

ЗА ПРЕДЕЛАМИ ЭЛЕКТРОНА ¹⁾

Сэр Дж. Дж. Томсон, Кембридж

Не так еще давно атом считался той последней границей, за пределы которой сама природа вещей не позволяет нам перейти. На атом смотрели как на нечто неделимое, непроницаемое, вечное, не доступное влиянию ни теплоты, ни электричества, ни какого-либо другого физического агента. Внутренность атома была объявлена той территорией, в которую физику никогда не удастся проникнуть. Но пришло время, когда эта святая святых подверглась исследованию, и оказалось, что сам атом построен из еще меньших частиц: отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных протонов. Были найдены средства подсчитать число электронов в атоме и было установлено, что атом вовсе не является маленькой твердой частицей, как это считали раньше, а представляет собой весьма сложную систему, по сложности сравнимую с солнечной системой. Более того, оказалось, что именно эта сложность, эта тонкая структура атома, сообщает материи ее электрические и химические свойства. Для объяснения этих свойств недостаточно просто предположить, что материя состоит из большого числа маленьких частиц; это объяснение непосредственно связано с вопросом о внутреннем строении этих частиц, с их электронной структурой.

Опыты дают нам возможность найти численные значения массы электрона и связанного с нею его заряда; они,

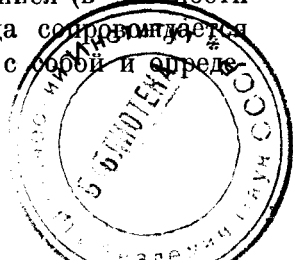
¹⁾ Лекция, читанная в Girton College 8 марта 1928 г.

однако, ничего не говорят о его структуре. Нельзя, например сказать, является ли электрон просто точечным зарядом отрицательного электричества, или он, наподобие атома, построен из еще более мелких частиц: суб-электронов и суб-протонов. Правда у нас нет доказательств того, что, подобно различным родам атомов, существуют и различные типы электронов. Но возможно, что наряду с наблюдаемым типом электронов имеются и другие, значительно менее устойчивые и потому почти совсем не наблюдаемые. Не имея никаких конкретных данных по этому вопросу, естественно, конечно, сделать простейшее предположение и рассматривать электрон как заряженную точку, окруженную средой, не обладающей внутренней структурой. Математический анализ при такого рода гипотезе значительно проще, чем при всякой другой. Из этого, разумеется, ничего не следует; так как нельзя думать, что вселенная построена по принципу наибольшего удобства математиков. Вполне вероятно, что в свете дальнейших успехов науки такая точка зрения на электрон окажется столь же не выдерживающей критики, как и прежняя точка зрения на атом.

Задачей моей сегодняшней лекции является показать, что эти успехи уже налицо и что истинная структура электрона и окружающего его пространства совершенно непохожа на обычные представления о ней.

У некоторых из вас может явиться вопрос: а нужно ли идти так далеко вглубь, не лучше ли поставить где-нибудь точку? На это я отвечу следующее: вся прелесть физики состоит в том, что в ней нет жестких и определенных границ. Каждое новое открытие не приводит нас к концу, а наоборот, открывает путь для дальнейших исследований; и потому пока будет существовать наука, всегда будет много новых неразрешенных проблем. Физикам нечего бояться остаться без работы.

Основная причина, которая, по-моему, заставляет отказываться от прежних воззрений на электрон, состоит в том, что, как было недавно показано, движущийся (в частности равномерно движущийся) электрон всегда сопровождается цугом волн. Эти волны как бы несут его с собой и опреде-



ляют его путь. Таким образом движущийся электрон представляет собой значительно более сложную вещь, чем простой точечный заряд.

Мне кажется, что наиболее очевидным свидетельством существования окружающих электрон волн являются опыты моего сына проф. Г. Ф. Томсона, изучавшего прохождение электронов через очень тонкие металлические пластинки. Эти пластинки, значительно более тонкие, чем тончайшие золотые листки, представляют собой очень ценные физические инструменты, так как они позволяют определить, является ли проходящее через них излучение потоком частиц или пучком волн. В самом деле, пусть мы имеем узкий пучок каких-нибудь лучей и хотим определить — состоит ли он из потока частиц, движущихся в одном направлении, или из пучка волн. Если бы этот пучок непосредственно падал на фотографическую пластинку, то в обоих случаях на ней получалось бы резко очерченное изображение. Посмотрим теперь, как изменится изображение, если на пути пучка поставить тонкую металлическую пластинку. Допустим, что пучок состоит из потока частиц; эти частицы будут ударяться о молекулы пластинки, меняя при каждом соударении направление своего пути. Величина этого отклонения будет различна для различных частиц, так как она определяется в значительной мере законами случайности. Поэтому по выходе из пластинки частицы уже не будут двигаться в одном и том же направлении и поток их примет форму конуса. Изображение на фотографической пластинке делается больше и расплывчатее, превратившись в пятно без определенной границы. Если же вместо потока частиц мы будем иметь пучок волн, то пластинка, в силу правильности расположения молекул, будет действовать подобно дифракционной решетке. Из свойств таких решеток известно, что при длинах волн, сравнимых с расстоянием между молекулами решетки, первоначальное пятно не расплывается, а будет окружено рядом ярких колец с определенными отношениями радиусов.

На рис. 1 показан результат, полученный моим сыном при опытах с прохождением пучка электронов через пластинку. На рисунке виден ряд колец, положение которых

в точности совпадает с положением диффракционных колец света определенной длины волны, которые бы получились при его прохождении через эту же пластинку. Тот факт, что эти кольца указывают на направления движения электронов, был доказан помещением магнита вблизи фотографической пластинки: кольца отклонялись магнитом подобно траекториям электронов (рис. 2). Отсюда ясно, что почернение пластинки обусловлено именно электронами, а не волнами света, так как последние не отклоняются в магнитном поле. Таким образом оказывается, что, проходя через металл, электроны меняют направление своего движения не как частицы, а как волны определенной длины волны. Отсюда можно заключить, что каждый электрон сопровождается цугом волн и что эти волны целиком определяют направление его движения. Электрон как бы вынужден следовать за этими волнами.

