

I

ИСТОКИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

1. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

Специальная, или частная, теория относительности, имеющая дело с инерциальными движениями, выросла из электродинамики движущихся сред. Еще до возникновения специальной теории относительности делались попытки осмыслить эмпирические факты в области электродинамики движущихся и покоящихся сред с единой точки зрения. Последовательное объяснение всех известных эмпирических данных оказалось возможным лишь на основе коренных изменений наших воззрений на пространство и время и постулирования конечной скорости распространения взаимодействий. Одновременно кардинальное значение приобрело поле как физическая реальность. Изменения положения одной из частиц могут сказываться на состоянии движения других частиц лишь через некоторый интервал времени и лишь через посредство поля. Поле с точки зрения теории относительности отнюдь не идентично эфиру Фарадея — Максвелла.

Каковы же исторические пути развития электродинамики движущихся сред, приведшие к созданию в начале XX в. специальной теории относительности?

Основой развития электродинамики в целом послужило открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции. Детальное изучение магнитных и электрических явлений привело Фарадея к представлению о реально существующих силовых линиях поля. Фарадей отказался от господствовавшей в то время точки зрения о «действии на расстоянии» и выдвинул представление о действии через среду — «мировой эфир».

В 1873 г. Максвелл в предисловии к первому изданию своего «Трактата об электричестве и магнетизме» писал: «Я знал, что между пониманием явлений Фарадеем и концепцией математиков предполагалось наличие такой разницы, что ни тот, ни другие не были удовлетворены языком друг друга... Фарадей видел силовые линии, пронизывающие все пространство, там,

где математики видели центры сил, притягивающих на расстоянии; Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния; Фарадей предполагал источник и причину явлений в реальных действиях, протекающих в среде, они же были удовлетворены тем, что нашли их в силе действия на расстоянии, приписанной электрическим флюидам» [1, стр. 349].

Полемика Фарадея с Эпинусом, Пуассоном и другими, допускаящими действие на расстоянии, и утверждение, что индукция во всех случаях представляет собой не что иное, как действие смежных частиц, дала импульс исследованиям по обособлению электродинамики. Одновременно Фарадей обратил внимание и на частные вопросы электродинамики движущихся тел. В 1838 г. он писал, что если подвесить заряженный шар и заставить его двигаться в определенном направлении, то эффект будет тождествен тому, как если бы мы возбудили ток в направлении движения шара. Осуществить этот эксперимент Фарадею не удалось.

Максвелл писал, что, изучая труды Фарадея, он установил, что фарадеевская трактовка явлений была также математической, хотя и не была представлена в форме общепринятых математических символов. Развивая идеи Фарадея о роли диэлектрической среды и эфира, Максвелл выразил в математической форме сущность всей совокупности экспериментов, связанных с электромагнитными явлениями.

Однако роль Максвелла далеко не ограничивается глубокой теоретической разработкой идей Фарадея. На основе экспериментальных данных Фарадея Максвелл мог написать лишь уравнения

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \text{ и } \operatorname{rot} \mathbf{H} = 0,$$

однако Максвелл записывает уравнение

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

которое в то время никакими опытами не подтверждалось. Эта гениальная догадка позволила Максвеллу прийти к волновому уравнению и к электромагнитной теории света (см., например, [1a]). В процессе создания Максвеллом теории электромагнитного поля условно различают три переплетающихся между собой этапа, неравноценных по своей значимости: 1) период ознакомления и осмысливания экспериментальных и теоретических трудов Фарадея; 2) период конструирования механических моделей электромагнитного поля; 3) поиски математических методов.

В уже сформулированной теории Максвелла различают: а) гипотетические положения; б) получение уравнений на основе исходных, в значительной степени гипотетических положений, в) группу уравнений, связывающих известные из опыта величины.

Гипотетические положения в теории Максвелла и метод получения Максвеллом уравнений поля подвергались критике со стороны Герца, Больцмана, Пуанкаре и многих других физиков второй половины XIX в. Физики отказались от попыток наглядной механической интерпретации уравнений Максвелла. Постепенно выяснилось, что физическая сущность уравнений Максвелла, описывающих структуру электромагнитного поля, глубоко и органически связана с опытными фактами.

