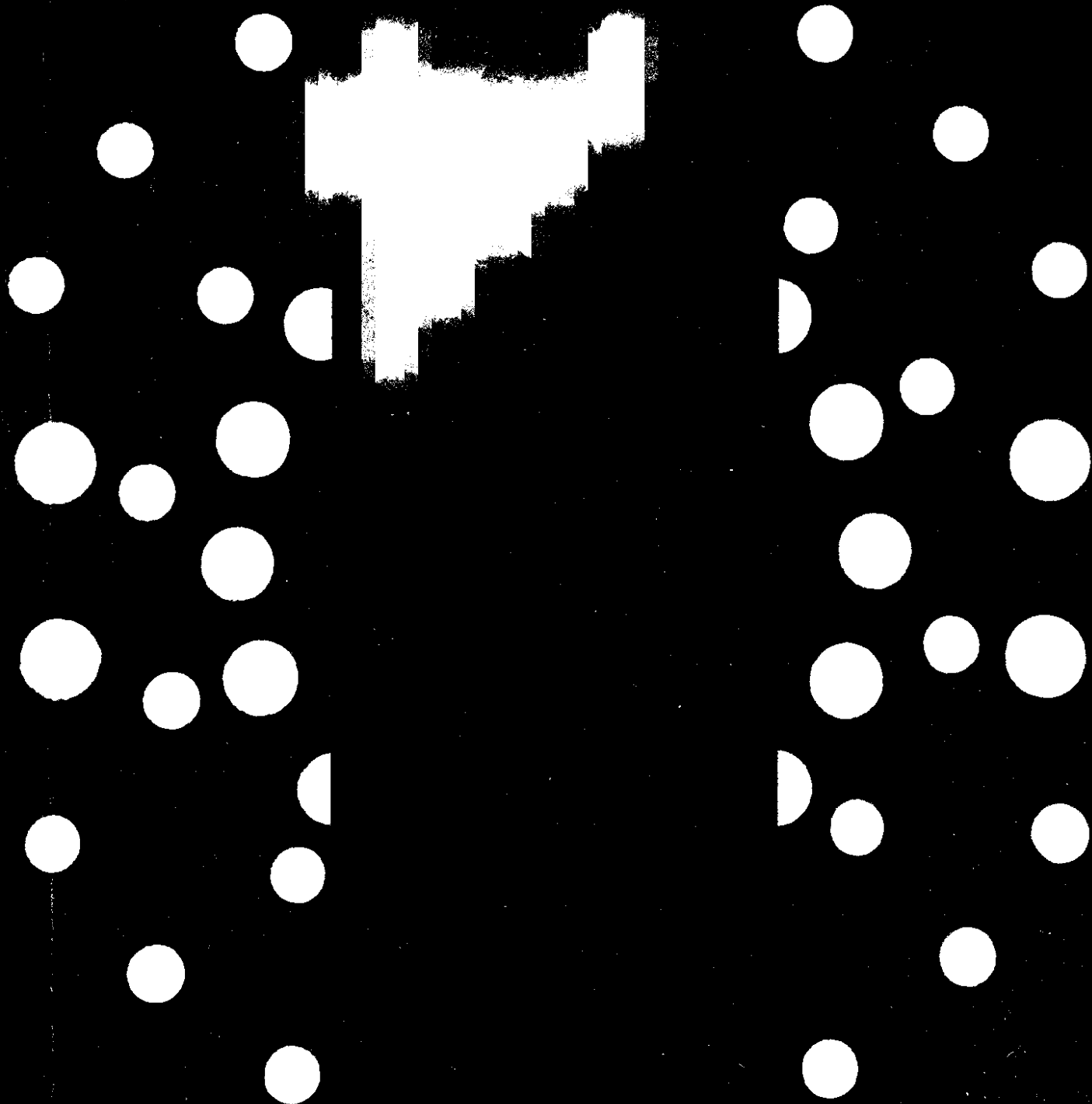


Д. АНДЕРСОН

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА



АТОМИЗДАТ · 1968

DAVID L. ANDERSON

THE DISCOVERY OF THE ELECTRON

THE DEVELOPMENT OF THE ATOMIC CONCEPT
OF ELECTRICITY

Princeton, New Jersey
Toronto — London — New York

1964

Д. АНДЕРСОН

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

(РАЗВИТИЕ АТОМНЫХ КОНЦЕПЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА)

Перевод с английского
В. А. КУЧЕРЯЕВА, Ю. В. ОРЛОВА, Г. А. ВАСИЛЬЕВА

АТОМИЗДАТ

МОСКВА 1968

Д. Андерсон. **Открытие электрона.** М., Атомиздат.

В книге рассказывается о длительном пути развития научных представлений о природе как самого электрона — элементарной ядерной частицы, так и электричества вообще. Перед читателем разворачивается историческая картина событий, связанных с научными открытиями и с разработками моделей и теорий в области электричества и магнетизма. В обзоре этих событий основное внимание уделяется открытиям, относящимся к концу прошлого и началу нынешнего столетия. Сюда входит открытие катодных и рентгеновских лучей, описание классических экспериментов, проведенных выдающимися физиками, открытие радиоактивности и атомарности электрического заряда, описание новейших достижений в области физики электрона. Кроме этого, в книге затронуты смежные вопросы физики, что значительно расширяет общий кругозор читателя, не требуя от него, однако, специальной подготовки.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

Рисунков 10, библиографии 124, таблиц 4.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге рассматривается история тех экспериментальных и теоретических открытий в физике, которые привели к теперешним представлениям о природе электрона в частности и электричества вообще. История электрона довольно сложна в представлении тех, кто знаком с трудностями, возникающими в процессе научных исследований. Но в то же время она и проста настолько, что может быть понята всеми, кто знаком с элементарным курсом физики.

Содержание большинства учебников физики составляют ставшие уже типичными объяснения различных наблюдаемых явлений. Не будем говорить о том, как развивалась физика на пути к современному уровню знаний, какие идеи были отброшены в процессе формирования наших взглядов; и все же физика наших дней освещается прошлым. Можно лучше понять ее животрепещущие проблемы, касающиеся исследований и разработки теорий, если проследить за историей развития по крайней мере некоторых основных идей.

Эта книга является «случайной историей». По форме и содержанию она, очевидно, многим обязана замечательной серии Случайных Историй, опубликованных в Гарварде первоначально под редакцией Джеймса Б. Конанта. Многие преподаватели и ученые в прошлом и теперь, сознательно или несознательно оказали мне большую помощь в написании этой книги. Среди них я должен, конечно, назвать Ф. А. Саундерса, который первым помог мне осознать, что физика может быть одновременно трудным и привлекательным делом; К. Т. Байнбриджа и Р. В. Муна, показавших мне, как мало я знаю о сущности научных исследований; Филиппа ле Корбейлера, Дж. Б. Кохена и Геральда Холтона, замечания ко-

торых помогли мне найти и описать волнующие примеры из истории развития физики; имя И. В. Тейлора, с кем я встречался всего один раз, но чье влияние оказалось столь сильным; моих коллег по Оберлину Ф. Г. Тукера, С. Е. Хова, Т. Е. Менинга, Р. Вайнштока и Дж. Н. Пальмиера и, наконец, не последнее в этом ряду имя Е. У. Кондона, чьи редакторские способности и полезные советы во многом определили достоинства этой книги, если таковые имеются.

Оберлин, Огайо.

Дэвид Л. Андерсон

Глава 1

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО?

Что такое электричество? Прежде чем ответить на этот вопрос, выясним, что мы имеем в виду и какие ответы удовлетворяют нас. Фактически в словах «Что такое электричество?» заключено два вопроса. Первый из них можно выразить в следующей форме: «Что представляют собой *электрические* явления в противоположность механическим, магнитным или астрономическим?» Кроме того, хотелось бы ответить на вопрос: «Можем ли мы понять сущность электричества на основании других явлений и концепций, которые уже хорошо нам известны?». Первый вопрос возник в свое время еще у древних греков, а более или менее удовлетворительные (хотя и не вполне совершенные) ответы были получены примерно в 1850 году. Попытка интерпретировать электричество на основании хорошо развитых неэлектрических концепций также была предпринята греками в далеком прошлом, но этот вопрос до сих пор продолжает волновать умы. Однако случилось так, что проблема была заменена прямо противоположной, и теперь мы часто ищем объяснения неэлектрическому явлению, исходя из электрических свойств материи. И все же наибольшие успехи в объяснении природы электричества были достигнуты в течение последних ста лет. В этой книге мы прежде всего познакомимся с открытиями и теориями, без которых были бы невозможны современные научные представления как о природе электричества, так и о внутренней связи между электричеством и другими явлениями физики и химии.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Наша основная цель — познакомиться с экспериментами, выполненными в период с 1890 по 1935 год, но для понимания сущности таких экспериментов полезно вспомнить сначала некоторые открытия и выдвигавшиеся в свое время теории электричества и магнетизма более раннего периода. Необходимо как бы создать обстановку для нашего рассказа.

К 1850 году основные экспериментальные законы, описывающие поведение электрических зарядов и токов, были хорошо известны. История открытий и путей развития этих законов сама по себе представляется занимательной [1], но мы не имеем возможности изложить ее здесь. Для нас легче просто перечислить (см. стр. 9—12) некоторые важные открытия, теории, уравнения и модели, которые были построены на основании этих открытий. (Мы используем слово «модель» в применении к какому-либо способу наглядного представления структуры или механизма, помогающему объяснить наблюдаемое явление. В этом смысле модель не есть мелкомасштабное воспроизведение некоторого оригинала. Скорее она представляет собой систему математических понятий или описательную и иногда даже механическую картину, с помощью которых можно хотя бы в какой-то степени понять то, что мы наблюдаем. Например, «модель», позволяющая объяснить химические явления, обычно связывается с понятием атома, обладающего некоторыми конкретными свойствами. Исходя из представлений об атомах и их свойствах, можно «понять» определенные химические реакции и, по-видимому, даже предсказать еще неизвестные реакции.)

ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЙ

В результате указанных на стр. 9—12 открытий к 1850 году оказалось возможным получить уравнения, связывающие большое количество электрических, магнитных и механических явлений. Это позволяло, по крайней мере, в принципе осуществить следующее:

1) измерить заряд данного изолированного объекта;

Дата	Экспериментальные наблюдения	Теории или модели
Древность	Ялтарь (или «электрон» по-гречески), натертый шерстью, притягивает маленькие кусочки смолы или пыль	—
1600 год	Вильям Гильберт обнаружил, что многие вещества способны «электризоваться». Гильберт назвал такие вещества «электриками» и указал на ряд различий между электрическими и магнитными явлениями	Гильберт полагал, что электрические эффекты обусловлены своего рода «испарениями» (effluvia); окружающими электризуемый объект Их действие он связывал с нагреванием поверхности «электрика» вследствие трения
1640 год	Никколо Кабео, итальянский монах-иезуит, открыл, что два «электрика» отталкивают друг друга. Ненаэлектризованные мелкие предметы притягивались к наэлектризованному материалу, в то время как электризованные «электрики» отталкивались друг от друга	Было предложено несколько моделей для объяснения этого явления Большинство моделей предполагало существование «испарений» вокруг наэлектризованных объектов
1704 год	—	Ньютон в своей «Оптике» упоминает об электричестве как о невесомой «жидкости»

В период с 1650 по 1750 год многие выдающиеся физики Европы исследовали и обсуждали проблемы природы света, тепла и электричества и вопросы природы материальных объектов. Была выдвинута концепция химических элементов и казалось вполне возможным и естественным представлять свет, тепло и электричество как конкретные формы некоего неуловимого элемента, тесно связанные друг с другом, если не идентичные.

Дата	Экспериментальные наблюдения	Теория или модели
1729 год	Грей установил, что электрические эффекты могут распространяться по металлам и влажным волокнам от одного места к другому. Эти вещества были названы сначала «неэлектриками», так как, будучи натертыми, они не становились наэлектризованными. Грей назвал их «проводниками»	Открытие проводимости показало, что независимо от природы электричества оно не может быть неразрывно связано с породившим его «электрическим» веществом, ибо, подобно теплу, оно передается от одного объекта к другому
1733 год	Де Фай открыл, что тонкие листочки золота, наэлектризованные в результате соприкосновения с натертым шелком стеклом, отталкиваются от последнего. но в то же время притягиваются к копалу (вид смолы), предварительно натертому шерстью. Де Фай обнаружил, что некоторые материалы ведут себя подобно стеклу, другие — подобно копалу. Поэтому он заключил, что существует два вида электричества и назвал их «стеклянным» и «смолистым»	По-прежнему оставался неразрешенным вопрос о механизме распространения электричества в воздухе и других веществах, но появилось дополнительное свидетельство в пользу существования двух видов электричества
1785 год	Кулон в серии блестящих экспериментов установил для силы притяжения и отталкивания электрических зарядов закон обратной пропорциональности квадрату расстояния между зарядами	

Дата	Экспериментальные наблюдения	Теории или модели
1791 год	Гальвани «случайно» обнаружил, что частично анатомированные лапки лягушки начинают дергаться, если к ним прикоснуться спаренными разнородными металлами. почти так же, как это бывает при попадании на лапку искр от «электрической машины»	Было показано, что наблюдаемое явление обусловлено потоком электричества (током) Гальвани утверждал, что биологическая ткань животного была необходима для выработки электрического тока
1800 год	Вольта заменил биологическую ткань бумагой и сукном, смоченными соленой водой или слабым раствором кислоты. Используя так называемую батарею металлических дисков, он смог получить достаточно большие разности потенциалов, способные даже вызывать шок	Теория Гальвани о «животном электричестве» была отброшена. Открытие Вольта явилось первым намеком на существование внутренней связи между химическими и электрическими явлениями
1801 год	Были изобретены аккумуляторные батареи (обратимые вольтовы элементы), и был открыт эффект нагревания электрическим током	—
1802 год	Была получена первая световая дуга	—
1819 год	Датский физик Эрстед открыл, что любой проводник, по которому течет электрический ток, окружает магнитное поле	—
1820 год	Эксперименты Ампера, Био и Савара позволили вывести количественные законы, определяющие силу взаимодействия тока известной величины, протекающего по проводнику, с током в соседних проводниках	Закон для двух длинных параллельных проводников ($F = k \frac{I_1 I_2}{d}$, где F — сила, действующая на единицу длины

Дата	Экспериментальные наблюдения	Теории или модели
1821 год	Зеебек открыл термоэлектрический эффект — возникновение токов, вызванных разницей температур в цепях, состоящих более чем из одного металла	проводника, I_2 и I_1 — величины токов, а d — расстояния между проводниками; коэффициент k зависит от выбранных единиц измерения) получил дальнейшее развитие Фактически этот закон является частным случаем более общей формулировки закона Ампера
1827 год	Упорные исследования, проведенные Омом, позволили ввести понятие электрического сопротивления как отношения величины тока к разности потенциалов	$V = IR$ $R = \frac{A}{L} (1 + aT) *$
1832 год	Фарадей провел экспериментальные работы по электролизу и дал количественные оценки этому явлению	Фарадей предположил, что полученные им уравнения можно понять, исходя из дискретной природы электричества
1831 год	Фарадей открыл индукцию токов в результате изменения магнитных полей	—

* V — разность потенциалов; I — сила тока; R — сопротивление; $R = \frac{A}{L} (1 + aT)$ — закон, выражающий зависимость сопротивления от температуры.

2) предсказать силу, которую необходимо приложить к данному заряду для перемещения его в окрестность другого известного заряда;

3) предсказать силу тока, текущего по проводнику, подключенному к батарее с известной разностью потенциалов;

4) предсказать напряженность магнитного поля вблизи проводника, по которому течет ток;

5) вычислить силу, действующую на проводник с током, расположенный в известном магнитном поле или, что по существу то же самое, находящийся вблизи одного или нескольких проводников с током;

6) предсказать ток, который будет индуцирован в проводнике в форме петли, находящемся в изменяющемся магнитном поле;

7) получить величину заряда, накопленного на данном изолированном проводнике, в результате его присоединения к батарее с заданным потенциалом, превышающим потенциал соседних проводников.

МОДЕЛИ

Можно было, конечно, выполнить все перечисленные выше задачи, и электротехническая промышленность в целом могла бы развиваться независимо от наличия или отсутствия какой-либо конкретной «модели» для описания самого явления электричества. Полученные ранее законы и уравнения давали весьма выразительные результаты, но они были эмпирическими, основанными скорее на экспериментальных данных, а не на какой-либо определенной модели. Но ведь можно же предсказать положение планет в заданный момент времени (на основании законов Кеплера), не зная ни их химического состава, ни внутренней температуры, или поведение данного количества газа азота при различных температурах и давлениях, не делая каких-либо частных предположений относительно внутренней структуры газа.

Тем не менее люди пытались развить модели, которые были бы полезны для понимания электрических явлений (и некоторые из этих моделей уже упоминались выше), поскольку, с одной стороны, это способствует более глубокому проникновению в суть явлений природы (наука есть нечто значительно большее, чем просто упорядоченная коллекция фактов); с другой стороны, даже

наполовину удовлетворительная модель обычно выдвигает идеи новых экспериментов, что оправдывает затраченные усилия.

Как уже отмечалось, открытие Греем электрической проводимости как будто бы подтверждало идею о том, что электричество фактически является «веществом» особого рода, веществом, которое может двигаться через проводники, в проводниках, вдоль проводников. Это вещество могло бы быть «жидким» или состоять из очень мелких частичек (гранул). Оно воздействовало на присутствующее по соседству электричество через, казалось бы, пустое пространство, что представлялось довольно таинственным, — и эта таинственность была до некоторой степени сродни загадке гравитационных сил, действующих на расстояниях в миллионы километров в пространстве того же рода. Открытие де Фаем факта существования по крайней мере двух видов электричества еще в большей степени осложнило проблему. Существуют ли два вида жидкости (если электричество представлять себе как жидкость), или имеется просто одна-единственная «электрическая жидкость» присутствие которой в данном теле в «нужном» количестве делает это тело нейтральным? Тогда чрезмерное количество жидкости должно сделать тело положительно заряженным, а недостаток ее — привести к отрицательной электризации.

Таким образом, во времена Вениамина Франклина выдвигались две модели — модель одной и модель двух жидкостей. Однако полученные к тому времени экспериментальные результаты были еще слишком бедны, чтобы не только остановиться на какой-либо одной из этих моделей, но даже с достоверностью подтвердить жидкостную модель вообще. Не представлялось также возможным решить спор между жидкостной моделью (согласно которой «электрическое вещество» предполагалось бесконечно делимым) и «атомной», или корпускулярной, моделью (в соответствии с которой «электрическое вещество» состояло из гранул, несущих некоторый электрический заряд).

Не был очевиден путь решения вопроса: существует ли электричество (будь то жидкость или гранулы) в каком-то смысле независимо, само по себе, или оно неразрывно связано с материальными объектами?

Модель «неуловимой жидкости» повисла, как говорят, в воздухе. Некоторые явления, связанные с нагреванием тел (теплопроводность, кажущееся исчезновение или появление тепла при превращении твердого тела в жидкость или при конденсации газа, выделение тепла при трении и сгорании, и возможная его передача посредством излучения), можно было бы еще понять на основании модели, согласно которой тепло — это некое вещество, некая невесомая жидкость с определенными специфическими свойствами, названная «теплотой». Дальтон, создавая свои первые модели структуры атома, полагал, что атомы окружены оболочкой из тепловой жидкости, идею о существовании которой он выдвинул для объяснения существования пространства между атомами в газообразном состоянии и для объяснения причины выделения тепла при сжатии газа. Эксперименты Румфорда в 1798 году, продемонстрировавшие образование тепла вследствие трения, опровергли жидкостную теорию тепла, но только точная работа Джоуля в середине XIX века фактически положила конец этой теории. Между тем блестящая математическая теория теплопроводности Фурье и работа Карно по термодинамике навели других исследователей на мысль, что электрическую проводимость и свойства электростатических полей можно, по-видимому, объяснить на основании аналогичной теории, включающей понятие электрической жидкости.

Здесь мы должны вспомнить, что природа самого вещества (так же, как и природа тепла, света, электричества) в течение продолжительного времени являлась предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований. В начале XIX столетия имелись веские доказательства того, что химические явления и поведение газов можно наилучшим образом объяснить исходя из «атомной» структуры вещества. К 1825 году казалось достаточно ясным, что тысячи различных химических соединений следует рассматривать как вполне определенные комбинации атомов сравнительно небольшого числа элементов [2]. Предполагалось, что все атомы одного элемента одинаковы. Если формула химического соединения известна, то относительные массы атомов двух элементов можно определить исходя из веса элементов, участвующих в химической реакции. Факти-

ческую массу отдельного атома определить невозможно, но эта информация не является необходимой для предсказания поведения большого количества атомов данного элемента в химических реакциях.

ХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В 1800 году, через два месяца после открытия Вольтой гальванической батареи как источника тока, Николсон и Карлейль в Англии смогли с помощью электрического тока разложить воду на водород и кислород. Открытие было воспринято как одно из доказательств того что движущееся электричество фактически идентично электричеству, обусловленному трением, т. е. статическому электричеству, поскольку еще с 1750 года было известно, что последнее может вызывать химическое разложение [3]. В 1811 году Гей-Люссак и Тенар предположили, что скорость разложения воды зависит только от силы электрического тока и не зависит непосредственно от размера или формы электродов и от концентрации раствора. В 1833 году Майкл Фарадей установил законы электролиза, в основу которых были положены строгие количественные соотношения. Его открытие можно резюмировать в форме равенства

$$M = FITA/v, \quad (1.1)$$

где M — масса разложившегося или выделившегося в электролите вещества; I — сила тока, проходящего через кювету; T — время прохождения тока; A — атомный вес вещества и v — химическая валентность вещества в растворе. (Если сила тока изменяется, то величину IT необходимо заменить полным зарядом Q , который переносится через кювету.) Коэффициент F является константой, значение которой не зависит от вида электролита и определяется только единицами измерения остальных величин в формуле (1.1). Фарадей назвал отношение A/v *электрохимическим эквивалентом* данного вещества

Численное значение величины A/v зависит, конечно от единиц измерения остальных характеристик, входящих в равенство. Однако, принимая произвольно за единицу электрохимический эквивалент водорода, Фарадей определил относительные электрохимические эк-

виваленты многих других элементов. Он указал [4], что равенство (1.1) можно обратить и использовать как основное соотношение при очень точных измерениях полного электрического заряда, протекшего через данную цепь. Для этой цели он сконструировал прибор, в котором под действием тока происходило разложение воды. Количество выделившегося при этом водорода можно было измерить с большой точностью, благодаря чему полученные данные являлись мерой величины заряда, прошедшего через устройство. (Фарадей изобрел также прибор, который мы назвали бы теперь тепловым амперметром: в некоторых случаях он определял силу тока по количеству тепла, необходимого для нагревания до «красного каления» платиновой проволоки данного диаметра [5].)

