

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

930.1/2:530

**ФИЗИКА ПЕРЕД ВОЗНИКНОВЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОЙ  
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ \*)****А. Борк**

Работу А. Эйнштейна 1905 г., посвященную специальной теории относительности<sup>1</sup>, считают кратким изложением революционных преобразований в науке. Целью предлагаемой статьи является изложение некоторых аспектов развития физики непосредственно перед созданием специальной теории относительности. Подробное перечисление всех событий, происходивших в это время, было бы, во-первых, неинтересным, а во-вторых, вовсе не содействовало бы прояснению вопроса, потому что по своему значению эти события очень неравноценны. Как это нередко бывает, одно из направлений развития физики оказалось доминирующим; собственно, оно определяло физику того времени и выдвигало по-настоящему интересные и важные проблемы. Непосредственно перед выходом Эйнштейна на сцену деятельность физиков была главным образом сосредоточена вокруг ведущей физической теории того времени — электромагнитной теории. Физики конца XIX века, разумеется, занимались не только электромагнитной теорией, но именно она привлекала всеобщее внимание. Мы сфокусируем свое изложение на этой теории и начнем с электромагнитной теории Максвелла.

**ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ**

Так как едва ли можно сказать, что Максвелл был непосредственным предшественником Эйнштейна, я лишь кратко остановлюсь на его работах. Фактически все содержание максвелловской теории сконцентрировано в трех больших статьях<sup>2</sup> 1856, 1861—1862 и 1864 гг., в меньшей работе 1868 г. и, наконец, в «Трактате об электричестве и магнетизме», появившемся в 1873 г. Основные идеи электромагнитной теории содержатся уже во второй большой статье, хотя в более четкой и развернутой форме они изложены в третьей статье и «Трактате».

Максвелл понимал, что подход Фарадея — Максвелла к проблемам электромагнитных явлений отличается от подхода к этим явлениям на континенте Европы представлением о «поле» (это слово мы встречаем впервые у Максвелла в 1865 г.); это представление было прямой противоположностью представления о «действии на расстоянии» (дальнодействии). Работа 1868 г. была специально написана, чтобы подчеркнуть это разли-

\*) А. М. В о r k, Physics just before Einstein, Science 152 (No. 3722), 597 (1966).  
Перевод В. А. Угарова.

чие. Сторонники дальнего действия пытались рассматривать только силы, действующие на тела, например, силы тяготения. Сторонники представления о поле рассматривали также пространство между телами или, как они говорили, «поле». Хотя некоторые физики упорно не признавали полевых идей, как правило, по онтологическим соображениям\*), считая, что поле не представляет собой физической реальности, успех Максвелла в реализации полевой точки зрения сыграл принципиально важную роль для атмосферы современной нам физики. Уже с 30-х годов XX века ведущей теорией физики стала квантовая теория поля, сочетающая в себе полевые представления с квантованием.

Нам следует четко представить себе, что было сделано Максвеллом для электромагнитной теории, если мы хотим правильно оценить вклад последователей Максвелла в этом направлении. Мы рассмотрим основные уравнения теории Максвелла в той форме, в которой они приводятся самим Максвеллом, а также их следствия. Поскольку «Трактат» был известен значительно больше других работ Максвелла, мы рассмотрим уравнения Максвелла в той форме, в которой они приведены там. Эта форма уравнений совпадает с тем, что было приведено в статье 1864 г. Максвелл пользовался в своих уравнениях как компонентами, так и кватернионами (которыми до появления «Трактата» не пользовались вовсе). Чтобы облегчить сопоставление записи Максвелла и современной, на рис. 1 приведены параллельно уравнения Максвелла в современных векторных обозначениях. Все, кто знаком с системой уравнений Максвелла, немедленно обнаружат некоторые отличия. В основных уравнениях Максвелл пользуется не только векторами поля, но и потенциалами. Представление о векторном потенциале было предложено Максвеллом, чтобы дать математическое описание «электротоническим состояниям», введенным Фарадеем<sup>4</sup>, причем Максвелл, поясняя введение векторного потенциала, писал (в противоположность тому, что мы думаем сегодня), что векторный потенциал «можно даже назвать фундаментальной величиной электромагнитной теории» (3, т. 2, раздел 540). Само название «векторный потенциал» впервые появилось в «Трактате». Некоторые из уравнений Максвелла, которые принято теперь выписывать, в частности уравнения для  $\operatorname{div} \mathbf{B}$  и  $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ , не приводятся, хотя они и являются следствием выписанных уравнений. Максвелл, очевидно, прекрасно понимал, что он выписал больше уравнений, чем необходимо (3, т. 2, раздел 615):

«Эти уравнения можно рассматривать как главнейшие связи между величинами, которые нас интересуют. Их можно скомбинировать так, чтобы исключить некоторые из этих величин, но на данном этапе наша цель состоит не в том, чтобы добиться максимальной компактности в математических формулах, а в том, чтобы установить все взаимосвязи, о которых мы имеем ясное представление. Исключение величины, которая отражает важную идею, обернется скорее потерей, чем выигрышем на теперешней стадии нашего исследования».

Почти все содержание максвелловской теории имеет отношение к теории световых явлений, как это изложено во втором томе «Трактата» (главы XX и XXI). После вывода волнового уравнения, которому удовлетворяет векторный потенциал, Максвелл сравнивает экспериментальные значения диэлектрических проницаемостей и показателей преломления для различных веществ. Максвелл лишь мимоходом затрагивает вопрос об энергии (хотя он твердо убежден в том, что поле обладает энергией) и почти не касается вопроса об электромагнитном поле, связанном с отдельным источником. Не следует рассматривать наши замечания

\*) Онтология — учение о бытии, об основных началах всего существующего. (Прим. пер.)