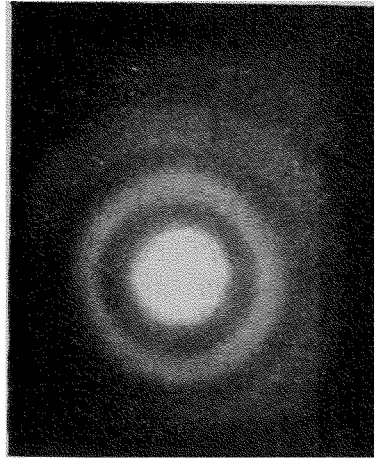


Рис 1

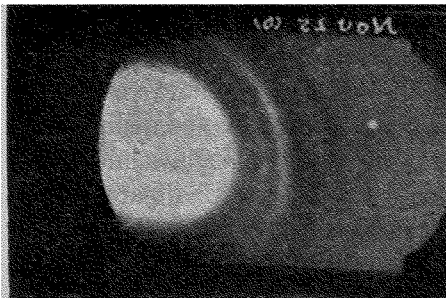


Рис 2

Тонкая металлическая пластинка не только обнаруживает наличие волн, но и позволяет определить их длину. Мой сын сделал это и получил весьма интересный результат. Оказалось, что, электронные волны обладают необыкновенно вы-

сокими частотами. Наименьшая из этих частот в миллион раз больше частоты видимого света и значительно превышает частоту как рентгеновых лучей, так и наиболее жест-

кого из всех известных видов высокочастотного излучения— γ -лучей радия. Электронные волны представляют собой совершенно новый тип излучения, свойства которого могут во многом отличаться от свойств всех известных нам до сих пор типов излучения.

Точно так же как понятия световых частиц оказалось недостаточно для объяснения свойств света и пришлось ввести понятие световых волн, так и понятия электрических частиц оказалось недостаточно для объяснения свойств электронов и пришлось предположить, что эти частицы сопровождаются системами волн. Дуализм волны-частицы имеет, таким образом, место в самых разнообразных областях физики и, повидимому, коренится в самой природе вещей.

Для того чтоб оценить важность этого факта, рассмотрим вкратце, каким образом энергия переходит из одного места в другое. Пусть, например, электрон меняет свое местоположение — возникает вопрос: каким путем следует за ним его энергия? Этот вопрос можно сформулировать яснее, если вернуться к старому представлению об электроне, как о шарике с радиусом в 10^{-13} см. Когда этот шарик движется, то сосредоточена ли его энергия внутри него или она распространена по всему внешнему пространству и пролагает себе путь через эфир? Если, как я это делаю, считать, вслед за Фарадеем и Клерком Максвеллом, что свойства заряженных тел обуславливаются линиями сил в окружающем их эфире, то энергию электрона нужно представлять себе сосредоточенной не в маленькой сфере, символизирующей электрон, а во всем внешнем пространстве. Согласно этому воззрению, вся энергия сосредоточена в эфире и распространяется с одного места на другое через посредство эфирных волн. Факт передачи энергии через эфир был впервые ясно и отчетливо сформулирован моим старым другом проф. Джоном Генри Пойнтингом. Его рассуждения приводят к результатам на первый взгляд несколько странным, хотя я считаю их безусловно правильными. Например я убежден, что большинство из всех считает, что энергия электрических лампочек сообщается им от электростанции через соединяю-

щие их медные проволоки. Согласно Пойнтингу дело обстоит вовсе не так, и энергия распространяется не по проволоке, а по окружающему ее внешнему пространству. Роль проволоки заключается не в том, что она переносит энергию, а скорее в том, что она направляет ее путь во внешнем пространстве. Энергия распространяется в виде волн по эфиру вне проволоки со скоростью, не зависящей от размеров проволоки и от ее материала.

Факт волнообразного распространения электрической энергии через эфир является общепризнанным; но можно ли пойти дальше и сказать, что всякая энергия передается таким же путем? Такое допущение вполне правдоподобно, так как естественно предположить, что существует энергия только одного типа, сосредоточенная в эфире и распространяющаяся через него. Но если попытаться перенести представление о волнообразном распространении электрической энергии на другие виды энергии, то мы сейчас же встретимся с затруднением, на первый взгляд непреодолимым. Дело в том, что все электромагнитные волны, независимо от их длины волны, распространяются через эфир с одной и той же скоростью — скоростью света; энергия, которую они несут с собой, должна обладать очевидно той же скоростью. Но пусть я или кто-нибудь из присутствующих попробует перейти с одного места на другое и передвинуть таким образом свою энергию — даже самый молодой из нас сейчас же безнадежно отстанет от луча света. Иначе говоря, мы должны считаться с тем фактом, что скорость распространения энергии может иметь самые разнообразные значения. Мне кажется, однако, этот факт не противоречит факту распространения энергии через эфир. В самом деле, распространение электромагнитных волн любой частоты со скоростью света не имеет места, если в эфире находятся электроны или вообще заряженные тела. Эти заряженные тела приводятся в движение электромагнитными волнами и сами начинают испускать их; вторичные волны, складываясь с первичными, меняют их характер, т. е. их длину волны, оставляя неизменной частоту и, следовательно, влияют на скорость их распространения.

