в 1876 г. такой опыт был по предложению Гельмгольца сделан Роуландом².

Роуланд взял два позолоченных стеклянных диска (рис. 11), между которыми вращался оклеенный золотой фольгой эбонитовый диск. Обкладки на эбоните заряжались, скажем, положительно, а обкладки на стекле заземлялись. Такое устройство — в виде конденсаторов — позволило работать с большими зарядами. Астатическая магнитная стрелка была подвешена над верхней стеклянной крышкой, и при вращении эбонитового диска наблюдалось отклонение этой стрелки. Этот опыт очень точен.

Несколько лет спустя (1888 г.) Рентген сделал другой опыт — с поляризованным диэлектриком³. Между разноименно заряженными обкладками вращался диск из незаряженного изолятора (рис. 12). Отклонение стрелок магнетометра показывало, что и в этом случае возникает ток. Этот опыт очень труден и первоначально встретил возражения (Роуланд указывал на возможность

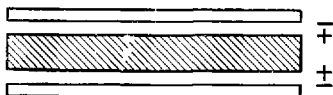


Рис. 11

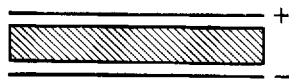


Рис. 12

утечки зарядов), но Рентген все их опроверг. Рентген добивался высокой чувствительности устройства для того, чтобы решить вопрос, увлекается ли эфир полностью или же так, как следует по Френелю. Однако он не смог достичь необходимой точности. Количественные результаты были достигнуты Эйхенвальдом в Москве в 1904 г. и много дали для теории относительности.

¹ Whittaker, стр. 297.

² Loc. cit., стр. 339

³ Loc. cit., стр. 426.

Вильсоном был сделан еще и такой опыт: он заставлял вращаться полый цилиндр из незаряженного диэлектрика в магнитном поле, направленном по оси (рис. 13). К металлическим обкладкам цилиндра присоединялся электрометр, который показывал, что при вращении цилиндра между обкладками появляется напряжение.

Что же говорят нам эти опыты? Какие выводы можно из них сделать?

Чтобы ответить на это, надо иметь теорию электромагнитных явлений в движущихся телах. Уравнения Максвелла не содержат в себе такой теории, ибо они относятся к неподвижным телам. Таким образом, возник вопрос о распространении этих уравнений на движущиеся тела. При этом надо было помнить, с одной стороны, об оптических вопросах, а с другой — о том, что вся электротехника основана на движении одних тел по отношению к другим (динамомшины, моторы). Это во-первых. Во-вторых, мы живем на Земле, и это обстоятельство выдвигает вопрос о том, как здесь протекают явления, т. е. как влияет на них равномерное прямолинейное движение.

Я уже здесь хотел бы обратить ваше внимание на следующее. На первый взгляд постановка вопроса кажется ясной. Но если немного глубже в нее вдуматься, то в ней самой обнаруживается известная трудность. Действительно, что значит покоящееся тело и тело движущееся? Относительно чего?

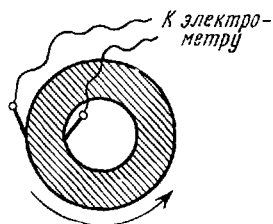


Рис. 13

Мы пока не будем глубже входить в этот вопрос. Будем считать, скажем, координатную систему «неподвижных» звезд той, к которой мы относим все движения.

Итак, вопрос о теории электромагнитных явлений в движущихся телах коренной и сам по себе (как вопрос о движущихся телах на Земле), и в отношении влияния движения самой Земли уточняется в указанной новой фазе следующим образом. Учение об электро-

магнитных явлениях в покоящихся телах вылилось в руках Максвелла в систему уравнений. Как обобщить эти уравнения на случай движущихся тел?

Максвелл сам неоднократно обращался к этому вопросу, но решение его, выдержанное в духе всей теории Максвелла, облек в определенную форму Герц. На этих герцевских уравнениях, которые сыграли несомненную роль в дальнейшем развитии, мы коротко и остановимся. Я не буду при этом строго придерживать-ся хода мыслей Герца, а изложу идею его теории по существу.

Герц исходит из максвелловских уравнений, которые должны быть справедливы для покоящихся тел. В интегральной форме эти уравнения таковы:

$$\oint_L H_s ds = \frac{1}{c} \left\{ \frac{d}{dt} \int_S D_n dS + \int_S J_n dS \right\},$$

$$\oint_L E_s ds = - \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_S B_n dS.$$

В дифференциальной форме:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right),$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

Без связи между \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{D} и \mathbf{E} эти уравнения не имеют смысла. Мы ограничимся изотропными телами, для которых

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}.$$

Мы имеем далее

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad \text{div } \mathbf{B} = 0.$$

Кроме этих соотношений между чисто электрическими величинами, для того чтобы их можно было связать с *силами*, задается еще выражение для энергии. Ее плотность

$$w = \frac{\mathbf{E} \mathbf{D} + \mathbf{H} \mathbf{B}}{2}.$$

Здесь все написано в так называемых рациональных лоренцовых единицах, в которых единица заряда в $\sqrt{4\pi}$ раз меньше абсолютной электростатической единицы, а единица напряженности — в $\sqrt{4\pi}$ раз больше. Благодаря этому в большинстве формул исчезает 4π , но, конечно, по существу ничего нового в этом нет.