Уравнения для	Обозначения Максвелла	Векторные обозначения
Магнитной индукции (A)	$a = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz},$	$\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$
	$b = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx},$	
	$c = \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}.$	
Напряженности электрического поля (B)	$P = c \frac{dy}{dt} - b \frac{dz}{dt} - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx},$	$\mathbf{E} = [\dot{\mathbf{r}}\mathbf{B}] - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi$
	$Q = a \frac{dz}{dt} - c \frac{dx}{dt} - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy},$	
	$R = b \frac{dx}{dt} - a \frac{dy}{dt} - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz}.$	
Механической силы (C)	$X = cv - bw - c \frac{d\psi}{dx} - m \frac{d\Omega}{dx}$ (Только первое уравнение)	$\mathbf{F} = [\mathbf{J}_T \mathbf{B}] + c\mathbf{E} - m\nabla \Omega$ ( $\mathbf{J}_T$ включает в себя ток смещения)
Намагничивания (D)	$a = \alpha + 4\pi A,$	$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi \mathbf{M}$
	$b = \beta + 4\pi B,$ $c = \gamma + 4\pi C.$	
Электрического тока (E)	$4\pi u = \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz},$	$[\nabla \mathbf{H}] = 4\pi \mathbf{J}_T$
	$4\pi v = \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx},$	
	$4\pi w = \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy}.$	
Электрической индукции (F)	$\mathfrak{D} = \frac{1}{4\pi} K \mathfrak{E}$ (Кватернионное обозначение)	$\mathbf{D} = \frac{K}{4\pi} \mathbf{E}.$
Проводимости (G)	$\mathfrak{R} = C \mathfrak{E}$ (Кватернионное обозначение)	$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$
Полного тока (H)	$u = p + \frac{df}{dt},$	$\mathbf{J}_T = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
	$v = q + \frac{dg}{dt},$	
	$w = r + \frac{dh}{dt}.$	
Свободных зарядов (J)	$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz}$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$
	$(K) \sigma = lf + mg + nh + l'f' + m'g' + n'h'$	$(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) \cdot \mathbf{n} = \sigma$
Магнитной индукции (L)	$\mathfrak{S} = \mu \mathfrak{H}$ (Кватернионное обозначение)	$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$

Рис. 1. Уравнения электромагнитного поля, приведенные в книге Дж. К. Максвелла «A Treatise on Electricity and Magnetism» (2-е издание). Во втором уравнении (A) опечатка: должно быть  $dH/dx$  во втором слагаемом справа. Для сравнения в правой части те же уравнения выписаны в современных векторных обозначениях.

как критику Максвелла; едва ли можно ожидать от основоположника теории полного и исчерпывающего исследования всех ее следствий.

Report on the work of J. F. Fitzgerald's paper.

"On the Electromagnetic Theory of the Rotation and Refraction of Light"

[I consider that both the method of treatment and the results obtained in this paper are such as deserve a place in the Philosophical Transactions.] At the same time I think it desirable, and even necessary to the comprehension of the paper, that the author should make the several statements of his assumptions more explicit.

What he says about the interior of a medium can generally be interpreted by comparison with my book on electricity but his statement of the boundary conditions (p. 4) can only be interpreted by working backwards from his results.

He says 'the values of the elements of the integrals must be the same for the

Рис. 2. Первая страница конспекта статьи Фицджеральда, составленного Максвеллом.

Современники Максвелла не хотели признавать его работу. Тэй и Кельвин (Вильям Томсон) были близкими друзьями Максвелла, но мы не имеем данных о том, что Тэй понял электромагнитную теорию. Кельвин просто отвергал эту теорию, он не признавал ее и после смерти Максвелла.

Однако мы можем с удовлетворением отметить, что Максвелл дожил до того времени, когда его электромагнитная теория пошла в ход. На рис. 2 воспроизведена первая страница конспекта статьи Фицджеральда, посвященной отражению и преломлению электромагнитных волн. Оригинал этого конспекта хранится в библиотеке Кембриджского университета. Об этом вопросе Максвелл упоминает в письме к Стоксу от 15 октября 1864 г. (5, стр. 25), однако сам он к нему не возвращался. Максвелл знал о работах Лоренца. Лоренц в своей докторской диссертации, оконченной в 1875 г., рассматривал отражение и преломление света.

### О ТЕХ, КТО ОБОБЩАЛ ТЕОРИЮ МАКСВЕЛЛА

Если взглянуть в ту деятельность, которая происходила в области электромагнитной теории за период от смерти Максвелла в 1879 г. до появления работы Эйнштейна в 1905 г., посвященной специальной теории относительности, полезно провести грань между теми, кто пытался модифицировать или обобщить теорию, и теми, кто искал новые результаты в качестве следствий теории, т. е. развивал ее. Конечно, трудно провести такое разделение безукоризненным образом, но оно существует и отражает фактическое положение дел, с которым мы нередко сталкиваемся в теоретической физике. Как это хорошо видно нам сегодня, наибольший вклад в современную физику внесли именно те, кто развивал теорию Максвелла. Однако во времена, о которых шла речь, это было отнюдь не очевидно, в особенности для тех, кто жил в Англии. Нельзя сказать также, что те, кто пытались модифицировать или обобщать теорию, всегда давали незначительный вклад в науку. Давайте приглядимся сначала к тем, кто обобщал теорию, а потом уже вернемся к тем, кто пытался ее развивать.