Пример такого эффекта в космическом масштабе можно найти в верхних частях атмосферы, в области, носящей название слоя Хивисайда. Слой Хивисайда, существование которого, между прочим, обуславливает возможность беспроволочной телеграфии на дальние расстояния, называется та верхняя область атмосферы, в которой атмосферное давление очень мало и солнечное излучение значительно интенсивнее, чем у поверхности земли, так как оно еще не успевает поглотиться в атмосфере. Интенсивность этого излучения там настолько велика, что оно рас-

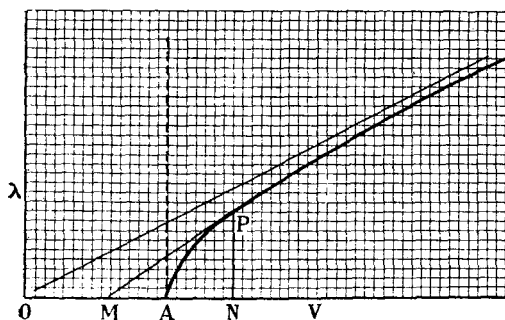


Рис. 3.

щекает большое количество молекул воздуха на электроны и положительные ионы. Таким образом в слое Хивисайда имеется большое количество избыточных положительных и отрицательных зарядов. Поведение электромагнитных волн в этом слое носит совершенно иной характер, чем в пространстве, близком к земле, лишенном свободных зарядов. В нижних слоях атмосферы все волны, независимо от их длины волны, движутся со скоростью света; в слое же Хивисайда их скорость всегда больше скорости света и различна для различных длин волн: чем больше длина волны, тем больше скорость ее распространения. Связь между длиной волны и скоростью распространения показана кривой *APL* на рис. 3, где по абсциссам отложена скорость, а по ординатам — длина волны¹⁾. Среду такого типа я буду называть сверхдиспергирующей средой.

Вертикальная пунктирная прямая на рисунке дает связь между скоростью распространения и длиной волны в нор-

¹⁾ Связь между скоростью V и длиной волны λ дается формулой:

$$V^2 = c^2 + B\lambda^2,$$

где B пропорционально количеству электронов в единице объема.

мальной среде. Вы видите, что влияние электрических зарядов сводится к увеличению скорости распространения волн. На первый взгляд кажется, что это обстоятельство никак не может помочь нам объяснить, почему энергия движется там медленнее, чем в чистом эфире. Это, однако, неверно. Дело в том, что, говоря о волнообразном распространении энергии, нужно различать между скоростью волн и скоростью переносимой ими энергии. Чем больше скорость распространения волн, тем меньше скорость распространения энергии. Этот факт часто забывают принять во внимание, так как в наиболее обычных примерах волнового движения — в свете и в звуке — все волны распространяются с одной и той же скоростью и потому вопрос об изменении скорости энергии не ставится.

Так как этот пункт имеет фундаментальное значение, то я остановлюсь на нем несколько более подробно. Когда мы вызываем каким-либо способом появление волн — например бросая камень в воду или создавая искровой разряд — то первоначальное возмущение возникает на сравнительно малой площади. При этом возбужденные волны обычно бывают разной длины; для того чтоб получилась только одна длина волны, возбуждение должно иметь совершенно особый характер и сразу распространяться на большую площадь. А так как на практике возбуждение ограничивается небольшой площадкой, то возникает не одна волна, а целая группа различных длин волн, распространяющихся в сверхдиспергирующей среде с различными скоростями. Если длины возбуждаемых волн близки друг к другу, то первоначальное возмущение, распространяясь во все стороны, будет сохранять свой прежний характер, т. е. сосредоточиваться на пространстве примерно такой же величины, как и то, на котором оно возникло. Вся энергия будет концентрироваться на этом пространстве и распространяться с той же скоростью, что и возмущение. Эта скорость может быть отлична от скорости распространения волн. Скорость распространения энергии называется групповой скоростью; скорость распространения волн — фазовой скоростью. Иллюстрируем различие между ними на простом примере. Пусть

у нас имеется два цуга волн. Будем изображать один из них в виде ряда мальчиков, идущих по прямой линии с постоянной скоростью на одинаковых расстояниях друг от друга. Скорость их будет соответствовать фазовой скорости, а расстояние между ними — длине волны. Второй цуг мы изобразим рядом девочек, движущихся с другой скоростью и разделенных друг от друга другим расстоянием. Представим себе теперь оба цуга идущих рядом. Если мальчики обозначают максимумы одного цуга волн, а девочки — максимумы другого цуга, то в тех местах, где мальчик и девочка находятся рядом, амплитуда колебания и его энергия имеют максимальные значения. Обратим свое внимание на эти точки и найдем скорость их движения. Если наблюдатель будет стоять на месте, то рано или поздно он увидит одну из девочек рядом с мальчиком; однако так как оба ряда идут не в ногу, то в следующей паре этого совпадения уже не будет и возможно, что его придется ждать очень долго. Сможет ли наблюдатель сократить время этого ожидания, если он сам начнет двигаться, и какова должна быть при этом его скорость? Обозначим эту скорость через W и допустим, что наблюдатель начал идти сейчас же после появления первой пары: через сколько времени его нагонит ближайшая девочка? Если V — скорость шага девочек и D — расстояние между ними, то это время будет, очевидно, равно

$$\frac{D}{V - W}.$$

То же время для мальчиков будет равно

$$\frac{d}{v - W},$$

где v — скорость шага мальчиков, d — расстояние между ними. В том случае, когда эти величины равны друг другу, т. е. когда

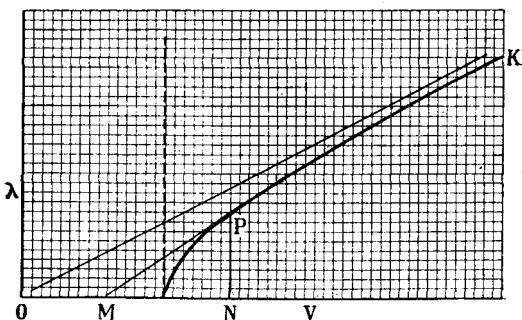
$$\frac{D}{V - W} = \frac{d}{v - W}$$

или $W = \frac{vD - Vd}{D - d}$, мальчики будут все время появляться одновременно с девочками и наблюдателю будет казаться,

что вся процессия состоит из одних только пар. Эта скорость W и есть, очевидно, скорость движения энергии. Мы видим, что она может быть совершенно отлична от фазовых скоростей V и v ; например, когда $vD = Vd$, групповая скорость равна нулю, какими бы ни были фазовые скорости. Из этого примера, между прочим, видно, что хотя скорость энергии может быть по величине гораздо меньше скорости распространения волн, направление их пути всегда одно и то же. Волны как бы направляют путь энергии.

