

ПЯТАЯ ЛЕКЦИЯ

(7|1 1934 г.)

Исторический обзор (продолжение): силы в электродинамике Герца, каковы должна быть правильная теория? Практический принцип относительности, электронная теория Лоренца, электромагнитный импульс и момент импульса, усреднение уравнений Лоренца для медленно движущихся тел, вопрос о выполнении практического принципа относительности в теории Лоренца

Мы разобрали теорию Герца. В общем дело обстояло так: уравнения Максвелла—Герца для движущихся тел инвариантны по отношению к преобразованию Галилея. т. е. они сохраняют свой вид во всех равномерно поступательно движущихся системах, а так как считается, что это преобразование отображает пространственно-временные соотношения в движущихся телах, то принцип относительности в теории Максвелла—Герца соблюден.

Громадное число опытов показывает, что поступательное движение Земли действительно не сказывается на электромагнитных явлениях, и здесь, таким образом, все как будто бы обстоит хорошо. Но теория Герца идет дальше: ее уравнения инвариантны при всяком движении системы как твердого тела. Однако имеется целый ряд опытов с телами, движущимися относительно Земли (опыты Физо, Эйхенвальда, Вильсона и др.), которые не подтверждают теории Герца, не объясняются ею совсем или же объясняются только качественно, а количественно получается типичное для теории расхождение (отсутствие коэффициента увлечения). В итоге теория Герца неудовлетворительна, не отвечает тем требованиям, которые надо предъявлять к физической теории.

Есть еще один принципиальный вопрос, на который Герц определенным образом отвечает, но этот ответ снова заставляет задуматься. Речь идет о силах, с которыми электромагнитное поле действует на тела. Рассмотрим для простоты только случай твердых тел, т. е. оставим в стороне деформации. Принципиально это упрощение ничего не меняет.

В электродинамике Максвелла—Герца силы, действующие в поле на тело, всегда могут быть сведены к натяжениям, т. е. к *поверхностным* силам плотности

$$\mathbf{T} = \mathbf{E}(\epsilon\mathbf{E}, \mathbf{n}) - \frac{\mathbf{n}\epsilon E^2}{2} + \mathbf{H}(\mu\mathbf{H}, \mathbf{n}) - \frac{\mathbf{n}\mu H^2}{2}.$$

Уравнения движения какой-либо системы тел, заключенных в объеме V , ограниченном поверхностью S , имеют при этом вид

$$\frac{d}{dt} \sum m\mathbf{v} = \oint_S \mathbf{T} dS,$$

$$\frac{d}{dt} \sum [\mathbf{r}, m\mathbf{v}] = \oint_S [\mathbf{r}, \mathbf{T}] dS.$$

Отсюда можно сделать следующее заключение: если поверхность S настолько удалена, что на ней поле равно нулю (замкнутая система), то правые части исчезают, т. е. равнодействующие всех сил и всех моментов сил, действующих на замкнутую систему тел, равны нулю. Иначе можно сказать, что в замкнутой системе тел результирующее количество движения и результирующий момент количества движения постоянны:

$$\sum m\mathbf{v} = \text{const}, \quad \sum [\mathbf{r}, m\mathbf{v}] = \text{const}.$$

Это является выражением III закона Ньютона — равенства действия и противодействия. Таким образом, герцевские силы гарантируют выполнение III закона Ньютона и с этой точки зрения они могут нас удовлетворить. Но если рассчитать соответствующие объемные силы, то плотность объемных сил будет

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2,$$

где \mathbf{f}_1 — сила, которая при наличии тел отлична от нуля как в переменном, так и в постоянном поле, но которая исчезает в отсутствие вещества. Сила же \mathbf{f}_2 имеет следующий вид:

$$\mathbf{f}_2 = \frac{\varepsilon_0 \mu_0}{c^2} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t},$$

где $\mathbf{S} = c[\mathbf{E}, \mathbf{H}]$ — вектор Пойнтинга. Таким образом, \mathbf{f}_2 не исчезает и в пустоте, если только поле переменное, т. е. по Герцу силы действуют и на эфир. Только благодаря этому в переменных полях соблюдается закон равенства действия и противодействия. То, что по Герцу на эфир должны действовать силы, следует из конечной скорости распространения. Пусть, например, плоская поверхность, помещенная в вакууме, односторонне излучает плоскую электромагнитную волну (рис. 25). Благодаря реакции поверхность начнет дви-