Гельмгольц и Больцман предложили собственный вариант максвелловской электродинамики; написанная на основе лекций Больцмана книга Керри<sup>6</sup> познакомила английских читателей с этими идеями. Возможно, что для континентальной Европы правильнее всего рассматривать эту работу как переходную от «теории дальнего действия», связанную с именами Гаусса, Вебера и Неймана, к работе Герца, выполненной уже в духе идей Максвелла.

У английских физиков, развивавших идеи Максвелла — здесь речь идет главным образом о Джозефе Ларморе и в меньшей степени о Дж. Дж. Томсоне, Г. М. Макдональде и Оливере Лодже, — мы можем отметить иной ход мысли. Все внимание этой группы сконцентрировано на «эфире» — гипотетической среде, в которой, как предполагалось, заключается электромагнитная энергия и в которой происходит распространение электромагнитных волн. По-видимому, высшей точкой этой деятельности явилась книга Дж. Лармора «Эфир и вещество», опубликованная в 1907 г.<sup>7</sup> и имевшая значительный отклик. Задолго до появления этой книги Лармор восторженно отзывался об эфире в письме, адресованном Оливеру Хевисайду (письмо датировано 12 октября 1893 г. <sup>8</sup>):

«Мне кажется, что я добился полного понимания эфира, не менее полного, чем понимание вещества. Я начал с того, что применил к эфиру во всей ее широте теорию света Мак-Кула; далее я перенес в эфир все электрические явления, исходя из обычных ограничений или предположений (относительно диссипативных процессов); наконец, я воспользовался вихревой теорией вещества лорда Кельвина. Лишь тавтология осталась в стороне, и служит весьма полезным *deus ex machina* в качестве иллюстрации одного запутанного пункта».

Почти все те, о ком шла речь, независимо от того, куда они по нашей классификации попали, верили в эфир. Часть из них говорила об эфире сдержанно, другие же рассматривали вопрос об эфире как центральную

нерешенную проблему электромагнитной теории. Даже сам Максвелл в своей работе 1861 г. предлагал некую модель, в которой использовалось вращательное движение и направляющие клапаны (нечто вроде шарикоподшипников; см. рис. 3), однако впоследствии от нее отказался. Тем не менее, он никогда не отказывался от мысли найти механическое обоснование электромагнитной теории.

Вера в существование эфира совсем не связана с тем, принимается ли точка зрения Максвелла на электричество и магнетизм, или нет. Самым

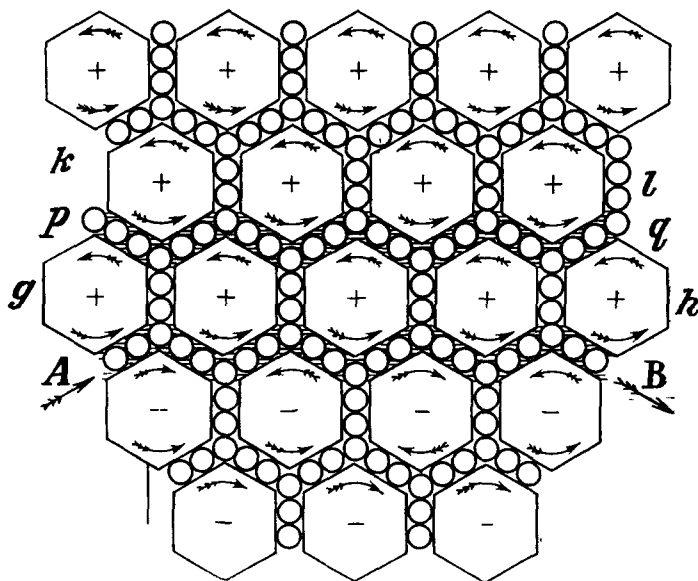


Рис. 3. Модель электромагнитного поля, предложенная Максвеллом в его статье «О физических силовых линиях» (1861 г.).

Гельмгольц описывает эту модель как «систему ячеек с упругими стенками и цилиндрическими полостями..., в которых упругие шары могут вращаться и сплющиваться центробежными силами. В стенках ячеек должны находиться другие шары с неизменным объемом, подобные роликовым подшипникам... их центр тяжести.... будет просто смещаться за счет упругости стенок ячеек.... смещение роликовых подшипников приводит к диэлектрической поляризации среды; их движение образует электрический ток; вращение упругих шаров соответствует намагничиванию среды, ось вращения совпадает с направлением магнитной силы».

ярким примером может служить лорд Кельвин, который отрицательно относился к теории Максвелла, но всю жизнь, правда, безуспешно, пытался развивать представление об эфире.

В конце своего «Трактата»<sup>(3)</sup>, т. 2, разделы 865, 866) Максвелл возвращается к идеям «действия на расстоянии», коротко напоминает о них и пишет следующее:

«В умах этих замечательных людей, по-видимому, укоренился некий пред-  
рассудок или, если хотите, «возражение а priori» против гипотезы о том, что существует среда, в которой разыгрываются явления излучения света и тепла, а также передача электрических сил на расстоянии».

Но, продолжая свои рассуждения, Максвелл подчеркивает, что даже эта группа, поскольку она, как правило, допускает конечное время распространения, неявно пользуется представлением об эфире.

«Следовательно, все эти теории ведут к представлению о среде, в которой происходит распространение. И если мы примем существование такой среды в качестве

гипотезы, то, как я полагаю, она должна занять важное место в наших исследованиях. Нам следует попытаться построить мысленное представление о всех деталях ее проявления. Это и составляло неизменную цель моего трактата».

Настойчивость, с которой пропагандировалась гипотеза эфира в физике конца XIX века, отмечалась уже неоднократно. Она отражала механический подход к физической реальности, подход, который физики хотели сохранить любой ценой.