Фарадей провел серию остроумных экспериментов с целью установления (если это возможно), какая из существующих теорий или моделей электролиза наиболее правильна. Было, например, неясно, является ли причиной диссоциации молекул в растворе (т. е. расщепления их на отдельные атомы или группы атомов) сам ток, или какое-то действие электродов, или что-либо еще. Работа Фарадея, хотя и не дала ответа на все загадки подобного рода, однако послужила убедительным подтверждением идеи, суть которой сводится к следующему: если вещество имеет по своей природе атомную структуру, то в процессе электролиза каждый атом получает вполне определенное количество электричества.

Чтобы увидеть возможную связь между атомной природой вещества и электричества, рассмотрим следующую модель процесса электролиза. Предположим, что в кювете для электролиза есть свободные атомы элемента A , находящегося в растворе (предположение А). Все атомы элемента A имеют одну и ту же массу m_0 (предположение Б) и каждый из них имеет некоторый положительный электрический заряд q_0 (предположение В). Допустим, что полный заряд Q , проходящий через кювету, переносится только атомами элемента A , в результате чего N_0 атомов этого вида накапливается на отрицательном электроде, отдавая при этом электроду свои индивидуальные заряды (предположение Г). (Если количество меди в растворе остается постоянным, а это действительно имеет место, например в случае типич-

правильность принятой нами модели, но оно определенно свидетельствует о том, что по крайней мере в процессе электролиза электричество переносится малыми порциями, каждая из которых имеет одинаковый заряд. Сам Фарадей [6] выразил это положение довольно осторожно: «Возможно, не следует высказываться по этому вопросу, не оговорив предварительно, что представленные факты будут обоснованы, но нельзя также и, может быть, даже бестактно не обсуждать его вообще. Хотя нам ничего неизвестно о структуре атома, все же трудно удержаться от искушения сформулировать некую идею о маленькой частице, в виде которой мы мысленно представляем его; и хотя в равной, если не в большей, степени мы не сведуци в электричестве (так как не можем сказать, является ли оно особым веществом или веществами, некой силой третьего рода или просто каким-то видом движения обычных материальных частиц), существует огромное множество фактов, оправдывающих наше предположение о том, что атомы в той или иной мере связаны с электрическими силами; именно этим силам они и обязаны своими наиболее поразительными свойствами, в частности взаимным химическим сходством...»

ДРУГОЕ ВЕЛИКОЕ ОТКРЫТИЕ ФАРАДЕЯ — ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ

В 1831 году Фарадей поставил ряд замечательных опытов, которые привели его к открытию явления индукции электрических токов в результате изменения магнитных полей. Мы уже упоминали, что немногим более чем за 10 лет до этих событий Эрстед открыл явление, связанное с возникновением магнитного поля в пространстве вблизи проводника с током. Ампером, Био и Саваром был развит математический аппарат для количественного описания величины и направления магнитного поля, возникающего вокруг данного проводника с током в форме петли. Фарадей попытался обнаружить обратный эффект — возникновение тока под действием магнитного поля. Другими словами, он попытался найти аналогию между действием электрического тока и эффектом, давно уже известным в электростатике

ного процесса гальванического покрытия медью, то мы обнаружим, что такое же число атомов меди должно перейти в раствор с положительного электрода.) Мы не можем измерить ни массы отдельных атомов, ни их заряды, но мы можем определить полную массу отложившегося на электроде вещества M_0 и полный заряд, прошедший через электролит:

$$M_0 = N_0 m_0 \quad (1.2)$$

и

$$Q = N_0 q_0. \quad (1.3)$$

Разделив равенство (1.2) почленно на равенство (1.3), получим

$$\frac{M_0}{Q} = \frac{m_0}{q_0}, \text{ или } M_0 = Q \frac{m_0}{q_0}. \quad (1.4)$$

Масса атома элемента A есть произведение атомного веса этого элемента на некоторую константу (которую мы будем обозначать c и которая одинакова для всех элементов в силу определения понятия «атомного веса». Таким образом, в равенстве (1.2) m_0 можно заменить величиной cA_0 , где A_0 — атомный вес элемента A . Если мы предположим далее (предположение Д), что валентность атома прямо пропорциональна величине электрического заряда, связанного с ним в процессе электролиза, так что заряд равен валентному числу v_0 , умноженному на некоторый основной заряд q_0 , то равенство (1.2) преобразуется к виду

$$M_0 = Q \frac{cA_0}{v_0 q_0} = \frac{c}{q} \cdot Q \cdot \frac{A_0}{v_0}. \quad (1.5)$$

Теперь по форме оно совпадает с равенством (1.1), если постоянный коэффициент c/q_0 (который, по нашему предположению, является константой для всех атомов) обозначить символом F , а Q заменить на IT .

Таким образом, модель, основанная на предположении, что с каждым атомом связан вполне определенный заряд, позволяет нам вывести уравнение, которое согласуется с уравнением, полученным Фарадеем экспериментально. Хотя такое согласие *не доказывает*, конечно,

как «индукция заряда». Например, отрицательно заряженный предмет, будучи поднесенным к незаряженному изолированному проводнику, притягивает положительные заряды ближайшей по отношению к себе части проводника и отталкивает отрицательные заряды. Если дать возможность отрицательным зарядам покинуть проводник, заземлив на короткое время соответствующую часть этого проводника, прежде чем удалить от него заряженный предмет, то первоначально нейтральный проводник приобретет результирующий положительный заряд. (Какие заряды — положительные, отрицательные или те и другие вместе — в действительности движутся в проводнике, можно решить лишь на основании некоторой конкретной модели; но окончательный результат в любом случае аналогичен описанному.) Тогда Фарадей задался вопросом, нельзя ли таким же образом с помощью одного тока вызвать появление другого тока. Он расположил рядом два контура: через один из них можно было пропускать ток, в другой был включен гальванометр. Пытаясь проследить за возникновением индуцированного тока во второй цепи, он ничего не обнаружил, за исключением коротких импульсов, появляющихся в тот момент, когда первичный ток включался или выключался [7]. Продолжая наблюдения, Фарадей заметил, что ток индуцируется не только при включении и выключении первичного контура, но также и при сближении цепей или удалении их друг от друга. Он установил также, что цепь с первичным током можно заменить магнитом, движущимся относительно вторичной цепи, имеющей форму витка; несколько позже ему удалось объяснить все наблюдаемые эффекты с точки зрения индукции тока, обусловленной *изменяющимся* магнитным полем. Такое магнитное поле можно было получить с помощью переменного электрического тока или с помощью движущегося магнита, а также в результате перемещения вторичной цепи по отношению к стационарному первичному току или магнитному полю. Фарадей использовал весьма плодотворную модель, основанную на наглядном представлении о магнитных линиях или силовых «трубках».

В том же десятилетии Георг Ом [8] провел ряд исследований, которые внесли ясность в многочисленные, но не систематизированные в то время эксперименталь-

ные данные, устанавливающие соотношения между так называемой разностью потенциалов на проводнике и проходящим через него током. Таким образом, примерно к 1835 году были сделаны основные эмпирические открытия в области электричества и магнетизма, основные по крайней мере в том смысле, что благодаря им была заложена научная база для широкого развития электротехнической промышленности; кроме того, они дали возможность подвести под эмпирические законы строгий математический фундамент.

ОБЗОР ОБЩИХ ТЕОРИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Вильгельм Вебер (1804—1891) был одним из первых, кто разработал достаточно удовлетворительную теорию электричества и магнетизма, связавшую в последовательную систему несколько отдельных эмпирических соотношений, обсуждавшихся выше. Развивая идеи, высказанные его коллегой Фехнером, Вебер [9] предположил, что ток в проводнике представляет собой мельчайшие положительно и отрицательно заряженные частицы, движущиеся в равных количествах навстречу друг другу. Применяя к такой модели равенства, полученные первоначально Ампером, он смог вывести уравнение для токов, возникающих в результате изменения магнитных полей. В его теории был ряд противоречий [10], и в общем, она скорее оказала большое влияние на дальнейшее развитие идей в области электромагнитной теории и в родственных областях (таких, как теория гравитации), чем стала непосредственным предшественником более поздних теорий.

Первым, кто достиг успеха в разработке действительно отвечающей требованиям времени фундаментальной теории электричества и магнетизма, был Джеймс Кларк Максвелл (1831—1879). Примерно к 1850 году была признана волновая модель света, в соответствии с которой предполагалось, что световые лучи представляют собой волны, имеющие длину 10^{-6} — 10^{-5} см и распространяющиеся со скоростью около $3 \cdot 10^8$ м/сек. Так как для волн, по-видимому, необходима среда, в которой они могли бы распространяться, то встал естественный во-

прос о природе этой среды. Была выдвинута гипотеза о некоем сплошном особом веществе — мировом эфире, заполняющем все пространство и пронизывающем все тела. Если бы световые волны имели механический характер, как все известные до этого волны, то эфир должен бы быть чрезвычайно жестким (ибо волны обладали весьма высокой скоростью); в то же время при движении планет в эфире трение должно отсутствовать. (Трудно удержаться от улыбки при столь необычных предположениях. Тем не менее ученые не должны бояться, казалось бы, даже самых фантастических гипотез, если обычные гипотезы окажутся непригодными для объяснения наблюдаемых явлений. Современный астроном, например, будет спокойно утверждать, что чайная чашка, наполненная веществом из внутренних областей некоторых звезд, должна иметь массу в тысячи тонн.) Во всяком случае, теория эфира оказала вполне естественное влияние на ход мыслей Максвелла и других физиков в процессе исследования проблемы взаимодействия между электрическими зарядами, токами и магнитными полями.

В 1855 году Максвелл был избран членом ученого совета Колледжа Св. Троицы в Кембридже. Вскоре после этого он начал публиковать статьи, в которых пытался свести электрические и магнитные явления к механической модели, включающей идею о несжимаемой, но упругой жидкости, заполняющей собою все пространство. Авторы современных учебников по электромагнитной теории чаще всего только приводят знаменитые уравнения, выведенные Максвеллом, останавливаясь вкратце на их экспериментальном обосновании, и применяют их главным образом для объяснения и предсказания громадного множества самых разнообразных явлений (начиная с отражения пучка света от зеркала и кончая исследованием свойств электромагнитных излучений, определяющих конструкцию телевизионных антенн). Путь развития идей Максвелла открывает ряд замечательных примеров взаимосвязи между механическими моделями, остроумной математической техникой и умением привлечь наметки идей и предположений, высказанных предшественниками и современниками Максвелла — Фарадеем, Вебером, Кельвином и другими. Незаурядные способности Максвелла и оригинальность его мате-

матического мышления сочетались с умением наглядно представить себе вполне конкретные модели. По его мнению, понятие силовых линий, предложенных Фарадеем в качестве некоторого аналога для описания поведения магнитных полей, могло послужить основой для весьма утонченной математической формулировки закона Ампера о взаимодействии магнитного поля с электрическими токами. Действительно, Максвелл смело видоизменил закон Ампера и ввел термин «перемещение тока», понимая под этим движение электрических зарядов внутри диэлектрика, которое Максвелл представлял в виде смещения некоей несжимаемой механической среды. Максвелл переписал закон Фарадея для индукции токов при изменении магнитных полей, связывающий напряженность электрического поля с электрическими зарядами, и закон, описывающий обычные магнитные поля, придав всем им вид уравнений с частными производными, или (что то же самое) вид уравнений векторного поля, включающих некоторые дифференциальные операторы.

Из результатов анализа этих уравнений он смог сделать важный вывод: любое возмущение в электрическом или магнитном поле будет распространяться в пространстве со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/сек. Если источником таких возмущений служит осциллятор (например, электрический заряд, быстро движущийся то вверх, то вниз), возмущения будут представлять собой электромагнитную волну, распространяющуюся со скоростью света и имеющую все основные характеристики световой волны. Такие волны должны преломляться при попадании в диэлектрическую среду, отражаться от металлических поверхностей и поляризоваться и помимо всего прочего переносить энергию и импульс.

Примерно в 1885 году Генрих Герц наряду с другими исследователями попытался получить более точные теоретические обоснования уравнений Максвелла. Несколько позже Герц решил проверить экспериментально некоторые выводы, вытекающие из уравнений Максвелла, особенно предсказания относительно аналогии между световыми волнами и волнами от осциллирующих зарядов. Поставив в 1887 и 1888 годах серию блестящих экспериментов, Герц добился крупного успеха: ему удалось продемонстрировать, что быстро колеблющиеся

электрические заряды действительно создают электромагнитные волны, свойства которых точно предсказываются уравнениями Максвелла. В настоящее время корректность уравнений Максвелла в описании электромагнитных явлений подтверждается работой любой телевизионной станции, радиоприемника, радарной установки, возможностью телефонной связи на дальние расстояния и т. п. Те же самые уравнения определяют характеристики любого электрического мотора и генератора, действующую на хвост кометы силу, обусловленную давлением солнечного света, траекторию иона в радиационном поясе Земли. Другими словами, уравнения Максвелла сыграли такую же роль в развитии теории электрических, магнитных и оптических явлений, как законы движения Ньютона в объяснении поведения планет и Луны, природы приливов и отливов, возможности игры в бейсбол, причин движения локомотивов и падения дождевых капель. Таким образом, к восьмидесятым годам прошлого века сформировалась так называемая классическая физика; к этому времени накопилось уже достаточно много обоснованных доводов в пользу того, что все физические явления можно объяснить на основании законов движения Ньютона, электромагнитных уравнений Максвелла и законов термодинамики. Правда, существовало несколько неприятных экспериментальных фактов, которые не соответствовали этим законам и уравнениям и не могли быть объяснены с их помощью. Но блестящие теории никогда не отвергались только из-за того, что им не соответствовали некоторые экспериментальные данные. Обычно оказывалось, что эксперименты были либо неправильно поставлены, либо в действительности имело место какое-то недоразумение, вводящее ученых в заблуждение; часто благодаря выдающимся работам некоторых молодых физиков открывались новые возможности, позволяющие привести экспериментальные данные в соответствие с теорией; наконец, в ряде случаев теория несколько видоизменялась с целью включения несогласующихся экспериментальных результатов. Но в общем в 80—90 годах прошлого века сложилось мнение, что основные физические теории разумно обоснованы и что дальнейший прогресс будет достигнут в первую очередь за счет более точных измерений параметров уже известных явлений.

Уравнения Максвелла сами по себе не зависят от выбора какой-либо конкретной модели, отражающей природу электричества. Эти уравнения были выведены на основании теории материального эфира, но входящие в уравнения символы можно также соответствующим образом интерпретировать, либо рассматривая электричество как сплошную жидкость, либо с помощью теории «атомов» или «частиц». Многие предсказания, вытекающие из уравнений Максвелла, также не зависят от выбора той или иной модели. Действительно, после того как уравнения получены, можно забыть о первоначальной модели и просто использовать их для описания различных наблюдаемых результатов, подобно тому как мы управляем автомобилем, ничего не зная и не заботясь о внутреннем устройстве автоматического механизма коробки передач. (Еще лучшей аналогией является пример использования законов движения Ньютона и закона всемирного тяготения для предсказания поведения лун Юпитера или для описания движения планеты Нептун без привлечения конкретной модели относительно механизма гравитационного взаимодействия тел.)

Фактически сам Максвелл отдавал предпочтение одной из моделей непрерывного электричества, приписывая все электрические явления перемещению или движению эфира. Он писал, например, в первом томе второго издания своего «Трактата об электричестве и магнетизме» [11]: «Эта теория молекулярного заряда служит методом, с помощью которого можно объяснить довольно большое число фактов об электролизе. Чрезвычайно невероятно, что, придя к пониманию действительной природы электролиза, мы сохраним в какой-либо форме теорию молекулярных зарядов, ибо тогда мы получим надежную основу для корректного описания поведения электрических токов, в результате чего отпадет необходимость в этих временных теориях» [12]. Поэтому Максвелл и даже многие из его последователей, придя к естественному выводу о том, что полученные им уравнения правильно описывают электрические и магнитные поля и их взаимодействие, в дальнейшем отдавали предпочтение моделям, не связанным в значительной мере с процессом течения по проводникам каких-либо жидко-

стей или частиц. Так, выдающийся американский экспериментатор Майкельсон писал в своей книге [13] в 1902 году: «Предположение, весьма привлекательное по своей простоте, состоит в том, что сам эфир представляет собой электричество; однако более разумно предположить, что электричество — это растяжение эфира, т. е. перемещение эфира эквивалентно электрическому току».

Однако пришло время пересмотреть и, возможно, принять ту точку зрения, согласно которой само по себе электричество следует мыслить как своего рода вещество, а не просто перемещение или растяжение некоторой среды. Отдельные экспериментальные данные, полученные даже в то время, когда теория Максвелла была уже признана и одобрена, способствовали возвращению к более ранней модели электричества. Например, на протяжении всего XIX столетия продолжались эксперименты по электролизу и предпринимались попытки построения теории для объяснения этих экспериментов. В 1881 году великий немецкий физик Гельмгольц прочел лекцию в Лондоне [14], в которой он, в частности, отметил: «Если мы принимаем гипотезу атомной структуры элементов, мы не можем не прийти к выводу о том, что электричество (как положительное, так и отрицательное) также разделяется на элементарные порции, или атомы электричества». Конечно, заявление Гельмгольца вытекало, по существу, из результатов работ Фарадея по электролизу. На протяжении многих лет со времен Фарадея продолжалось изучение прохождения электричества через жидкости, а аналогичные работы по электропроводности газов в конечном счете подтвердили точку зрения Фарадея — Гельмгольца.

ПРИРОДА НАУЧНОГО ПОИСКА

В заключение поговорим немного о сути научного исследования. Существует несколько классических формулировок научного метода, однако сами ученые, работающие в той или иной области, обычно чувствуют их односторонность. Эти формулировки обычно включают упоминания о тщательном сборе фактов, об упорядочении этих фактов, о выдвижении временных пробных гипотез и получении выводов из этих гипотез, о проверке

предсказаний или выводов и т. д. Конечно, в конце концов научные знания и теории превращаются в стройные логические системы. Говорят, что на этой стадии наука выглядит подобно прекрасной статуе, с которой удалены все следы подпорок, пыли и мусора. Для ученых, ведущих исследования, другими словами, для науки в процессе ее развития подпорки жизненно необходимы. На самом деле в течение какого-то времени вообще неясно, что является подпорками, а что самой статуей. Правда, в конце концов статуя освобождается от лесов и подпорок и стоит самостоятельно, прекрасная и не нуждающаяся в поддержке.

Левис и Рандол в предисловии к своей большой книге по термодинамике [15] выразили ту же мысль, используя несколько другие аналогии: «Существуют древние соборы, которые, не говоря уже об их священном предназначении, внушают нам торжественное благоговение. Даже праздный посетитель, войдя в такое здание, настраивается на серьезный лад и начинает говорить приглушенным голосом, и так как любой шепот отражается под сводчатым нефом, то кажется, что возвращающееся эхо приносит с собой некое таинственное послание. Труд многих поколений архитекторов и мастеров забыт, их ошибки стерты временем или скрыты под пылью веков. Видя только совершенство законченного целого, мы находимся под впечатлением какого-либо сверхчеловеческого творения. Но иногда мы входим в здание, которое еще недостроено: тогда шум молотков, запах табака, банальные шуточки, которыми обмениваются рабочие, могут натолкнуть нас на мысль, что это не великое сооружение, а результат обычных человеческих усилий, приложенных в определенном направлении и с определенной целью».

Еще одной моделью, с помощью которой можно представить научный процесс, является деревянная головоломка. Ищутся фигурки, сразу несколько, в беспорядке высыпанные из коробки. Некоторые из них обнаруживаются случайно, для нахождения других требуется большая изощренность и высокая утонченность мышления. Некоторые фигурки соединяются вместе, образуя хорошие конфигурации, и тогда эти конфигурации наводят на мысль, какого вида фигурки следует искать дальше, а, возможно, даже, где их искать. Разгадывающий

головоломку испытывает чувство удовлетворения от удачно найденной комбинации и от самого процесса соединения фигурок друг с другом, фактически даже от нахождения этих фигурок. Он чувствует беспокойство, когда некоторые из фигурок не подходят друг к другу. Иногда новые сочетания определяются сразу целиком, но иногда необходимы решительные переделки. Конечно, эта модель не вполне удачна: деревянная головоломка науки не имеет гладких прямых краев. В результате добавления новых деталей неожиданно обнаруживаются свойства, которые, по утвердившемуся мнению, должны относиться к совершенно другой нерешенной проблеме. Иногда то, что считалось удачно подобранной внутренней областью составленной конфигурации, превращается в беспорядок, когда появляются новые фигурки. Что касается тех, кто пишет о научной методологии, то они могут взглянуть на созданную картину позже и заметить ее красоту и ясную логическую структуру. Но тот, кто участвовал в ее составлении, приобретает совершенно иной опыт, опыт более искусственного и знающего настоящую цену человеческому наслаждению, не идущий ни в какое сравнение с опытом того, кто видит только завершенную картину.

Загадка природы человечества отнюдь не разрешена, но ее общие контуры стали теперь достаточно хорошо просматриваться. В связи с этим в настоящей книге предприняты попытки воссоздать для читателя некоторые картины тех крушений и восторженных взлетов, как мы их теперь себе представляем, которые перенесли люди, нашедшие решения этих первых проблем, или, следуя нашей модели, совершить с читателем экскурсию в собор в то время, когда в нем еще не убраны некоторые рабочие подмости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Whittaker E. A. History of the Theories of Aether and Electricity. New York, 1960; Roller D. E., Roller D. H. D. The Development of the Concept of Electric Charge: Electricity from the Greeks to Coulomb. Cambridge, Harvard University Press, 1954.
2. Nash L. K. The Atomic Molecular Theory; Harvard Case Histories in Experimental Science, 4. Cambridge, Harvard University Press, 1950.

