

ник света помещен в магнитное поле. Узнав результаты первого опыта Зеемана, Лоренц объяснил их, исходя из теории электронов. При этом он предсказал, что спектральные линии в опыте Зеемана должны не просто расширяться, но разделяться на две или на три в зависимости от направления, в котором производится наблюдение по отношению к направлению магнитного поля. Лоренц также определил, что эти линии должны быть определенным образом поляризованы. Последующие экспериментальные исследования подтвердили выводы Лоренца и, таким образом, явились подтверждением электронной теории.

Вскоре после создания электронной теории была развита электронная теория металлов. Немецкий физик Друде полагал, что электроны, находящиеся в металле, являются свободными и ведут себя подобно атомам идеального газа. Эта гипотеза дала ему возможность, применив методы кинетической теории газов к электронам внутри металла, построить электронную теорию металлов, которая была далее разработана Лоренцем в 1904—1907 гг.

Новые результаты были получены также при применении электронной теории для объяснения магнитных свойств тел. Магнитные свойства парамагнетиков объяснились еще старой теорией, согласно которой молекулы парамагнетиков имеют постоянный магнитный момент, т. е. представляют собой маленькие магниты. При отсутствии магнитного поля магнитные моменты молекул расположены хаотически, так что общий магнитный момент всего тела равен нулю. В случае же магнитного поля молекулы принимают преимущественную ориентацию и тело приобретает магнитный момент.

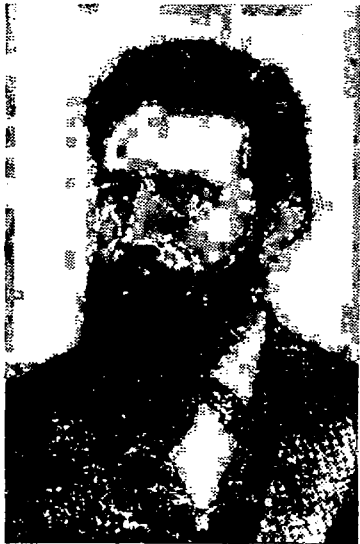
О диамагнетизме были высказаны идеи Вебером, а затем Максвеллом. Максвелл полагал, что в молекулах диамагнетиков при возникновении магнитного поля согласно закону электромагнитной индукции возникают электрические токи. При этом магнитный момент возникших токов имеет направление, противоположное направлению напряженности магнитного поля.

Развитие представлений об электронах поставило на очередь задачу рассмотреть явление парамагнетизма и диамагнетизма с точки зрения этой теории. Впервые электронную теорию диамагнетизма начал разрабатывать английский ученый Лармор, который одновременно с Лоренцем участвовал в построении общей теории электронов. Лармор объяснил явления диамагнетизма, рассматривая движение электронов в веществе, учитывая при этом действие внешнего магнитного поля (прецессия Лармора).

В 1905 г. Ланжевен развил более подробную и строгую электронную теорию диамагнетизма и парамагнетизма. Электронная теория ферромагнетизма была разработана Вейсом (1907).

§ 60. ОТКРЫТИЯ КОНЦА XIX в., ПРИВЕДШИЕ К НАУЧНОЙ РЕВОЛЮЦИИ В ФИЗИКЕ

Конец XIX в. в истории физики отмечен рядом принципиальных открытий, которые вызвали научную революцию во взглядах физиков. Важнейшими из них были открытие электрона и установление



Вильгельм Рентген

зависимости его массы от скорости, а затем открытие радиоактивности. Следует отметить открытие фотоэффекта и его законов, а также открытие рентгеновских лучей. Последние два открытия помимо собственного значения для развития представлений о физических явлениях сыграли существенную роль как в открытии электрона и электромагнитной массы, так и в открытии радиоактивности.