Эйнштейн и Инфельд писали, что законы Максвелла не связывают, как это имеет место в законе Ньютона, два широко разделенных события, «они не связывают случившееся *здесь* с условиями *там*. Поле *здесь* и *теперь* зависит от поля в непосредственном соседстве в момент, только что протекший... Изучение уравнений Максвелла с математической стороны показывает, что из них можно сделать новые и действительно неожиданные заключения, а всю теорию можно испытать на гораздо более высоком уровне, потому что теоретические следствия теперь имеют количественный характер и обосновываются всей цепью логических аргументов» [2].

Признание определяющей роли среды в электромагнитных процессах, введение тока смещения как источника магнитного поля наряду с конвекционным током, констатация конечной скорости распространения электромагнитных взаимодействий — основные элементы теории Максвелла — были проанализированы и осмыслены с точки зрения теории относительности. Кроме того, была устранена непоследовательность электродинамики Максвелла, когда наряду с утверждением о конечной скорости распространения взаимодействий оперировали понятием одновременности, предполагая существование мгновенно распространяющихся сигналов.

Однако задолго до возникновения теории относительности теория электромагнитных явлений Фарадея — Максвелла прошла во второй половине XIX в. длительный путь усовершенствования. В 1890 г. Герц опубликовал статью «Об основных уравнениях электродинамики для покоящихся сред», в которой уравнениям Максвелла придан симметричный вид. «В 1890 г., — пишет Лауэ, — Генрих Герц (1857—1894) придал закону индукции Фарадея форму дифференциального уравнения... Тем самым система уравнений Максвелла, в которой мы вместе с Герцем усматриваем сущность теории Максвелла, приняла такой эстетически совершенный симметричный вид, который, принимая во внимание всеобъемлющее физическое содержание системы, привлекает нас почти как очевидность» [3].

Основные уравнения Максвелла могут быть разделены на две группы. Первая группа однородных уравнений связывает электрическое и магнитное поля одно с другим:

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0; \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}.$$

Вторая же группа связывает поля одно с другим и с распределением электрических зарядов и токов в пространстве:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}; \operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho.$$

Здесь $\mathbf{E}(t, x, y, z)$ и $\mathbf{H}(t, x, y, z)$ — напряженности электрического и магнитного полей; $\rho = \rho(t, x, y, z)$ — плотность электрического заряда; $\mathbf{j} = \mathbf{j}(t, x, y, z)$ — вектор плотности электрического тока.

Обе эти группы уравнений инвариантны при переходе от одной инерциальной системы к другой относительно преобразований Галилея. В 1900 г., через десять лет после того, как Герц и Хевисайд придали уравнениям Максвелла стройную и математически более изящную форму, Лармор нашел преобразование, по отношению к которому уравнения Максвелла в вакууме являются инвариантными. Эти преобразования независимо были получены также Лоренцом и носят теперь название преобразований Лоренца.

Сформулировав основные положения электродинамики покоящихся сред, Герц приступил к анализу явлений в движущихся средах. Уже 7 марта 1890 г. мы находим в дневнике Герца запись о его размышлениях относительно уравнений электродинамики в движущихся средах. В том же году Герц публикует статью «Об основных уравнениях электродинамики для движущихся тел».

Известно, что уравнения Максвелла в интегральной форме

$$\begin{aligned} \frac{4\pi}{c} \int \sigma E_n dS + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \epsilon E_n dS &= \int \operatorname{rot}_n \mathbf{H} dS; \\ \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int \mu H_n dS &= - \int \operatorname{rot}_n \mathbf{E} dS \end{aligned}$$

относятся к неподвижной в пространстве поверхности S (здесь ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости; σ — проводимость). Герц же предполагает, что в движущейся системе отсчета уравнения остаются справедливыми, но относятся к поверхности, жестко связанной с движущимися телами.