гаться, и если центр тяжести остается в покое, то только потому, что такая же сила приложена в поле волны к эфиру. Итак, выполнение III закона Ньютона покупается ценой действия сил на эфир. Но никому и никогда не удавалось обнаружить это действие, заставить эфир двигаться, хотя делалось множество таких опытов (например, прохождение света около быстро вращающегося диска). Герц исходил из того, что эфир — такая же среда, как и всякое другое вещество, и здесь этот взгляд мстит за себя. Нет проверки этого, нет реального содержания. Все это, равно как и то обстоятельство, что сколь угодно разреженное тело должно полностью увлекать эфир, ставит концепцию Герца под подозрение. Наконец, прямое противоречие с опытом окончательно заставляет от нее отказаться.

Между прочим, Ф. Франк показал, что требования, чтобы уравнения для равномерно и прямолинейно движущихся тел 1) обращались для покоящихся тел в уравнения Максвелла и 2) были инвариантны по отношению к преобразованию Галилея, однозначно приводят к уравнениям Герца. Поэтому закрадывается сомнение — можно ли вообще удовлетворить принципу относительности в электродинамике. Это сомнение было уже у Герца; он кончает свою статью словами, что „правильная теория, вероятно, будет различать движение тел и движение эфира“. Именно по этому пути пошел Лоренц.

Чего же нужно требовать от правильной теории?

Мы заранее знаем, что она не будет удовлетворять принципу относительности: этому учит уже опыт Физо. Для неподвижного наблюдателя скорость света в покоящейся воде равна c_1 , а в движущейся $c_1 + w(1 - n^{-2})$. Это говорит опыт. Принцип же относительности требует, чтобы для наблюдателя, движущегося вместе с водой, скорость света была c_1 . Но если галилеево преобразование верно, если оно правильно дает переход от неподвижной системы к движущейся, то для наблюдателя, движущегося вместе с водой, скорость будет

$$[c_1 + w(1 - n^{-2})] - w = c_1 - wn^{-2},$$

а не c_1 , т. е. принцип относительности неверен. Можно было бы возразить, что для применимости принципа относительности надо воспроизвести одинаковые условия также и в отношении источника

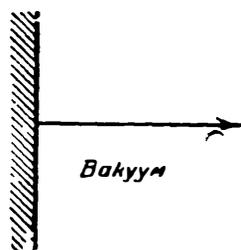


Рис. 25.

света, т. е. при движении воды (для того чтобы скорость света относительно нее была c ,) надо заставить и источник двигаться вместе с водой. Однако это не спасает дела, ибо мы исходим из *независимости скорости света от движения источника*. Если бы такая зависимость была, подобно тому как в механике скорость снаряда складывается со скоростью пушки, то все могло бы быть в порядке. Но опыты, как мы увидим далее, полностью подтверждают, что скорость света не зависит от движения источника. Исходя из этого факта, мы должны заключить, что либо галилеево преобразование верно, и тогда в электродинамике не может быть сохранен принцип относительности, либо принцип относительности остается в силе, но тогда надо отказаться от галилеева преобразования. На этот последний шаг еще никто не мог осмелиться. Сохраняя же преобразование Галилея, мы вынуждены оставить принцип относительности. Но ведь опыты говорят, что движение Земли не сказывается на скорости света! Что значит „не сказывается“?

Посмотрим еще раз, что говорят опыты.

Движение Земли не влияет на электрические и оптические явления... С какой точностью? Ведь до сих пор мы рассматривали только такие опыты, которые были рассчитаны на обнаружение эффектов первого порядка относительно w/c . Вот с *этой* точностью мы знаем, что движение Земли не влияет. Правда, опыт Физо дает отличие уже в первом порядке, но по отношению к движению Земли такого опыта не делали. Мы, конечно, *можем* такой опыт сделать, но сначала сделайте, а тогда будем о нем говорить. Далее, еще никогда не делались опыты с двумя часами (эти опыты теория относительности вообще квалифицирует особо). Все опыты, фактически сделанные, относились к сравнению пути *двух* лучей и все делались в *первом* порядке w/c .