В 1895 г. Вильгельм Рентген (1845—1923) открыл лучи, получившие название рентгеновских. Открытие чрезвычайно заинтересовало ученых и вызвало широкую дискуссию о их природе. Быстро был выяснен ряд свойств этих необычных лучей: способность проходить через светонепроницаемые тела, ионизировать газы и др., но природа самих лучей оставалась неясной. Рентген высказал

гипотезу о том, что лучи представляют собой продольные электромагнитные волны. Существовала гипотеза о корпускулярной природе этих лучей. С другой стороны, уже очень скоро после открытия Рентгена было высказано предположение, что эти лучи являются электромагнитными волнами, имеющими вид хаотически следующих друг за другом электромагнитных импульсов.

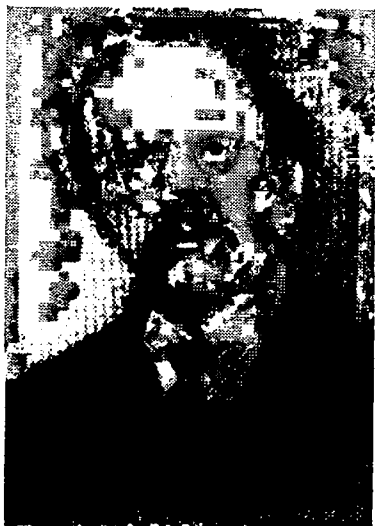
Однако все попытки обнаружить волновые свойства лучей Рентгена, например наблюдать их дифракцию, долгое время были безуспешными, пока немецкому физикау Лауэ не пришла идея использовать вместо дифракционной решетки кристалл и попытаться обнаружить дифракцию рентгеновских лучей от кристаллической решетки (опыт впервые был произведен только в 1925 г.).

Открытие рентгеновских лучей способствовало исследованиям электропроводности газов и изучению катодных лучей.

Заинтересовавшись открытием Рентгена, английский ученый Дж. Дж. Томсон (1856—1940) совместно с совсем еще молодым Резерфордом установили, что под действием облучения рентгеновскими лучами газ сильно повышает свою электропроводность, сохраняя некоторое время это свойство и после прекращения облучения. Однако если газ, подвергнутый облучению рентгеновскими лучами, пропустить через вату, то он немедленно теряет приобретенное свойство. Этот факт подтверждал предположение, что проводниками электричества в газах являются заряженные частички, образующиеся в результате действия рентгеновских лучей. Что это за частички, каков их заряд и масса — эти вопросы встали перед Томсоном. Для исследования этих вопросов Томсон, решил изучить свойства катодных лучей, кото-

рые как он считал, также являются потоком заряженных частиц, и провел целую серию экспериментальных исследований по измерению отношения заряда к массе для катодных частиц. Эти исследования и привели его к открытию электрона.

В 1897 г. Томсон опубликовал первые результаты по определению отношения заряда к массе катодных лучей. Для измерения отношения заряда к массе катодных частичек¹⁾ (Томсон определяет обратную величину отношения массы к заряду) он применил два метода. Первый заключался в измерении заряда и кинетической энергии, переносимых катодными лучами за один и тот же промежуток времени. Для измерения электрического заряда пучок катодных лучей направлялся в фарадеев цилиндр (полый металлический цилиндр, имеющий небольшое отверстие в одном из оснований и соединенный с электрометром). Кинетическая энергия пучка катодных лучей определялась по измерению температуры внутри фарадеева цилиндра с помощью помещенного туда термозлемента, который нагревался при попадании в него этих лучей. Измеряя далее отклонение этого пучка лучей в магнитном поле, имеющем направление, перпендикулярное лучу, Томсон и определил отношение заряда к массе:



Джозеф Джон Томсон

$$\frac{e}{m} = \frac{2\mathcal{E}_k}{QH^2 r^2},$$

где \mathcal{E}_k — кинетическая энергия частиц, Q — их заряд, r — радиус кривизны траектории, описываемой пучком лучей в магнитном поле, H — напряженность магнитного поля.