## ВЕКТОРЫ

Сегодня довольно трудно понять, почему прошло двадцать лет с того момента, когда была сформулирована теория электромагнетизма в период с 1861 по 1865 гг., до того, как были сделаны первые попытки выяснить все следствия теории. Читая учебники, можно подумать, что стоит лишь появиться новой теории, как все бросаются ее проверять, чтобы сразу решить, принять ее или отвергнуть. Но фактически зачастую никто не торопится. В интересующем нас случае развитие электромагнитной теории задержалось как из-за необходимости развития новой математической техники, так и из-за необходимости введения новой системы обозначений — векторов.

Независимо друг от друга, Хевисайд и Гиббс выделили векторные аспекты из кватернионов Гамильтона и сумели построить чистую векторную алгебру и векторное исчисление; оба они имели специальное намерение использовать их в электромагнитной теории; работы этих двух авторов различались, по существу, лишь обозначениями. Хевисайд так говорит по поводу векторов в своей книге «Электромагнитная теория» <sup>(9)</sup>, т. I):

«Мое знакомство с кватернионами произошло совсем иначе. Максвелл изложил свои результаты в «Трактате» в кватернионной форме. Я обратился к книге Тэта, чтобы узнать, как обращаться с ними. У меня было немало затруднений, но в конце концов я обнаружил, что кватернионы можно вполне разумно использовать при работе с векторами. Однако, пытаясь прилагать кватернионы в электромагнитной теории, я понял, что это очень неудобно. Кватернионы в их векторном аспекте казались антифизичными и неестественными и совсем не согласовывались с обычной скалярной математикой. И я совсем отказался от кватернионов, стал пользоваться чистыми скалярами и векторами и начиная с 1883 г. пользовался в своих работах простой векторной алгеброй».

Выбор обозначений может показаться куда менее важным, потому что он оказывает влияние только на форму, но не на содержание теории. Однако история науки знает и обратные примеры, когда обозначения играли первостепенную роль. Так было, например, при обобщении специальной теории относительности и переходе к общей теории относительности. Большинство основных величин, входящих в электромагнитную теорию, являются векторами, поэтому работать исключительно с их компонентами просто утомительно. Максвелл под влиянием дружбы с Тэтом во многих главах «Трактата» пользовался кватернионными обозначениями, однако довольно редко использовал их в выводах. Но, как это поняли Гиббс и Хевисайд, ему фактически нужны были лишь векторы определенного вида, поэтому кватернионы, которые не являлись бы векторами, почти никогда не встречаются в «Трактате».

Другие английские физики, в отличие от Хевисайда, отказывались вводить векторы. Очень резко выступал против векторов Кельвин <sup>10</sup>. Джинс в различных изданиях своего «Трактата» жестко использовал компоненты векторов. Немцы сначала избегали векторов, но впервые их появление можно обнаружить в работе Лоренца 1892 г. Однако уже Фёппль в своем учебнике 1894 г. пользуется обозначениями Хевисайда. а статья Лоренца <sup>11</sup>, посвященная электромагнитной теории в «Encyklo-

pädie der Mathematischen Wissenschaften» (1904) целиком использует векторные обозначения, лишь незначительно отличающиеся от обозначений Гиббса и Хевисайда. В общем можно сказать, что тот, кто был заинтересован в развитии электромагнитной теории, был в неменьшей степени заинтересован и в векторах; мне кажется, что этот случай может быть использован как яркий пример того, как правильные обозначения существенно помогают развитию физики.

#### ОЛИВЕР ХЕВИСАЙД

Оливер Хевисайд получил почетную степень в Гёттингене в 1905 г.; в соответствующем решении было сказано, что он был «скорее всего первым из последователей Максвелла». Я склонен считать эту оценку правильной. Вместе с тем даже специалисты по истории физики почти полностью забыли о роли Хевисайда. Имя его помнят в связи с двумя введенными в физику новшествами, имеющими далеко не первостепенное значение, — рационализированной системой единиц в электромагнитной теории и хевисайдским слоем заряженных частиц над поверхностью Земли, кроме того, в связи с техникой операционного исчисления. Но даже беглый просмотр его работ по электричеству <sup>12</sup>, <sup>13</sup> или его книги «Электромагнитная теория» <sup>9</sup> (состоящей из пяти томов) показывает, что именно Хевисайду принадлежит развитие теории Максвелла в самых различных направлениях. Поскольку работы Хевисайда сейчас известны мало, я остановлюсь на некоторых из них.

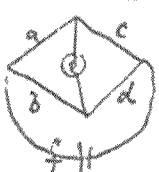
Образование Хевисайда было весьма необычным. Он не заканчивал университета и был самоучкой. Тем не менее, он сумел очень быстро стать радиоинженером благодаря протекции своего дяди, сэра Чарльза Уитстона. Возможно, что именно благодаря этому обстоятельству первые работы Хевисайда посвящены мостике Уитстона. Из записных книжек Хевисайда можно установить, что он послал одну из этих работ Максвеллу, а в бумагах Максвелла обнаружены заметки, касающиеся этой работы (рис. 4). Работы Хевисайда в области электромагнитной теории открываются работой, выполненной в начале 1880 г. и завершаются крупной серией работ (1885—1887 гг.) под названием «Электромагнитная индукция и ее распространение» <sup>14</sup>. Эта серия открывается уравнениями Максвелла, написанными в такой форме, что их легко узнает современный читатель. Хевисайд был, по-видимому, первым, кто стал считать уравнение для  $\text{rot } \mathbf{E}$  основным уравнением, хотя словесная формулировка этого уравнения в интегральной форме приводится в работе Максвелла 1868 г. Хевисайд особо подчеркивал симметрию электрического и магнитного полей («метод дуплексов» — двойников). Исходя из энергетического рассмотрения, Хевисайд пришел к выводу, что из основных уравнений потенциалы можно исключить. Несколько позже Герц, который работал с компонентами полей, пришел к тем же самым уравнениям, и в продолжении двадцати с лишним лет эти уравнения называли обычно «уравнениями Максвелла в форме Герца — Хевисайда» (в своей работе 1905 г., посвященной специальной теории относительности, Эйнштейн назвал их уравнениями Максвелла — Герца). Хевисайд был настолько потрясен симметрией между электрическим и магнитным полем, что вводил иногда магнитные «заряды» и магнитные токи, хотя отчетливо сознавал, что к этому нет ни малейших экспериментальных оснований.