3. Whittaker E. *Cm.* [1], p. 73.
4. Faraday M. *Experimental Researches in Electricity*. Vol. II, Sections 732—741. London, Richard and John Edward Taylor, 1839.
5. Faraday M. *Ibid.*, Section 853.
6. Faraday M. *Ibid.*, Section 852.
7. Faraday M. *Ibid.*, p. 23.
8. Ohm G. *Ann. Physik*, 6, 459 (1826).
9. Weber W. *Ann. Physik*, 64, 337 (1845).
10. Whittaker E. *Cm.* [1], p. 225.
11. Maxwell J. C. *Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford, Oxford University Press, 1881.
12. Maxwell J. C. *Ibid.*
13. Michelson A. A. *Light Waves and Their Uses*. Chicago, University of Chicago Press, 1961.
14. Helmholtz H. J. *Chem. Soc.*, 39, 277 (1881).
15. Lewis G. N., Randall H. M. *Thermodynamics*. New York, Mc Graw-Hill Book Company, 1923.

Глава 2

КАТОДНЫЕ ЛУЧИ

ОТКРЫТИЕ КАТОДНЫХ ЛУЧЕЙ

Еще в 1705 году было замечено, что искры от электрической машины проскакивают в разреженном воздухе дальше, чем в воздухе при нормальном давлении. Ватсон [1] в 1748 году наблюдал подобные северному сиянию «сполохи колыхающегося огня» в стеклянной трубке с разреженным воздухом длиной примерно 81 см. В 1838 году Фарадей [2], пропуская ток от электростатической машины через стеклянную трубку с воздухом при низком давлении, наблюдал фиолетовое сечение, исходящее из положительного электрода (анода). Это свечение распространялось почти до самого отрицательного электрода (катода) на другом конце трубки. Сам катод также светился, а между светящимся катодом и фиолетовым столбом имелось темное пространство, которое теперь называют «фарадеевым темным пространством». (Фиолетовый столб — это дедушка современных «неоновых» вывесок и флюоресцентных световых трубок. Окраска испускаемого такой трубкой света зависит от вида заполняющего ее газа. Неон при давлении приблизительно в одну сотую атмосферы испускает яркий оранжевый свет при пропускании через него тока, гелий — розовато-белый, пары ртути — зеленовато-голубой.)

Дальнейшее развитие исследований потребовало усовершенствования техники откачки газа из замкнутого объема. До 1855 года в насосах, использовавшихся для этой цели, прокладки или поршневые уплотнения делались из кожи и подобных ей материалов. Когда внут-

реннее давление снижалось в десять или сто раз по сравнению с нормальным атмосферным давлением, дальнейшее разрежение становилось фактически невозможным из-за просачивания через уплотнения. Но в 1855 году Гейслер изобрел насос, в котором в качестве поршня использовался столб ртути. С помощью такого насоса можно было достигнуть *значительно* более низких давлений, правда при изрядной затрате физического труда. В течение трех последующих лет в процессе изучения электрической проводимости разреженных газов делаются новые открытия. В 1858 году Плюкер [3] обнаружил, что фарадеево темное пространство увеличивается, а свечение вокруг катода становится несколько более протяженным, когда давление воздуха в трубке снижается. Плюкер нашел, что это свечение направлено вдоль «силовых линий» магнитного поля, «как если бы оно было составлено из гибких цепочек железных опилок, прикрепленных на одном конце к катоду». Плюкер установил также, что если катод сделан из платины, то соседние части стеклянной трубки в конце концов покрываются тонким слоем этого металла. (Такой способ нанесения очень тонких металлических слоев до сих пор используется в лабораториях, а сам процесс называется напылением.) Наиболее естественно предположить, что «магнитный» свет образуется вследствие накаливания частичек платины, срывающихся с отрицательного электрода. Плюкер, как оказалось, сделал весьма важное открытие: стекло самой трубки фосфоресцировало вблизи катода, а положение светящегося участка менялось при изменении магнитного поля, в котором была расположена трубка.

В 1869 году ученик Плюкера Хитторф [4] поместил твердый предмет между катодом и местом фосфоресцентного свечения стеклянной стенки. Он обнаружил, что предмет отбрасывает тень, как будто свечение в стекле вызвано лучами, распространяющимися прямолинейно от катода. Сами лучи при достаточно низком давлении в трубке были невидимы.

НАБЛЮДАЕМЫЕ СВОЙСТВА ЛУЧЕЙ

Прежде всего перечислим важные особенности катодных лучей. Плюкер и Хитторф установили следующие факты.

а. *Лучи испускаются катодом, если через разреженное пространство трубки проходит ток.* (Ток, между прочим, был обычно маленьким, порядка миллиампера или меньше. Разность потенциалов между катодом и анодом, наоборот, была довольно высока, около нескольких тысяч вольт. Такие потенциалы обычно получали с помощью «индукционных катушек» возбуждения, которые, как правило, имели две обмотки. Вторичная обмотка состояла из большого числа витков и окружала первичную обмотку, расположенную на железном сердечнике и имеющую относительно небольшое число витков.)

Пульсирующий постоянный ток проходил через первичную обмотку и наводил во вторичной обмотке чередующиеся положительные и отрицательные импульсы, неравные по амплитуде, поскольку первичный ток прерывался вибрирующим контактором быстрее, чем восстанавливался. Батарейное зажигание в современном автомобиле основано на том же принципе. Чтобы получить мощный неппульсирующий источник, некоторые исследователи использовали генератор Вимшурста или подобные электростатические генераторы, а также батареи, составленные из большого количества маленьких аккумуляторов.)

б. *Лучи распространяются прямолинейно.*

в. *Лучи вызывают флюоресценцию стекла.*

г. *Лучи отклоняются магнитным полем.*

С 1871 года Евгений Гольдштейн в Германии провел серию экспериментов с огромным количеством катодов из разных материалов (различавшихся по форме и размерам), на основании которых были сделаны дальнейшие выводы.

д. *Лучи в основном испускаются перпендикулярно поверхности любого катода.* Таким образом, слегка вогнутый чашеобразный катод можно использовать для получения сходящегося пучка лучей, которые будут собираться в фокусе, расположенном в заданной точке. (Как отмечал сам Гольдштейн, положение и степень размытости фокальной точки зависит от остаточного давления газа и от разности потенциалов между анодом и катодом.) Такое направленное испускание лучей значительно отличается от испускания света. Раскаленный уголь, пламя свечи или накалившаяся добела нить испу-

скают свет во всевозможных направлениях, а отнюдь не перпендикулярно к излучающей поверхности.

е. *Свойства лучей не зависят от природы материала катода.* Катод может быть сделан из платины, золота или любого другого подходящего металла.

Устанавливая внутри вакуумных трубок пластины, покрытые самыми различными материалами, и направляя на них пучок катодных лучей, Гольдштейн установил еще ряд свойств лучей.

ж. *Лучи могут вызывать химические реакции.*

Под их действием соли серебра изменяют свой цвет, как и при облучении ультрафиолетовым солнечным светом. Лучи могут быть причиной и других «фотохимических» реакций.

Отклонение лучей магнитным полем привело в 1871 году Кромвелла Варлея [5] к предположению, что лучи состоят из отрицательно заряженных материальных частиц, поскольку поток таких частиц должен отклоняться в соответствующем направлении при прохождении через магнитное поле.

В 1879 году англичанин сэр Вильям Крукс с помощью своего искусного помощника Гимингама, большого мастера по приборам, изобрел множество катодно-лучевых трубок, которые позволили легко демонстрировать уже известные свойства лучей, а также помогли открыть новые свойства.

з. *Лучи, будучи сфокусированы на тонкую фольгу, могут нагреть ее до красного каления.* Таким образом было показано, что лучи переносят энергию.

и. *Лучи способны оказывать силовое воздействие или, выражаясь научным языком, они могут переносить импульс.* Чтобы показать это, Крукс использовал катодно-лучевую трубку, в которой лучи бомбардировали очень чувствительное колесико с лопатками. Ось колесика могла катиться по стеклянным направляющим. Если направляющие строго горизонтальны, колесико с лопатками тщательно сбалансировано, а начальное трение сведено к минимуму, тогда, направив лучи на верхние лопатки, можно заставить катиться это колесико вдоль направляющих. Идея такого опыта возникла у Крукса, когда он наблюдал отклонение очень тонкого кусочка стекла, искусно подвешенного на пути катодных лучей.

Трубки Крукса были столь превосходно сконструированы и изготовлены, что подобные им используются для демонстрационных целей и по сей день. В действительности, как указывал Дж. Дж. Томсон в 1903 году в книге «*Conduktion of Electricity Through Gases*» [6], эксперименты Крукса с лопастным колесиком, по-видимому, доказали, только то, что катодные лучи нагревают лопатки. Он писал: «Допустим, что лучи столь интенсивны, что они переносят очень большой ток, скажем 10^{-5} ампера, имея при этом весьма высокую скорость порядка 10^{10} см/сек; пусть N — число частиц, ударяющихся о поверхность в единицу времени, m — масса частицы; тогда, предположив, что при соударении с поверхностью скорость частиц не меняется, получим величину импульса, сообщаемого поверхности в единицу времени (т. е. величину силы), равную $2Nm \cdot 10^{10}$; если e — заряд частицы, тогда Ne — ток, переносимый лучами, в нашем случае равный 10^{-6} (в электромагнитных единицах); следовательно, импульс, сообщаемый поверхности в 1 сек, равен $2 \cdot 10^4 m/e$ дин, или $1,2 \cdot 10^{-3}$ дин, так как $m/e = 6 \cdot 10^{-8}$ ». (Это составляет приблизительно одну десятитысячную от веса обычной мухи.) Сделав разумные предположения относительно массы и размеров колесика в приборе Крукса, можно рассчитать, что даже при отсутствии трения сила указанной величины должна действовать в течение примерно одной минуты, чтобы повернуть колесико на полный оборот, а чтобы пройти всю длину направляющей, потребуется, возможно, пять минут. Томсон, по-прежнему считал, что наблюдавшееся движение колесика обусловлено так называемым радиометрическим эффектом, т. е. нагреванием лопаток лучами с последующей передачей молекулами газа, ударяющимися о нагретые и ненагретые стороны лопаток, неравных импульсов.

Крукс предполагал, что катодные лучи могут представлять собой «поток молекул». Он считал, что молекулы разреженного газа * в трубке при столкновении с

* Если из катодно-лучевой трубки удалено 99,9% воздуха, то все-таки еще огромное количество молекул присутствует в каждом кубическом сантиметре ее объема. При комнатной температуре в 1 см^3 будет находиться примерно $2,7 \cdot 10^{15}$ молекул и около $4 \cdot 10^{19}$ молекул будут ударяться о каждый квадратный сантиметр катода в 1 сек. В среднем каждая молекула будет проходить между столкновениями путь примерно $0,01 \text{ см}$.

катодом приобретают отрицательный электрический заряд, вследствие чего они отталкиваются отрицательным катодом и с большой скоростью отлетают от его поверхности в перпендикулярном к ней направлении. В итоге они сталкиваются с другими молекулами (после прохождения фарадеевого темного пространства) и вызывают их люминесценцию. «Из-за большой скорости, с которой молекулы отскакивают от возбужденного отрицательного полюса, происходит задержка молекул, продвигающихся с меньшей скоростью по направлению к этому полюсу. Столкновение происходит на границе темного пространства, где люминесцирующая полоса свидетельствует об энергии столкновений» [7].

Модель Крукса, казалось, объясняет все наблюдаемые свойства, которые мы уже перечисляли: прямлинейное распространение, излучение в направлении, перпендикулярном поверхности, отклонение под действием магнитных полей, способность вызывать флюоресценцию, способность передавать энергию и импульс. Крукс говорит об этих лучах как о «четвертом состоянии вещества», называемом им *ультрагазом*. Крукс имел в виду не состояние, в котором молекулы разорваны каким-либо образом на некие частицы нового вида, а скорее состояние, в котором столкновения между молекулами настолько редки, что ими можно пренебречь. (В твердых телах атомы все время сохраняют в какой-то степени фиксированное относительное расположение. В жидкостях они все еще как бы касаются друг друга, но молекулярные группы атомов не имеют между собой постоянной связи. В газах молекулы можно считать независимыми, но только в промежутках между достаточно частыми столкновениями. Поэтому Крукс считал свои лучи примером «четвертого» состояния, в котором даже случайные столкновения не играют роли.)

ДИСКУССИЯ

Казалось бы, модель Крукса отвечала всем необходимым требованиям, поскольку с ее помощью можно было объяснить наблюдаемые свойства на основании вполне понятных и легко воспринимаемых умозрительно явлений. Тем не менее быстро возникали возражения, имевшие под собой как экспериментальную, так и тео-

ретическую основу. В 1880 году П. Дж. Тайт заметил, что если эти лучи действительно являются молекулами, движущимися с высокой скоростью, то длина волны излучаемого ими света должна быть больше или меньше (вследствие эффекта Допплера) длины волны света, испускаемого этими молекулами в обычном состоянии. В самом деле, если источник световых или звуковых волн движется по направлению к регистрирующему прибору, то наблюдаемая длина волны короче, чем в случае постоянного расстояния между источником и наблюдателем. Для звуковых волн этот эффект наглядно проявляется во внезапном изменении высоты звука гудка локомотива в то время, когда локомотив быстро проносится мимо наблюдателя. Количественная характеристика эффекта зависит от отношения скорости источника к скорости распространения волны; для звуковых волн это отношение нетрудно сделать достаточно большим. Световые волны распространяются значительно быстрее звуковых, но доплеровский сдвиг спектральных линий вследствие стремительного движения круковского потока молекул должен быть вполне ощутимым. Однако никаких значительных изменений в спектре светящихся пучков, указывающих на то, что свет испускается молекулами, имеющими очень большую скорость, в разреженном газе не наблюдалось.

Видеманн, Гольдштейн и Герц в Германии, изучая свойства катодных лучей, пришли к совершенно иной модели. Они предположили, что лучи могут быть новым видом электромагнитных волн. В связи с этим они отмечали, что обычные световые волны имеют следующие свойства:

а') свет испускается горячими и некоторыми холодными поверхностями;

б') световые волны распространяются прямолинейно;

в') они могут вызывать флюоресценцию стекла;

г') эти волны не отклоняются магнитным полем;

д') они испускаются во всех направлениях по отношению к ориентации поверхности;

е') свойства световых волн в основном не зависят от природы их источника (по крайней мере для горячих излучателей);

ж') они могут передавать энергию;

и') световые волны способны передавать импульс.

(Последнее свойство вытекает из уравнений Максвелла. Считали, что оно подтверждено экспериментально с помощью «радиометра» Крукса и проявляется в природе в виде отклонения хвостов комет под действием солнечного света.)

Сторонники волновой модели указывали, что все перечисленные свойства наблюдаются и у катодных лучей, за исключением свойств γ и d). В 1880 году еще не было окончательно ясно, что уравнения Максвелла исключают возможность магнитного отклонения электромагнитных волн. Действительно, можно было предположить, что магнитное поле способно каким-то образом деформировать эфир, через который, как полагали, должны проходить волны, и таким путем отклонять именно эти необычные лучи, а не обыкновенные световые. (Было известно, что сильные магнитные поля могут изменять плоскость поляризации световых волн в некоторых средах.) Кроме того, причину однонаправленного излучения катодных лучей можно было, по-видимому, приписать скорее всего необычным обстоятельствам их возникновения, связанного с электричеством, в противоположность образованию обыкновенного света в результате простого нагревания поверхности.

Таким образом, физики должны были остановиться на одной из двух противоречивых моделей, каждая из которых довольно хорошо соответствовала наблюдаемым фактам. Крукс и английские физики в основном придерживались корпускулярной модели, хотя они и признавали, что характерная модель Крукса (поток отрицательно заряженных молекул) возможно нуждается в усовершенствовании. Гольдштейн, Герц и другие немецкие физики были сторонниками волновой модели, хотя магнитное отклонение лучей представляло для них своего рода проблему.

По образному выражению каждая группа имела как бы «отсрочку решения». Но такова уж человеческая натура, а ученые в этом отношении не отличаются от остальной части рода человеческого: несмотря на длинные разговоры о беспристрастной объективности, каждая группа заняла обособленную позицию, представлявшую собой по меньшей мере весьма твердую рабочую гипотезу. А от такой позиции, однажды принятой, не легко отказаться. Фактически эта дискуссия была весь-

ма плодотворной, ибо многие блестящие эксперименты в последующих двух десятилетиях были направлены на то, чтобы окончательно признать или отвергнуть выдвигаемые аргументы. Личные отношения между некоторыми участниками дискуссии были напряженными. Но, по видимому, это не слишком высокая плата за то, что может быть названо теперь началом современной физики.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ГОЛЬДШТЕЙНА

Гольдштейн [8] атаковал идеи Крукса на нескольких фронтах. Чтобы проверить идею «молекулярного потока», он построил катодно-лучевую трубку длиной 90 см и откачал из нее газ настолько, что остаточное давление составляло всего 0,008 мм рт. ст., т. е. примерно одну сотысячную долю нормального атмосферного давления. При таком давлении, как отмечал Гольдштейн, длина свободного пробега молекул (т. е. среднее расстояние, проходимое молекулой между двумя последовательными столкновениями) должна составлять примерно 6 мм, в то время как темное пространство простиралось от катода примерно на 6 см. Крукс, конечно, заявил, что лавина заряженных молекул с катода отталкивает оставшийся в трубке газ, растекаясь подобно пресной воде, приносимой рекой в соленый океан. (Аналогия довольно слабая; пар, выходящий из носика чайника, представлял бы лучшую аналогию, поскольку вода — фактически несжимаемая жидкость, в то время, как в катодно-лучевой трубке имеется чрезвычайно разреженный газ.) Однако наиболее серьезный аргумент Гольдштейна состоял в том, что и после прохождения темного пространства катодные лучи продолжают двигаться по направлению к другому концу трубки, покрывая при этом расстояние, в 150 раз превышающее длину свободного пробега молекул при таком давлении. Он отмечал, что вероятность проникновения на столь большое расстояние без столкновения, вызывающего отклонение от первоначального направления, равна примерно 10^{-65} , и все же лучи образуют резко очерченное флюоресцирующее пятно на дальнем конце трубки. Вероятно, только электромагнитные лучи, думал он, могут

пройти большое расстояние в столь сильно заселенной молекулами трубке, не испытав при этом рассеяния.

В той же статье Гольдштейн снова поднимает вопрос о направленном характере испускания лучей; на основании результатов большого числа экспериментов он показывает, что флюоресцирующее пятно от вогнутой стороны почти полусферического катода достаточно сильно изменяется по размерам и местоположению в зависимости от приложенного напряжения или давления остаточного газа (Дж. Дж. Томсон отметил в 1906 году, что кажущаяся неперпендикулярность испускания была обусловлена отклонением лучей уже после испускания в результате действия сильных электростатических полей или в результате рассеяния на оставшихся молекулах воздуха. Так или иначе к 1906 году дискуссия была закончена, а в 1880 году точка зрения Гольдштейна имела еще приверженцев.)

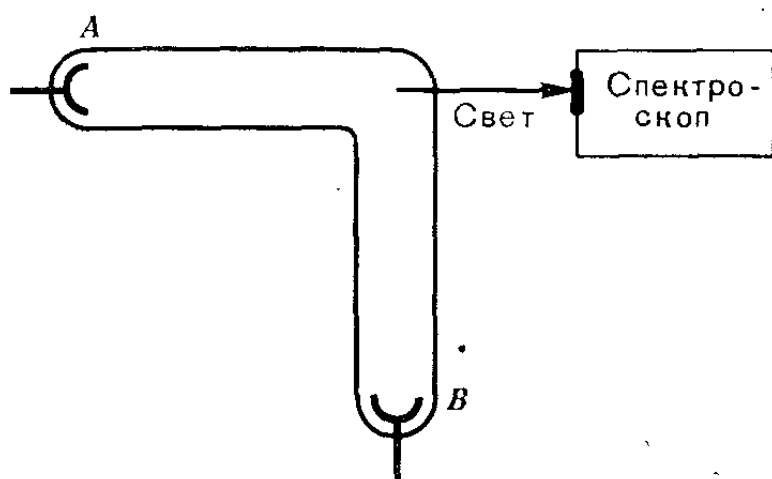


Рис. 1. L-образная трубка Гольдштейна для наблюдения эффекта Доплера в пучке света, обусловленного катодными лучами.

Гольдштейн тщательно повторил также эксперимент Тайта по изучению доплеровского сдвига спектральных линий, излучаемых, как утверждалось, «молекулярным потоком». Он сконструировал L-образную трубку с равными плечами (рис. 1), в которой любой электрод мог служить катодом. Если в качестве катода использовать электрод *A*, то свет, попадающий в спектроскоп, обусловлен потоком, движущимся по направлению к спектроскопу. Когда же в качестве катода работает электрод *B*, свет обусловлен потоком, проходящим в перпендикулярном к оптической оси спектроскопа на-

правлении. Точность измерений позволяла утверждать, что скорость молекул, излучающих свет, не превышает $22,5 \cdot 10^3$ м/сек, что значительно меньше величины, ожидаемой на основании модели Крукса.

ЭКСПЕРИМЕНТ ШУСТЕРА

Артур Шустер [9] из Оуэнского колледжа (Манчестер) предположил в 1884 году, что отсутствие эффекта Доплера можно объяснить тем, что любой свет, испускаемый в процессе распространения катодных лучей, обусловлен относительно стационарными молекулами, с которыми сталкиваются быстродвижущиеся частицы лучей.