Вот с этой оговоркой, что не все опыты делались, а те, которые делались, имели точность до первого порядка, поступательное движение Земли не сказывается на электромагнитных явлениях. Назовем это „практическим принципом относительности“. Опыт Физо показывает, что, сохраняя галилеево преобразование, мы не можем удовлетворить точному принципу относительности (независимость электромагнитных явлений в любых опытах, в любом порядке), но теория *должна объяснить практический принцип*. Можно ли построить *такую* теорию? Эту задачу поставил и разрешил Лоренц.

К этому времени появился целый ряд новых экспериментальных фактов. Интерес был привлечен к явлениям электрического разряда

в газах, к катодным лучам, которые были открыты Плюкером еще в 1859 г., но природа которых была установлена именно в это время. Герц считал их продольными электромагнитными волнами. Оказалось, что это движущиеся заряженные тельца, масса которых зависит от скорости, причем они имеют различные продольную и поперечную массу. Помимо объяснения практического принципа относительности, теория Лоренца должна была охватить огромный круг вопросов, и она блестяще с этим справилась. Она сумела объяснить множество явлений и в неподвижных телах (дисперсию и абсорбцию, Зееман-эффект и т. д.), но основное в теории Лоренца — это движущиеся тела, для которых она и была главным образом развита. Фундаментальная работа Лоренца так и называется „Versuch einer Theorie der elektrischen und magnetischen Erscheinungen in bewegten Körpern“. Именно эта сторона теории Лоренца — явления в движущихся телах — будет интересовать и нас.

Лоренц постулирует существование всепроникающего, однородного, изотропного и неподвижного эфира. Покоящаяся относительно эфира система отсчета — это особая, выделенная система. Таким образом, Лоренц сознательно отказывается от принципа относительности.

Эфир у Лоренца — единственный диэлектрик в максвелловском смысле слова, тела же представляют собой совокупности положительных и отрицательных заряженных частиц. Отрицательные частицы — электроны — все одинаковы по своей массе (когда они покоятся относительно эфира) и по величине заряда. Это именно те частицы, поток которых образует катодные „лучи“. Положительные частицы всегда связаны с „весомой“ материей, с веществом. Свойства тел различны в силу разного их построения из этих положительных и отрицательных частиц. Таким образом, в мире нет ничего кроме этих зарядов и эфира. Проводники — это тела, в которых электроны в промежутках между соударениями могут свободно двигаться. В диэлектриках каждая молекула нейтральна, причем разноименные заряды связаны в ней какими-то силами, которые в первом приближении можно считать квазиупругими. Кроме того, электроны могут вращаться вокруг собственных осей и совершать орбитальные движения в молекулах, чем объясняются магнитные свойства тел.

Теперь, с точки зрения квантовой теории, все это нам кажется, конечно, немного наивным и крайне упрощенным, но эта ясная и простая картина дала чрезвычайно много. Надо заметить, что она куда более стройна, чем современная квантовая теория (конечно, надо учесть,

что последняя еще слишком нова), но сейчас она, разумеется, может рассматриваться только как модель.

Мы отвлечемся от магнитных свойств, ибо пара- и диамагнетики ведут себя почти как вакуум (говоря по Максвеллу, $\mu = 1$), а поведения ферромагнетиков теория Лоренца вообще объяснить не может. Точно так же мы исключаем из рассмотрения не так давно открытые так называемые сегнетоэлектрики, аналогичные ферромагнетикам, но не по своим магнитным, а по электрическим свойствам.

Пусть \mathbf{e} и \mathbf{h} — напряженности электрического и магнитного полей, характеризующие состояние чистого эфира, вакуума. Для них Лоренц сохраняет максвелловские уравнения для пустоты

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{h} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}, & \operatorname{rot} \mathbf{e} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \mathbf{e} &= 0, & \operatorname{div} \mathbf{h} &= 0. \end{aligned}$$

Как же связаны \mathbf{e} и \mathbf{h} с частицами, с зарядами? Здесь по существу имеется два вопроса: 1) как поле создается зарядами и 2) как поле действует на заряды. На первый вопрос Лоренц отвечает следующим образом. Там, где плотность заряда $\rho \neq 0$,

$$\operatorname{div} \mathbf{e} = \rho.$$

Далее, из опытов Роуленда Лоренц заимствует эквивалентность движущегося заряда току и полагает поэтому

$$\operatorname{rot} \mathbf{h} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \right).$$