Скорость энергии можно легко определить из диаграммы, дающей зависимость фазовой скорости от длины волны (рис. 4). Точка P обо-

значает волну со скоростью ON и длиной волны PN . Скорость энергии, переносимой группой волн, по длине близких к PN , равна OM , где M — точка пересечения касательной к нашей кривой в точке P с осью абсцисс. Можно пока-



звать, что $OM \cdot ON = c^2$, где c — скорость света в недиспергирующей среде. Таким образом, чем больше фазовая скорость, тем меньше скорость распространения энергии. Из чертежа видно, что OM в зависимости от положения точки P может иметь любое значение от нуля до скорости света. Отсюда видно, что энергия может передаваться волнами и все же не обладать скоростью света. Когда в эфире находятся заряженные тела, скорость энергии в зависимости от длины волны может иметь любое значение от 0 до c .

Примером этого различия между скоростью распространения энергии и скоростью распространения волн может служить буря на море. В глубокой воде волны, подобно электромагнитным волнам в эфире, наполненном зарядами, двигаются с разными скоростями; скорость водяных волн тоже растет с длиной волны, хотя и не так быстро, как

у электромагнитных волн. Бурное море вовсе не похоже на красивую волнистую поверхность, в виде которой его изображают на картинах; оно покрыто беспорядочно разбросанными белыми гребнями, значительно более высокими, чем волны. Если вы обратите свое внимание на верхушку какой-нибудь волны, близкой к одному из этих гребней, то увидите, что эта верхушка движется гораздо быстрее гребня. В том месте, где находится гребень, сосредоточено наибольшее количество энергии, и наблюдение показывает, что эта энергия передвигается медленнее, чем сопровождающие ее волны.

Я обращаю ваше внимание на одну особенность нашего чертежа, имеющую фундаментальное значение. Длина волны PN равна скорости ее распространения ON , умноженной на период колебания; следовательно период колебания равен отношению отрезков $\frac{PN}{ON}$. Но из чертежа видно, что вели-

чина $\frac{PN}{ON}$ никогда не превышает определенной границы, так как P всегда лежит ниже прямой OK . Следовательно период колебания наших волн всегда остается меньше некоторой конечной величины. Наша среда пропускает только колебания выше определенной частоты и не пропускает более низких колебаний.

Таким образом мы видим, что эфир, который сам по себе может переносить энергию только со скоростью света, вследствие присутствия электрических зарядов переходит в сверхдиспергирующее состояние и становится способным служить передатчиком энергии с любой скоростью, меньшей скорости света. При своем передвижении энергия сопровождается цугом волн, определяющих направление ее движения, которые сами по себе, вне тех мест, где находится переносимая ими энергия, обладают лишь небольшой энергией. При этом каждой скорости передвижения энергии соответствует определенная длина волны, которая тем меньше, чем быстрее движется энергия. Скорость самих волн значительно больше скорости энергии, причем произведение этих двух величин равно квадрату скорости

распространения волн через чистый недиспергирующий эфир.

Опыты, описанные мною выше, показывают, что именно такое положение вещей мы имеем в электроне. Энергия, сосредоточенная в самом электроне, движется вместе с некоторым цугом волн по направлению, им определяемому. К концу настоящей лекции в качестве добавления приложено математическое исследование вопроса о прохождении волн через сверхдиспергирующую среду, наполненную электрическими зарядами. В нем показано, что между скоростью электрона u и длиной волны сопровождающих его волн λ должно иметь место соотношение

$$\sqrt{\frac{u\lambda}{1-\frac{u^2}{c^2}}} = C,$$

где C —постоянная, а c —скорость света, т. е. $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Это соотношение было в точности подтверждено опытами моего сына, который при $u = 10^{10}$ см/сек нашел $C = 8,3$ и, следовательно, $\lambda = 7,8 \cdot 10^{-10}$ см. Так как частота наших волн, т. е. число их колебаний в секунду, равна

$$\frac{c^2}{C \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}},$$

то наименьшее ее значение есть $\frac{c^2}{C}$ или в данном случае

$$1,08 \cdot 10^{20}.$$

Итак электрон ведет себя так, как если бы он проходил через атмосферу, наполненную электрическими зарядами.

Вышеприведенное воззрение на электрон приписывает ему дуалистическую структуру. Одна часть его, в которой сосредоточена энергия, построена из электрических линий сил; тогда как другая „часть“ представляет собою цуг волн, находящийся в резонансе с электроном и определяющий его путь. Это представление об электроне поразительно совпадает с тем представлением о структуре света, которое я дал

в „Philosophical Magazine“ за октябрь 1924 г. Согласно последнему, свет, подобно электрону, тоже обладает дуалистической структурой. С одной стороны он представляет собой замкнутое электрическое силовое кольцо, в котором сосредоточена его энергия; с другой стороны он, как и электрон, сопровождается системой электромагнитных волн, которые сами не имеют энергии, а только определяют ее путь. Если принять, что эти волны находятся в резонансе с кольцом и что энергия кольца пропорциональна частоте света, то для данной структуры можно будет вывести следствия, находящиеся в согласии с законом излучения Планка. С другой стороны, принимая такое представление о свете, мы сразу избавляемся от всех затруднений, связанных с согласованием электрических свойств света, которые требуют для своего объяснения корпускулярной теории с его оптическими свойствами, например с явлением интерференции, требующими волновой теории. В самом деле, наши волны испытывают обычную интерференцию и направляют энергию как раз в светлые части интерференционной картины.