То, что поверхность S у Герца жестко связана с частицами движущейся материи, весьма существенно, поскольку поток через неподвижный и поток через движущийся контур различны. Изменение потока через движущийся контур складывается

из изменения потока, обусловленного зависимостью поля от времени, и изменения, вызванного перемещением контура. При этом предположении нетрудно перейти к дифференциальной форме уравнений Герца:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \operatorname{rot} [\mathbf{D}\mathbf{u}] + \mathbf{u} \operatorname{div} \mathbf{D} + \mathbf{J} \right\}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \left\{ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} [\mathbf{B}\mathbf{u}] \right\}; \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \end{aligned}$$

где $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$; $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$; $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$; \mathbf{u} — скорость. Это — уравнения Герца для движущихся тел.

Как отметил Л. И. Мандельштам, инвариантность уравнений Герца относительно преобразований Галилея — Ньютона следует из самого вида этих уравнений в интегральной форме. Поверхность движется вместе с телом, и если мы перемещаемся вместе с телом, то поверхность относительно нас неподвижна; следовательно, в любой системе отсчета, которая перемещается вместе с телами, справедливы обычные уравнения Максвелла. Если система координат вращается, то относительно наблюдателя по-прежнему все неподвижно, и, следовательно, в противоположность уравнениям механики уравнения Герца инвариантны относительно любого вращения и любого ускоренного движения рассматриваемой системы отсчета. Герц исходит из предположений, что напряженности электрического и магнитного полей не меняются при переходе к другой системе отсчета (при этом условии уравнения Герца инвариантны).

То, что уравнения Герца удовлетворяют более общему принципу относительности, чем уравнения классической механики, нельзя рассматривать в данном случае как большое преимущество теории Герца, так как при более тщательном рассмотрении уравнений Герца мы видим, что в члене $\operatorname{rot}[\mathbf{D}\mathbf{u}]$ скорость \mathbf{u} должна быть отнесена к привилегированной системе (эфиру), и, следовательно, эфиру следует приписать ту же скорость, что и телу, т. е. эфир полностью увлекается при движении. При этом теория приходит в противоречие с явлением аберрации и опытом Физо.

Герц полагал, что если эфиру приписывать скорость, отличную от скорости движущихся тел, или считать его неподвижным, то подобная теория требует еще более произвольных гипотез, чем теория подвижного эфира. По пути построения теории неподвижного эфира пошел Г. Лоренц. Герцовскому подвижному и полностью увлекаемому эфиру Лоренц противопоставляет неподвижный однородный и изотропный эфир. Эфир Лоренца — единственный диэлектрик в старом, максвелловском смысле; тела же в отличие от эфира представляют собой совокупность положительных и отрицательных зарядов. Эту идею развивали

Вебер, Риман, Клаузиус; однако при этом они допускали в основном мгновенное дальноедействие. Согласно же Максвеллу и Лоренцу, взаимодействие зарядов распространяется с конечной скоростью.

Теория Лоренца на первом этапе своего развития была несовместима с опытами Майкельсона — Морли. Фицджеральд, а затем независимо от него Лоренц предположили, что всякое тело сокращается в направлении его движения и, в частности, в направлении движения Земли. Это положение устраняет противоречие с опытом Майкельсона — Морли. Лоренц исходит из того, что эфир является носителем не только электрических и магнитных, но и вообще всех сил, в том числе и молекулярных, сводимых к силам электрическим. Когда тело движется относительно эфира, то эфир проходит сквозь тело, и это, согласно Лоренцу, оказывает влияние на молекулярные взаимодействия, а вместе с тем на размеры тела в направлении движения. Позднее Лоренц писал, что эта гипотеза на первый взгляд представляется несомненно несколько странной, но без нее трудно обойтись, если настаивать на представлении о неподвижном эфире. Но при этом возникали новые трудности, которые нельзя было полностью устранить и с помощью дополнительных предположений. Одна из трудностей (указана Пуанкаре) состоит в том, что одни лишь электрические силы не дают устойчивого равновесия. Лоренц для устранения возможной неустойчивости предположил, что электроны сплющиваются при движении и что неэлектромагнитные силы также изменяются при движении. Пуанкаре не мог также согласиться с тем, что опытные значения величин разных порядков малости требуют в теории Лоренца различные по характеру гипотезы.