Написанные уравнения говорят о том, как поле создается движущимися зарядами. Второй же вопрос — о действии поля на движущиеся заряды — решается тем, что на основании закона Био—Савара Лоренц постулирует следующее выражение для плотности силы:

$$\mathbf{f} = \rho \left(\mathbf{e} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{h}] \right)$$

В совокупности приведенные уравнения должны описать решительно всё, включая и явления в движущихся телах, ибо движение в них уже включено. В этом смысле они аналогичны уравнениям Ньютона. Лоренцовы уравнения сохраняются и в теории относительности, с ними работают и поныне.

Необходимо заметить следующее. Во-первых, концепция, согласно которой вся материя (вернее проводники, ибо до Максвелла об электрических свойствах диэлектриков вообще знали мало) построена из электрических зарядов, движущихся в вакууме, не была новой. Из нее исходили уже теории Вебера, Римана, Клаузиуса. Но от их воззрений лоренцову теорию принципиально отличает то, что взаимодействие частиц происходит по Максвеллу, т. е. действие распространяется в поле с *конечной* скоростью, в то время как в старых теориях принималось мгновенное дальнеедействие.

Во-вторых, в противоположность Максвеллу—Герцу, Лоренц принципиально *отказывается от действия сил на эфир*: сила пропорциональна ρ и там, где $\rho = 0$, она обращается в нуль. Этот отказ очень важен и влечет за собой глубокие следствия.

Плотность \mathbf{f} лоренцовой силы можно преобразовать к виду

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}^* - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t}, \quad (6)$$

где \mathbf{S} — вектор Пойнтинга, а \mathbf{f}^* — плотность силы по Герцу. Таким образом, уничтожается как раз тот член, который давал у Герца силу, действующую на эфир. Из (6) следует, что результирующая сила \mathbf{F} и результирующий момент \mathbf{N} , действующие на заряды, заключенные в объеме V , ограниченном поверхностью S , равны соответственно

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV = \oint_S \mathbf{T} dS - \frac{d}{dt} \int_V \frac{\mathbf{S}}{c^2} dV,$$

$$\mathbf{N} = \int_V [\mathbf{r}, \mathbf{f}] dV = \oint_S [\mathbf{r}, \mathbf{T}] dS - \frac{d}{dt} \int_V \frac{[\mathbf{r}, \mathbf{S}]}{c^2} dV.$$

Введем полное количество движения \mathbf{G}_0 и полный момент количества движения \mathbf{Y}_0 тел, находящихся в нашем объеме V :

$$\mathbf{G}_0 = \sum m\mathbf{v}, \quad \mathbf{Y}_0 = \sum [\mathbf{r}, m\mathbf{v}].$$

Тогда уравнения движения для всей системы зарядов в объеме V будут

$$\frac{d\mathbf{G}_0}{dt} = \mathbf{F} = \oint_S \mathbf{T} dS - \frac{d}{dt} \int_V \frac{\mathbf{S}}{c^2} dV,$$

$$\frac{d\mathbf{Y}_0}{dt} = \mathbf{N} = \oint_S [\mathbf{r}, \mathbf{T}] dS - \frac{d}{dt} \int_V \frac{[\mathbf{r}, \mathbf{S}]}{c^2} dV.$$

Если теперь мы поставим вопрос о полной силе, действующей на замкнутую систему ($\oint \mathbf{s} = 0$), то, поскольку объемные интегралы,

вообще говоря, отличны от нуля, мы получим, что сумма всех сил отлична от нуля, т. е. закон равенства действия и противодействия не выполнен. Односторонне излучающая плоскость начнет двигаться под действием реакции и компенсации не будет. Итак, лоренцова теория ведет к тому, что третий закон Ньютона, по крайней мере в обычной своей форме, не имеет места. Центр масс системы может ускоряться без наличия внешних сил, тело само может „вытащить себя за волосы“. Иначе можно сказать, что \mathbf{G}_0 и \mathbf{Y}_0 в замкнутой системе не постоянны.