Шустер считал, что наблюдаемые лучи представляют поток отрицательно заряженных частиц, имеющих высокую скорость; что касается механизма их образования, он не был согласен с Круксом. Крукс, как уже говорилось, полагал, что нейтральные молекулы получают отрицательные заряды при столкновении с катодом, а затем отталкиваются от него, приобретая при этом высокую скорость. Шустер обнаружил, что в парах над поверхностью электролизованной жидкости не появляется заряженных молекул (как можно было бы ожидать в соответствии с теорией Крукса). Поэтому он предположил, что в катодно-лучевой трубке отрицательные частицы могут возникать в результате диссоциации молекул газа на положительные и отрицательные осколки, причем положительные осколки захватываются катодом, а оставшиеся свободными отрицательные ионы отталкиваются.

В той же статье Шустер описал первый случай использования магнитного способа отклонения лучей с целью получения некоторой количественной информации о физических свойствах частиц, образующих (как он предполагал) лучи. В магнитном поле, ориентированном перпендикулярно начальному направлению движения лучей, наблюдаемая траектория должна быть дугой окружности. В таком случае со стороны магнитного поля на эти частицы должна действовать центростремительная сила. Если каждая частица, имеющая массу m , скорость v и заряд q , движется в магнитном поле, характеризуемом индукцией B , по траектории с радиусом

сом кривизны R , то можно написать следующее уравнение:

$$Bqv = \frac{mv^2}{R} \quad (2.1)$$

или

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{BR} \quad (2)$$

Величины B и R можно было измерить, но поскольку Шустер не знал скорости лучей, это соотношение он не мог использовать эффективно. С другой стороны, он видел, что при фиксированном значении потенциала, приложенного к катодно-лучевой трубке, и при фиксированном значении величины B кривизна траектории остается постоянной. При этом величина радиуса R не зависела от тока, переносимого пучком катодных лучей. На основании этого Шустер заключил, что скорость частиц, образующих катодные лучи, не зависит от величины тока в пучке, а определяется только приложенным ускоряющим потенциалом, если, конечно, отношение q/m остается постоянным.

Позже, в 1890 году Шустер [10] определил верхний и нижний пределы возможных значений отношения заряда к массе. Он исходил из того, что максимально возможная кинетическая энергия частиц должна быть равна Vq (V — ускоряющий потенциал, приложенный к катодно-лучевой трубке; q — заряд излучаемой частицы). Комбинируя выражение для кинетической энергии $\frac{mv^2}{2} = Vq$ с соотношением (2.2), он получил, что максимальное значение отношения q/m равно $2V/B^2R^2$. Взяв в качестве типичных параметров значения $V = 225$ в, $B = 200 \cdot 10^{-4}$ вебер/м² и $R = 1$ см = 0,01 м, Шустер нашел, что отношение заряда к массе для излучаемых с катода частиц должно быть не больше 10^{10} к/кг (кулон на килограмм). Величину нижнего предела этого отношения он определил с помощью выражения (2.2), используя значение скорости молекул воздуха при комнатной температуре (примерно 1000 м/сек). При указанных выше величинах магнитного поля и радиуса он получил в качестве нижнего предела отношения заряда к массе значение $5 \cdot 10^6$ к/кг. Для атома водорода из ре-

зультатов исследования процесса электролиза было известно, что отношение заряда к массе равно примерно 10^8 к/кг, т. е. лежит между указанными выше верхним и нижним пределами для катодных лучей. Это соображение послужило подтверждением того, что катодные лучи представляют собой поток отрицательно заряженных молекул или атомов.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ГЕРЦА И ЛЕНАРДА

Начиная с 1883 года провел ряд экспериментов с катодными лучами Генрих Герц [11], выдающийся экспериментатор, показавший еще в 1877 году, что осциллирующие токи вызывают электромагнитные волны, предсказанные уравнениями Максвелла. Его исследования имели цель опровергнуть модель, согласно которой катодные лучи представлялись как поток отрицательно заряженных частиц, и подтвердить гипотезу электромагнитных волн. Во-первых, эти эксперименты должны были показать, что лучи могут образовываться не импульсами, а непрерывно, и что траектория лучей не обязательно должна совпадать с траекторией тока в трубке.

До Герца экспериментаторы исследовали лучи с помощью быстро вращающихся зеркал, которые используют для стробоскопического наблюдения вращательных, вибрационных или пульсирующих движений. Было обнаружено, что лучи испускаются не в виде непрерывного потока, а отдельными порциями. Герц справедливо предположил, что такая прерывность обусловлена просто пульсациями подаваемого на трубку высокого напряжения, характерными для обычно используемых в этих целях катушек возбуждения. Чтобы получить источник с постоянной разностью потенциалов, он построил батарею аккумуляторов из 1000 маленьких элементов общим напряжением 2000 в. В катодных лучах, полученных с использованием этого источника, не удалось обнаружить пульсаций ни визуально, ни с помощью ряда остроумно задуманных электрических методов детектирования. (Например, ток от батареи пропускали сначала через катодно-лучевую трубку, а затем через схему, подобную мосту Уитстона, которую можно сбалансировать только для постоянного, но не для пульсирующего тока.) Самыми различными способами Герц

показал, что если пульсации и имеют место, то их частота должна значительно превышать миллион циклов в секунду. Эти результаты говорили как будто скорее в пользу непрерывной, волновой, нежели корпускулярной природы катодных лучей, хотя подобные мысли и не были достаточно определенно высказаны Герцем в его статье.

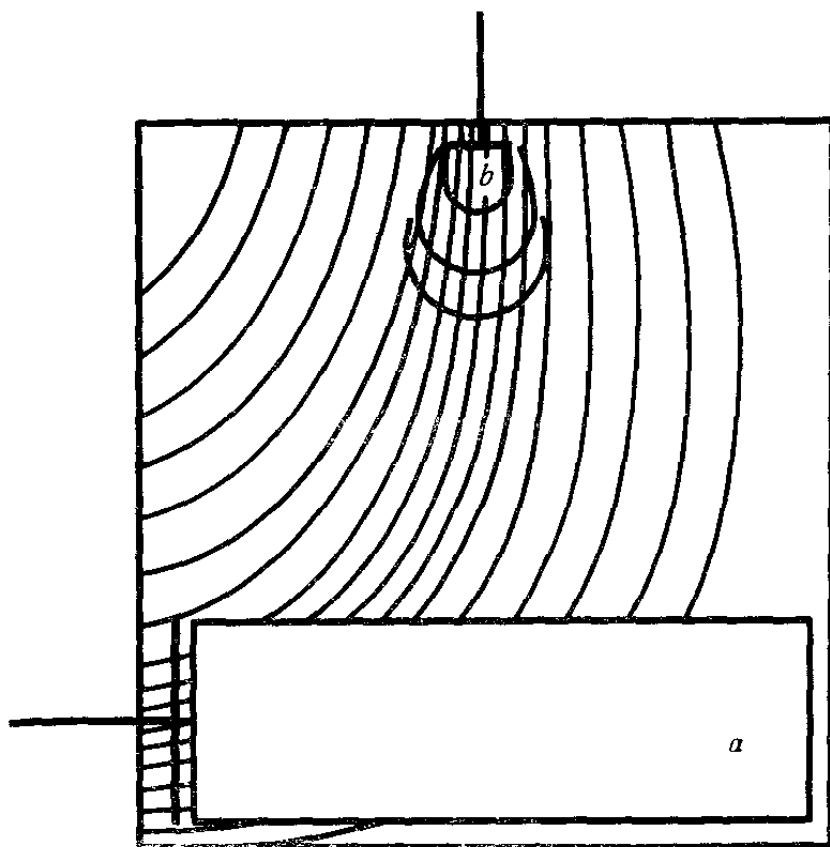


Рис. 2. Устройство, использованное Герцем для наблюдения в плоской катодно-лучевой трубке.

Вторая серия экспериментов преследовала цель непосредственно продемонстрировать тот факт, что ток между двумя электродами в катодно-лучевой трубке не обязательно следует по пути самих лучей. Герц сконструировал «трубку», состоящую из двух плоских стеклянных пластин площадью 12 см^2 каждая, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга. Анод и катод можно было помещать в различные положения на краю откачанного пространства между двумя стеклянными пластинами. Типичное устройство показано на рис. 2. Пучок, как и предполагалось, перемещался в направлении от катода, перпендикулярно поверхности, стано-

ваясь постепенно видимым благодаря образованию слабого голубого свечения в остаточном газе. Этот путь лучей обозначен на диаграмме Герца буквой *a*. Вблизи от анода наблюдалось бархатистое анодное свечение, обозначенное буквой *b*. Кривые линии на рисунке показывают полученные Герцем результаты исследования направления и величины протекающего тока. В качестве индикаторов направления и величины тока он использовал свободно подвешенные магнитные стрелки. Герц регистрировал относительную скорость колебаний стрелки в различных точках и ее ориентацию после возвращения в положение покоя. На основании результатов своих исследований [2] он сделал следующий вывод: «Рисунки, без сомнения, показывают, что направление катодных лучей не совпадает с направлением тока. Иногда линии тока почти перпендикулярны направлению катодных лучей. В некоторых частях газового пространства наблюдается яркое катодное свечение, хотя ток там исчезающе мал. В общих чертах распределение тока на пути от полюса к полюсу такое, каким оно было бы в твердом или жидком проводнике. Отсюда следует, что катодные лучи не имеют ничего общего с линиями тока.»

Герц разработал ряд других методов, с помощью которых, по его мнению, можно было продемонстрировать последнее утверждение. В серии экспериментов он использовал трубку, конструкция которой показана на рис. 3. Здесь *C* — катод, *A* — анод, а *A'* — экран из мелкой проволочной сетки, электрически связанный с катодом. Часть катодных лучей проходит через отверстие *H* в аноде и, минуя сетку, достигает дальнего конца трубки, вызывая появление флюоресцентного пятна на стекле. Предполагалось, что сетка будет электрически защищать остальную часть трубки от влияния катода и анода, так что только «чистые катодные лучи», как их назвал Герц, смогут проникнуть за сетку. Окружающая трубку защита *S*, анод и сетка были заземлены, так что весь объем, за исключением межэлектродного пространства, был свободен от электромагнитных полей. Изолированный от защиты цилиндр *F* соединялся с квадрантным электрометром — прибором, который мог регистрировать и измерять весьма малый электрический заряд. Когда катодно-лучевую трубку удаляли из защиты и

цилиндра и вводили внутрь цилиндра небольшой электростатический заряд, то стрелка электрометра отклонялась весьма сильно, хотя к цилиндру фактически не прикасались. Если катод удаленной лучевой трубки соединяли проволокой со стержнем, подвешенным внутри цилиндра, то стрелка электрометра также отклонялась за пределы своего нормального диапазона. Наконец, когда катодно-лучевую трубку помещали внутрь цилиндра, то наблюдались беспорядочные колебания стрелки, по величине не превосходившие и одной сотой доли того отклонения, которое получала стрелка при подсоединении к катоду стержня. Ряд экспериментов такого рода убедил Герца в том, что любые электрические эффекты, связанные с лучами, являются сугубо вторичными и что сами катодные лучи не переносят заряда во внутреннем пространстве цилиндра.

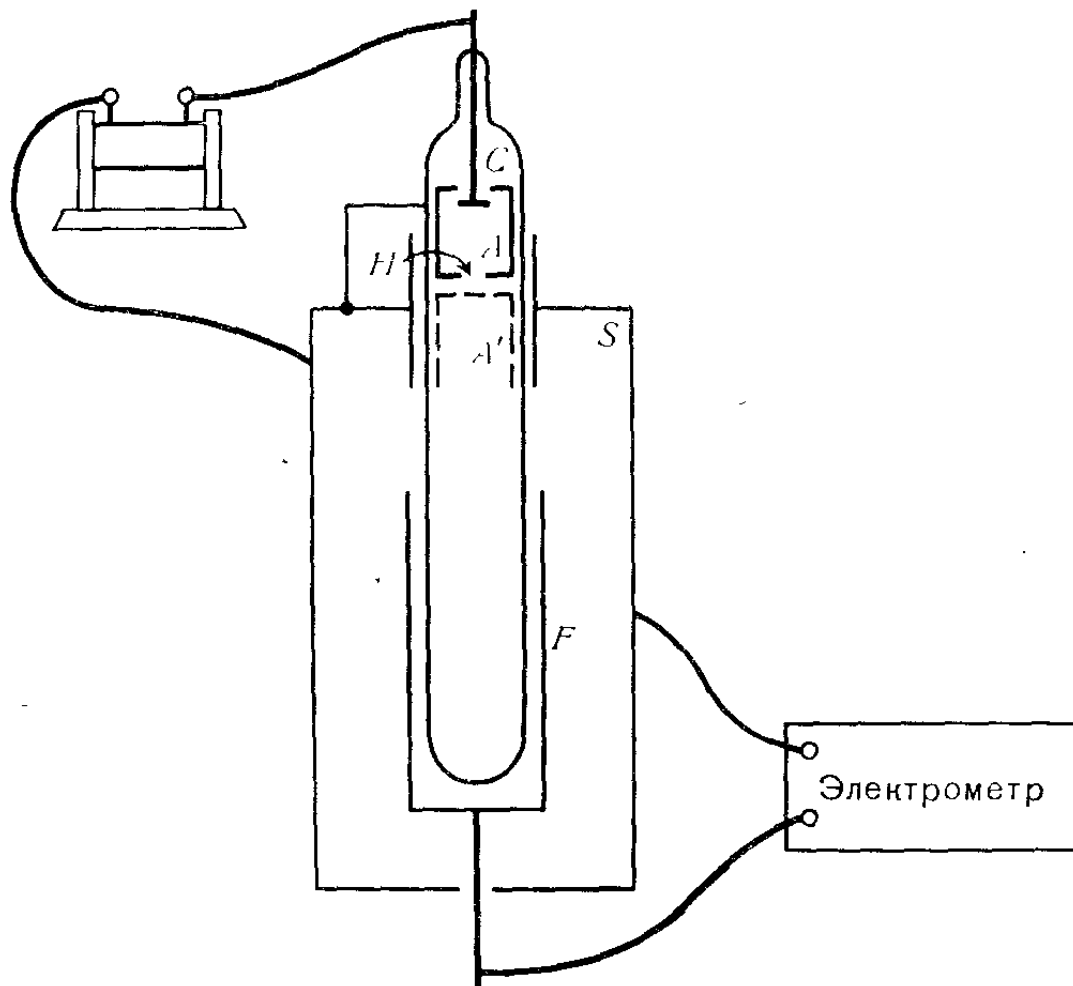


Рис. 3. Аппаратура, использованная Герцем для измерения заряда, переносимого пучком катодных лучей.

Затем Герц поставил эксперимент, в некотором смысле обратный описанному. Если в предыдущем опыте он пытался обнаружить в пространстве заряд, переносимый

лучами, то в новом эксперименте он наблюдал поведение лучей в поперечном электрическом поле. Если бы лучи представляли поток заряженных частиц, они должны были бы подвергнуться действию силы, обусловленной электрическим полем. Пучок катодных лучей в поперечном электрическом поле должен отклоняться так же, как молекулы воды в струе, выходящей из горизонтально расположенного сопла шланга, отклоняются вниз под действием гравитационного поля Земли. Для этих исследований была построена трубка, подобная в какой-то степени изображенной на рис. 3, ее катод был защищен и это давало возможность получать «чистые катодные лучи». Поперек траектории движения лучей располагалась тонкая проволока, тень от которой была видна на фоне флюоресцирующего пятна, обусловленного действием пучка лучей на дальнем конце трубки. Изменение положения этой тонкой линейной тени позволяло наблюдать любые отклонения пучка.

Герц писал: «Теперь трубка была помещена между двумя сильно наэлектризованными, противоположно заряженными пластинами, но никакого эффекта в фосфоресцирующем изображении не наблюдалось. Однако возникал вопрос, не компенсируется ли большая электростатическая сила, приложенная к трубке, распределением электрического заряда, образованного внутри нее. Чтобы разрешить это сомнение, внутрь трубки были введены две металлические полоски на расстоянии 2 см друг от друга, соединенные с наружными контактами, благодаря чему им можно было сообщать различные потенциалы». (На протяжении многих лет после Герца физиков ставили в тупик неожиданные распределения электростатических зарядов внутри стеклянной аппаратуры, поскольку исследователи не всегда даже догадывались о возможности существования зарядов.) Герц сначала применил батарею из 20 элементов Даниэля с напряжением приблизительно 22 в в качестве источника, создающего разность потенциалов между двумя пластинами, однако заметить отклонение пучка ему не удалось. Тогда он использовал батарею с напряжением примерно 500 в, но при подключении ее к пластинам между ними возник дуговой электрический разряд. (Сегодня мы сказали бы, что, вероятно, катодные лучи вызвали ионизацию остаточного газа, обусловив-

шую возникновение электрической проводимости между двумя пластинами или электродами. Напряженность электрического поля между пластинами в таком случае может быть очень маленькой.) Чтобы предотвратить дуговой разряд, Герц подключил большое сопротивление между батареей и отклоняющими пластинами или электродами. Это устранило разряд. Однако теперь большая часть напряжения падала на этом сопротивлении, так что электрическое поле между пластинами было весьма слабым, и Герц не наблюдал смещения пучка катодных лучей.

Тогда он поставил вопрос: какова должна быть скорость этих гипотетических заряженных материальных частиц, при которой магнитное поле напряженностью в один эрстед отклоняло бы их сильнее, чем электрическое поле напряженностью $1,1$ в/мм? (Появление такой нецелочисленной величины связано с тем, что Герц выражал потенциалы в единицах, соответствующих разности потенциалов на элементе Даниэля, которая равна примерно $1,06—1,08$ в.) Путем несложного расчета Герц получил, что скорость должна быть равна $1,1 \cdot 10^8$ м/сек, «...величине, которая едва ли возможна...» (Фактически Герц поставил вопрос: «Какова должна быть скорость частиц, если под действием приложенного электрического поля их отклонение в десять раз меньше отклонения в магнитном поле?» Этот вопрос был вполне разумен, поскольку с помощью своей аппаратуры он мог зарегистрировать отклонение пучка в магнитном поле Земли ($0,2$ гаусса), но не наблюдал никакого отклонения в электрическом поле.)

На основании полученных результатов он сделал следующие выводы.

1. Поскольку более сильные доказательства противного отсутствуют, можно считать разряд батареи непрерывным; поэтому свечение при разряде не обязательно обусловлено пробоем.

2. Катодные лучи представляют собой только явление, сопровождающее разряд, и непосредственно никак не связаны с траекторией тока.

3. Катодные лучи либо не имеют вовсе, либо обладают весьма слабыми электростатическими или электромагнитными свойствами. Эти катодные лучи электрически индифферентны, и среди уже известных природных

явлений к ним наиболее близок свет. Вращение плоскости поляризации света в большой степени аналогично отклонению катодных лучей магнитом [13].

С волновой моделью катодных лучей была связана еще одна побочная проблема. Известно, что многие твердые вещества прозрачны для световых волн, однако никто не знал, могут ли катодные лучи проникать сквозь какие-либо вещества. Но в 1891 году Герц открыл, что и катодные лучи могут проходить через тонкие слои металла. В качестве детектора лучей он использовал пластину из стекла, содержащего некоторые соединения урана, этот сорт стекла отличался свойством сильно флюоресцировать при облучении катодными лучами или ультрафиолетовым светом. Он покрыл часть поверхности пластины тонким слоем листового золота, а часть золотого листочка прикрыл слюдой. Помещая такую пластинку внутрь катодно-лучевой трубки, он обнаружил, что если покрытая листком золота сторона обращена к катоду, то стекло флюоресцирует, несмотря на присутствие золотого листочка на пути лучей. Лучи проходили сквозь золотую фольгу, но не могли пройти через пластинку слюды. Могли возникнуть подозрения, что лучи проходят через неизбежно существующие в листочке золота мелкие отверстия величиной с булавочное острие. Однако никакого свечения со стороны, обращенной к катоду, не наблюдалось, т. е., как отметил Герц, свет не мог пройти назад через предполагаемые отверстия. Более того, он обнаружил, что два или три слоя золотых листочков все еще пропускают заметную долю лучей, тогда как случайно распределенные отверстия в листочках с необходимостью должны перекрываться в таком многослойном экране.

Герц установил также, что лучи могут проникать не только через тонкие слои золота, но и через серебро, алюминий, сплавы золота или серебра с оловом, цинком и медью и через «напыленные» слои меди, серебра или платины. Кроме того, он показал, что лучи могут проходить через последовательно расположенные тонкие слои металлов. И хотя в процессе прохождения через фольгу лучи рассеивались, по выходе из фольги они все же отклонялись в магнитном поле.

Ученик Герца Филлипп Ленард [14] продолжил эти исследования. Закрыв тонкой алюминиевой фольгой

(толщиной $0,000265$ см) небольшое отверстие на конце катодно-лучевой трубки, что позволило ему изолировать вакуум внутри трубки от внешнего атмосферного давления, Ленард смог вывести лучи наружу. Он обнаружил, что они проходят в воздухе при нормальной температуре и давлении расстояние, равное примерно 1 см. Фольги, с которыми работал Ленард, были слишком толстыми (фактически их толщина в несколько тысяч раз превышала поперечник атома), так что даже самые маленькие молекулы или атомы не могли бы пройти сквозь них. В то время типичные размеры атома не были точно известны, но достаточно разумные оценки показывали, что его диаметр составляет примерно 10^{-8} см. Во всяком случае экспериментально можно было убедиться, что фольги способны изолировать водород или любой другой газ от хорошего вакуума. Так как атомы были самыми маленькими из известных тогда частиц и поскольку они не проникали через такие фольги, гипотеза о корпускулярной природе катодных лучей казалась весьма неправдоподобной. С другой стороны, даже сравнительно длинноволновые световые лучи (иными словами, электромагнитные волны) могли проходить через тонкие фольги из золота и через сравнительно большие слои прозрачных материалов, таких, как вода или стекло.