Лоренц ввел понятие об истинном поле как состоянии неподвижного эфира и наряду с этим понятие эффективного поля для движущейся материальной системы. Принцип относительности и введенные Лоренцом преобразования справедливы, согласно Лоренцу, для эффективного поля. Это разделение на истинное и эффективное поля носило искусственный характер.

Т. П. Кравец отметил в примечаниях к «Теории электронов» Лоренца, что «для читателя, знакомого с теорией относительности, бросается в глаза, какие мучительные усилия приходится делать адепту старой теории для истолкования экспериментальных результатов в ее терминах, и насколько теория явлений становится проще и естественнее с точки зрения принципа относительности. Но еще более поучительно, как много было сделано до Эйнштейна, в частности самим Лоренцом, для нахождения выражений, остающихся инвариантными при переходе от одной инерциальной системы к другой» [4, стр. 466].

Динамическая трактовка Лоренца по существу сталкивалась с серьезными трудностями; сама же исходная концепция, исто-

рически связанная со стремлением к механической трактовке физических явлений, нуждалась в радикальном пересмотре.

Эксперименты в области электродинамики движущихся тел. В 1838 г. Фарадей безуспешно пытался обнаружить магнитное поле движущихся заряженных тел. Через 35 лет Максвелл разработал схему несложного по замыслу, но трудно выполнимого эксперимента, который позволил бы обнаружить магнитное поле движущихся зарядов. Развитие электродинамики движущихся тел, как предыстории теории относительности, тесно переплетается с экспериментальными исследованиями, связанными в первую очередь с именами Максвелла и Гельмгольца. В 1873 г. Максвелл писал, что выдвинутое им предположение об эквивалентности движущегося заряженного тела и электрического тока можно было бы проверить в следующем опыте: «На основании исследований В. Томсона можно принять, что помещенная в воздухе наэлектризованная плоскость начинает терять свой заряд лишь тогда, когда напряженность электрического поля у ее поверхности достигнет величины $E = 2\pi\sigma = 130 \text{ CGSE}$. Если эта плоскость движется в самой себе со скоростью v , то ее магнитное действие будет $2\pi\sigma v/n = 0,005 v$ ($n = 3 \cdot 10^{10} = \text{скорости света}$)» [5, стр. 12].

Максвелл подсчитал, что плоскость, заряженная до потенциала пробоя воздуха и перемещающаяся со скоростью 100 м/сек, обнаружила бы магнитное поле, не превосходящее четырехтысячной доли горизонтальной составляющей земного магнетизма. Он предложил в подобном опыте использовать заряженный непроводящий диск и вращать его в плоскости магнитного меридиана вокруг горизонтальной оси. В 1876 г. Роуланд осуществил этот опыт в лаборатории Гельмгольца. Эбонитовый диск диаметром 21 см и толщиной 0,5 см вращался вокруг вертикальной оси между двумя неподвижными горизонтальными стеклянными дисками. Внутренние стороны стеклянных дисков и обе стороны эбонитового диска были позолочены и представляли собой обкладки конденсатора. Над поверхностью стеклянного диска была подвешена аstaticкая система, состоящая из двух магнитных стрелок. Величина отклонения стрелки была приблизительно равна теоретически ожидаемому.

В 1885 г. Рентген качественно подтвердил результаты Роуланда и показал, что магнитное поле возникает и тогда, когда электричество относительно проводника находится в покое, но движется вместе с проводником в пространстве. Такое движение электричества Гельмгольц назвал «электрической конвекцией».

Лехеру в более поздних исследованиях (1889) не удалось обнаружить никакого эффекта. Химстед (1889) изменил схему Роуланда. Он показал, что отклонение стрелки в этих опытах происходит в соответствии с правилом Ампера и что это отклонение пропорционально скорости вращения и плотности

движущегося электрического заряда. Опыты Химстеда подверглись серьезному обсуждению, но особого внимания по тонкости анализа заслуживает обсуждение Эйхенвальда. Он писал: «Химстед мог производить своим прибором лишь относительные измерения, а между тем абсолютные измерения в этих опытах имеют огромное значение, между прочим, уже потому, что наряду с электрической конвекцией при движении проводников в электростатическом поле могут возникать и кондукционные токи, т. е. движения электричества по самим проводникам. Кондукционные токи тоже производят магнитные действия, ничем не отличающиеся от магнитных действий токов конвекционных» [5, стр. 15].