Другой метод, который использовал Томсон для определения отношения e/m , был основан на одновременном действии электрического и магнитного полей на пучок катодных лучей. Томсон воздействовал на такой пучок электрическим и магнитным полями, направленными взаимно перпендикулярно и перпендикулярно пучку. Подбирая величину электрического поля E так, чтобы действие его компенсировалось действием магнитного поля H , и измеряя затем отклонения этого пучка при наличии только одного магнитного поля той же напряженности, Томсон получил, что

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{H^2 r},$$

¹⁾ Thomson J. J. Phil. Mag., (44), 1897, p. 293.

где r — опять-таки радиус кривизны траектории пучка в магнитном поле.

Томсон получил, что среднее значение для e/m равно $2,3 \cdot 10^7$ СГСМ. Оказалось также, что эта величина не зависит от вида газа в трубке, а также от материала катода. Из опытов Томсона следовало, что катодные лучи, бесспорно, являются потоком заряженных частиц, заряд и масса которых остаются одними и теми же при использовании различных газов и разных материалов катода. Если принять, что заряд катодных частиц равен заряду водородного иона, определенного из электролиза, то масса этих частиц во много раз меньше массы самого малого атома — атома водорода. Таким образом, напрашивался вывод о существовании заряженных частиц, имеющих значительно меньшую массу, чем масса атома, и входящих как составные части в атомы всех элементов. Такие частицы Томсон предложил назвать «корпускулами». Эти корпускулы, как утверждал он, входят в состав всех атомов элементов.

Независимо от Томсона значение величины e/m для катодных лучей определил Кауфман. Измеряя отклонение пучка катодных лучей в магнитном поле и зная разность потенциалов между катодом и анодом, что давало возможность определить скорость катодных лучей, Кауфман вычислил величину e/m , порядок которой получился таким же, как и у Томсона. Однако Кауфман в первой своей работе не сделал выводов, какие сделал Томсон. Он писал, что факт постоянства e/m для различных металлов и газов и значительное отклонение этой величины от отношения заряда к массе ионов, вычисленных из явления электролиза, очень трудно объяснить¹⁾. Вскоре Томсон определил отношение заряда к массе для заряженных частиц, получаемых при освещении ультрафиолетовыми лучами поверхности металла, т. е. использовал явление фотоэффекта.

Явление фотоэффекта впервые наблюдал Герц, который заметил, что электрическая искра проскакивает через искровой промежуток при меньшей разности потенциалов, если он освещается ультрафиолетовым светом. Последующие опыты показали также, что заряженный проводник заметно теряет свой заряд, если он освещается ультрафиолетовыми лучами.

В 1888 г. явление фотоэффекта исследовал А. Г. Столетов. Он установил, что фотоэффект может иметь место и при малых потенциалах, и разработал классический метод наблюдения этого явления. Установка Столетова представляла собой металлическую пластинку C , которая освещалась через сетку лучами от электрической дуги A (рис. 24). Пластинка и сетка были включены в цепь, содержащую гальваническую батарею B и гальванометр. Если на сетку подавалось положительное напряжение, а на пластинку — отрицательное, то при освещении последней по цепи протекал ток. Используя рассмотренный метод исследования, Столетов установил ряд важных закономерностей. Так, он показал, что фототок имеет место только в том случае, если на освещаемую пластинку подается отрицательный

1) K a u f m a n W. Ann. Phys. B. 61 (297), 1897, S. 544.

потенциал; что величина тока пропорциональна световому потоку, падающему на пластину; что существует ток насыщения; что для получения фототока нужно осветить прибор ультрафиолетовыми лучами, и т. д. На основании полученных результатов Столетов сделал вывод:

«На активно-электрические токи следует смотреть как на токи конвективные; так и смотрит на них в настоящее время большинство исследователей. Служат ли орудиями конвекции, переносителями зарядов, самые частицы газа (Риги, Биша и Блондло) или же пылинки катода, подобно тому, как это бывает, по мнению Пулуя, при разрядах в кружковых трубках (Ленард и Вольф), это — другой вопрос»¹⁾.