Хевисайд наряду с Пойнтингом и независимо от него расширил энергетическое рассмотрение, включив в него то, что теперь называют вектором Пойнтинга; таким образом, появилась возможность говорить не только о запасе энергии в электромагнитном поле (как это делал Макс-



велл), но и о потоке энергии. В современных учебниках, как и в работе Хевисайда 1892 г., представленной Королевскому обществу<sup>15</sup>, энергетические соотношения получаются практически одинаково.

Oliver Heaviside Phil Mag. Feb 73  
Great Northern telegraph company. Newscastle on Tyne  
on Best arrangement of Wheatstone Bridge



$d$  resistance to be measured (given)  
 $f$  battery resistance (given)  
 $e$  galvanometer resistance (given)  
then for best arrangement

$$a = \sqrt{ef}$$

$$b = \sqrt{de \frac{d+f}{d+e}}$$

$$c = \sqrt{df \frac{d+e}{d+f}} \quad \text{like J.C.M}$$
  

$d = \gamma$  resistance to be measured  
 $f = \alpha B$   $c = \sqrt{\alpha \gamma} \sqrt{\alpha \gamma} \sqrt{B G}$   
 $e = \alpha G$   $b = \sqrt{\alpha \gamma \frac{\alpha + \gamma}{\alpha + \gamma}} \sqrt{B \gamma \frac{G + \gamma}{B + \gamma}}$   
 $a = c$   
 $b = \beta$   $\beta = \sqrt{\alpha \gamma \frac{\alpha + \gamma}{\alpha + \gamma}}$   
 $c = b$

Рис. 4. Заметки Максвелла в связи с работой Хевисайда, посвященной мосту Уитстона.

Перелистывая работы Хевисайда, мы убеждаемся в том, что его основной вклад в электромагнитную теорию состоял в развитии этой теории, в особенности в определении полей, создаваемых различными конфигурациями движущихся зарядов. Его великолепная математическая техника, применяемая для решения таких задач, не всегда находила должное понимание (Бромвич, как мне кажется, был первым из математиков, оценивших ее; это видно из его переписки с Хевисайдом) и была одной из причин, затруднявших публикацию его работ. Не говоря уже о мастерском применении операционного метода, Хевисайд применял бесселевы и связанные с ними функции. Хевисайд первый ввел импульсную функцию. Многие другие, среди которых следует отметить Фидджеральда, Вихерта и Лоренца, также решили многие частные проблемы излучения. Нам следует рассматривать решение таких частных проблем как первый шаг теоретического развития максвелловской теории.

## ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ

Следующий шаг в развитии электромагнитной теории (<sup>16</sup>, гл. XI) был сделан несколько в ином направлении, вызванном новыми экспериментальными результатами — открытием электрона. Речь идет о том, что теперь принято называть теорией электрона Лоренца. Однако следует указать также имена тех, кто внес немалый вклад в развитие этой теории. Это — Дж. Дж. Томсон, Хевисайд, Мортон, Сирль, Абрагам и Пуанкаре. Основная идея теории ныне широко известна. Движущийся шарик, обладающий зарядом, величина которого по определению равна единице, создает вокруг себя электромагнитное поле; это поле в свою очередь действует с определенной силой на шарик. В какой-то момент перспективы казались обнадеживающими; казалось, что «массу» можно исключить из фундаментальных физических понятий, объяснив ее появление электромагнитным эффектом «самодействия» заряженного шарика. Эту заманчивую мысль не удалось реализовать, и сегодня теория электрона Лоренца представляет для нас главным образом исторический интерес, хотя к ней возвращаются время от времени и в наши дни. Однако классическая электронная теория сохранила свое значение до нашего времени, так как к некоторым из ее идей вновь возвращаются в теории относительности, хотя и в несколько измененном виде.

Электромагнитное поле заряженного шарика обладает энергией и тем самым заставляет шарик вести себя так, как если бы он обладал массой; мы приходим таким образом к взаимосвязи между массой и энергией. Абрагам, в частности, в своих работах усиленно подчеркивал необходимость рассмотрения энергии и импульса. Но соответствие между ними оказалось более жестким: электромагнитная масса возрастала с ростом скорости, причем закон возрастания совпадал с релятивистским законом зависимости массы от скорости  $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ . Я остановлюсь на экспериментальных данных, касающихся зависимости массы от скорости, позже, когда буду рассказывать об экспериментах Кауфмана.