Все написанные выше уравнения относятся к *неподвижным телам*.

Вообще любые уравнения имеют смысл лишь тогда, когда указано, в какой системе координат они справедливы. Утверждается, что система координат, в которой с достаточной точностью справедливы написанные уравнения, *существует*, а именно, что эта система, определяемая некоторыми тремя неподвижными точками, — система неподвижных звезд. Таким образом, написанные уравнения относятся к телам, неподвижным в этой системе. Между тем

они применялись — в сущности, непоследовательно — к движущимся телам, например к динамомашинам. Строго говоря, это недопустимо: к трансформатору их можно применять, но к динамо-машине нельзя. В подобных случаях поступали примерно следующим образом. Предположим, что мы имеем катушку и магнит. Возьмем магнит в положениях 1 и 2, возьмем разность магнитных потоков и разделим на $t_2 - t_1$. Таким образом, в выражение для электродвижущей силы косвенно войдет скорость движения магнита, но специфическое влияние движения — если оно существует — при таком квазистационарном подходе не учитывается. *Приближенно для малых скоростей* такой подход все же допустим, так как он дает в этом случае достаточно точные результаты. Но в описанных опытах это уже не годится, и необходимо было распространить уравнения на движущиеся тела.

Герц исходил из того, что *эфир полностью увлекается телами*. Замечу сразу же: в оптике это приводит к неверным выводам, так как, по Герцу, коэффициент увлечения должен равняться единице. Таким образом, герцевские уравнения не охватывают оптических явлений. Интересно и вместе с тем странно, что Герц — второй создатель электромагнитной теории света — отказался от объяснения оптических явлений. Он сам говорит, что хочет охватить только электромагнитные явления в узком смысле. Это первый недостаток его теории: заведомо исключается целый класс явлений.

Второй недостаток — теория Герца во многих вопросах не дает однозначного ответа. Наконец, в-третьих, по отношению к описанным выше опытам она дает просто неверный ответ.

Спрашивается, зачем же тогда рассматривать теорию Герца? Прежде всего важно и интересно знать, к каким заключениям приводит предположение о полном увлечении эфира, какие случаи находятся в согласии с этим предположением. Но, кроме того, сам характер постановки вопроса у Герца очень интересен и предвосхищает его постановку в теории относительности.

Сделаем здесь небольшое отступление и сформулируем нашу задачу. Ее можно разбить на две:

1) Как выглядят в нашей неподвижной системе координат уравнения для электромагнитных явлений, протекающих в движущихся телах? Это вопрос физический.

2) Если известны уравнения в неподвижной системе координат, то как они будут выглядеть в другой системе, например в движущейся (лаборатория на Земле и т. п.)?

Второй вопрос дорелятивистская физика считала вопросом простого пересчета от одной системы к другой, вопросом чисто кинематическим. Заслуга Эйнштейна в том, что он показал, что вся трудность именно во *втором* вопросе — как перейти от одной

ввести для координат обозначения x_i и x'_i ($i = 1, 2, 3$), и тогда преобразование запишется в виде

$$x'_i = a_i + \sum_{k=1}^3 b_{ik} x_k, \quad i = 1, 2, 3,$$

а соотношения ортогональности — в виде

$$\sum_{k=1}^3 b_{ik} b_{jk} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

Мы воспользовались евклидовой геометрией. В этом уже лежит известное ограничение, о котором прежде никто не говорил, но которое сохраняется, правда, и в специальной теории относительности, где мы также стоим на точке зрения евклидовой геометрии.

Чтобы выполнить преобразование уравнений движения к новой системе координат, нам теперь остается написать слагающие силы в новой системе. Мы утверждаем — и это *физическое* утверждение, — что слагающие силы в новой системе выражаются через ее слагающие в старой таким же образом, как разности новых координат x'_i через разности старых x_i , т. е.

$$X'_i = \sum_{k=1}^3 b_{ik} X_k, \quad i = 1, 2, 3.$$

Это физическое утверждение вот в каком смысле: пусть на веревке висит груз; что такое слагающие силы веса? Представим себе оси координат в виде гладких стержней, на которые надеты пружины. По растяжению этих пружин мы и судим о величине слагающих. Тогда *оказывается*, т. е. это говорит *опыт*, что растяжения пружин в новой и старой системах связаны между собой именно так, как записано выше для X_i и X'_i .

Физическую величину, определяемую тремя числами, которые при изменении координатной системы преобразуются как разности координат, мы называем *вектором*. Таким образом, опыт говорит нам, что сила есть вектор.