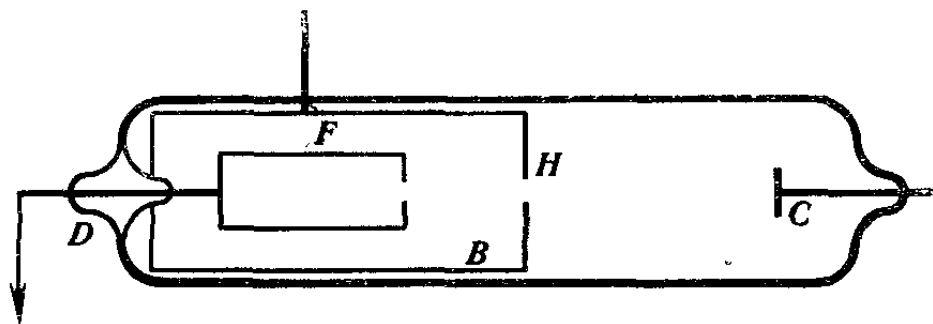
ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ КАТОДНЫХ ЛУЧЕЙ, ПРОВЕДЕННЫЕ ТОМСОНОМ

В 1894 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон, познакомившись с теориями и работами Герца и Ленарда, предпринял попытку измерить скорости лучей. Он сомневался в правильности волновой модели, поскольку лучи отклонялись магнитным полем. Томсон пытался доказать, что катодные лучи, хотя и обладают способностью вызывать фосфоресцентное свечение, сами по себе не являются формой ультрафиолетового излучения. Поэтому он поставил своей целью определить скорость катодных лучей, измеряя время между моментами вспышки свечения в двух различных точках вдоль оси трубки. Для этого он закоптил поверхность трубки, а соответствующие точки обозначил царапинами. Время прохождения света через эти царапины фиксировалось

с помощью быстро вращающегося зеркала — методом, до сих пор используемым в некоторых экспериментах для измерения очень коротких временных интервалов [15]. Эксперименты Томсона показали, что лучи движутся со скоростью, равной примерно $200\,000$ м/сек, что приблизительно в 1500 раз меньше скорости ультрафиолетовых лучей. (Однако в 1896 году Томсон повторил эксперименты по определению скорости катодных лучей, установив, что она значительно выше полученной ранее величины, и опровергнув таким образом результаты своего собственного эксперимента. Каковы причины заниженных результатов, полученных в первом опыте, сказать трудно. Ряд предположений, которые можно было высказать по этому поводу, Томсон в своей статье обоснованно опроверг, ибо, будучи осторожным экспериментатором, он хотел заранее обезоружить возможную критику.)

Этот результат Томсона проложил дорогу для новых замечательных экспериментов, которые прочно утвердили модель, согласно которой лучи интерпретировались как поток заряженных частиц. Но сначала мы расскажем об эксперименте, проведенном в 1895 году французским физиком Жином Перреном, включившим полученные им результаты в свою докторскую диссертацию. В эксперименте, идея которого была весьма проста, Перрен в каком-то смысле повторил попытку Герца определить электрический заряд, переносимый лучами. Но Перрен поместил коллектор, собирающий заряды, *внутри* катодно-лучевой трубки (как показано на рис. 4, представляющем копию рисунка из опубликованной им работы [16]). Коллектор закреплялся внутри анода B с помощью изолированной стойки D в области, свободной от полей. Катодные лучи, эмиттируемые катодом C поступали в пространство внутри анода через отверстие H . Часть лучей попадала на коллектор, в результате чего он неизменно получал отрицательный заряд. Чтобы показать, что этот заряд действительно обусловлен катодными лучами, Перрен приложил магнитное поле, вследствие чего лучи отклонялись и не попадали в отверстие H , а коллектор оставался нейтральным. Перрену посчастливилось сделать коллектор из обычного металла, оказавшегося, вероятно, очень чистым. Некоторые металлы и окислы при бомбардировке их частица-

ми высокой скорости испускают электронов больше, чем поглощают, и вследствие этого заряжаются *положительно*. Случись такое — и тогда возникла бы поистине удивительная путаница в вопросе о действительной природе катодных лучей.



И электрометру

Рис. 4. Прибор Перрена, с помощью которого было показано, что катодные лучи переносят отрицательные заряды:

C — катод; *B* — анод, установленный на изоляторе *D*; *F* — коллектор, собирающий заряды в пространстве внутри анода, свободном от электромагнитных полей.

Перрен, доказав, что лучи переносят отрицательный заряд, помог Томсону решить этот вопрос раз и навсегда (так, по крайней мере, казалось до 1930 года). В 1897 году Томсон воспользовался результатами Ленарда (установившего, что пробег катодных лучей в воздухе при нормальном давлении и нормальной температуре составляет примерно 1 см) и показал, что диаметр частиц (если лучи состоят из частиц) должен быть *значительно* меньше диаметра молекул воздуха, ибо при таких условиях пробег молекулы в воздухе до столкновения с другой молекулой равен в среднем приблизительно 10^{-5} см. Таким образом, катодно-лучевые частицы, имеющие в воздухе пробег примерно 1 см, должны быть, грубо говоря, в 10^5 раз меньше молекул по эффективной площади столкновений. Вот это соображение в соединении с фактом обнаружения одних и тех же свойств лучей, независимо от природы остаточного газа или от вида металла катода, привело Томсона к предположению, что лучи состоят из податомных частиц, являющихся компонентами атомов *всех* элементов.

Затем, в 1897 году Томсон сообщил о ряде экспериментов, которые в совокупности с результатами экспериментов Перрена привели в дальнейшем к всеобщему

признанию корпускулярной природы катодных лучей как потока заряженных частиц. Если Перрен видоизменил и обобщил эксперименты Герца, установив факт переноса лучами электрического заряда, то Томсон в свою очередь видоизменил и обобщил эксперименты Герца и Шустера с использованием магнитных и электрических отклоняющих полей, определив отношение заряда к массе лучей-частиц и показав, что это отношение постоянно и не зависит от вида источника лучей.

Томсон, так же как и Шустер, использовал соотношение между радиусом кривизны траектории пучка в известном магнитном поле, отношением заряда к массе q/m , скоростью гипотетических частиц и напряженностью магнитного поля [см. равенство (2.2)]. Выявив необходимость существования другого вида связи между q/m и v (т. е. фактически записав два уравнения с двумя неизвестными), Томсон придумал два различных метода для определения такой связи. В одном из методов пучок, как и в экспериментах Перрена, падал на электрически защищенный коллектор, который с физической точки зрения был достаточно мал. Пучок передавал свой заряд коллектору, нагревавшемуся вследствие механических столкновений. Количество тепловой энергии H , переданное коллектору в течение промежутка времени T , можно определить из соотношения между его массой, удельной теплоемкостью и приростом температуры. Изменение температуры нетрудно определить с помощью очень легкой термопары, соединенной с коллектором. Полный заряд Q , переданный коллектору, можно измерить чувствительным электрометром.

Предположим, что в течение времени T о коллектор ударяется n частиц, масса и скорость каждой из которых равны соответственно m и v , а заряд — q . Тогда

$$Q = nq \quad (2.3)$$

при условии, что каждая частица «прилипает» к коллектору, не вызывая вторичной эмиссии каких-либо заряженных частиц (так что можно измерить полный заряд переданный коллектору). Для обеспечения этого условия Томсон заземлял защитный электрод. (Если коллектор приобретает отрицательный потенциал, то некото

рые частицы из пучка могут отскочить от него и попасть на защиту.)

Далее, каждая частица, попадая на коллектор, передает ему свою кинетическую энергию, которая будет, очевидно, проявляться в форме тепла:

$$H = n \left(\frac{1}{2} m v^2 \right). \quad (2.4)$$

Разделив равенство (2.3) почленно на равенство (2.4), получим соотношение

$$\frac{q}{m} = 2Qv^2/H, \quad (2.5)$$

которое совместно с равенством (2.2) ($q/m = v/BR$) определяет численные значения отношения q/m и скорости v .

Используя этот метод, Томсон получил значение скорости v в пределах от $2,4 \cdot 10^7$ до $3,2 \cdot 10^7$ м/сек (что составляет примерно одну десятую долю скорости света), а отношение заряда к массе — $(1,0 \div 1,4) \cdot 10^{11}$ к/кг [17].

Как подчеркивал Фитцджеральд в своем обзоре работ Томсона [18], этот метод неявно предполагает ряд допущений. Выше уже упоминалось об условиях, выполнение которых необходимо для справедливости уравнения (2.3). Но и уравнение (2.4) верно только при определенных допущениях. В частности, предполагается, что каждая заряженная частица отдает коллектору всю свою энергию, последняя же полностью превращается в тепло, и потери тепла в окружающее пространство отсутствуют. Помимо этого существуют экспериментальные трудности, связанные с измерением очень малых разностей температуры (не превышающих нескольких градусов) с помощью термопары и с измерением накопленного заряда. Томсон представил свои окончательные результаты измерений величины q/m в виде численного значения $1,17 \cdot 10^{11}$ к/кг; но с учетом вероятной экспериментальной ошибки, по-видимому, следовало бы написать $q/m = (1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{11}$ к/кг. Кроме того, возможны также большие систематические ошибки.

В той же статье Томсон сообщил о другом методе, на основании которого можно получить соотношение между величинами q/m и v . Трубка, которую он использовал, показана на рис. 5. Пучок катодных лучей попадал в электрическое поле, создаваемое пластинами A и B . В этой же области с помощью внешней катушки можно было создать магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка. Любое отклонение пучка можно было измерить по шкале S , расположенной на конце трубки.

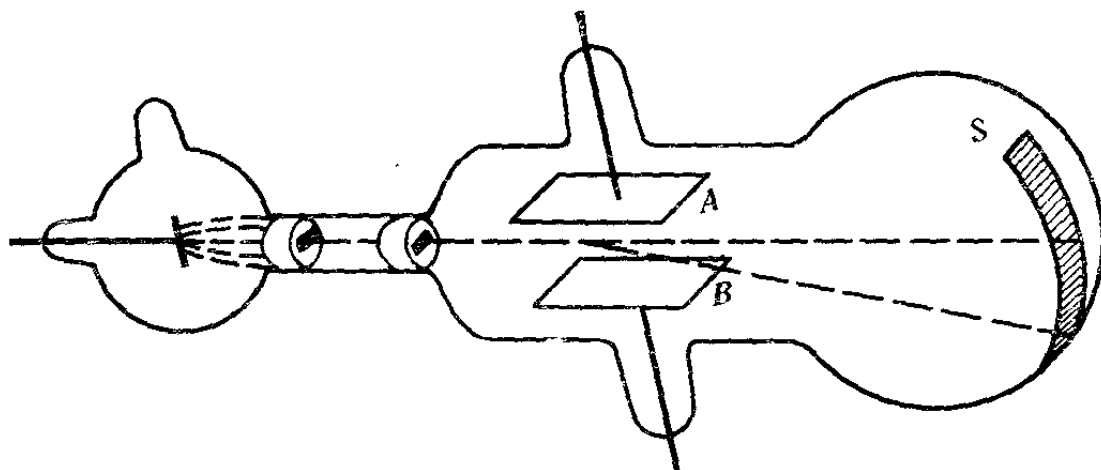


Рис. 5. Прибор Томсона для определения отношения q/m путем отклонения катодных лучей с помощью электрического и магнитного полей.

В отсутствие электрического поля магнитное поле может отклонять пучок вверх или вниз, как показано пунктирной линией на рисунке. Пучок движется прямолинейно, за исключением области действия магнитного поля, где его траектория представляет собой дугу окружности радиуса R . (В действительности существуют переходные краевые эффекты на границах поля, поскольку невозможно создать такое магнитное поле, которое изменялось бы от нуля до максимальной величины при переходе из точки P в бесконечно близкую точку P' . Но краевые эффекты могут быть рассчитаны и учтены при проведении очень точных экспериментов.) Пренебрегая краевыми эффектами, довольно легко рассчитать радиус R по измеренному отклонению пучка и геометрическим характеристикам трубки. Таким образом, эта трубка может быть использована для измерений при наличии только магнитного поля в условиях, необходимых для применимости равенства (2.2).

Предположим теперь, что в присутствии магнитного поля к двум отклоняющим пластинам приложена разность потенциалов V . Если пластины удалены друг от друга на расстояние D (м), то напряженность электрического поля в пространстве между пластинами равна

$$E = \frac{V}{D} \text{ (ньютон/кулон)}. \quad (2.6)$$

На заряд q в таком поле действует сила Eq , направленная вверх или вниз в зависимости от знака q и направления поля E . Если разность потенциалов V такова, что сила Eq численно равна силе, приложенной к частице со стороны магнитного поля, но противоположна по направлению, то

$$F_{\text{эл}} = F_{\text{маг}} \quad (2.7)$$

или $Eq = Bqv$, откуда

$$v = \frac{E}{B}. \quad (2.8)$$

Практически потенциал V изменяют до тех пор, пока пучок не перестанет отклоняться. Нулевое отклонение свидетельствует о том, что электрическая и магнитная силы равны. Соответствующую такой ситуации разность потенциалов V измеряют вольтметром, а индукцию B определяют с помощью пробной катушки и баллистического гальванометра.

Полученное таким образом численное значение скорости v можно подставить в равенство (2.2) и определить величину q/m . Проведя ряд экспериментов и усреднив полученные результаты, Томсон нашел, что среднее значение отношения q/m равно $0,77 \cdot 10^{11}$ к/кг. Эта величина не согласуется с опубликованными им результатами экспериментов, основанных на эффекте нагревания катода. Такое расхождение он объясняет в основном возможными систематическими ошибками в более поздних экспериментах. В своих трудах в течение нескольких последующих лет он обычно приводил величину q/m как «приблизительно равную 10^{11} кулон на килограмм».

Рядом исследователей были получены более высокие значения отношения q/m . Например, в 1898 году Кауфман сообщил о результатах своих опытов, в которых он определял соотношение между величинами q/m и v , измеряя, как и Шустер, разность потенциалов V между катодом и анодом. Найденное им значение q/m составляло $1,86 \cdot 10^{11}$ к/кг. В большинстве своих статей и в изданной в 1903 году книге «Conduction of Electricity Through Gases» Томсон анализировал условия различных экспериментов, пытаясь найти причины такого расхождения, указывал, что отношение заряда к массе не должно превышать примерно $1,2 \cdot 10^{11}$ к/кг.

Предполагалось, что кинетическая энергия частицы $mv^2/2$ равна энергии Vq , приобретаемой зарядом q под действием разности потенциалов V . Томсон отмечал, что Шустер не имел оснований делать такое допущение, поскольку в результате столкновений частицы должны замедляться. Кроме того, Томсон полагал, что ионы, т. е. заряженные частицы, образуются не обязательно на поверхности катода. По его мнению, они могли рождаться и на некотором расстоянии от катода. Стало быть, их кинетическая энергия должна быть меньше Vq , вследствие чего допущения Шустера приводят к ошибочному завышению величин q/m .

Пытаясь интерпретировать некоторые из своих результатов, а также завышенные данные других экспериментаторов, Томсон указывал, что соответствующие опыты проводились, как правило, с сильно вакуумированными трубками. Поэтому для получения катодных лучей необходимо было приложить довольно большую разность потенциалов между анодом и катодом. Однако, сомневаясь в достоверности столь высоких значений, отношение q/m как для катодных лучей, так и для пучков электронов, эмиттируемых другими источниками, он приводит без каких-либо уточнений в своем труде «Conduction of Electricity Through Gases», переизданном в 1906 году.

Возвращаясь назад, отметим следующее высказывание Томсона, когда он, получив численные результаты, опубликовал в 1897 году свою статью [19]: «Мы видим, что отношение m/q не зависит от природы газа и по порядку величины равно 10^{-7} (Томсон использовал в качестве единицы измерения грамм на единицу заряда

CGSM. — Д. А.); это значение весьма мало по сравнению с наименьшим из известных уже значений отношения $m/q = 10^{-4}$, полученным для иона водорода в процессе электролиза. Это может быть обусловлено либо малой массой частицы m , либо большой величиной заряда q , либо тем и другим одновременно.»

На основании результатов Ленарда, изучавшего прохождение лучей через вещество, Томсон утверждал, что корпускулы (как он назвал лучи-частицы) имеют малые размеры, вернее, обладают малой массой. По его мнению, были причины предполагать, что заряд исследуемых частиц q больше заряда иона водорода в электролите. Тем не менее он считал, что различие в 1000 раз в значениях m/q в основном обусловлено малой массой корпускул.

Он писал: «Таким образом, катодные лучи представляют собой новое состояние вещества, существенно отличное от обычного газообразного состояния...; в этом новом состоянии материя представляет собой вещество, из которого построены все химические элементы.»

Как мы увидим позже, такая точка зрения была слишком упрощенной. И все же в этой статье Томсон впервые после Праута, который в 1818 году выдвинул гипотезу о водороде как составной части вещества, высказал серьезное предположение о наличии первичного вещества, образующего якобы неделимые атомы.

С 1897 года корпускулярная модель катодных лучей, главным образом благодаря экспериментам Перрена и Томсона, завоевывает общее признание. Однако высказанная Томсоном мысль о катодно-лучевых частицах как об основных компонентах или даже составляющих компонент, из которых построены все атомы, не была встречена с большим энтузиазмом.

Истинная роль томсоновских корпускул в структуре атома могла быть понята только в сочетании с результатами других исследований, в частности с результатами анализа спектров и изучения явления радиоактивности.

ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА

Эксперименты Герца, продемонстрировавшие образование электромагнитных волн в результате колебания электрических зарядов и подтвердившие справедли-

вость уравнений Максвелла, способствовали общему признанию идеи об электромагнитной природе световых волн, причиной возникновения которых, как предполагалось, являются особые колебания заряженных частиц внутри молекул или атомов.

В 1896 году голландский физик Питер Зееман [20] предпринял попытку установить, влияет ли внешнее магнитное поле на длину волны света, излучаемого этими гипотетическими осцилляторами. Принципиально аппаратура, которую он использовал, была весьма простой: источник света (например, пары натрия в пламени газовой горелки) помещали между поверхностями полюсов электромагнита и пропускали свет через спектроскоп. В своих первых опытах Зееман не обнаружил каких-либо изменений или смещений спектральных линий после включения тока электромагнита. Он прекратил опыты, но однажды ему посчастливилось познакомиться с отчетами Фарадея о последних экспериментах, проведенных сорок или пятьдесят лет назад. Зееман обнаружил, что Фарадей фактически пытался осуществить такой же эксперимент, считая его, очевидно, заслуживающим внимания. Тогда Зееман, преклонявшийся перед умом своего предшественника, решил повторить эксперимент. На этот раз, работая с более сильным магнитным полем, он обнаружил, что спектральные линии («D-линии» паров натрия) стали несколько шире. Уширение составляло около одной сороковой расстояния между двумя соседними линиями или около $0,15 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$).

Зееман обратился за помощью к известному голландскому физику-теоретику Лоренцу [21] с просьбой разработать теорию, которая могла бы объяснить уширение спектральных линий. Лоренц развил теорию электричества и магнетизма, основанную на анализе движения и взаимодействия заряженных *частиц*, в отличие от рассмотрения электромагнитных *полей*, фигурировавших в уравнениях Максвелла. (В некотором смысле формулировка Лоренца отражала основные положения веберовской теории электричества и магнетизма, от которой в свое время отказались отчасти вследствие ее ограниченности, отчасти в связи с громадным успехом теории Максвелла.) Во всяком случае точку зрения Лоренца

ренца следовало учитывать при обсуждении модели, на основании которой можно было бы объяснить эффект Зеемана. Действительно, если предположить, что свет излучают небольшие заряженные частицы, вращающиеся по орбитам внутри атома, то можно предсказать слабое сжатие или уширение этих орбит в присутствии внешнего магнитного поля, что должно привести к некоторому изменению длины волны испускаемого электромагнитного излучения. Фактическую величину этого сдвига можно определить, если известны отношение q/m для орбитальных частиц и напряженность магнитного поля. Лоренц и Зееман, таким образом, допускали существование внутри атома маленьких заряженных частиц и по наблюдаемому уширению спектральных линий смогли оценить величину отношения q/m для этих частиц, которое, по их подсчетам, оказалось равным примерно 10^7 единиц CGSM на 1 г. Это отношение было таким же, как и соответствующая величина, полученная Томсоном для катодно-лучевых частиц.

Спустя несколько месяцев сэр Оливер Лодж в процессе подготовки к демонстрации эффекта Зеемана в Лондонском Королевском обществе [22] обнаружил, что уширение в действительности является расщеплением линии на три компоненты. Это явление он наблюдал с помощью спектроскопа высокой разрешающей способности в достаточно сильном магнитном поле. Почти одновременно такое же открытие сделал сам Зееман, пропуская свет через отверстия в полюсах магнита в направлении, параллельном магнитному полю. Было обнаружено, что в присутствии магнитного поля свет в этом случае имел круговую поляризацию. Тщательный анализ направления поляризации в зависимости от направления магнитного поля показал, что излучающие свет частицы внутри атома должны быть заряжены отрицательно. Таким образом, идентичность этих частиц с частицами катодных лучей казалась доказанной. Английский физик Лармор писал в статье о работе Зеемана [23]: «Итак, Зееман пришел к заключению, что действительная масса вращающегося иона, в предположении, что он обладает целым единичным зарядом (зарядом электрона), составляет около 10^{-8} массы атома. Примерно такая же величина массы получалась в расчетах профессора Дж. Дж. Томсона для носителей электриче-

ства в катодных лучах. Если допустить, что эти носители являются просто электронами, то в молекуле должно находиться около 10^8 электронов.»

С появлением мощных электромагнитов и спектрометров высокой разрешающей способности одним из наиболее точных методов измерения величины q/m стали опыты, основанные на использовании эффекта Зеемана. Бабкок [24] и Хаустон [25] в середине двадцатых годов получили значение $1,761 \cdot 10^{11}$ к/кг с точностью до четвертой значащей цифры. Позднее, в более точных экспериментах, было обнаружено многократное расщепление спектральных линий, чего нельзя уже было объяснить с помощью классической модели Зеемана — Лоренца. Это один из редких примеров в физике, когда несовершенство измерительной техники, не позволившее Зееману обнаружить в его ранних экспериментах эффект многократного расщепления спектральных линий, скорее помогло, нежели помешало развитию полезной модели или теории. Подобный пример являет собой также теория свободного падения Галилея.