Другая релятивистская идея, возникшая отчасти в рамках электронной теории, — это сокращение масштабов вследствие их движения; эту идею стимулировали опыт Майкельсона — Морли и «гипотеза сокращения». Обычное предположение для покоящегося заряженного шарика состояло в том, что заряд равномерно распределен либо по всему объему шарика, либо по его поверхности. Форма покоящегося заряда считалась безусловно сферической. Однако для движущегося шарика приходилось считать совсем иначе. Лоренц заметил некоторые преимущества «эллипсоида Хевисайда», который сжимался в духе Фицджеральда — Лоренца; это сжатие впоследствии стали называть релятивистским сжатием. Джеммер <sup>16</sup> отметил более общий и весьма интересный аспект теории — аспект, имеющий обертоны в современной физике. Теоретики эфира любили «объяснять» электромагнитную теорию с помощью эфира, наделенного механическими свойствами, но теория электрона поставила все вверх ногами; центральное понятие классической механики — масса — стала «объясняться» через поля и заряды. Таким образом, центр тяжести теории стал очевидным образом смещаться в сторону полей, отдаляясь от частиц.

В 1875 г. почти ничего не было завершено в направлении развития электромагнитной теории сверх того, что было сделано самим Максвеллом. Но стоило лишь приступить к развитию теории, как дело пошло замечательно быстро, и вся эта работа была почти полностью завершена к 1900 г. Достигнутый прогресс можно ясно понять из двух статей Лоренца, написанных в 1904 г. для «*Encyklopädie...*»; первая из них посвящена электромагнитной теории, вторая — теории электрона. Современный

читатель обнаружит бы в этих статьях многие хорошо известные ему результаты. Из библиографии к этим двум статьям (рис. 5) можно видеть, что в развитии теории принимали участие лишь немногие физики.

## Literatur.

(Zugleich für den folgenden Artikel V 14.)

- M. Faraday*, Experimental researches in electricity, 3 vol., London 1839—1855.  
Deutsche Übersetzung in Ostwald's Klassikern d. exakten Wiss., Nr. 61, Leipzig 1870.
- W. Thomson*, Reprint of papers on electrostatics and magnetism, London 1872.
- J. Clerk Maxwell*, On Faraday's lines of force (1855, 1858), Transactions of the Cambridge Phil. Soc. 10 (1861), p. 27 (Scientific papers, Cambridge, 1 (1890), p. 168). Deutsche Übersetzung in Ostwald's Klassikern, Nr. 69, Leipzig 1895.
- On physical lines of force, Phil. Mag. (4) 21 (1861), p. 161, 291, 338; 23 (1862), p. 12, 45 (Scientific papers 1, p. 451).
- A dynamical theory of the electromagnetic field, Transactions of the London Royal Soc. 185 (1865), p. 459 (Scientific papers 1, p. 528).
- A treatise on electricity and magnetism, 2 vol., Oxford, 1. ed. 1873, 2. ed. 1881, 3. ed. 1892.
- H. Poincaré*, Électricité et optique, Paris, 1. éd. 1890, 1891; 2. éd. 1901.
- J. Holtzmann*, Vorlesungen über Maxwell's Theorie der Elektrizität und des Lichtes, 2 Teile, Leipzig 1891, 1893.
- M. Hertz*, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, Leipzig 1893.
- G. Hertz*, Electrical papers, 2 vol., London 1893.
- Electromagnetic theory, 2 vol., London 1893, 1899.
- H. A. Lorentz*, La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants, Leiden 1892 (auch erschienen in Archives néerlandaises 26, p. 363).
- Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, Leiden 1895.
- J. J. Thomson*, Notes on recent researches in electricity and magnetism, intended as a sequel to Prof. Clerk Maxwell's treatise on electricity and magnetism, Oxford 1893.
- A. Föppl*, Einführung in die Maxwell'sche Theorie der Elektrizität, Leipzig 1894.
- P. Drude*, Physik des Aethers auf elektromagnetischer Grundlage, Stuttgart 1894.
- R. Hertz*, Theorie molekular-elektrischer Vorgänge, Freiburg i. Br. und Leipzig 1896.
- A. Gray*, A treatise on magnetism and electricity, 2 vol., London, vol. 1 1828.
- K. Wiedert*, Grundlagen der Elektrodynamik (in „Festschrift zur Feier der Enthüllung des Gauss-Weber-Denkmal in Göttingen“), Leipzig 1897.
- J. Larmor*, Aether and matter, a development of the dynamical relations of the aether to material systems on the basis of the atomic constitution of matter, including a discussion of the influence of the earth's motion on optical phenomena, Cambridge 1900.
- G. T. Walker*, Aberration and some other problems connected with the electromagnetic field, Cambridge 1900.
- E. Cohn*, Das elektromagnetische Feld. Vorlesungen über die Maxwell'sche Theorie, Leipzig 1900.
- P. Duham*, Les théories électriques de J. Clerk Maxwell, étude historique et critique, Paris 1902.

Рис. 5. Библиография к статьям Лоренца, посвященным электромагнитной теории

Хотя я отнюдь не исчерпал список тех, кто принимал участие в развитии теории электромагнитного поля, нам следует все же двинуться дальше. Переходя к экспериментальным достижениям, я лишь мельком

упомяну Герца и других, которые сумели генерировать электромагнитное излучение, предсказанное теорией Максвелла, поскольку эти важнейшие работы широко известны.

За основу подхода к экспериментальной ситуации мы примем эксперименты, описанные Лоренцем в его попытке построения общей теории, озаглавленной «Электромагнитные явления в системах, движущихся со скоростями, меньшими скорости света»<sup>17</sup>. Первым приведен эксперимент Майкельсона — Морли, поставленный с целью измерить скорость движения Земли относительно эфира. Этот эксперимент был осуществлен раньше, чем это обычно считают; первая попытка Майкельсона, навеянная письмом Максвелла в «Nature», была предпринята в 1881 г.<sup>18</sup>, а существенно улучшенный эксперимент, в котором Майкельсон использовал массивную плиту, плавающую в ртути, был произведен в 1887 г.<sup>19</sup>. Следовательно, к моменту написания обзора Лоренца загадка опыта Майкельсона висела над физиками почти уже четверть века. Тем не менее ни один из крупнейших физиков до Эйнштейна даже и в мыслях не имел отказаться от представления об эфире. Даже те из них, чья работа почти не опиралась на представление об эфире (таким был, например, Хевисайд), твердо верили в существование эфира.