Абрагам указал, однако, на то, что можно так обобщить понятия количества движения и его момента, чтобы по отношению к обобщенным величинам имел место закон сохранения. Если ввести электромагнитный импульс

$$\mathbf{G} = \int_V \frac{\mathbf{S}}{c^2} dV,$$

локализованный в эфире, с объемной плотностью

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{S}}{c^2}$$

и момент электромагнитного импульса

$$\mathbf{Y} = \int_V [\mathbf{r}, \mathbf{g}] dV,$$

то для замкнутой системы

$$\frac{d\mathbf{G}_0}{dt} = -\frac{d\mathbf{G}}{dt}, \quad \frac{d\mathbf{Y}_0}{dt} = -\frac{d\mathbf{Y}}{dt}.$$

Принимая \mathbf{G} и \mathbf{Y} всерьез, мы получаем обобщенные законы сохранения импульса и момента импульса — сохраняется лишь сумма соответствующих механических и электромагнитных величин

$$\mathbf{G}_0 + \mathbf{G} = \text{const}, \quad \mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y} = \text{const}.$$

Мы видим, что вектор Пойнтинга приобретает, помимо своего энергетического смысла, еще значение плотности импульса. Но, неза-

висимо от этого толкования, полученный результат имеет ряд интересных следствий (давление электромагнитных волн, отдача при излучении и т. д.). Интеграл $\int S_n dS$ дает нам поток энергии однозначно лишь в случае замкнутой поверхности. Для незамкнутой поверхности $\int S_n dS$ уже не выражает потока энергии и лишь иногда дает приближенно правильную величину. В других случаях такое употребление \mathbf{S} приводит к парадоксам. Пока \mathbf{S} толкуется только как плотность потока энергии, выражение $\mathbf{S} = c[\mathbf{e}, \mathbf{h}]$ определено лишь с точностью до ротора произвольного вектора, так как

$$\oint_S \text{rot}_n \mathbf{a} \cdot d\mathbf{S} \equiv 0.$$

Ничто не обязывает нас считать, что именно $c[\mathbf{e}, \mathbf{h}]$, а не $c[\mathbf{e}, \mathbf{h}] + \text{rot } \mathbf{a}$ есть плотность потока в данной точке. Но если \mathbf{S} выражает плотность электромагнитного импульса, то здесь для такой неоднозначности уже нет места.

Рассмотрим такой пример: возьмем цилиндрический конденсатор и направим по его оси однородное магнитное поле. Легко видеть, что поток \mathbf{S} через всякую замкнутую поверхность равен нулю, но момент электромагнитного импульса отличен от нуля. Следовательно, если мы будем заряжать этот конденсатор, когда он уже находится в магнитном поле (до зарядки $\mathbf{Y}_0 = 0$, $\mathbf{Y} = 0$), то, поскольку $\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y} = 0$, а мы создаем $\mathbf{Y} = \int_V \left[\mathbf{r}, \frac{\mathbf{S}}{c^2} \right] dV$, должен будет

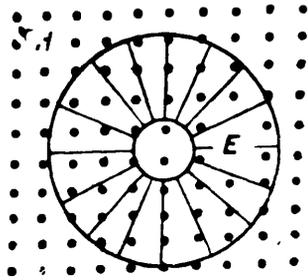


Рис. 26.

появиться механический момент количества движения $\mathbf{Y}_0 = -\mathbf{Y}$, т. е. конденсатор должен закрутиться. Наблюдать этот эффект на опыте очень трудно, так как он чрезвычайно мал, но принципиально он наблюдаем и, следовательно, позволяет определить величину \mathbf{S} .

Конечно, здесь ясно в чем дело: если мы осуществляем зарядку тем, что тянем электроны по радиусу, то они заворачивают в магнитном поле и при остановке отдают свой импульс (его тангенциальная слагающая и вызывает вращение). Однако наше толкование обобщает законы сохранения, а нас интересует сейчас именно эта сторона дела. Аналогичное обобщение закона сохранения энергии

(в замкнутой системе постоянна сумма механической и электромагнитной энергий) для нас привычно. Почему же не сделать аналогичное обобщение для импульса и его момента? Мы это сделали и ввели электромагнитные импульс и момент импульса. Мы увидим в дальнейшем, что в теории относительности эти обобщения вообще не независимы, а составляют один шаг.