Этот дуализм является необходимым следствием представления о волнообразном распространении энергии через эфир, поскольку всегда нужно различать между передачей энергии и распространением волн. В случае световых волн это различие затемняется тем фактом, что скорость передачи энергии оказывается равной скорости распространения волн. Такое совпадение является, однако, чистой случайностью — как мы видели, энергия может передвигаться гораздо медленнее, чем волны, тогда дуализм становится совершенно очевидным. В оптических явлениях волны играют основную роль, и потому мы вполне можем ограничиться волновой теорией; в электрических же явлениях речь идет об энергии, и потому наиболее пригодной является корпускулярная теория, концентрирующая внимание на частицах энергии. Говоря о волнах, мы получаем волновую теорию, говоря об энергии — корпускулярную теорию. Таким образом каждая из этих теорий охватывает только часть истинной действительности. Строго говоря, во всех оптических явлениях — точно так же, как при движении электрических частиц —

катодных, α - и β -лучей, нужно принимать во внимание и частицы и волны.

Поведение электрона указывает на то, что он движется в сверхдиспергирующей среде. Возникает вопрос: сосредоточена ли эта среда в непосредственной близости к электрону, что могло бы быть, если бы электрон, подобно атому, состоял из еще более мелких электрических частиц: или сам эфир имеет структуру такого рода. Конечно для обычного света эфир не является сверхдиспергирующей средой, но это не значит, что он не может быть таковой для колебаний во много тысяч раз более быстрых, так как дисперсия зависит от частоты колебаний. Так, например, стекло не обладает дисперсией по отношению к длинным электромагнитным волнам, употребляемым в беспроводной телеграфии, так как период колебаний последних значительно больше периода собственных колебаний молекул стекла, и в то же время оно обладает дисперсией по отношению к видимому свету, период колебаний которого лишь не на много отличается от периода собственных колебаний этих молекул. Если структура эфира такова, что период его собственных колебаний значительно меньше, чем период колебаний света, и все же больше, чем период колебаний электронных волн, то он может быть диспергирующей средой по отношению к электронным волнам и не быть ею по отношению к свету.

Посмотрим, каким образом можно было бы сделать выбор между двумя выше сформулированными возможностями.

Согласно первому предположению сверхдиспергирующая область сосредоточена вблизи электрона, и размеры ее совпадают с размерами электрона. Значение, обычно приписываемое диаметру электрона, есть 10^{-13} см. Эта величина не является результатом непосредственных измерений, она вычисляется из формулы, куда входят известные нам заряд и масса электрона. Всякая система, обладающая электрическим зарядом, обладает в силу этого и известной массой значение которой зависит от конфигурации системы. Если допустить, что электрон представляет собой заряженную

сферу радиуса a и что вся его масса имеет электромагнитное происхождение, то мы получим:

$$m_0 c^2 = \frac{2}{3} \frac{e^2}{a},$$

где m_0 — масса покоящегося электрона, а c — скорость света. Отсюда, зная m_0 , e и c , можно вычислить a . Таким путем и было получено значение 10^{-13} см. Мы видели, что эта величина находится в связи с определенными представлениями о структуре электрона — фактически диаметра электрона никто не мерил. Если дать другую картину этой структуры, например предположить, что электрическое поле электрона распределено вокруг него не равномерно, а обладает „выступами“, то можно получить другое, более высокое, значение для этого диаметра. С нашей точки зрения наиболее характерной для размеров электрона является величина окружающей его сверхдиспергирующей области. Эту величину можно хотя бы приблизительно определить из непосредственных опытов, подобных опытам Г. Ф. Томсона над получением диффракционных колец при прохождении электронов через тонкие металлические листки. Зная радиусы этих колец, можно определить длину волны электронных волн, находящихся в пределах сверхдиспергирующей области, интерференция которых и обуславливает появление колец. Для того, чтоб интерференция была заметной, электронный пучок должен заключать в себе по крайней мере несколько таких волн. Согласно измерениям Г. Ф. Томсона, электронам, со скоростью в 10^{10} см/сек, соответствует длина волны, близкая к $7,8 \times 10^{-10}$ см. Следовательно диаметр сверхдиспергирующей области должен равняться самое меньшее 10^{-9} см, т. е. иметь значение значительно большее, чем те 10^{-13} см, которые даются обычной теорией. Употребляя менее быстрые электроны, можно получить большие длины волн; при этом, однако, когда длина волны станет больше диаметра сверхдиспергирующей области интерференционная картина должна будет сделаться размытой. Опыт показал, что резкие очертания у колец пропадают только тогда, когда скорость электронов делается значительно меньше, чем 10^{10} см/сек, а длина

волны значительно больше, чем 10^{-9} см. Возможно, однако, что на это размывание интерференции влияют и побочные причины.

Хорошо очерченные кольца получаются при длинах волн в 10^{-9} см; следовательно диаметр сверхдиспергирующей области во всяком случае не меньше этой величины. Этот факт вполне может быть согласован со свойствами электрона, так как нельзя забывать, что частота электронных волн весьма велика и что диспергирующая способность электрона проявляется только по отношению к очень быстрым колебаниям. По отношению же к более низким частотам, сверхдиспергирующая область может вести себя как нормальный эфир и, следовательно, не быть обнаруженной. Таким образом вовсе не удивительно, что изучение электронных волн дает для размеров электрона более высокое значение, чем другие методы.