Для измерения отношения e/m у фотоэлектронов Томсон использовал простейший фотоэлемент, состоящий из металлической пластинки и металлической сетки, включенных в цепь с батареей и гальванометром. Пластинка и сетка помещались в сосуд, из которого выкачивался воздух. Стенка сосуда, через которую освещалась металлическая

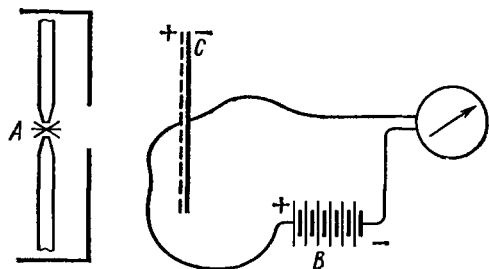


Рис. 24.

Рисунок А. Г. Столетова

пластинка, была изготовлена из кварца. Освещая пластинку светом, содержащим ультрафиолетовые лучи, Томсон наблюдал, как обычно, появление фототока, регистрируемого гальванометром. Если теперь поместить весь прибор в магнитное поле, направление которого перпендикулярно направлению фототока, то при определенной величине напряженности поля фототок прекратится. Это, очевидно, имеет место тогда, когда под действием магнитного поля заряженные частицы поворачиваются, не успев достигнуть сетки, и ток, следовательно, прекращается. Зная расстояние между пластинкой и сеткой, разность потенциалов между ними, а также измерив критическую напряженность магнитного поля, при котором ток прекращается, Томсон определил значение e/m . При этом он получил величину, примерно совпадающую с величиной e/m , полученной им для катодных лучей.

Важнейшим открытием в физике конца XIX в. было открытие радиоактивности, которое помимо своего общего принципиального значения сыграло важную роль в развитии представлений об электро-не. Толчком к открытию радиоактивности было изучение рентгеновских лучей.

В 1896 г. Антуан Анри Беккерель (1852—1908), пытаясь обнаружить рентгеновские лучи, испускаемые, по его мнению, различного рода веществами после того, как они освещались солнечным светом, открыл, что кристалл урановой соли является непрерывным источником какого-то излучения, которое может проходить через непрозрачные экраны и вызывать почернение фотопластинок.

¹⁾ Столетов А. Г. Собр. соч., Т. 1, с. 263.



Мария и Пьер Кюри

Мария Склодовская-Кюри (1867—1934), занявшись исследованием нового явления, пришла к выводу, что в урановых рудах присутствуют вещества, обладающие также свойством излучения, названного ею радиоактивным. В результате упорного труда Марии и Пьеру Кюри (1859—1906) удалось выделить из урановых руд новый элемент (1898), который обладал радиоактивностью гораздо большей, чем уран. Этот элемент был назван радием.

Исследованием вновь открытых явлений занялись многие физики. Нужно было определить природу радиоактивных лучей, а также какое влияние на радиоактивность оказывают физические условия, в которых находятся радиоактивные вещества, и т. д. Все эти вопросы начали проясняться в результате последующих исследований. Мы не будем рассматривать историю развития исследований радиоактивности, которые сыграли огромную роль в последующем развитии физики и привели к развитию новой важнейшей области современной физики — ядерной физики и к физике элементарных частиц. Упомянем только о двух вопросах, вставших перед физиками в связи с изучением радиоактивных явлений.

Во-первых, это вопрос о природе радиоактивного излучения. Уже через короткое время после открытия Беккереля стало ясно, что радиоактивное излучение неоднородно и содержит три компонента, которые получили название α -, β - и γ -лучей. При этом оказалось, что α - и β -лучи являются потоками соответственно положительно и отрицательно заряженных частиц. Природа γ -излучения была выяснена позже, хотя довольно рано высказывалось мнение, что оно представляет собой электромагнитное излучение.