Опыты Роуланда непосредственно показали, что движение наэлектризованных тел приводит к появлению поля. Эти опыты в то время и несколько позже истолковывали на основе теории Гельмгольца, Неймана, Вебера, Максвелла. Гельмгольц признал, что хотя результаты этих опытов соответствуют предпосылкам теории Вебера, но их можно вывести из теории Максвелла, отрицающей действие на расстоянии. Приводя оценку Гельмгольца, Розенбергер отмечал: «Хотя, таким образом, правильность закона Вебера с количественной стороны не была оспорена, но уже приведенный только что отзыв Гельмгольца указывает на то, что теперь речь шла уже не столько о правильности выводов, вытекающих из этого закона, сколько о *принципиальной допустимости его исходных предпосылок*, что теперь критика была направлена вообще против возможности, и необходимости, во-первых, непосредственного действия электрических сил на расстоянии и, во-вторых, одновременного течения двух противоположных жидкостей по одному проводнику» [6]. Опыты Роуланда были первыми исследованиями магнитного поля конвекционных токов.

Одновременно с работой Химстеда появилась совместная работа Роуланда и Хитчинсона. В своих опытах они приняли достаточные меры к тому, чтобы электрическое поле между дисками было однородным, что позволило бы точнее, чем в предыдущих опытах, рассчитать распределение движущихся зарядов. Эйхенвальд отмечал, что в этих опытах было обращено особое внимание на точность измерений. Разности потенциала измерялись электрометром Томсона, для отсчета оборотов на каждой оси были помещены счетчики.

Роуланд и Хитчинсон вычисляли из своих опытов отношение электростатических абсолютных единиц к электромагнитным и при различных условиях опыта получали значения скорости света, лежащие в пределах $2,26 \cdot 10^{10}$ и $3,78 \cdot 10^{10}$ см/сек. Ряд работ, выполненных Кремье, привел к отрицательным результатам. Сам Кремье на основании своих опытов упорно отрицал возникновение магнитного поля при движении электрических зарядов.

Положительные результаты других исследователей он приписывал различным случайным ошибкам. Однако Кремье принадлежит заслуга применения нового метода, состоящего в том, что исследуется магнитное поле, создаваемое при вращении не постоянного, а переменного электрического заряда.

Эйхенвальд отмечал преимущество метода Кремье в том, что чувствительная магнитная стрелка может быть помещена вдали от вращающихся дисков и ограждена от посторонних влияний.

Пендер, пользуясь методом Кремье, получил положительные результаты. Он повторил опыт Роуланда с горизонтальным диском и наблюдал отклонения помещенной над диском стрелки. В 1903 г. Кремье и Пендер в совместной работе подтвердили результаты Пендера.

Первые прямые и очень точные опыты, которые привели к количественным результатам, находящимся в согласии с теорией, были произведены А. Эйхенвальдом. Работы Эйхенвальда производились в то время, когда опыты Пендера не были еще опубликованы, но были известны отрицательные результаты опытов Лехера и Кремье. Эйхенвальд отмечает, что и после появления работ Пендера было все же желательно повторение опытов Роуланда.

Эйхенвальд пользовался плоским конденсатором, состоящим из двух вертикальных проводящих дисков, которые заряжались электричеством противоположного знака. Один или оба диска вместе могли вращаться около общей оси. Магнитная стрелка, защищенная от посторонних влияний, помещалась около края одного из дисков.

Сопоставив опыты Роуланда, Химстеда, Роуланда и Хитчинсона, Пендера со своими, Эйхенвальд писал: «Заряд, движущийся со скоростью, достигающей 150 м/сек, образует вокруг себя магнитное поле, которое во всех отношениях, а именно по направлению, по величине и по распределению в пространстве и по своим индукционным действиям, эквивалентно магнитному полю гальванического тока, численная величина которого равна данной величине электрической конвекции» [5, стр. 52].