Среди γ -лучей, испускаемых радиоактивными веществами, имеются такие, длины волн которых сравнимы с длинами электронных волн; они, однако, не сопровождаются электронами. Если сверхдиспергирующее состояние имеется только в непосредственном соседстве с электроном, то скорость этих γ -лучей должна быть отлична от скорости электронных волн; если же сверхдиспергирующая способность является свойством всего эфира, то скорость γ -лучей должна совпадать со скоростью электронных волн той же длины волны и следовательно быть больше скорости света. Длины волн γ -лучей можно измерить методом, который в принципе совпадает с методом измерения электронных длин волн; частоты же γ -лучей можно определить, зная скорость выбиваемых ими из металлов β -частиц. Предполагая, что вся энергия γ -лучей переходит в β -частицы, можно определить эту энергию E , а с нею и частоту ν из соотношения $h\nu = E$. Интересующая нас скорость распространения γ -лучей равна $\lambda\nu$. Измерения λ для очень жестких γ -лучей были произведены Ковариком, а измерения ν — Эллисом и Скинером. Эти измерения показали, что значения $\lambda\nu$ весьма близки к обычному значению скорости света. Отсюда можно заключить, что сверхдиспергирующее состояние

вызвано присутствием самого электрона; иначе говоря, что электрон сам „доставляет для себя эфир“.

Можно ожидать, что эффект столкновения с электроном будет для этих жестких γ -лучей значительно больше, чем для света низшей частоты. В самом деле, по отношению к γ -лучам электрон является сверхдиспергирующей средой. Показатель преломления в такой среде значительно меньше единицы, например, для тех волн, с которыми имел дело Г. Ф. Томсон, он равен $\frac{1}{3}$. Таким образом при входе в область, окружающую электрон, путь γ -лучей должен искривиться так, как если бы они отталкивались от электрона. Так как скачок в показателе преломления довольно велик, то это отклонение должно быть очень большим. Изменение направления движения γ -лучей связано с потерей импульса, причем по закону сохранения количества движения импульс, потерянный лучами, переходит к электрону. Массы жестких γ -лучей сравнимы с массой электрона, следовательно столкновение между лучами и электроном можно уподобить столкновению между двумя телами с массами одного порядка величины, одно из которых первоначально находится в покое. При такого рода столкновении, когда одно из тел отклоняется на значительный угол, покоящееся тело получает от движущегося большое количество энергии. Следовательно энергия жестких γ -лучей должна при их столкновении с электронами значительно уменьшиться, а уменьшение энергии эквивалентно уменьшению частоты. Изменение частоты при столкновении носит название эффекта Комптона; из наших рассуждений следует, что этот эффект должен быть особенно велик для жестких γ -лучей.

Поскольку электрон представляет собой сложную систему, постольку он обладает целым рядом собственных периодов колебаний. Число этих периодов может быть очень велико, они образуют ряд дискретных значений, каждое из которых отделено от следующего конечным интервалом. Электрон может колебаться в различных периодах, но не в любом произвольно выбранном периоде. При этом между самим элек-

троном и сопровождающими его волнами должен быть резонанс. Импульс и энергия электрона связаны простыми соотношениями с частотой ведущих волн: в добавлении *A* показано, что энергия электрона пропорциональна частоте волн и что произведение импульса электрона на его длину волны постоянно. Отсюда следует, что импульс и энергия электрона, подобно его частотам и длинам волн, не могут принимать любых значений. Возможные значения например импульса, всегда отделены друг от друга конечными интервалами, так что рост количества движения идет не непрерывно, а скачками. Таким образом мы приходим к своего рода квантованию количества движения. С нашей точки зрения, квантование является следствием и выражением определенной структуры электрона — только такие движения возможны, или по крайней мере устойчивы, которые находятся в резонансе с внутриэлектронными колебаниями.

На какую бы точку зрения ни стать по отношению к структуре электрона, мы почти неизбежно придем к представлению о его собственных периодах колебаний. В самом деле, когда электрон находится в равновесии, распределение силовых линий окружающего его электрического поля таково, что его потенциальная энергия имеет минимальное значение. Если это распределение нарушится, например вследствие прохождения через поле быстро летящего катодного луча, то новое распределение уже не будет равновесным и начнет совершать колебания. Период этих колебаний будет сравним с тем временем, которое тратит свет на прохождение расстояния, равного по величине линейным размерам электрона.

Опыт показывает, что электроны отклоняются под действием электрических и магнитных сил. Так как путь электронов определяется волнами, то приходится признать, что эти силы влияют на направление распространения волн. Известно, что пути световых лучей всегда остаются прямыми линиями, за исключением случая переменного показателя преломления (например в мираже искривление лучей объясняется тем, что воздух у земли горячее и потому менее преломляет, чем в верхних слоях атмосферы). Поэтому раз электриче-

ские и магнитные силы меняют направление лучей, значит они делают показатель преломления окружающей электрон сверхдиспергирующей среды величиной, меняющейся от точки к точке. С нашей точки зрения этого и нужно было ожидать, так как преломляющая способность данной области зависит от распределения в ней электрических систем. Если электрон удален от других заряженных тел, то окружающие его линии сил расположены симметрично; их столько же на одной стороне, сколько на другой, и показатель преломления имеет одинаковые значения на обеих сторонах. Появление заряженного тела нарушает симметрию вблизи электрона: линии сил сгущаются на одной стороне, оставляя другую. Показатель преломления в окружающей электрон области зависит от числа силовых линий, проходящих через эту область. Следовательно, благодаря изменению в распределении силовых линий, вызванному появлением заряженного тела, показатель преломления на одной стороне электрона делается отличным от показателя преломления на другой стороне. А это в свою очередь вызывает отклонение пути волн при переходе с одной стороны электрона на другую, отклонение же волн влечет за собой искривление траектории электрона. Математическая теория этого эффекта и дана в добавлении В.