Лармор внес в модель Лоренца—Зеемана некоторые усовершенствования. Начиная, по крайней мере, с 1897 года стало ясно, что необходимо задуматься о структуре атома в целом, ибо открытие Зееманом внутри атома корпускул, обнаруженных в катодных лучах, еще не означало, что атом состоит только из таких корпускул. Атом не мог больше рассматриваться как мельчайшая и самая фундаментальная частица.

В 1898 году Ленард отказался от электромагнитной волновой модели катодных лучей и начал эксперименты по определению отношения q/m с помощью электрического и магнитного отклонения катодных лучей, прошедших сквозь тонкие фольги. Он получил величины, близкие по значению к соответствующим величинам, измеренным Томсоном для обычных катодных лучей.

ОТНОШЕНИЕ q/m ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Герц в 1887 году в своих известных экспериментах по изучению электромагнитного излучения сделал, казалось бы, случайное открытие. Он обнаружил, что ультрафиолетовые лучи вызывают эмиссию отрицательно заряженных частиц из некоторых металлов. В 1899 году

Дж. Дж. Томсон сконструировал чувствительный прибор для измерения отношения заряда к массе для этих фотоэлектрических частиц. Он использовал в качестве фотокатода широкую пластину, на некотором расстоянии (около 1 см) от которой была расположена параллельно ей другая пластина (рис. 6). Последняя была заряжена положительно, благодаря чему частицы, излучаемые фотокатодом, притягивались к ней и ускорялись.

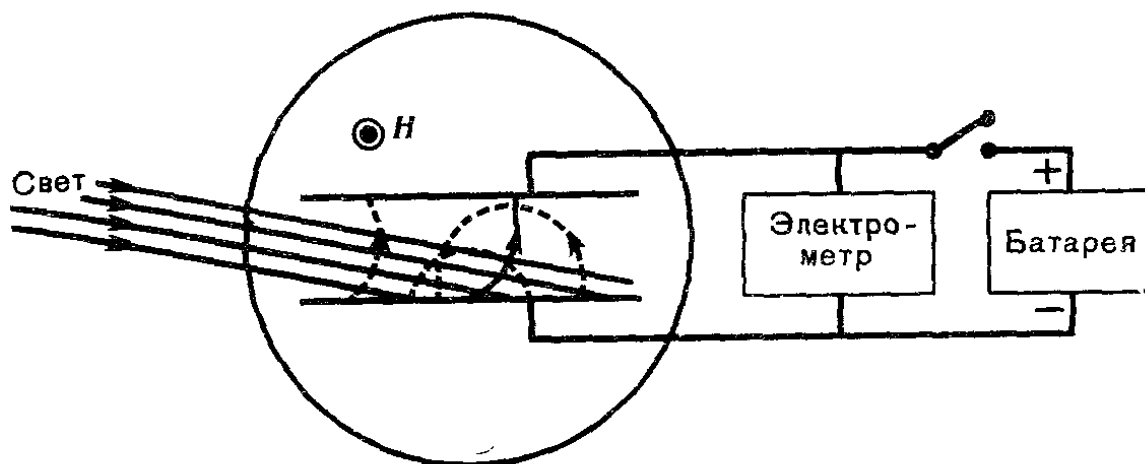


Рис. 6. Схема эксперимента Томсона по определению отношения q/m для фотоэлектрических частиц. Магнитное поле приложено перпендикулярно плоскости рисунка. Пунктиром показаны типичные траектории фотоэлектронов.

Под действием магнитного поля, направление которого было параллельно пластинам, частицы, вылетающие из фотокатода в самых различных направлениях, начинали двигаться по некоторой искривленной траектории. В достаточно сильном магнитном поле при условии, что отношение заряда к массе для всех частиц одинаково, они должны были бы вернуться к катоду. Подключая электрометр к положительно заряженной пластине и меняя напряженность магнитного поля, Томсон измерял ток. Зная расстояние между пластинами, потенциал положительной пластины и напряженность магнитного поля, при которой ток падал до нуля, он смог определить отношение q/m для частиц, испускаемых в результате фотоэффекта. Оно оказалось равным $0,76 \cdot 10^{11}$ к/кг, что было весьма близко к величине, полученной Томсоном для катодно-лучевых частиц.

В 1900 году Ленард и пять лет спустя Рейгер, ускоряя фотоэлектрические частицы известной разностью

потенциалов и затем отклоняя их в магнитном поле, установили, что величина отношения q/m равна $(0,96 \div 1,2) \cdot 10^{11}$ к/кг. Более поздние измерения показали, что эти частицы можно отождествить с катодно-лучевыми.

ЧАСТИЦЫ, ИСПУСКАЕМЫЕ РАСКАЛЕННЫМИ МЕТАЛЛАМИ

В 1899 году Томсон определил величину отношения q/m для отрицательно заряженных частиц, испускаемых, как обнаружил Эдисон, раскаленными добела металлами. Используя при этом методику, которую он применял для изучения фотоэлектрического эффекта, Томсон получил значение q/m , равное $0,87 \cdot 10^{11}$ к/кг, что удовлетворительно согласуется с величиной этого отношения для частиц катодных лучей.

В течение нескольких последующих лет Оуэн в Англии и Венельт в Германии получили подобные значения для частиц, испускаемых окислами некоторых металлов, нагретыми до температуры красного каления.

ЧАСТИЦЫ, ИСПУСКАЕМЫЕ РАДИОАКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

В конце прошлого века стало известно, что некоторые радиоактивные вещества испускают отрицательно заряженные частицы, получившие впоследствии название β -лучей (бета-лучей). В 1900 году Беккерель попытался определить отношение заряда к массе и скорость этих частиц, пропуская их через электрическое и магнитное поля. Он обнаружил, что они имеют весьма высокую скорость, составляющую приблизительно $\frac{2}{3}$ скорости света, в то время как отношение заряда к массе равно для них примерно 10^{11} к/кг. В более точных экспериментах, проведенных Кауфманом в 1901—1902 годах для β -лучей было получено отношение q/m , равное $1,77 \cdot 10^{11}$ к/кг.

Таким образом, в течение четырех-пяти лет после успешных экспериментов Томсона в 1897 году с катодными лучами было установлено, что электроны (так стали называть вновь открытые частицы) испускаются раз-

личными веществами и обладают по существу одинаковыми свойствами.

Эмиссия электронов может происходить: а) под действием сильных электрических полей или при бомбардировке катода положительными ионами, как в классической катодно-лучевой трубке; б) в результате поглощения атомами ультрафиолетовых лучей; в) в результате теплового возбуждения атомов в металлах и окислах, нагретых до температуры белого каления; г) в результате спонтанного распада радиоактивных атомов.

Если, кроме того, предположить, что точно такие же частицы присутствуют *внутри* атомов, то становится возможной лучшая интерпретация эффекта Зеемана. (Такое допущение не является тривиальным, ибо испускание частицы атомом не есть логическое обоснование того, что данная частица содержится в самом атоме. Современная физика изобилует множеством примеров, когда эмиттируемые частицы образуются в момент испускания.)

В табл. 1, заимствованной из работы Томсона («Conduction of Electricity Through Gases», 1906), приведены примеры некоторых источников электронов и отношения величины заряда к массе, полученные для каждого из них в различных исследованиях. В наше время физики обычно приводят экспериментальные данные вместе с оценкой их точности, что позволяет судить о справедливости тех или иных утверждений хотя бы в пределах вероятных экспериментальных ошибок и неопределенностей. Приведенные Томсоном значения отношения q/m отличаются друг от друга по крайней мере в три раза, однако это не помешало ему в свое время утверждать, что все наблюдавшиеся частицы идентичны. (Скорости этих частиц отнюдь не обязаны быть одинаковыми, так что разница в соответствующих значениях не должна вызывать недоумения.)

Таким образом, к 1900 году было накоплено много убедительных фактов, позволявших утверждать, что электрон является составной частью атома. Теперь усилия физиков были направлены на изучение свойств электрона, ставились эксперименты и развивались теории, которые помогли бы осмыслить роль этой частицы в многочисленных химических и физических явлениях.

Таблица 1

Источник частиц	Исследователь, дата	Метод	q/m , 10^{11} к/кг	Скорость, 10^7 м/сек
Катодные лучи	Дж. Дж. Томсон, 1897	В, Е	0,77	2,2÷3,6
	Дж. Дж. Томсон, 1897	В, Н	1,17	2,4÷3,2
	Кауфман, 1897—1898	В, V	1,86	—
	Симон, 1899	В, V	1,865	—
	Вихерт, 1899	В, L	1,26	—
	Сейтц, 1901	В, Е	0,645	7,03
	Сейтц, 1902	В, Н и V	1,87	5,7÷7,5
	Штарк, 1903	В, Е	1,84	3,2÷12
	Рейгер, 1905	В, R	1,8	10
«Лучи Ленарда»	Ленард, 1898	В, Е	0,639	—
	Ленард, 1898	В, R	0,68	—
Фотоэлектроны	Дж. Дж. Томсон, 1899	I	0,76	—
	Ленард, 1900	В, V	1,15	—
	Рейгер, 1905	В, V	0,96÷1,2	—
Горячие металлы Раскаленные окиси	Дж. Дж. Томсон, 1899	I	0,87	—
	Оуэн, 1904	I	0,56	—
	Венельт, 1904	В, V	1,4	—
Бета-излучение радия	Беккерель, 1900	В, Е	1,0	20
	Кауфман, 1901—1902	В, Е	1,77	—
Бета-излучение полония	Эверс, 1906	В, Е	1,7	—

Примечание. В — отклонение пучка в магнитном поле; Е — отклонение пучка в электрическом поле; Н — измерение энергии, обусловленной эффектом разогрева пучка; V — измерение ускоряющей разности потенциалов; L — измерение скорости частиц; R — замедление в электрическом поле; I — отклонение широкого пучка в переменных пересекающихся электрическом и магнитном полях и регистрация момента исчезновения тока.

Но прежде чем продолжать наш рассказ, мы несколько отвлечемся и в следующей главе познакомимся с двумя замечательными открытиями, сделанными неожиданно в процессе исследования свойств катодных лучей в девяностых годах прошлого столетия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Watson W. Philos. Trans. Roy Soc. London, **45**, 93 (1748); **47**, 362 (1752).
2. Faraday M. Philos. Trans. Roy. Soc. London, **128**, 125 (1838); Faraday op. cit. Vol. I, Section 1526.
3. Plücker J. Ann. Physik, **103**, 151 (1858); Philos. Mag., **16**, 119, 408 (1858); Philos. Mag., **18**, 1, 7 (1859).
4. Hittorf J. W. Ann. Physik, **136**, 1, 197 (1869).
5. Varley C. Proc. Roy. Soc. A, **19**, 236 (1871).
6. Thomson J. J. Conduction of Electricity Through Gases. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1906, p. 630.
7. Crookes W. Philos. Mag., **7**, 57 (1879).
8. Wiedemann G. H. and Goldstein E. Philos. Mag., **10**, 234 (1880).
9. Schuster A. Proc. Roy. Soc. A, **37**, 317 (1884).
10. Schuster A. Proc. Roy. Soc. A, **47**, 526 (1890).
11. Hertz H. Miscellaneous Papers. London, Macmillan and Company, 1896.
12. Hertz H. Ibid., p. 245.
13. Hertz H. Ibid., p. 254.
14. Lenard P. Ann. Physik, **51**, 225 (1894); **52**, 23 (1894).
15. Thomson J. J. Philos. Mag., **38**, 358 (1894).
16. Perrin J. Compt. rend., **121**, 1130 (1895).
17. Thomson J. J. Philos. Mag., **44**, 293 (1897).
18. Fitzgerald G. F. Électricien, **39**, 103 (May 1897).
19. Thomson J. J. Philos. Mag., **44**, 311 (1897).
20. Zeeman P. Zittingsversl. Amsterdam, **5**, 181, 242 (1896); Philos. Mag., **43**, 226 (1897); **44**, 55 (1897).
21. Lorentz H. A. Philos. Mag., **43**, 232 (1897).
22. Lodge O. Proc. Roy. Soc. A, **60**, 466, 513 (1896); **61**, 413 (1896); Électricien, **38**, 568, 643 (1897); Nature, **56**, 237 (1896).
23. Larmor J. Philos. Mag., **44**, 503 (1897).
24. Babcock H. D. Astrophys. J., **38**, 149 (1923); **69**, 43 (1929).
25. Houston W. V. Phys. Rev., **30**, 608 (1927).

Глава 3

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ И РАДИОАКТИВНОСТЬ

Хотелось бы сказать несколько слов об одной замечательной особенности, характерной для научного поиска. Часто в процессе упорных исследований какого-либо конкретного явления неожиданно открывают новый, ранее не известный эффект. Человеку неискушенному это может показаться счастливой случайностью или просто везением. Но еще Пастер заметил, что в науке случай помогает только зрелому уму. Зрелость же человеческого ума и его способность к открытиям определяются двумя факторами. Прежде всего, необходимо быть хорошо подготовленным и знать все то, что уже сделано, чтобы суметь почувствовать новое в том или ином его проявлении. При этом ум должен вообще быть восприимчивым ко всему новому и, может быть, необычному. Ученый должен уметь отличать второстепенные эффекты от новых, необычных явлений, с которыми он может столкнуться в процессе эксперимента и которые он должен уметь заметить, проанализировать и исследовать, отказавшись с необходимостью от рассмотрения побочных эффектов. В последнем десятилетии XIX века многие более или менее подготовленные люди экспериментировали с катодными лучами. Но удивительное открытие рентгеновских лучей суждено было сделать одному из них, человеку и счастливому и мудрому одновременно. Счастливому, ибо ему удалось заметить нечто необыкновенное в явлении, которое наблюдали и другие, но прошли мимо; достаточно мудрому, чтобы выявить суть вновь открытого.

ОТКРЫТИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

В 1895 году Вильгельм Конрад Рентген, директор Института физики и ректор университета в Вюрцбурге, проводил эксперименты с катодными лучами. Он случайно заметил, что картон, покрытый флюоресцирующим минералом, начинает светиться в темной комнате, если поблизости работает катодно-лучевая трубка (сама трубка в это время была накрыта, и поэтому комната была совершенно темной). Рентген немедленно поставил серию блестящих экспериментов и в течение шести недель выявил почти все основные свойства лучей, вызывающих флюоресцентное свечение. В декабре 1895 года и в марте 1896 года он опубликовал полученные им результаты в статье «On a new Kind of Rays, Preliminary Communication» («О новом виде лучей, предварительное сообщение») [1]. Привожу некоторые выдержки из первой части этой работы.

1. «Если разряжать довольно большую индукционную катушку через . . . катодно-лучевую трубку . . ., которая достаточно хорошо откачана и прикрыта тонким черным картоном, и если всю аппаратуру разместить в совершенно темной комнате, то при каждом разряде на экране из бумаги, покрытой платиноси-неродистым барием, наблюдается яркая вспышка . . . Это свечение заметно даже в том случае, когда экран находится на расстоянии двух метров от аппаратуры.

Легко доказать, что причина, вызывающая флюоресценцию, кроется в самой разрядной трубке . . .»

2. Во втором разделе Рентген описывает множество материалов, которые оказались в той или иной степени прозрачными для этих лучей. Здесь и бумага, и колоды карт, и оловянная фольга. Отдельные листы этих материалов были прозрачны, однако несколько листов, сложенных вместе и помещенных между трубкой и флюоресцирующим экраном, создавали тень. Тонкие пластины из дерева, тяжелой резины и стекла, которое почти не содержало свинца, были сравнительно прозрачны, а свинцовое стекло — относительно непрозрачно. Рентген обнаружил, что мышечная ткань более прозрачна по сравнению с костной. Вода и другие жидкости также были прозрачны, в то время как большинство металлов толщиной в несколько миллиметров и более оказалось

непрозрачным. В сноске Рентген отмечает: «Для краткости изложения я буду использовать термин «лучи», а для отличия от других лучей я буду называть их «Х-лучами». Другие исследователи обычно называли эти лучи «рентгеновскими лучами», несмотря на возражение самого Рентгена. Название «Х-лучи» укоренилось в Америке во время первой мировой войны*.

3. «Представленные результаты экспериментов наряду с другими данными приводят к заключению, что прозрачность различных веществ, имеющих одинаковую толщину, определяется в основном их плотностью... Дальнейшие эксперименты показали, однако, что плотность не является единственным определяющим фактором. Я изучал прозрачность пластинок приблизительно одинаковой толщины из стекла, алюминия, кальцита и кварца. Хотя эти вещества имеют почти одинаковую плотность, вполне очевидно, что кальцит существенно менее прозрачен по сравнению с остальными веществами, которые в этом отношении оказались почти одинаковыми». Наблюдавшийся эффект получил объяснение позднее: элемент кальций, содержащийся в кальците, имеет больший атомный номер, а следовательно, содержит больше электронов, чем основные составляющие элементы других материалов; поглощение же рентгеновских лучей непосредственно связано с плотностью электронов в веществе.

4 и 5. (В этих разделах описаны дальнейшие исследования по прохождению лучей через вещество.)

6. «Платиносинеродистый барий не является единственным соединением, флюоресцирующим под действием Х-лучей. В результате облучения начинают флюоресцировать фосфоресцирующие соединения кальция, урановое стекло, обычное стекло, кальцит и ряд других веществ». (Рентген отмечает также, что Х-лучи вызывают почернение фотографических пластин после проявления. Он предполагает, что при поглощении Х-лучей выделяется тепло, хотя этот эффект им не был тогда обнаружен. Сетчатка человеческого глаза, как он установил, нечувствительна к этим лучам.)

* В советской научной литературе применяется обычно термин «рентгеновские лучи». — *Прим. перев.*

7. В этом разделе Рентген сообщает о попытке обнаружить преломление и измерить коэффициент преломления X-лучей в различного рода призмах. Он отмечает, что его попытки не увенчались успехом, и заключает, что невозможно создать призму, которая могла бы фокусировать эти лучи.

8. Заметного отражения лучей от поверхностей Рентген не наблюдал.

9. Рентген указывает, что прозрачность кристаллов не зависит от ориентации их осей относительно направления пучка X-лучей.

10. Рентген сравнивает длину пробега в воздухе X-лучей и катодных лучей, которые Ленард выводил через тонкие фольги в конце катодно-лучевой трубки. Он отмечает, что X-лучи проходят в воздухе расстояние два метра и даже более, в то время как катодные лучи, мыслимые Ленардом как своего рода электромагнитные волны, имеют пробег всего лишь несколько сантиметров. На основании в какой-то степени грубых измерений яркости флюоресцирующего экрана в зависимости от расстояния между экраном и трубкой Рентген установил, что интенсивность пучка X-лучей обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника.

11. «Наиболее важное различие в поведении катодных и X-лучей состоит в том, что последние не отклоняются даже в весьма сильном магнитном поле, как показали многочисленные опыты».

12. «Было установлено, что наиболее интенсивное флюоресцирующее пятно на стенке разрядной трубки следует рассматривать как основной центр, из которого во всех направлениях испускаются X-лучи... Если катодные лучи отклонять внутри трубки с помощью магнита, то они начинают излучаться из другой точки, той, которая соответствует концу пути катодных лучей. По этой причине X-лучи, которые не отклоняются магнитным полем, нельзя отождествить с катодными лучами, прошедшими через стекло колбы или отраженными от него без каких-либо изменений. Различие в степени отклонения лучей нельзя, конечно, объяснить весьма высокой плотностью газа вне разрядной трубки. Отсюда я заключаю, что X-лучи не идентичны катодным, но они возникают при взаимодействии последних со стеклянной стенкой разрядной трубки».

13. «X-лучи генерируются не только в стекле, поскольку я наблюдал их и при работе с трубкой, покрытой алюминием толщиной 2 мм. Следовательно, лучи рождаются в этом металле. Позже я исследую и другие вещества».

14. В этом разделе Рентген рассказывает о нескольких снимках, сделанных им в X-лучах, включая снимки костей руки, проволоки в изоляции, намотанной на деревянную катушку, набора гирь в коробке, а также снимок «куска металла, внутренняя неоднородная структура которого стала различимой под действием X-лучей». Эти результаты фактически положили начало развитию двух на редкость плодотворных направлений практического применения X-лучей — диагностических исследований в медицине и испытаний металлических отливок без разрушения.

15. «Я перепробовал много способов с целью обнаружить явление интерференции X-лучей, но, к сожалению, безрезультатно. Возможно, это объясняется только их малой интенсивностью».

16. «Эксперименты начаты, но еще не доведены до той стадии, когда можно с определенностью сказать, действуют ли электростатические силы каким-либо образом на X-лучи».

17. Рассматривая вопрос о природе X-лучей, которые, как мы уже видели, не могут быть катодными, прежде всего можно предположить, что они представляют собой ультрафиолетовый свет, поскольку они способны вызывать флюоресценцию и некоторые химические эффекты. Это предположение, однако, сразу же можно опровергнуть более вескими соображениями. Если допустить, что X-лучи — это ультрафиолетовое излучение, то они должны быть существенно отличны по своим свойствам от известных уже ультрафиолетовых и инфракрасных лучей». (Ибо, как отметил Рентген, они не преломляются и не отражаются заметным образом, не поляризуются, а эффективность их поглощения в веществе в первом приближении пропорциональна плотности вещества.)

«Я не мог признать такое объяснение удовлетворительными вынужден был искать другое». (Рентген предположил, что лучи могут представлять собой «продольные» электромагнитные волны в отличие от ранее

известных поперечных. Эта мысль была ошибочной, однако правильное решение было далеко не очевидным.)

Во второй части сообщения описывалась серия экспериментов по исследованию ионизирующей способности X-лучей. Рентген обнаружил, что воздух и некоторые твердые изоляторы под действием лучей начинают проводить ток.