Второй вопрос, возникший в связи с исследованием радиоактивного излучения, был более трудным и заключался в определении источника энергии, которую несут эти лучи. Вначале было высказано предположение, что энергия излучения при радиоактивном распаде берется из вне, из окружающего радиоактивное вещество пространства. Однако эта гипотеза вызвала много возражений. Гипотеза о том, что источник энергии радиоактивного излучения нужно искать внутри самого радиоактивного вещества, казалась более убедительной. Но вопрос о том, что это за энергия, находящаяся внутри атома, которая освобождается при его распаде и выделяется вместе с излучением, был неясен, как и вообще вопрос о механизме самого радиоактивного распада, а первые теории, возникшие для решения этого вопроса, нельзя было считать убедительными.

Открытие и изучение радиоактивного излучения сыграло важную роль и для исследования свойств электрона. Во-первых, оказалось, что β -лучи — это поток тех же самых заряженных частиц, что и катодные лучи и фоточастицы.

В 1900 г. Беккерель, пытаясь выяснить природу β -лучей, исследовал для них отношение заряда к массе, используя их свойство отклоняться в электрическом и магнитном полях. Он определил, что величина e/m для β -лучей примерно равна 10^7 СГСМ, т. е. очень близка к величине, полученной для катодных лучей и для фотоэлектронов. Исследования Беккереля подтверждали существование электрона как некоторой универсальной частицы, входящей в состав вещества.

Нужно отметить, что первоначальное открытие Дж. Дж. Томсоном электрона, — частицы, меньшей атома, было встречено со стороны ряда ученых скептически. Атомистическая гипотеза вообще у многих встречала возражения и еще не пользовалась полным признанием. Идея же о существовании частиц еще более мелких, чем атом, тем более не могла увлечь многих ученых. Вспоминая это время, Томсон писал:

«Сперва было очень мало тех, кто верил в существование таких частиц, меньших атомов. Я впоследствии часто рассказывал о видном физике, который был тогда на моей лекции в Королевском институте и думал, что я их морочу. Я не был удивлен таким отношением, ибо сам приходил к этому истолкованию своих результатов с большой неохотой и то только после того, как убедился, что эксперимент не дает возможности избежать предположения о существовании частиц меньших атомов»¹⁾.

Шустер также, говоря об истории открытия электрона, подчеркивает, что первые работы по измерению отношения заряда к массе не обратили на себя внимания ученых. Только в 1899 г., после лекции Томсона перед Британской ассоциацией. «...научный мир, казалось, внезапно пробудился перед фактом полного переворота, происшедшего в его основных понятиях»²⁾.

Вскоре было сделано новое очень важное открытие — обнаружено, что отношение заряда к массе для электрона не является постоянной величиной, а зависит от скорости. Это открытие было сделано при изучении β -лучей, представлявших собой поток электронов с большими скоростями. Впервые этот факт обнаружил Кауфман уже в 1901 г. Пучок β -лучей от радиоактивного элемента Кауфман подвергал действию магнитного и электрического полей, имеющих одно и то же направление, перпендикулярное лучу. При таком расположении, как показывают расчеты, отклонение x частиц магнитным полем H , во-первых, перпендикулярно величине отклонения y этих частиц электрическим полем E , и, во-вторых, между x и y должно существовать определенное соотношение для всех частиц, летящих с любой скоростью,

1) Thomson J. J. Recollections and reflections. London, 1936, p.341.

2) Шустер А. Прогресс физики, с. 75.

а именно:

$$y = \frac{E}{k H^2} \frac{m}{e} x^2,$$

где k — постоянная.

Таким образом, из расчета следовало, что β -частицы, имеющие различные скорости, проходя поля E и H , должны на экране расположиться в виде отрезка параболы. Эксперимент, однако, показал, что полученная кривая не является точной параболой и для ее интерпретации нужно было признать, что e/m уменьшается с увеличением скорости частиц. Из этого результата следовало, что либо заряд должен уменьшаться при увеличении скорости, либо увеличиваться масса электрона. Естественно принять, что изменяется масса, тогда как заряд остается неизменным, тем более что из теории уже было известно, что движущийся электрический заряд должен обладать «электрической инерцией», которая зависит от скорости.