Уже в 1888 г. Рентген изучал магнитные действия диэлектриков, движущихся в электростатическом поле. В его опытах диск из стекла или эбонита вращался вокруг вертикальной оси между двумя неподвижными металлическими обкладками конденсатора. При перемене заряда в обкладках конденсатора во время вращения диска магнитная стрелка, находившаяся над верхней обкладкой, отклонялась. Направление отклонения стрелки соответствовало предположению, что движущиеся заряды диэлектрика эквивалентны электрическим токам. Косвенным подтверждением опытов Рентгена служили опыты Пендера. Пендер (1903) показал, что эбонитовый диск, равномерно вращаясь в перемен-

ном электрическом поле, возбуждает в соседнем проводнике индукционные токи.

Опыты Рентгена в усовершенствованной форме повторил Эйхенвальд. Наблюдаемые в его опытах отклонения стрелки представляли результат разности действий двух взаимно противоположных конвекционных токов, поскольку заряды, появившиеся на обеих сторонах диэлектрика в поле конденсатора, всегда имеют разные знаки. Количественные измерения Эйхенвальда находились в согласии с теорией.

В последующей серии опытов Эйхенвальд заставил вращаться оба диска конденсатора вместе с содержащимся между ними диэлектриком как одно целое. Подобный эксперимент с теоретической точки зрения имел существенное значение. В опытах Роуланда и Эйхенвальда один диск заряженного конденсатора двигался относительно другого, неподвижного диска, имеющего заряд противоположного знака, или заряды обоих дисков двигались совместно относительно среды, находящейся между дисками.

В опытах с вращающимся диэлектриком поверхностные заряды диэлектрика двигались относительно неподвижных зарядов на дисках конденсатора. При вращении дисков конденсатора вместе с помещенным между ними диэлектриком относительно перемещения зарядов не было; однако и в этом случае возникало магнитное поле. Эйхенвальд впервые доказал на прямом опыте существование магнитного поля тока смещения.

Мы видим, что Эйхенвальд дал не только совершенно безупречное экспериментальное доказательство существования магнитного поля конвекционных токов, но и произвел весьма точные количественные измерения этого поля. Опыты Эйхенвальда дали возможность установить полную эквивалентность конвекционных токов токам проводимости, подтвердили эквивалентность магнитных полей тока проводимости, тока смещения, тока конвекции и тока Рентгена; они же должны были помочь решить вопрос о том, какая из двух основных дорелятивистских теорий электродинамики движущихся сред — теория Герца или теория Лоренца — соответствует действительности.

Ход рассуждений физиков в то время был примерно таким: если эфир переносится вместе с вращающимся диском (Герц), ток смещения в движущемся диэлектрике должен быть пропорционален диэлектрической постоянной; если же эфир неподвижен (Лоренц) и не принимает участия во вращении, то, поскольку диэлектрическая постоянная эфира равна единице, ток смещения должен быть пропорционален $\epsilon - 1$, так как необходимо вычесть ту часть тока смещения, которая обуславливалась эфиром в том случае, если бы он участвовал в движении.

Обозначим через $\pm \rho = \epsilon E / 4\pi$ плотность заряда на обкладках конденсатора, через $\pm \rho' = - \frac{(\epsilon - 1) E}{4\pi}$ плотность заряда, наве-

денного в диэлектрике, и через $\rho'' = \pm \rho \pm \rho' = \pm \frac{E}{4\pi}$ плотность свободных зарядов. Перемещая эти заряды с постоянной скоростью v параллельно плоскостям обкладок конденсатора, получаем соответствующий вклад в магнитное поле

$$H = A \frac{v}{c} \frac{\epsilon E}{4\pi} = A\beta\rho;$$

$$H' = -A \frac{v}{c} \frac{\epsilon - 1}{4\pi} E = A\beta\rho';$$

$$H + H' = A \frac{v}{c} \frac{E}{4\pi} = A\beta\rho'',$$

где A — коэффициент пропорциональности.