Уравнения Лоренца написаны для истинного, микроскопического поля. Но мы не можем знать, как движутся все элементарные заряды, да это и не нужно: мы всегда измеряем средние значения, работаем со средними величинами. Как же напишутся наши электромагнитные уравнения для макроскопических, усредненных величин? При усреднении надо будет учесть строение вещества, отразить основные черты структуры проводников и диэлектриков (от магнетиков мы отвлекаемся). Мы рассмотрим сразу же общий случай движущихся тел. Это значит, что средняя скорость всех зарядов, составляющих тело, отлична от нуля. Если мы обозначим ее \mathbf{w} , то истинная скорость заряда будет складываться из средней скорости тела \mathbf{w} и из скорости заряда относительно тела \mathbf{u}

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} + \mathbf{u}.$$

Обозначим плотность заряда электронов проводимости через ρ_i , а среднюю плотность их заряда $\hat{\rho}_i$ ($\hat{}$ будет обозначать усреднение) через $\rho: \hat{\rho}_i = \rho$, причем ρ — это максвелловские свободные заряды. Максвелловская плотность тока проводимости по определению $\hat{\rho}_i \mathbf{u} = \mathbf{J}$. Если имеются, кроме свободных зарядов, еще и связанные (рис. 27), то момент одной молекулы будет

$$\mathbf{p} = \sum_i e_i \mathbf{r}_i,$$

где \mathbf{r}_i — расстояние заряда e_i от произвольно выбранного центра нейтральной молекулы. Средний момент единицы объема или поляризация есть

$$\mathbf{P} = N\mathbf{p},$$

где N — концентрация зарядов с моментом \mathbf{p} . Легко показать, что средняя плотность ρ_p связанных (поляризационных) зарядов будет

$$\hat{\rho}_p = -\operatorname{div} \mathbf{P}.$$

Таким образом, средняя объемная плотность связанных зарядов отлична от нуля только в неоднородном поле. Введем далее для усредненных напряженностей обозначения

$$\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{E}, \quad \hat{\mathbf{h}} = \mathbf{H}.$$

И, наконец, нам необходима связь \mathbf{P} с напряженностями полей. Лоренц предполагает, что в диполях диэлектрика действуют квазиупругие силы. Тогда эта связь линейна, и \mathbf{P} пропорционально средней лоренцовой силе $\mathbf{E} + \frac{1}{c}[\mathbf{w}, \mathbf{H}]$. Коэффициент пропорциональности мы возьмем в виде $\epsilon - 1$, где ϵ зависит от предположений о строении материи. Можно считать вообще, что все уравнение

$$\mathbf{P} = (\epsilon - 1) \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{w}, \mathbf{H}] \right)$$

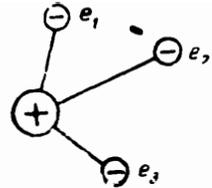


Рис 27

является просто одним из постулатов, касающихся строения материи. Мы увидим далее, почему выбор коэффициента сделан именно в таком виде ($\epsilon - 1$).

Усреднение лоренцовых уравнений дает

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \mathbf{J} + \epsilon \mathbf{w} + \text{rot} [\mathbf{P}, \mathbf{w}] \right),$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t},$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0, \quad \text{div } \mathbf{E} = \rho - \text{div } \mathbf{P}.$$

Мы должны требовать от этих уравнений, чтобы для неподвижных тел ($\mathbf{w} = 0$) они совпадали с максвелловскими, т. е. принимали вид

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

$$\text{div } \mathbf{H} = 0, \quad \text{div } \epsilon \mathbf{E} = \rho.$$

Очевидно, при нашем выборе \mathbf{P} это выполнено, так как при $\mathbf{w} = 0$ мы имеем $\mathbf{P} = (\epsilon - 1) \mathbf{E}$ и, таким образом, под ϵ надо понимать просто максвелловскую диэлектрическую постоянную.