Томсон еще в 1881 г. теоретически рассмотрел задачу о движении заряженного шара радиуса r , обладающего обычной массой m и несущего электрический заряд e , для случая, когда его скорость v мала по сравнению со скоростью света. Очевидно, что энергия такого шара состоит из кинетической энергии его движения $T_k = mv^2/2$ и энергии электрических и магнитных полей $T_{эл.м}$ в пространстве, окружающем этот шар. Если положить, что электрическое поле движущегося шара в каждый момент времени для каждого положения шара равно полю покоящегося заряда, т. е. электрическое поле, не деформируясь, как бы переносится вместе с зарядом (что можно принять для данного случая), то можно подсчитать и магнитное поле заряда, следовательно, и общую энергию ($T_{эл.м}$) поля, которое создается таким шаром:

$$T_{эл.м} = \frac{1}{8\pi} \int \{E^2 + H^2\} dv.$$

Так как $\frac{1}{8\pi} \int E^2 dv$ — величина, которую можно в нашем случае принять постоянной и независимой от скорости заряда, то нужно рассчитать только энергию магнитного поля $T_m = \frac{1}{8\pi} \int H^2 dv$. Расчеты показали, что вся энергия магнитного поля движущегося заряда

$$T_m = \frac{a}{2} \frac{e^2}{r} v^2,$$

где a — некоторый числовой коэффициент. Таким образом, общая энергия $T = T_k + T_{эл} + T_m$ равна

$$T = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{a}{2} \frac{e^2}{r} v^2 + T_{эл},$$

или

$$T = \left(m + a \frac{e^2}{r} \right) \frac{v^2}{2} + T_{эл},$$

где $T_{эл}$ — постоянная величина. Таким образом, заряженный шар, движущийся со скоростью $v \ll c$, как бы увеличивает свою массу на величину

$$m' = a \frac{e^2}{r}.$$

(По расчетам Томсона, $a = 2/(3c^2)$.)

В 1888—1889 г. Хевисайд рассмотрел вопрос об электрическом и магнитном поле точечного заряда, движущегося уже с любой скоростью. В 1893 г. Дж. Дж. Томсон опубликовал расчеты электрического и магнитного полей движущегося с любой скоростью, меньшей скорости света, заряженного шара. Оказалось, что электрическое поле заряженного шара зависит от скорости его движения. Не касаясь количественных результатов, полученных Хевисайдом, Томсоном, а также другими учеными, работавшими над этой же задачей, отметим только то общее, что было получено в результате их исследований. Величина elm оказалась переменной, зависящей от скорости движения.

Таким образом, вопрос об увеличении инерции движущегося заряда и необходимости приписывать ему дополнительно электромагнитную массу уже был теоретически рассмотрен. Поэтому и результаты опытов Кауфмана нельзя было считать неожиданными. Естественно было положить, что зависимость величины elm от скорости определяется только изменением массы электрона.

Теперь задача заключалась в том, чтобы построить более точную теорию движения электрона с учетом того, что масса его зависит от скорости. Построение такой теории требовало предположений о структуре электрона, его форме, распределении в нем электрического заряда и т. д.

Впервые такую теорию разработал немецкий физик М. Абрагам в 1902 г. В основу ее он положил гипотезу, что электрон — это твердый недеформируемый шарик, по поверхности которого равномерно распределен заряд. Для такой модели Абрагам рассчитал величину электромагнитной массы электрона.

Нужно отметить, что электромагнитная масса электрона уже не могла быть охарактеризована одной скалярной величиной. Необходимо было ввести массу продольную (m_l) и массу поперечную (m_t), зависящие от скорости, причем если m_l характеризует инерцию электрона в случае изменения его скорости только по величине (без изменения направления движения), то m_t определяет его инерцию при изменении скорости только по направлению.