Возможны следующие случаи:

а) движется одна обкладка конденсатора или обе обкладки в одну или противоположные стороны; согласие теории с результатами опытов Эйхенвальда хорошее;

б) движется диэлектрик, а обкладки конденсатора находятся в покое; одна сторона диэлектрика дает вклад $H'_1 = A_1\beta\rho'$ в магнитное поле, другая — $H'_2 = A_2\beta\rho'$ и $H = (A_1 - A_2)\beta\rho'$;

в) движется одна обкладка конденсатора вместе с диэлектриком: тогда

$$H = \{A_1 + A_2(\epsilon - 1)\} \beta \frac{E_1}{4\pi};$$

эта формула подтверждена опытами Эйхенвальда;

г) движется конденсатор как целое:

$$H_A + H_B = (A_1 - A_2)\beta \frac{E}{4\pi}.$$

Согласно теории Герца, магнитного поля не должно быть, но последняя формула также подтвердилась экспериментально.

Опыты Эйхенвальда оказались проще всего интерпретировать на основе теории Лоренца. Сам Эйхенвальд писал: «Так как электромагнитные явления представляют собой единственную, известную в настоящее время, связь материи с мировым эфиром, то естественным является вопрос, не сопровождается ли движение материи в электромагнитном поле движением самого эфира. Вопрос этот, как увидим ниже, решается в отрицательном смысле на основании наших опытов с диэлектриками, движущимися в электростатическом поле. С другой стороны, в области чисто оптических явлений такой же ответ на поставленный вопрос дается известным опытом Физо над скоростью распространения света в движущейся жидкости. Все вместе взятое позволяет нам сделать следующее заключение: то, что мы называем в настоящее время мировым эфиром и что проникает

собой все материальные тела, мы должны считать неподвижным даже внутри самой материи, находящейся в движении» [5, стр. 10—11].

В опыте Вильсона полый цилиндр, помещенный в магнитное поле, направленное параллельно оси, вращается вокруг своей оси. Внутри цилиндра возникает радиально направленное электрическое поле. В металлическом цилиндре при этом происходит перемещение электронов проводимости к внешней поверхности цилиндра. Электроны проводимости перемещаются до тех пор, пока заряд на внешней поверхности цилиндра не создаст поле, которое уравнивает силу Лоренца, действующую на электроны, находящиеся в цилиндре вещества $(\mathbf{F} = \frac{e}{c} [\mathbf{v}\mathbf{B}])$. Между внешней и внутренней поверхностями цилиндра возникает разность потенциала и при соединении их проводником в нем пойдет ток.

Вильсон экспериментально подтвердил, что теория Герца, исходящая из полного увлечения эфира, не соответствует действительности. Проблема относительности движения оказалась центральной в электродинамике движущихся сред, но с отказом от полного увлечения эфира нельзя было сохранить и принцип относительности в его классической форме. Лоренц пошел по пути отказа от принципа относительности, но и этот путь оказался сложным и противоречащим многим экспериментальным данным. Необходимо было модифицировать группу преобразований классической физики, чтобы разрешить трудности электродинамики движущихся тел.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

В основу оптики движущихся тел, ставшую важной вехой на пути к созданию теории относительности, легли теории абберации и доплер-эффекта.

Явление абберации света было обнаружено английским астрономом Дж. Брэдли. В конце XVII в. и в самом начале XVIII в. многие астрономы заметили изменения в положении звезд, происходившие с годичной периодичностью и с амплитудой около $40''$. Ж. Пикар, Р. Гук и Дж. Флемстид склонны были приписать эти изменения параллаксу, Кассини-младший и Манфреди справедливо оспаривали эти положения, так как при параллактическом смещении светило удаляется от апекса перемещения наблюдателя, в то время как при наблюдаемом смещении светило приближается к апексу.

В 1725 г. С. Молине предпринял попытку проверить исследования Гука. Молине установил телескоп почти в вертикальном положении и начал наблюдения за звездой γ Дракона, приняв