Гипотеза сокращения была единственной серьезной попыткой объяснить результат эксперимента Майкельсона — Морли. Эта гипотеза предполагала физическое сокращение майкельсоновской плиты в направлении движения. Лоренц впервые выдвинул эту идею в 1892 г. и развивал ее в последующих работах; предварительно он указал на ошибки в первоначальном анализе эксперимента, предложенном Майкельсоном. Роль Фицджеральда представляется мне более сомнительной. В опубликованных им работах упоминается сокращение лишь в двух библиографиях, посвященных книге Лармора «Эфир и вещество», где он вовсе не претендует на то, что идея «сокращения» принадлежит ему. Он развивал некоторые мысли, имеющие отношение к сокращению, около 1892 г., упоминая о них в разговоре с Оливером Лоджем; Лодж очень коротко упоминает об этом в нескольких статьях, но этого совсем недостаточно, чтобы подтвердить заключение о том, что взгляды Фицджеральда и Лоренца были вполне сходными. Впоследствии Фицджеральд рассказывал также Лоренцу о том, что его очень интересовала эта проблема, и Лоренц ссылается на него в своей работе 1895 г. Лармор совсем не упоминает о заслугах Фицджеральда в книге «Эфир и вещество» (1900), в которой цитируется только Лоренц; однако всего лишь год спустя в некрологе, посвященном Фицджеральду, он приписывает приоритет ему<sup>20</sup>.

Большинство других экспериментов, упомянутых Лоренцем в его работе 1904 г., также касаются движения Земли относительно эфира. Он коротко останавливается на попытке Рэлея и Брюса (1902—1904) выяснить, может ли движение относительно эфира привести к появлению двойного лучепреломления у движущегося тела. Гораздо подробнее описывается эксперимент Траутона — Нобла. Эти авторы пришли к выводу, что должен возникнуть вращательный момент, стремящийся повернуть заряженный конденсатор так, чтобы его пластины встали параллельно направлению движения Земли; однако они не смогли обнаружить наличие такого вращательного момента даже с помощью очень чувствительных торсионных весов. Лоренц совсем не упоминает эксперименты Лоджа по абберации света.

Экспериментальный результат, привлечший наибольшее внимание Лоренца в его работе 1904 г., имел совсем иной характер. Несколько последних страниц работы Лоренца посвящены сравнению теоретических выводов из его теории электрона с экспериментальными результатами

Кауфмана<sup>21</sup>, полученными в самом начале XX века. Эти эксперименты в свое время считались очень важными, но о них очень мало знают сейчас, да и то разве в самых общих чертах. Как уже упоминалось выше, они имеют прямое отношение к теории электрона. Кауфман, используя хлорид радия, полученный им от Кюри, изучал отклонение электронов, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, в электрическом и магнитном полях. Из его измерений можно было определить массы электронов. В своих первых публикациях Кауфман сравнивал полученные им результаты с расчетами Сирля и пришел к выводу, что поскольку лишь незначительная часть массы зависит от скорости, основная доля массы по своему происхождению не является электромагнитной. Абрагам и Хевисайд подчеркнули трудности теоретической интерпретации этих результатов, а Кауфман в свою очередь усовершенствовал используемую им экспериментальную технику. Новые более тонкие эксперименты привели его к совершенно противоположным выводам: «Масса электронов, возникающих в лучах Беккереля, зависит от их скорости; эта зависимость хорошо согласуется с формулой Абрагама». Таким образом, как теперь представлялось, всю массу электрона можно считать электромагнитной и тем самым массу можно исключить из набора фундаментальных величин. В письме в «Nature» Хевисайд присоединяется к Лоренцу, который в статье 1904 г. указывал, что предложенная им зависимость массы от скорости (в наши дни эта зависимость называется релятивистской зависимостью массы от скорости) полностью согласуется с экспериментальными результатами Кауфмана. Можно сказать, что эти эксперименты в общем подтвердили теорию электрона Лоренца.

В заключение я хотел бы остановиться на другой группе экспериментов, оказавших чрезвычайно большое влияние на развитие физики. Электромагнитная теория была той основой, на которую опирались теории, объясняющие только что открытые в то время явления — «лучи» различного сорта — лучи Беккереля, рентгеновские лучи и катодные лучи. Большинство этих открытий было сделано в течение нескольких лет, около 1895 г. Неожиданно и весьма драматично мир, окружающий человека, стал неизмеримо сложнее. Можно до некоторой степени представить себе ту возбужденную обстановку, которая царила в то время, просмотрев письма Фиджжеральда<sup>22</sup> к Хевисайду. Мы приведем несколько выдержек из этих писем:

«[8 июня 1896 г.]. Это излучение Рентгена очень загадочно. Уже с самого начала января я усиленно пытаюсь доказать, что они представляют собой ультрафиолетовые колебания, и в свое время предлагал Лоджу поставить эксперимент по обнаружению предполагаемых колебаний промежуточной частоты. У меня самого нет соответствующей аппаратуры, чтобы получить такие колебания...»