Но ведь мы хотели получить больше, мы хотели объяснить абсорбцию, дисперсию и т. п. — явления, которых не объясняет

теория Максвелла. Почему этого нет? Потому, что мы предположили, что отклонение зарядов в молекулах диэлектрика от их положений равновесия просто пропорционально действующей силе. Мы не учли, таким образом, массы связанных электронов, пренебрегли инерцией в уравнении движения связанного электрона. В быстропеременных полях это недопустимо, и если бы мы этого не сделали, то мы получили бы ϵ как функцию частоты, т. е. дисперсию.

Перейдем теперь к тому, что нас интересует в первую очередь — к движущимся телам. Как здесь обстоит дело с толкованием электромагнитных опытов в движущихся телах? Возьмем, например, опыт Рентгена. У Герца мы имели для плотности тока Рентгена

$$\text{rot}[\mathbf{D}, \mathbf{w}] = \text{rot}[\epsilon \mathbf{E}, \mathbf{w}].$$

Здесь же имеем

$$\text{rot}[\mathbf{P}, \mathbf{w}] \approx \text{rot}[(\epsilon - 1) \mathbf{E}, \mathbf{w}]$$

(с точностью до членов первого порядка относительно \mathbf{w}). Таким образом, в согласии с результатами Эйхенвальда, плотность тока Рентгена пропорциональна $\epsilon - 1$, а не ϵ . Мы указали при рассмотрении теории Герца, что ее можно приспособить к опытам, если формально взять вместо \mathbf{w} только часть скорости, а именно увлекаемую (френелевскую) часть. Здесь это отпадает. По Лоренцу дело не в \mathbf{w} , а в \mathbf{P} . \mathbf{w} — полная скорость материи, но эфир не увлекаем, а движутся только заряды, и это дает именно то, что нужно. Таким образом, Лоренц совершенно естественно объясняет этот опыт, равно как и все остальные электромагнитные опыты. В частности, опыт Вильсона объясняется чрезвычайно просто и наглядно тем, что поляризация движущегося в магнитном поле диэлектрика обуславливается силой $\frac{(\epsilon - 1)}{c} [\mathbf{w}, \mathbf{H}]$.

Теперь — самое интересное: как теория Лоренца осуществляет практический принцип относительности? Мы знаем, что точный принцип относительности заведомо не будет иметь места. Если мы, желая ответить на вопрос о том, как будут протекать электромагнитные явления для наблюдателя, движущегося вместе с телами, применим к усредненным лоренцовым уравнениям преобразование Галилея

$$x_i' = x_i - w_i t, \quad t' = t,$$

с добавлением условий

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E}, \quad \mathbf{H}' = \mathbf{H},$$

т. е. будем считать напряженности абсолютными, то уравнения окажутся инвариантными. Это дает прямой расчет, но это можно усмотреть хотя бы из того, что лоренцовы уравнения отличны от герцевских уравнений, которые инвариантны.

Можно было бы пойти по пути признания неинвариантности уравнений и ограничиться показом того, что в *опытах* имеет место инвариантность. Но Лоренц, хотя он и не был математиком, к счастью, пошел другим путем. Считая, как и все, что физический смысл имеет только галилеевское преобразование, он поставил вопрос о формальных, лишенных физического содержания преобразованиях, по отношению к которым его уравнения были бы инвариантны. В качестве первого шага он берет преобразование

$$x_i' = x_i - w_i t, \quad t' = t - \frac{(\mathbf{w}, \mathbf{x}')}{c^2},$$

формально вводя новую переменную t' . В теории Лоренца она не имеет физического смысла и является только вспомогательной величиной. Физический смысл попрежнему имеет только t и толковать результаты надо будет в переменных \mathbf{x}' и t .

Самое интересное — то, что по отношению и к этому преобразованию лоренцовы уравнения тоже инвариантны...

ШЕСТАЯ ЛЕКЦИЯ

(13,1 1934 г.)

Краткое резюме. Исторический обзор (продолжение) метод преобразований, объяснение опыта Физо и частичного увлечения эфира в теории Лоренца, опыт Майкельсона, опыт Трутона и Нобля, гипотеза сокращения, развитие метода преобразований, необходимость отказа от преобразования Галилея

Мы установили общее положение: если мы хотим сохранить и независимость скорости света от движения источника и преобразование Галилея, и в то же время хотим остаться в согласии с опытом, то нужно отказаться от принципа относительности. На этот путь