В настоящей лекции я стремился показать, каким образом недавно открытые свойства электронов приводят нас к тому выводу, что электрон не является конечной ступенью в структуре материи; что он сам обладает структурой, будучи построен из еще меньших электрических зарядов. С помощью такого рода представлений оказалось возможным объяснить недавно открытые явления. Результаты вышесказанной теории во многом совпадают с результатами, полученными путем разработки новой волновой механики, появлением которой мы обязаны Луи де-Бройлю, Шрёдингеру и другим. Это совпадение тем более замечательно, что обе вышеназванные теории резко разнятся друг от друга в самых своих основах. Теория де-Бройля носит чисто аналитический, теория, изложенная мною сегодня, — чисто физический характер. Я пытался показать, что недавно открытые свой-

ства электрона аналогичны тому, что мы имеем в других отделах физики, и дать вместе с тем картину структуры электрона, которая объясняла бы эти свойства.

Интересно отметить, что при таком взгляде на электрон применение методов классической механики ведет к результатам, которые раньше считались исключительной особенностью квантовой механики. Отсюда, мне кажется, можно сделать тот вывод, что необходимость этого нового типа механики связана с особыми специальными представлениями о природе электрона.

Опыты, описанные мною, точно так же, как опыты Дэвисона и Кенсмена и Дэвисона и Джермера об отражении электронов от кристаллов, открывают поле для совершенно новых исследований. Будем надеяться, что эти исследования помогут нам разрешить громадной важности вопрос о природе электрона.

Добавление А.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В СВЕРХДИСПЕРГИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ.

Уравнения распространения волн через среду, содержащую электрические заряды, пишутся следующим образом:

Пусть X , Y , Z суть компоненты электрической силы; α , β , γ — компоненты магнитной силы; x_r , y_r , z_r — координаты электрического заряда массы m_r ; c — скорость света. Тогда справедливы три уравнения вида

$$\frac{dX}{dt} + 4\pi c^2 \sum e \frac{dx_r}{dt} = e^2 \left(\frac{\partial \beta}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial y} \right), \quad (1)$$

три уравнения вида

$$\frac{\partial X}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{d\beta}{dt}, \quad (2)$$

и по три уравнения для каждого заряда вида

$$m_r \frac{d^2 x_r}{dt^2} + n_r^2 x_r = X e + \left(\beta \frac{dz_r}{dt} - \gamma \frac{dy_r}{dt} \right) e. \quad (3)$$

Отсюда мы имеем:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + 4\pi c^2 \sum e \frac{d^2 x_r}{dt^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) - c^2 \frac{d\phi}{dx}, \quad (4)$$

где

$$\phi = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z}.$$

Для случая волнового движения, когда все уравнения линейны, член с ϕ можно отбросить.

Допустим, что все заряженные частицы имеют одинаковые массы m' , одинаковые периоды собственных колебаний и одинаковые заряды; тогда, обозначив через N число зарядов в единице объема, мы получим:

$$4\pi c^2 \sum e \frac{d^2 x_r}{dt^2} = 4\pi N c^2 e \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

В сверхдиспергирующем состоянии $m' \frac{d^2}{dt^2}$ велико по сравнению с n^2 и с $\frac{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}{m'} e^2$, следовательно, согласно (3), правая часть последнего соотношения равна

$$4\pi c^2 \frac{N e^2}{m'} X.$$

Подставляя это в (4), имеем

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + 4\pi^2 B X = c^2 \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

где

$$B = \frac{c^2 N e^2}{m'}.$$

Это и есть уравнение распространения волн в сверхдиспергирующей среде.

Рассмотрим случай плоской волны, когда

$$X = A \cos \frac{2\pi}{\lambda} (vt - z),$$

где v — фазовая скорость, а λ — длина волны. Для этого случая формула (5) дает

$$v^2 = B\lambda^2 + c^2. \quad (6)$$

Групповая скорость u равна

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda} = \frac{c^2}{v},$$

откуда

$$uv = c^2$$

или по формуле (6)

$$c^4 = B\lambda^2 u^2 + c^2 u^2,$$

и окончательно

$$\frac{\lambda u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{c^2}{\sqrt{B}}, \quad (7)$$

т. е. $\frac{\lambda u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ постоянно. Это соотношение между λ и u

как раз и подтверждается опытами моего сына.

Частота наших волн ν есть

$$\nu = \frac{v}{\lambda},$$

или, так как $v = \frac{c^2}{u}$:

$$\nu = \frac{c^2}{\lambda u} = \frac{\sqrt{B}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}. \quad (8)$$

Следовательно наименьшая возможная частота равна $\sqrt{B}$.

Мой сын нашел, что при скорости электрона в 10^{10} см/сек длина волны λ равняется $7,8 \cdot 10^{-10}$ см. Подставляя в уравнение (7) значения $u = 10^{10}$, $\lambda = 7,8 \cdot 10^{-10}$, мы получаем

$$\sqrt{B} = 1,08 \cdot 10^{20}.$$

Таким образом наименьшая частота электронных волн есть $1,08 \cdot 10^{20}$; она соответствует в воздухе длине волны

в $2,7 \cdot 10^{-10}$ см. Эта длина значительно меньше длины волн даже жестких рентгеновых лучей и вообще всех видов излучения, за исключением самых жестких γ -лучей; она мала и по сравнению с радиусом атома.

Так как

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{m}{m_0},$$

где m — масса электрона, движущегося со скоростью u , а m_0 — масса покоящегося электрона, то из уравнения (8) мы имеем:

$$\nu = mc^2 \frac{\sqrt{B}}{m_0 c^2}. \quad (9)$$

Но mc^2 есть полная энергия электрона; следовательно частота волн равна энергии электрона, умноженной на постоянную. Этот факт известен как соотношение теории квант; с нашей точки зрения он является, однако, не постулатом квантовой механики, а логическим следствием того факта, что энергия электрона движется через сверхдиспергирующую среду.