Таким образом, Рентген в течение нескольких недель со дня сделанного им открытия тщательно изучил многие важные характеристики лучей. Ленард и многие другие немецкие физики, как помнит читатель, считали в то время, что катодные лучи являются неизвестным ранее видом электромагнитных волн. Рентген взял на себя труд продемонстрировать, что X-лучи не тождественны с катодными, поскольку они обладают большей проникающей способностью, не отклоняются ни в электрическом, ни в магнитном полях, а их интенсивность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от детектора до источника. Рентген показал также, что открытые им лучи не есть новая форма ультрафиолетового света, хотя и был уверен, что они носят волновой характер и являются каким-то видом электромагнитного излучения. Действительно, вскоре было доказано, что эти лучи в некотором смысле подобны световым волнам, но имеют чрезвычайно малую длину волны.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Обычно годы и даже десятилетия отделяют новое научное открытие от его первого практического применения. Максвелл, например, написал свой знаменитый труд по электромагнитной теории в шестидесятых годах прошлого столетия, Герц демонстрировал электромагнитные волны во второй половине восьмидесятых годов, а Маркони использовал их для практических целей сигнализации только в 1896 году.* Совсем иначе обстояло дело

* Не умаляя заслуг Маркони, следует отметить, что приоритет в изобретении беспроволочного телеграфа принадлежит А. С. Попову, который 7 мая 1895 года доложил схему своего приемника на заседании физического отделения Русского физико-химического общества — *Прим. ред.*

с рентгеновскими лучами. 8 ноября 1895 года Рентген впервые наблюдал светящийся экран. Первое сообщение об этом было опубликовано в декабре этого же года. А 20 января 1896 года в Дартмуте (Нью-Гемпшир) с помощью рентгеновских лучей был установлен перелом руки у некоего Эдди Мак-Карти [2]. В университетских лабораториях, как правило, имелись катодно-лучевые трубки, и совершенно естественно, что, как только стало известно об открытии рентгеновских лучей, они сразу же были взяты на вооружение медициной.

Через год после открытия рентгеновских лучей английский журнал «Панч» опубликовал поэму, которая начиналась так:

О, Рентген, а новость ведь верна,
Это не пустой молвы обман,
Берегись его — советует она,
Мрачный Юмор Ваш кладбищем видно дан.

Нежный пастушок едва ли оценил бы
Прелести скелета своей милой . . .

А шесть недель спустя американский юмористический еженедельник «Лайф» продолжил развитие этой темы:

Линии на портрете дамы, написанном X-лучами.

Она так молода, стройна и ростом в меру,
Но чьи же это кости — хрупкие фосфаты, карбонаты чьи,
Рисуют мне катодные лучи,
И осцилляции, и омы, и амперы.
И позвоночник скрыть себя не может
В прекрасном теле под покровом кожи.
И красотой ребра поражают,
А их сиянье плоти окружает.
В лицо ее безносое гляжу,
Не вижу глаз, но трепетно шепчу:
«Любимая, тебя я обожаю.»
И зубы белые ее, слегка светясь,
Улыбкой мне во мраке отвечают.
Ах, прелесть ты жестокая моя,
О, несравненная катодография!

Лоуренс К. Рассел [3]

К сожалению, в первые годы после открытия рентгеновских лучей их использовали слишком безрассудно. Скрытая опасность этих лучей не была осознана до тех

пор, пока многие из энтузиастов их применения не получили ожоги или не стали жертвой злокачественной опухоли. Подобные случаи характерны, конечно, и для других научных и технических достижений. Примером тому служит наблюдаемое в настоящее время некритическое и даже легкомысленное отношение к использованию обладающих фантастическими возможностями инсектицидов и веществ, уничтожающих сорняки.

ПЕРВЫЕ ПРИЗНАКИ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Говоря о путях развития науки, замечу, что не каждый способен увидеть проявление нового в каком-либо уже известном явлении. С этой точки зрения интересна статья Гольдштейна [4], отрывок из которой я приведу. «Она (речь идет об электромагнитной природе катодных лучей. — Д. А.) в значительной степени подтверждается тем фактом, что флюоресцирующий экран внутри трубки, защищенный от прямых катодных лучей, возбуждается под действием прямолинейно распространяющегося излучения от тех участков стенок, на которые падают электрические лучи. В этом случае наблюдается своеобразное свечение экрана, расположенного примерно на расстоянии 1 см от места падения лучей...» Эта работа была опубликована и в Германии, и в Англии, и ее, должно быть, прочли практически все, кого интересовала природа катодных лучей. Но в течение пятнадцати лет ни у кого не возник вопрос, почему может светиться экран, защищенный от катодных лучей. Интересно также обратиться к статье самого Дж. Дж. Томсона, в которой он писал [5]: «Я имел возможность наблюдать фосфоресценцию обычного немецкого стекла, помещенного на расстоянии нескольких футов от разрядной трубки, хотя прежде чем попасть на фосфоресцирующее тело свет должен был пройти через стеклянные стенки вакуумной трубки и достаточно толстый слой воздуха...» Эта статья была написана более чем за год до открытия Рентгена, но Томсон сосредоточил все усилия на определении скорости катодных лучей и не обратил внимания на этот как будто побочный эффект. Он просто констатировал факт, как бы соглашаясь с немецкими учеными в том, что многие второстепенные явления, связанные

с катодными лучами, способны подобно ультрафиолетовому свету вызывать флюоресценцию. Теперь мы знаем, что описанный эффект был обусловлен действием рентгеновских лучей.

Еще задолго до 1895 года было известно, что не следует оставлять фотографические пластинки вблизи от катодно-лучевой трубки (иначе они засвечивались), подобно тому как бактериологам уже до открытия пенициллина было ясно, что отдельные виды бактерий, в частности *Penicillin notatum*, попадая в выращиваемую культуру, могут нарушить ход бактериологического эксперимента.

Примерно через три месяца после открытия рентгеновских лучей сэр Оливер Лодж [6] отметил, что некоторые из результатов Ленарда обусловлены, вероятно, не катодными лучами, прошедшими через тонкие окна из фольги, а возникновением рентгеновских лучей в самих фольгах при торможении катодных лучей. Может быть, стоит процитировать отрывок из некролога [7], написанного Эндраде в связи с кончиной Ленарда в 1947 году: «... Ленард был глубоко удручен тем, что не он открыл рентгеновские лучи, которые были у него почти под руками и которые он, по всей вероятности, обнаружил бы в ближайшее время, если бы не Рентген. Он никогда не называл имени Рентгена, упоминая об этих лучах. Он воспринимал как личное оскорбление неполное признание его трудов и был не способен проявить какое-либо великодушие и даже справедливость ко всякому, кто, по его мнению, недооценивал его заслуги перед наукой».

ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

В течение нескольких месяцев после публикации работы Рентгена был поставлен целый ряд экспериментов по изучению свойств лучей. Дж. Дж. Томсон вместе со своим совсем еще юным учеником Эрнестом Резерфордом провели многочисленные исследования ионизирующей способности лучей. Беккерель начал изучать связь между явлением флюоресценции и возникновением рентгеновских лучей. В процессе своих работ он сделал новое замечательное открытие, о котором будет речь ниже.

В итоге оказалось, что эффекты отражения, преломления и поляризации рентгеновских лучей весьма слабы, чем и объясняется неудача Рентгена в попытках обнаружить их. После того как их удалось продемонстрировать, стало ясно, что рентгеновские лучи подобны обычным поперечным электромагнитным волнам, характерной особенностью которых является чрезвычайно малая длина волны. Спустя примерно пятнадцать лет после открытия Рентгена были измерены с большой точностью длины волн рентгеновских лучей. Это в свою очередь привело к более глубокому пониманию природы рентгеновских лучей. В 1906 году Маркс [8] поставил исключительно тонкий эксперимент, с помощью которого было показано, что скорость рентгеновских лучей в пределах очень малой экспериментальной ошибки равна скорости света. (В его аппаратуре использовались резонансные колебательные электрические контуры, которые по истечении определенного времени после инъекции импульса рентгеновских лучей включали фотоэлектрический детектор, установленный на известном расстоянии от источника лучей.)

ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛН РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

В 1899 году два голландских физика Хэг и Винд [9] пропустили пучок рентгеновских лучей через V-образную щель и исследовали картину, полученную на фотографической пластинке в результате облучения этим пучком. Изображение щели оказалось несколько шире и структурнее, чем можно было бы ожидать при прямолинейном распространении пучка. Подобное явление наблюдалось всякий раз, когда пучок проходил через отверстия, сравнимые по величине, с длиной волны. (Водяная волна, например, свободно проходит сквозь заросли тонкого тростника или входит в широкий залив почти без всякого искажения, но в то же время она огибает край волнолома или дамбы. Эти «дифракционные» эффекты были вполне понятны, когда дело касалось пучков света. Поэтому Хэг и Винд заключили, что размытие пучка рентгеновских лучей после прохождения через щель можно объяснить в предположении, что эти лучи фактически подобны световым, но имеют длину

волны около 1 ангстрема (10^{-8} см). Видимый свет имеет длину волны порядка нескольких тысяч ангстрем.

В серии экспериментов, проведенных в 1907 и 1908 годах, Вальтер и Поль [10] обнаружили несоответствие с результатами Хэга и Винда. Согласно данным Вальтера и Поля получалось, что если рентгеновские лучи действительно являются электромагнитными волнами, то их длина волны должна быть меньше одной десятой величины, указанной Хэгом и Виндом. Однако Поль и Вальтер оценивали степень размытия фотографического изображения щели визуально (с помощью микроскопа). В 1912 г. Зоммерфельд и Кох [11] повторно проанализировали изображение на их пластинках, пользуясь созданным к тому времени микрофотометром. Они установили, что дифракционные эффекты действительно имеют место и что ошибка результатов Хэга и Винда не так уж велика.

Тем временем в 1907—1908 годах Вин и Штарк привлекли к рассмотрению идеи Планка и Эйнштейна о взаимосвязи между длиной волны света и энергией, соответствующей поглощению или излучению светового кванта. По известной величине кинетической энергии катодных лучей они рассчитали длину волны рентгеновских лучей, которая получилась равной примерно $0,5 \cdot 10^{-8}$ см.

ДОВОДЫ В ПОЛЬЗУ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

В вопросе о природе рентгеновских лучей не было единодушного согласия.

В ходе изучения ионизации, вызываемой рентгеновскими лучами, было обнаружено, что поглощение рентгеновских лучей сопровождается образованием частиц с очень высокой скоростью, подобных β -частицам. (В этом вопросе большую роль сыграло использование камеры Вильсона, с помощью которой удалось проследить траектории ионов.)

Вильям Генри Брэгг и Дж. П. В. Мадсен [12] заметили, что эти заряженные частицы распространяются преимущественно в направлении первоначального рентгеновского излучения, обладая при этом энергией, рав-

ной энергии катодных лучей, вызвавших появление рентгеновского излучения.

В 1910 году Брэгг писал [13]: «В процессе преобразования β -лучей в рентгеновские и наоборот не наблюдается потери энергии; скорость вторичных β -лучей не зависит от расстояния, пройденного рентгеновскими лучами; таким образом, энергия рентгеновских лучей не может рассеиваться в процессе их движения, и, следовательно, они представляют собой корпускулы». Другими словами, обычная волна в процессе распространения должна бы рассеиваться, а ее интенсивность становиться все более и более слабой. В то же время рентгеновские лучи могут пройти расстояние в несколько метров и затем передать вторичным электронам свою первоначальную энергию. Брэгг считал, что только частицы могут вести себя подобным образом. Это была все та же проблема, которая в той или иной форме уже не раз возникала перед учеными, ведущими исследования в новой, постоянно расширяющейся области науки.

Оглядываясь назад, мы можем сказать, что трудности были обусловлены вполне естественным желанием осмыслить свойства рентгеновских лучей непременно с помощью лишь одной модели — *либо* корпускулярной, *либо* волновой. Никто не предполагал, что нужна комбинированная теория, объединяющая обе эти модели, ибо и в настоящее время не известно ни одного обычного объекта, для объяснения поведения которого пришлось бы прибегнуть к такой теории.

Образ нашего мышления таков, что всегда трудно свернуть с проторенного пути, когда жизнь или эксперимент открывают перед нами новое явление, которое нельзя ни объяснить обычными словами, ни понять на основании привычных моделей. Поэтому неопределенность, возникшая в связи с очевидным проявлением корпускулярных свойств у рентгеновских лучей, оставалась неразрешенной вплоть до появления квантовой механики в 1920 году.

ДИФРАКЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Уже давно физиков интересовали оптические свойства кристаллов, которые, как известно, обладают в высшей степени упорядоченной внутренней структурой.

Можно представить себе кристалл как своего рода трехмерный сад с регулярно расположенными атомами вместо деревьев. Поведение пучка света, проходящего сквозь кристалл, зависит от его направления относительно плоскостей различных слоев атомов.

В 1912 году в Мюнхене ученик Зоммерфельда Эвальд работал над диссертацией, посвященной оптическим проблемам кристаллов. По ряду вопросов Эвальд обратился за советом к молодому преподавателю физики в университете Макс фон Лауэ. Вопросы Эвальда навели Лауэ на мысль, что расстояния между слоями атомов в кристаллических решетках по порядку

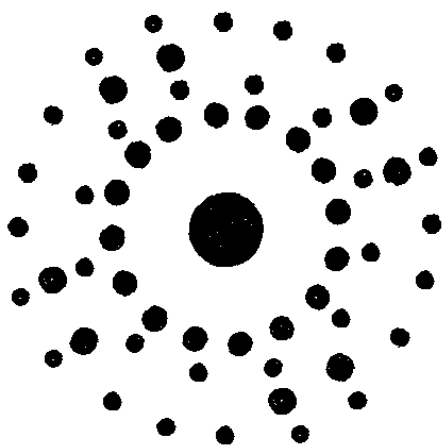


Рис. 7. Дифракционная картина, полученная Фридрихом и Книппингом в 1912 году при изучении прохождения рентгеновских лучей через кристалл сернистого цинка.

величины близки к вероятной длине волны рентгеновских лучей. Фон Лауэ занимался в то время теорией дифракционных решеток Рэлея в применении к обычному свету. Он предположил, что кристаллы могут служить своего рода пространственной дифракционной решеткой для рентгеновских лучей. Тогда двое студентов Фридрих и Книппинг попытались обнаружить обратную дифракцию рентгеновских лучей от кристалла сульфата меди, но не получили никакого положительного результата.

В конце концов Книппинг решил послать узкий пучок рентгеновских лучей *сквозь* маленький кристаллик, и после проявления пластинки он увидел сложную картину пятен [14] (рис. 7). Фон Лауэ попробовал найти теоретическую зависимость между характером расположения пятен, длиной волны рентгеновских лучей и структурой кристалла, использовавшегося в эксперименте, но большого успеха он не добился. Он предполагал, что все рентгеновские лучи, обуславливающие конкретное пятно, имеют одинаковую длину волны (аналогично спектральным линиям, образуемым оптической решеткой). Вильям Лоуренс Брэгг, сын Вильяма Генри Брэгга, развил более удовлетворительную теорию [15], основанную на рассмотрении отраже-

ния волн различной длины от каждой из плоскостей, в которых сконцентрированы атомы в кристалле. По расположению и интенсивности пятен он смог определить фактическую внутреннюю структуру нескольких кристаллов, что как бы положило начало важному применению рентгеновских лучей для изучения кристаллов [16].

На основании анализа дифракции рентгеновских лучей недавно была выяснена структура чрезвычайно сложных молекул нуклеиновых кислот.

СПЕКТРОМЕТРИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Изобретатель конденсационной камеры Вильсон предположил, что кристаллы легче всего расщепить по плоскостям, которые плотно заселены атомами, так называемым плоскостям скола, подобно тому, как гипотетический фруктовый сад наиболее просто разделить на участки вдоль линий, которые не задевают ни одного дерева. Эти плоскости скола в кристаллах могут служить в качестве зеркал для пучка рентгеновских лучей, касающихся их поверхностей при условии, что длина волны рентгеновских лучей сравнима с расстоянием между слоями атомов в кристалле. Брэгг действительно смог обнаружить дифрагированные отраженные пучки [17]. Его отец, В. Г. Брэгг [18], позже использовал для измерения длины волны рентгеновских лучей кристаллы каменной соли. Он получил весьма точные результаты в единицах шага решетки, т. е. расстояния между соседними слоями атомов. Это расстояние можно рассчитать, исходя из химического состава, атомных весов компонент, плотности кристалла с использованием числа Авогадро.

Было обнаружено, что спектр рентгеновских лучей, выходящих из обычной трубки, состоит из сплошной и (если ускоряющий потенциал достаточно высок) линейчатой частей. Длины волн, включенных в линейчатый спектр, зависят от химического состава мишени трубки. В 1912 году Бор выступил с теорией, которая на основании предполагаемого строения атома водорода объясняла характер видимой части линейчатого спектра ато-

ма водорода. Вскоре после этого удалось посредством незначительной модификации теории Бора объяснить структуру линейчатого спектра других атомов. В соответствии с этой теорией линейчатый спектр должен быть обусловлен излучением орбитальных электронов, находящихся вблизи атомного ядра. Вместе с тем было установлено, что сплошной спектр возникает при резком торможении электронов, когда катодные лучи ударяются о мишень.

Позже структуру сплошного спектра (длины волн и интенсивность) удовлетворительно объяснили на основании уравнений Максвелла.

ОТКРЫТИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

Мы видели, что спустя уже один-два месяца с момента первого публичного сообщения Рентгена о новом открытии ученые Европы и Америки начали проводить эксперименты с новыми лучами. Не избежавший этого увлечения французский физик Анри Беккерель начал серию экспериментов, которые привели его к совершенно неожиданным результатам. Согласно Рентгену, место возникновения X-лучей соответствовало той точке катодно-лучевой трубки, где пучок вызывал флюоресценцию в стекле трубки. (Теперь мы знаем, что флюоресценция просто сопутствует возникновению рентгеновского излучения и что в действительности можно получить рентгеновские лучи еще большей интенсивности, если на пути катодных лучей установить металлическую мишень, которая не флюоресцирует подобно стеклу при попадании в него пучка. Но Беккерель в то время не мог знать об этом.) Связывая возникновение рентгеновских лучей с флюоресценцией, он поставил вопрос, могут ли другие вещества, например некоторые минералы, флюоресцирующие под действием ультрафиолетового света (а не катодных лучей), быть источником новых лучей. 24 февраля 1896 года Беккерель сделал сообщение во Французской академии наук [19] о проведенном им эксперименте. Он обернул фотографическую пластинку двумя слоями черной бумаги, так что свет не мог проникнуть внутрь, сверху положил кристаллы двойной сернокислой соли урана и калия — минерала, способного

флюоресцировать. Затем он выставил это устройство на яркий солнечный свет с целью вызвать флюоресценцию. Он обнаружил после проявления, что пластинка действительно оказалась засвеченной, по-видимому, лучами от светящихся кристалликов, подобными рентгеновским, ибо они проникали сквозь черную бумагу.

Неделю спустя он сообщил еще более волнующую новость [20]: «Некоторые из предшествующих экспериментов были подготовлены в течение 26 и 27 февраля; так как в эти дни солнце показывалось только временами, я приостановил опыты, оставив все в полной готовности: положил завернутые пластинки в ящик, сохранив на месте урановые соли. Солнце не показывалось в течение нескольких дней, и я проявил пластинки 1 марта, рассчитывая обнаружить только очень слабое изображение. Изображение же, напротив, получилось весьма интенсивным».

В это время Беккерель все еще считал, что проникающее излучение связано с флюоресценцией кристаллов, но спустя год он обнаружил, что лучи испускаются ураном совершенно независимо от того, в каком химическом соединении он находится. *Эмиссия лучей происходила непрерывно.* Так было открыто явление радиоактивности, всестороннее изучение которого началось вскоре в лабораториях всего мира.

В это время Кавендишская лаборатория [21] во главе с Максвеллом, Рэлеем и Дж. Дж. Томсоном стала мировым центром физических исследований. В 1895 и 1896 годах Томсон был занят изучением поведения ионов в газах; он привлек к этим исследованиям молодого новозеландца Эрнеста Резерфорда. Резерфорд начал изучать ионизирующую способность лучей Беккереля. В процессе исследований он обнаружил, что существуют по крайней мере два вида лучей, испускаемых соединениями урана. Излучение, названное им альфа-лучами (α -лучами), легко поглощалось листом бумаги или тонкой (0,00254 см) металлической фольгой. Излучение, которое он назвал бета-лучами (β -лучами), проходило через значительно более толстые фольги, например алюминиевую фольгу толщиной 0,254 см [22].

В течение нескольких следующих лет новые открытия следовали одно за другим. В 1898 году Мария и Пьер Кюри во Франции и Шмидт в Германии открыли

радиоактивность тория. Год спустя супруги Кюри смогли выделить из урановых руд два новых элемента, полоний и радий, оказавшиеся также радиоактивными. Резерфорд (работавший в это время в университете в Монреале) и Оуэнс открыли торон*. В течение некоторого времени многообразие новых радиоактивных элементов казалось довольно беспорядочным, в периодической таблице для них не хватало места. Однако разработанная Резерфордом и Содди в 1900—1903 годах теория последовательных превращений вследствие радиоактивного распада и развитие концепции изотопов в работах Крукса, Хана, Содди, Белтвуда и других навели некоторый порядок в этом хаосе. С помощью серии блестящих экспериментов было доказано, что альфа-частица (α -частица) — это дважды ионизованный атом гелия, т. е. атом гелия, потерявший два электрона. В руках Резерфорда и других ученых α -частицы превратились в тончайший инструмент, стали своего рода зондом для исследований внутренней структуры других атомов.

В 1899 году Гейзер, Беккерель, Мейер и Швейдлер независимо друг от друга показали, что β -лучи отклоняются магнитным полем, как если бы они состояли из отрицательно заряженных частиц. Изучая отклонение лучей в магнитном и электрическом полях, Кауфман установил (см. гл. 2), что β -частицы и катодно-лучевые частицы имеют почти одинаковое отношение заряда к массе.

Между тем в 1900 году Виллард [23] обнаружил существование третьего типа лучей, испускаемых радиоактивным веществом. Эти лучи не отклонялись в магнитном поле и обладали чрезвычайно высокой проникающей способностью. Они были названы гамма-лучами (γ -лучами). Со временем было установлено, что их поведение подобно поведению рентгеновских лучей с очень короткой длиной волны. Если рентгеновские лучи — это дитя, то радиоактивность — это довольно быстро появившаяся на свет внучка исследования свойств катодных лучей. Оба открытия явились тем мощным орудием, с помощью которого мы достигли современного уровня в наших представлениях о структуре атомов и свойствах электронов.