Абрагам получает следующие выражения для m_l и m_t :

$$m_l = \frac{e^2}{2r c^2} \frac{1}{\beta^2} \left[-\frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) + \frac{2}{1-\beta^2} \right],$$

$$m_t = \frac{e^2}{2rc^2} \frac{1}{\beta^2} \left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \right) \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) - 1 \right],$$

где β — отношение скорости движения электрона v к скорости света c , т. е. v/c .

Если положить, что $v \ll c$, то

$$m_l = m_t = m_0 = \frac{2}{3} \frac{e^2}{rc^2},$$

т. е. имеем то же самое выражение для «кажущейся» массы движущегося заряда, которое было выведено Томсоном еще в 1881 г. Другая модель — модель деформированного электрона — принадлежала Лоренцу. Еще в 1895 г. в своей работе, о которой говорилось выше, Лоренц для объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона принял, что размеры всякого тела при движении его в эфире сокращаются в направлении этого движения в отношении $1 : \sqrt{1 - \beta^2}$, где, как обычно, $\beta = v/c$ — отношение скорости тела к скорости света. Развитием этой гипотезы при построении электродинамики движущихся тел, как будет отмечено ниже, явилось положение о том, что электрон при своем движении относительно эфира превращается в сплюснутый эллипсоид вращения, так что его поперечные размеры не изменяются, а размеры в направлении движения сокращаются. При этом изменяется и его масса. Лоренц получил следующие результаты:

$$m_l = m_0 (1 - \beta^2)^{-3/2},$$

$$m_t = m_0 (1 - \beta^2)^{-1/2}.$$

Упомянем еще теорию Бухерера. Согласно этой теории, электрон при движении также принимает форму эллипсоида вращения. Но в отличие от теории Лоренца Бухерер предполагает, что объем электрона при этом не изменяется. Выражения, предложенные Бухерером для продольной и поперечной масс, таковы:

$$m_l = m_0 (1 - \beta^2)^{-4/3} \left(1 - \frac{1}{3} \beta^2\right)^2,$$

$$m_t = m_0 (1 - \beta^2)^{-1/3}.$$

Решить вопрос о правильности той или иной теории должен был эксперимент. Однако провести его было нелегко, так как результаты, даваемые этими теориями для скоростей, которые были доступны в то время, очень мало отличались друг от друга. Кауфман в 1906 г. вновь провел измерение отношения e/m для β -лучей в электрическом и магнитном полях и пришел к заключению, что его измерения подтверждают теорию Абрагама и противоречат теориям Лоренца и Бухерера, а также появившейся теории относительности Эйнштейна, которая, как известно, давала для зависимости массы от скорости тот же результат, что и теория Лоренца. Кауфман писал, что полученные результаты говорят против правильности теории Лоренца и, следовательно, также теории Эйнштейна¹⁾ и подчеркивал, между прочим, что общие положения Эйнштейна необходимо признать негодными. Кауфман, как и ряд других физиков того времени, был противником этой теории. Однако

¹⁾ K a u f m a n n W. Ann. Phys. B. 19 (324), 1906, S. 534.

он переоценил точность своих измерений и результаты, полученные им, вскоре были опровергнуты. В 1908 г. Бухерер, проделав более точные измерения зависимости elm от скорости, используя при этом β -частицы, имеющие скорости порядка 0,7 скорости света, показал, что правильное значение зависимости elm от скорости дает теория Лоренца, следовательно, и теория Эйнштейна. Однако результаты, полученные Бухерером, вызвали критику, и вокруг вопроса о зависимости elm от скорости возникла дискуссия¹⁾. В результате этой дискуссии и последующих еще более точных измерений правильность вывода Бухерера была подтверждена.