Интересно также, что если по правилам квантовой механики вычислить массу светового кванта любой частоты, то результат будет совпадать с величиной массы электрона, который, согласно нашей теории, сопровождал бы электронные волны соответствующей частоты. Далее, показатель преломления μ равен

$$\mu = \frac{c}{v} = \frac{u}{c}.$$

Но по формуле (8)

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}},$$

где $\nu_0 = \sqrt{B}$ — наименьшему возможному значению ν . Отсюда

$$\mu = \frac{u}{c} = \sqrt{1 - \frac{\nu_0^2}{\nu^2}}. \quad (10)$$

Если

$$X = A \cos(pt - mz),$$

то из уравнения (2)

$$\beta = \frac{m}{p} A \cos(pt - mz) = \frac{1}{v} A \cos(pt - mz). \quad (11)$$

Энергия в единице объема, обусловленная электрической силой, есть

$$\frac{1}{8\pi c^2} A^2 \cos^2(pt - mz).$$

Энергия в единице объема, обусловленная магнитной силой, есть

$$\frac{1}{8\pi} \beta^2 = \frac{1}{8\pi v^2} A^2 \cos^2(pt - mz).$$

Так как в сверхдиспергирующей среде v больше c , то магнитная энергия там не равна электрической — как в недиспергирующей среде, а всегда меньше ее; в частности она равна нулю, когда частота волн достигает предельного значения ν_0 . Среднее значение разности между электростатической и магнитной энергией равно кинетической энергии тех зарядов, присутствие которых вызывает появление дисперсии. В самом деле

$$m_1 \frac{d^2x}{dt^2} = Xe = e A \cos(pt - mz)$$

$$m_1 \frac{dx}{dt} = \frac{eA}{p} \sin(pt - mz),$$

и, следовательно, кинетическая энергия наших зарядов

$$\frac{1}{2} N m_1 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

равна

$$\frac{1}{2} \frac{Ne^2}{m'p^2} A^2 \sin^2(pt - mz).$$

Но из формулы (6)

$$\frac{Ne^2}{m'p^2} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{v^2} \right),$$

и, следовательно, кинетическая энергия равна

$$\frac{1}{8\pi} A^2 \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{v^2} \right) \sin^2(pt - mz)$$

и среднее значение ее есть

$$\frac{A^2}{16\pi} \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{v^2} \right).$$

Как видим, оно действительно совпадает со средним значением разности между электрической и магнитной энергией.

Поэтому среднее значение полной энергии в единице объема равно удвоенному среднему значению электростатической энергии, т. е. величине

$$\frac{A^2}{8\pi c^2}.$$

Поток энергии за единицу времени через единицу поверхности дается вектором Поинтинга

$$\begin{aligned} \frac{1}{4\pi} X\beta &= \frac{1}{4\pi} \frac{X^2}{v} \quad [\text{по формуле (11)}] = \\ &= \frac{1}{4\pi} \frac{A^2}{v} \cos^2(pt - mz). \end{aligned}$$

Среднее значение его есть

$$\frac{A^2}{8\pi v}.$$

Но если u есть скорость энергии, то этот поток должен быть равен средней плотности энергии, умноженной на u . Отсюда

$$\frac{A^2}{8\pi v} = u \frac{A^2}{8\pi c^2}$$

и $uv = c^2$.

Таким путем можно получить значение скорости энергии, не прибегая к понятию интерференции между дугами волн. Так как

$$\beta = \frac{X}{v} = \frac{uX}{c^2},$$

то можно сказать, что магнитная сила пропорциональна скорости энергии. Вводя предельную частоту ν_0 , можно написать уравнение (5) в виде

$$\frac{d^2X}{dt^2} + 4\pi^2\nu_0^2 X = c^2 \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right).$$

С другой стороны, если ν есть частота передаваемых волн, то

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = -4\pi^2 \nu^2 X.$$

Следовательно последнему уравнению можно придать вид

$$4\pi^2 (\nu_0^2 - \nu^2) X = c^2 \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right)$$

или по формуле (10):

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) + 4\pi^2 \mu^2 \nu^2 X = 0.$$

Добавление В.

Путь электрона под действием внешней силы.

Уравнения, определяющие путь луча света в среде с переменным показателем преломления μ , имеют вид:

$$\frac{d}{ds} \left(\mu \frac{dx}{ds} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial x}; \quad \frac{d}{ds} \left(\mu \frac{dy}{ds} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial y}; \quad \frac{d}{ds} \left(\mu \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial z}.$$

Если q есть скорость энергии электрона; u , v , w — ее компоненты, то $\mu = \frac{q}{c}$; и эти уравнения принимают вид

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{u}{c} \right) = \frac{\partial \mu}{\partial x}.$$

Если ds есть элемент пути энергии $ds = q dt$, то отсюда

$$\frac{du}{dt} = cq \frac{\partial \mu}{\partial x} = \frac{1}{2} c^2 \frac{\partial \mu^2}{\partial x}$$

и аналогично для $\frac{dv}{dt}$, $\frac{dw}{dt}$.

Отсюда видно, что путь нашей энергии такой же, как путь массы m , на которую действует сила с компонентами

$$\frac{1}{2}mc^2 \frac{\partial \mu^2}{\partial x}, \quad \frac{1}{2}mc^2 \frac{\partial \mu^2}{\partial y}, \quad \frac{1}{2}mc^2 \frac{\partial \mu^2}{\partial z}.$$

Как видим, эта сила выводится из потенциала V , причем в сверхдиспергирующей области

$$\mu^2 = \mu_0^2 + \frac{2V}{mc^2},$$

где μ_0 — значение, которое имеет μ при отсутствии внешних сил.