«[10 июля 1896 г.]. Я не видел описания шведских экспериментов с катодными лучами. Я достаточно скептически отношусь ко многим из этих экспериментов, а также к однородности применяемых полей и их изотропности... очень забавно, что Герц и Ленард настолько верили в то, что Х-лучи и катодные лучи одно и то же, что умудрились прозвать открытие рентгеновских лучей...»

«[28 сентября 1896 г.]. Конференция была очень интересной. Я остановился у Лоджа вместе с Кери Фостер, Глазбруком, Дж. Дж. Томсоном и Рукером; можно сказать, что мы образовали подкомитет секции А. Я забыл упомянуть еще о Ленарде. В его стиле мы всегда называли их Х-лучами и избегали имени Рентгена. Развернулись пространственные дискуссии на тему о том, что представляют собой катодные лучи. Ленард и Бьеркнесс склонялись к тому, что эти лучи представляют распространение чего-то, не связанного с веществом; все английские физики придерживались корпускулярной гипотезы. Трудностью для первых было то, что эти лучи отклоняются в магнитном поле, а для вторых способность катодных лучей проникать через тонкие пленки металлов. Согласно наблюдениям они проходят через металл без каких-либо изменений, если судить по их способности отклоняться. Именно этого можно было бы ожидать при распространении волн, однако это требует соударений без изменения направления движения, чтобы отклонение не зависело от того, какой газ находится

за алюминиевым окошком. Я придумал механическую модель этого явления, а Ленард признал, что с позиций механики нет возражений против этой модели, хотя, с другой стороны, ни один из немецких физиков не смог предложить какой-либо теории, исходящей из представления об эфире, объясняющей отклонение катодных лучей в магнитном поле...».

Обсуждение вновь открытых явлений является главной темой писем Фидджеральда в это время, и мы легко обнаружим важную роль теории электромагнитной теории в этой переписке. Только что открытые лучи привели к целой серии удивительных и неожиданных открытий.

Мы не можем не удивляться той кипучей непрерывной деятельности, которой был отмечен период, предшествующий 1905 г. Привычный ньютоновский мир стал давать трещины во всех направлениях. Речь шла не только об отдельных частностях, шатались все механические устои этого мира. Почва для революции в физике была вполне подготовлена.

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Противоположной точки зрения придерживался Эдвард Уиттекер: *A History of the Theories of Aether and Electricity, The Modern Theories 1900—1926*, Dover, New York, 1954. Важная роль Эйнштейна в истории развития теории относительности отстаивается Холтоном: *On the Origins of the Special Theory of Relativity*, Amer. J. Phys. 28, 627 (1960).
2. W. D. Niven, Ed., *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1890: vol. 1, стр. 155—229 («On Faraday's Lines of Force»); vol. 1, стр. 451—513 («On physical Lines of Force»); vol. 1, стр. 526—597 («A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field»); vol. 2, стр. 125—143 («On a Method of Making a Direct Comparison of Electrostatic with Electromagnetic Force; with a Note on the Electromagnetic Theory of Light»).
3. J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford, Ed. 2, 1881.
4. L. P. Williams, Michael Faraday, Basic Books, New York, 1964.
5. J. Larmor, Ed., *Memoir and Scientific Correspondence of the Late Sir George Gabriel Stokes*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1907, vol. 2.
6. C. E. Curry, *Theory of Electricity and Magnetism*, Macmillan, London, 1897.
7. J. Larmor, *Aether and Matter*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1900.
8. Приводимое письмо принадлежит к собранию писем Хевисайда в Институте инженеров-электриков в Лондоне.
9. O. Heaviside, *Electromagnetic Theory*, Electrician Print. and Publ. Comp., Lnd., 1893.
10. Резкая полемика по поводу двух альтернативных систем обозначений имела место на страницах «Nature» в 1890-х годах. См. A. M. Bork, *Vectors vs. Quaternions, the Letters in «Nature»*, Amer. J. Phys. (1967).
11. H. A. Lorentz, *Maxwells Elektromagnetische Theorie. Weiterbildung der Maxwellschen Theorie und «Elektrontheorie»*, Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften, Teubner, Leipzig, 1904, Bände 2, 13—14.
12. A. M. Bork, Amer. J. Phys. (1967); см. также: O. Heaviside, *Electrical Papers*, Macmillan, London, 1892.
13. Я выражаю свою благодарность Г. Джозефу, чьи статьи и устные сообщения дополнили мои сведения о Хевисайде. Очень интересна литературная работа, касающаяся ученых, близких по духу Хевисайду: N. Wiener's *The Tempter*, Random House, New York, 1959.
14. O. Heaviside, *Electrical Papers*, Macmillan, London, 1892 (работа появилась сначала в «The Electrician», January 3, 1885).
15. —, Phil. Trans. Roy Soc. London A183, 423 (1893).
16. M. Jamer, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, Harvard Univ. Press, Cambridge, 1961 (см. перевод, М., «Прогресс», 1967).
17. Работа воспроизведена в сб.: A. Einstein, H. A. Lorentz, H. Weyl, H. Minkowski, *The Principle of Relativity*, Dover, New York, 1923 (см. перевод: «Принцип относительности» М.-Л., ОНТИ, 1935).
18. A. A. Michelson, Amer. J. Sci., No 3, 22, 120 (1881).
19. — and E. W. Morley, *Aether*, Phil. Mag. 24, 449 (1887).
20. A. M. Bork, *Isis* (1967).
21. W. Kaufmann, Phys. Zs. 4, 54 (1903).
22. Письма Фидджеральда к Хевисайду также находятся в Институте инженеров-электриков в Лондоне. Это довольно обширная переписка, включающая в себя около 60 писем.