Введение понятий продольной и поперечной масс у электрона связано с выбором определенного математического выражения второго закона динамики, а именно $\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$. В данном случае для сообщения одинакового по величине, но различного по направлению ускорения (в направлении скорости и перпендикулярно ей) необходимо приложить различную по величине силу, отсюда и следовала необходимость введения продольной и поперечной масс электрона. Однако второй закон динамики можно записать в форме, данной самим Ньютоном: $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{G}}{dt}$, где \mathbf{G} — импульс или количество движения. В этом случае понятие массы электрона как одной скалярной величины может быть сохранено. Действительно, при соответствующем выборе системы координат уравнения движения электрона

$$F_x = m_e \frac{d^2x}{dt^2}, \quad F_y = m_t \frac{d^2y}{dt^2}, \quad F_z = m_t \frac{d^2z}{dt^2}$$

можно записать в виде одного векторного уравнения:

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} \left(m \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right),$$

где m — скалярная величина, зависящая от скорости. Если продифференцировать и выполнить простое преобразование, то имеем

$$\mathbf{F} = \left(\frac{dm}{dv} v + m \right) \frac{dv}{dt} \mathbf{e} + \frac{mv^2}{r} \mathbf{t},$$

где \mathbf{e} и \mathbf{t} — единичные векторы, направленные соответственно по направлению движения и перпендикулярно ему.

Таким образом, если направление силы, действующей на электрон, совпадает с направлением скорости, то

$$\mathbf{F} = \left(\frac{dm}{dv} v + m \right) \frac{dv}{dt} \mathbf{e}.$$

Если же сила направлена перпендикулярно направлению движения,

¹⁾ Подробно об этой дискуссии см., например: Бу л г а к о в Н. Экспериментальные работы, посвященные вопросу о природе электрона. — «Вопросы физики», 1911, вып. 9, с. 337.

$$F = m \frac{v^2}{r} t.$$

Отсюда замечаем, что $\left(\frac{dm}{dv} v + m\right)$ играет роль продольной, а m — поперечной масс, следовательно, согласно Лоренцу и Эйнштейну,

$$m = m_t = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Открытие зависимости массы электрона от скорости и объяснение этого факта наличием электромагнитной массы вызвали вопрос, обладает ли вообще электрон обычной массой, массой в смысле классической механики, массой в смысле Ньютона. Этот вопрос не мог быть решен. Не был известен такой эксперимент, с помощью которого можно было бы отделить обычную от электромагнитной массы, имеющей, как бы мы теперь сказали, чисто «полевой» характер. И вот возникла идея, что электрон имеет только электромагнитную массу, а обычной массой в смысле Ньютона не обладает. Дальнейшее ее развитие приводит к гипотезе, что вообще всякая масса имеет чисто электромагнитное происхождение. Ведь вещество состоит из отрицательно заряженных частиц (электронов) и положительно заряженных ионов. Возможно, что масса всех заряженных частиц является чисто электромагнитной и никакой массы в смысле Ньютона не существует. Так возникает идея об электромагнитной теории материи.

«В последнее время неоднократно ставился такой вопрос,—писал Лоренц в 1907 г.— Раз мы пришли к представлению, что не существует никакой материальной массы, а есть только масса электромагнитная (для случая отрицательных электронов эта идея получила серьезную поддержку в опытах Кауфмана), нельзя ли распространить это представление и на положительные электроны и вообще на всю материю.

... Я лично охотно готов принять электромагнитную теорию материи и сил, действующих между материальными частичками»¹⁾.

Так в самом начале XX в. возникает новая общая физическая концепция, новые представления о физической картине мира, в основе которых лежит электромагнитная теория материи. Однако в отличие от предыдущих общих концепций эта концепция не могла не только долго продержаться, но даже сколько-нибудь широко развиться.

§ 61. НАЧАЛО РЕВОЛЮЦИИ В ФИЗИКЕ, КРИЗИС ФИЗИКИ И АНАЛИЗ ЕГО В. И. ЛЕНИНЫМ

Гипотеза о чисто электромагнитной природе массы вела к революционным изменениям во взглядах физиков. Действительно, со времен Ньютона массу тела рассматривали как основной признак материальности. Ее понимали как количество материи в теле. Поэтому

¹⁾ Лоренц Г. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения, с. 79—80.