* Торон — изотоп эманации радия. — *Прим. ред.*

КАНАЛОВЫЕ ЛУЧИ

Еще одно открытие было следствием изучения свойств катодных лучей. В 1886 г. Гольдштейн, используя в качестве катода в разрядной трубке металлический диск с отверстиями, наблюдал слабо светящиеся лучи, выходящие из этих отверстий в направлении, противоположном аноду [24]. Она назвал их «каналовыми лучами» (Kanalsstrahlen), так как они выпускались из отверстий или каналов в катоде. Вин [25], изучая отклонение их в магнитном и электрическом полях, показал в 1897 году, что эти лучи несут положительный заряд, причем отношение заряда к массе для них значительно больше, чем для катодных лучей.

Многие исследователи безуспешно пытались определить заряд вновь открытых лучей непосредственно из экспериментов, аналогичных эксперименту Перрена с катодными лучами. (Трудности были связаны с тем, что лучи сильно ионизировали оставшийся в трубке воздух, вследствие чего заряд быстро стекал с коллектора.)

Некоторое время оставался открытым вопрос о происхождении положительных ионов каналовых лучей. Образуются ли они вследствие ионизации остаточного газа в трубке или выбиваются из анода в результате бомбардировки его катодными лучами? А может быть, наоборот, они вылетают из катода, бомбардируемого положительными ионами? Вот вопросы, на которые надо было ответить. Полученные величины отношения заряда к массе были существенно различными, но все они оказались значительно больше соответствующего отношения для катодных лучей. Заметим, что если в трубке находилось небольшое количество водорода, отношение заряда к массе для каналовых лучей было близко к значению этого отношения для ионов водорода, образующихся при электролизе.

В 1913 году Дж. Дж. Томсон опубликовал работу [26], в которой он описывал остроумный метод измерения отношения заряда к массе в том случае, когда в пучке имелось несколько видов ионов. Он направлял каналовые лучи в пространство, где действовали сильные магнитное и электрическое поля, параллельные друг другу и перпендикулярные первоначальному направлению пучка. Магнитное поле вызывало отклонение, про-

порциональное отношению заряда ионов к их массе и обратно пропорциональное их скорости. Электрическое поле отклоняло ионы перпендикулярно по отношению к отклонению магнитным полем, величина отклонения была пропорциональна отношению заряда к массе и обратно пропорциональна *квадрату* скорости. Если пучок (состоящий из ионов с различными скоростями) падал на фотографическую пластинку, образовывалась темная линия, представляющая обычно отрезок параболы. Параметр параболы зависел от отношения заряда ионов к их массе, от геометрических размеров аппаратуры и от напряженности полей. Когда Томсон провел эксперимент с трубкой, содержащей остатки неона, он обнаружил на пластинке не одну параболу, а две. Одна из них, более слабая, соответствовала ионам с массой 22, а другая — ионам с массой 20 в предположении, что оба вида ионов имели одинаковый электрический заряд. Тогда Содди высказал мысль, что в цепочках распада радиоактивных элементов существуют атомы, обладающие совершенно одинаковыми химическими характеристиками, но различными массами и периодами полураспада. Он назвал такие атомы *изотопами* одного и того же элемента. Эксперимент Томсона с пучком ионов неона указывал на то, что нерадиоактивный неоновый газ имеет два изотопа, отличающиеся только массами. Со временем ученик Томсона Астон и другие студенты открыли существование изотопов у многих химических элементов. В настоящее время известно около 400 стабильных изотопов, а также несколько сот радиоактивных изотопов.

Астон вскоре измерил отношения массы к заряду, а следовательно, и относительные массы изотопов с точностью, превышающей 1%. Он обнаружил, что если массу наиболее распространенного изотопа кислорода принять равной 16 единицам, то все изотопы других элементов будут иметь массы, близкие в пределах ошибки эксперимента к целым числам. Еще в 1815 г. Праут на основании систематики атомных весов химических элементов выдвинул гипотезу, согласно которой все атомы предполагались построенными из некоего основного компонента, имеющего единичную массу. Открытие существования нецелых значений относительных атомных весов (например, хлор имеет атомный вес 35,5) опровергло гипотезу Праута. Спустя столетие она была

вновь пересмотрена в связи с появлением концепции изотопов и благодаря трудам Астона. Нецелое значение атомного веса хлора и ряда других элементов в свете нового открытия можно было объяснить, рассматривая смеси изотопов, относительный атомный вес каждого из которых выражается целым числом.

К 1923 году масс-спектрографы Астона, как стали называть его приборы, были достаточно точны, чтобы уловить небольшие отклонения от правила целых чисел. Однако к этому времени новая версия гипотезы Праута была уже подтверждена, так что эти небольшие отклонения не являлись препятствием для развития основной идеи о строении атома.

Коста, работавший в Париже, сумел измерить в 1925 году массы ионов с точностью 1 : 3000. Астон в 1927 году смог определять массы, отличающиеся друг от друга всего на 0,0001. Дальнейшее усовершенствование масс-спектрографов Бейнбриджем, Маттаухом, Герцогом, Ниром и многими другими физиками позволило определить массы ионов с точностью, превышающей 10^{-6} . (При каждом вздохе масса человеческого тела увеличивается приблизительно на 0,00001 часть.)

ЛИТЕРАТУРА

1. Röntgen W. K. Sitzungsberichte der Würzburger Physikalischen-Medicinischen Gesellschaft, December 28, 1895. Reprinted in Ann. Physik, 64, 1 (1898).
2. Glasser O. Wilhelm Conrad Röntgen. 2nd ed., Springer Verlag, Berlin. — Göttingen — Heidelberg, 1959, p. 26.
3. Both the Punch and the Life poems are quoted in Glasser's book, Op. cit.: Punch, 100, 45 (1896); Life, 27, 191 (1896).
4. Goldstein E. Monatsberichte der Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin (January 1880). Translated in Philos. Mag., 10, 173 (1880).
5. Thomson J. J. Philos. Mag., 37, 358 (1894).
6. Lodge O. Electricien, 36, 438 (1896); 37, 370 (1896).
7. Da C. Andrade E. N. Nature, 160, 895 (1947).
8. Marx E. Ann. Physik, 20, 677 (1906).
9. Haga H., Wind C. H. Proceedings of Amsterdam Academy (English Edition), 1, 420 (1899); 5, 247 (1902).
10. Walter B., Pohl R. W. Ann. Physik, 25, 715 (1908).
11. Sommerfeld A., Koch P. P. Ann. Physik, 38, 5 (1912).
12. Bragg W. H., Madsen J. P. V. Philos. Mag., 15, 663 (1908); 16, 918 (1908).
13. Bragg W. H. Philos. Mag., 20, 385 (1910).
14. Friedrich W., Knipping P., von Laue M. Sitz. d. Bayer. Akad. Wiss., p. 303 (1912); Friedrich, Naturwissenschaften, 16,

- 365 (1922); *Nature*, **91**, 518 (1913); Ewald P. P. *Physik Z.*, **15**, 399 (1914).
15. Bragg W. L. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, **17**, 43 (1912); *Nature*, **90**, 402 (1912).
 16. Bragg W. L. *Nature*, **91**, 496 (1913).
 17. Bragg W. L. *Nature*, **90**, 410 (1912).
 18. Bragg W. H. *Nature*, **91**, 205 (1913).
 19. Becquerel H. *Compt. rend.*, **122**, 406 (1896).
 20. Becquerel H. *Compt. rend.*, **122**, 501 (1896).
 21. An interesting account of the development of the Cavendish Laboratory is available in «A History of the Cavendish Laboratory», 1871—1910, by Fitzpatrick and Schuster et al. (Lngmans, Green and Co., London, 1910).
 22. Rutherford E. *Philos. Mag.*, **47**, 109 (1899).
 23. Villard P. *Compt. rend.*, **130**, 1178 (1900).
 24. Goldstein E. *Berlin Sitzungber.* (1886), p. 691; Whittaker E. *Op. cit.*, p. 363.
 25. Wien W. *Verhandl. deut. physik. Ges. zu Berlin*, **16**, 165 (1897); *Ann. Physik*, **65**, 167 (1898).
 26. Thomson J. J. *Proc. Roy. Soc. A*, **59**, 1 (1913).

Глава 4

АТОМНАЯ ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

ВВЕДЕНИЕ

В науке, как и в большинстве других областей человеческой деятельности, основные идеи и понятия обычно не претерпевают внезапных изменений. В тридцатые годы нашего века вышла до некоторой степени спорная, но интересная книга профессора Альфреда О'Рейли из Корка «Электромагнетизм» [1], в которой он собрал высказывания известных ученых в период с 1880 по 1900 год относительно природы электричества. Сэр Артур Шустер [2], например, писал в 1911 году о состоянии этого вопроса в 1890 году: «Те, кто помнил, как подобное противоречие между двумя теориями, связанными с природой света, было разрешено в пользу колебаний, уже по естественной для человека склонности относились отрицательно к корпускулярным теориям, считая их принадлежностью средних веков . . . Я полагаю, что причина такого отношения заключается в следующем: в то время как электродинамическая теория Максвелла в целом не была еще принята, точка зрения, согласно которой электрический ток рассматривался всего лишь как движение эфира, стала популярной в научных кругах и получила почти повсеместную поддержку.» И далее Шустер добавляет: «Идея о возможности самостоятельного существования атома электричества никогда не приходила мне в голову; и если случилось бы что-либо подобное и я открыто выразил бы такие еретические мысли, я вряд ли мог бы считаться серьезным физиком, ибо границы допустимого еретизма в науке довольно узки».

Макс Планк [3] писал в 1925 году: «Я не верил тогда (в 1900 году) до конца в гипотезу об электро́не». В 1920 году Ленард в своей статье [4] привел слова немецкого физика Вихерта, сказанные им в 1897 году: «Электричество есть нечто воображаемое, существующее реально только в мыслях». (Вихтер хотел, вероятно, подчеркнуть, что слово «электричество» было всего лишь подходящим названием для обозначения гипотетического «нечто» при описании электрических явлений, истинную же суть можно было понять только на основании предположения Максвелла о перемещениях эфира или чего-либо подобного.) Даже в 1897 году известный физик лорд Кельвин [5] писал об электричестве как о некой «непрерывной жидкости». Некоторые коллеги Дж. Дж. Томсона решили, что он мистифицирует их, когда на лекции в Королевском институте [6] он высказал предположение, что частицы катодных лучей следует рассматривать как возможные компоненты атома.

В действительности, конечно, идея о корпускулярной природе электричества не была отвергнута окончательно. На подобной гипотезе была основана теория Вебера, а открытия Фарадея, связанные с электролизом, давали ей убедительное экспериментальное подтверждение. В 1874 году в Белфасте Г. Джонстон Стони выступил с докладом перед Британской ассоциацией прогресса науки, в котором он использовал результаты, полученные Фарадеем, как отправную точку для выдвижения атомарной теории электричества, согласно которой все электрические заряды состоят из элементарных фундаментальных зарядов. Из экспериментов Фарадея была известна величина полного электрического заряда (в кулонах), прошедшего через электролит. Деля ее на число выделившихся атомов водорода (полученное из результатов довольно грубых измерений, основанных на кинетической теории газов), Стони получил величину фундаментального заряда. Она оказалась равной 10^{-20} к (кулон), т. е. примерно $1/16$ принятого в настоящее время значения. Доклад Стони не был опубликован полностью вплоть до 1881 года [7], того самого года, когда знаменитый немецкий ученый Гельмгольц [8] в лекции, прочитанной Химическому обществу Великобритании, еще раз напомнил об открытии Фарадея в области

электролиза и снова подчеркнул возможность атомной структуры электричества, о которой упоминал сам Фарадей.

Лекция Гельмгольца привлекла значительно большее внимание научных кругов, чем более ранняя работа Стони. Уже в 1894 году появились в журналах довольно острые письма Стони, в которых он протестовал против утверждений, подобных следующему [9]: «Гельмголец . . . был первым, кто показал на примере электролиза, что каждую валентность следует связывать с минимальным электрическим зарядом, т. е. «валентным зарядом», который подобно электрическому атому неделим . . .»

Почти до 1900 года метод Стони для оценки величины заряда — этого гипотетического «атома электричества» — был единственным легко доступным методом, в котором результат получался путем деления величины Ne , полученной из уравнения Фарадея, на N . (N — число Авогадро, т. е. число молекул в грамм-молекуле* любого данного вещества; e — заряд, переносимый одновалентным ионом в процессе электролиза.) (Заметим, что выше мы использовали для обозначения электрического заряда символ q . В тех случаях, когда известно или предполагается, что отдельный заряд имеет только одну возможную величину, этот заряд будет обозначаться символом e .) Верхний предел размера молекулы можно было найти на основании косвенных измерений толщины чрезвычайно тонкой мыльной пленки или пленки масла на поверхности воды либо с помощью уравнения состояния Ван дер Ваальса с малыми поправками. Зная объем одной грамм-молекулы вещества, нетрудно приблизительно оценить содержащееся в ней число молекул. Таким образом, в 1873 году стало известно, что число молекул в одной грамм-молекуле вещества (число Авогадро) равно примерно 10^{23} или 10^{24} .

В конце девяностых годов прошлого столетия Томсон со своими сотрудниками из Кавендишской лаборатории нашли более прямой способ определения величины гипотетического элементарного электрического заряда. Фарадей проводил свои эксперименты с ионизован-

* Грамм-молекула — количество граммов вещества, численно равное его молекулярному весу. — *Прим. перев.*

ными жидкостями. В связи с открытием X-лучей в 1895—1896 годах появилась возможность получения большого числа ионов в воздухе или других газах. Томсон [10] и его ученики немедленно принялись за изучение свойств этих ионов. Они измерили скорости рекомбинации положительных и отрицательных ионов, т. е. скорости их превращения в нейтральные атомы или молекулы в различных газах в зависимости от давления. Они измерили также коэффициенты диффузии ионов в различных газах, представляющие собой меру скорости, с которой происходит диффузия ионов, обусловленная их неравномерным распределением. Эти измерения аналогичны, например, измерению скорости диффузии данного количества молекул хлора из только что открытого сосуда в комнате с неподвижным воздухом. Ими была измерена также подвижность ионов в электрических полях с известной напряженностью. На основании результатов изучения диффузии и подвижности ионов было показано, что в пределах ошибки эксперимента произведение Ne для ионов газа такое же, как для одновалентных ионов в растворе электролита. Другими словами, элементарный электрический заряд, переносимый ионами в процессе электролиза, оказался равным элементарному заряду ионов, образованных в газах.

МЕТОД ТАУНСЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАРЯДА e

В 1897 году Таунсенд [11], студент, работавший в лаборатории Томсона, попытался измерить величину элементарного заряда e методом, который не был связан с необходимостью определения или использования числа Авогадро. Было обнаружено, что выделяющийся в процессе электролиза газ обычно содержит ионы, которые во влажной атмосфере над поверхностью электролита могут стать центрами образования капелек. Таунсенд втянул этот заряженный туман посредством всасывающих трубок в электрически изолированную камеру и пропустил его (внутри камеры) через склянки с концентрированной серной кислотой. Кислота отбирала из воздуха влагу и некоторое количество заряда, который несла влага. Заряд, остающийся в осушенном воздухе, собирался в устройстве, которое представляло по су

шеству сетку Фарадея, расположенную внутри камеры. Полный заряд, накопленный в камере за определенный интервал времени, измерялся чувствительным электрометром, в общее количество воды, удаленной из воздуха, определялось путем взвешивания склянок с кислотой до и после эксперимента.

Таунсенд определил количество капелек, образующих туман, разделив вес накопленной воды на вес одной капельки. Вес одной капли был найден по известной плотности воды и радиусу типичной капли. Капельки были настолько малы, что их нельзя было наблюдать с помощью обычного измерительного микроскопа, поэтому радиус капли вычисляли по величине скорости осаждения облака капель. Сэр Джордж Стокс [12] показал в 1851 году, что сферическая капелька, имеющая радиус a и плотность ρ , падая под действием силы тяжести в однородной жидкости с вязкостью η , достигает в конце концов постоянной скорости, определяемой соотношением

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{ga^2\rho}{\eta} \quad (4.1)$$

(g — ускорение свободного падения).

Осаждение тумана, слабый дождь и, наконец, грозовой ливень — яркие примеры того, как радиус капли влияет на скорость ее падения. Зависимость скорости падения тела от вязкости среды подчиняется закону обратной пропорциональности, который можно продемонстрировать, бросая маленькие дробинки в воду, масло, патоку, мед. Чтобы определить радиус «средней» капли и ее вес, Таунсенд измерил скорость осаждения тумана. Затем, предположив, что центром конденсации каждой капли является единичный заряд, он получил возможность определить его величину, разделив общий заряд, накопленный всеми капельками, на вес собранной воды. Таунсенд обнаружил, что эта величина в какой-то степени зависит от вида газа, используемого в эксперименте, но во всех случаях она весьма близка к $1 \cdot 10^{-19}$ к. Помимо экспериментальных трудностей, связанных с измерениями довольно малых значений полного заряда и небольших количеств воды, эксперименту Таунсенда был присущ другой недостаток: отсутствовала уверен-

ность в том, что все капли имеют приблизительно одну величину и что каждая из капель несет единичный отрицательный (или положительный) заряд. Если бы имела смесь разноименных зарядов, то результирующая величина e могла оказаться заниженной. Тем не менее этот эксперимент заслуживает внимания, ибо он дал возможность определить величину e без непосредственного использования числа Авогадро. Полученное при этом значение e совпадало в пределах ошибки эксперимента с результатами других методов, требовавших знания числа Авогадро.

МЕТОД ТОМСОНА

Примерно в то же время (1897) Вильсон провел в Кавендишской лаборатории свои первые исследования процесса образования облака из капелек. Он открыл, что ионы газа, так же как и обычные пылинки, могут служить центрами конденсации водяных паров в воздухе, пересыщенном паром. Используя технику, разработанную Вильсоном, Томсон сконструировал камеру, в которой благодаря наличию стабилизированного источника рентгеновских лучей могли рождаться ионы. Температура водяных паров и воздуха, давление и степень насыщения были известны. С помощью поршня во вспомогательном цилиндре можно было внезапно изменять давление и температуру на известную величину и определять таким образом результирующую степень пересыщения водяных паров в камере. Поскольку предварительно вся пыль была из камеры удалена, то центрами конденсации были только ионы. Общий заряд всех ионов в каждый данный момент времени был известен из независимых измерений с помощью электрометра, так что заряд одного иона мог быть получен как частное от деления этого общего заряда на количество образовавшихся капелек. Число этих капелек определяли, как и в эксперименте Таунсенда, путем измерения скорости осаждения облака с последующим вычислением радиуса «средней» капли на основании закона Стокса. Общее количество воды, сконденсировавшейся в каплях в процессе расширения, было весьма мало, и его нельзя было измерить непосредственно, поэтому пришлось прибегнуть к косвенному методу. Для этого пришлось изме-

ритель изменение температуры вследствие расширения. Зная это изменение, а также давление, объем и термодинамические свойства водяных паров и воздуха, нетрудно было рассчитать количество воды, сконденсировавшейся в каплях.

Первые результаты, полученные Томсоном, дали среднее значение величины e , равное приблизительно $2,2 \times 10^{-19}$ к. Аналогичные эксперименты Вильсона показали, что при соответствующем выборе степени расширения (которая должна быть меньше 1,3) воздуха в камере можно добиться конденсации капелек только на отрицательных ионах. В этом случае образовавшиеся капельки меньше различались по величине. Томсон использовал эти новые данные в своих дальнейших экспериментах (1901 год). Для получения ионов он применил лучи радия, а не рентгеновские лучи, что позволило исключить ошибку, связанную с нестабильной работой рентгеновской аппаратуры. Величина e , полученная в этих экспериментах, равнялась примерно $1,1 \cdot 10^{-19}$ к. Томсон обнаружил, что средний заряд ионов в пределах экспериментальных ошибок не зависит от рода ионизованного газа и от вида источника ионизации. Это обстоятельство представлялось довольно сильным аргументом в пользу существования единичного заряда, присущего всем элементам.

Полученное в опытах Томсона значение e следовало, очевидно, интерпретировать не просто как среднее значение заряда для множества различных ионов, а именно как величину единичного элементарного заряда.

МЕТОД ВИЛЬСОНА

В 1903 году Вильсон [13] внес некоторые изменения в метод, использованный ранее Томсоном. Известно, что большие по размерам и более тяжелые капли падают быстрее, поэтому Вильсон решил наблюдать только за верхней частью облака, предполагая, что она будет состоять из достаточно однородных маленьких капель. Кроме того, он установил две горизонтальные пластины в верхней части и у основания камеры; таким образом, если к пластинам была приложена некоторая разность потенциалов, то на каждую каплю помимо силы тяжести действовала еще дополнительная сила Eq (E — напря-

женность электрического поля между пластинами, а q — заряд, несомый типичной каплей). Проводя вспомогательные измерения в отсутствие электрического поля, можно исключить необходимость приближенных расчетов среднего значения массы капелек. Конечная скорость капли, движущейся в вязкой среде (воздух тоже является вязким для очень малых капель), пропорциональна действующей на каплю силе. Скорость капли верхней части облака, падающей под действием только силы тяжести, удовлетворяет соотношению

$$v_g = kmg, \quad (4.2)$$

где k — некоторая постоянная, соответствующая данной капле, а m — масса капли. Если приложено электрическое поле, то

$$v_e = k(mg + Eq). \quad (4.3)$$

Знак плюс показывает, что направление электрического поля совпадает с направлением постоянно приложенной гравитационной силы.

Комбинируя соотношения (4.2) и (4.3), получим

$$Eq = mg \frac{(v_e - v_g)}{v_g}. \quad (4.4)$$

Так как масса типичной капли равна $4\pi\rho a^3/3$, мы можем переписать это последнее уравнение в виде

$$Eq = \frac{4}{3} \pi\rho a^3 g \frac{(v_e - v_g)}{v_g}. \quad (4.5)$$

Согласно закону Стокса,

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{ga^2\rho}{\eta}.$$

Решая последнее уравнение относительно радиуса капли a и подставляя полученное выражение в уравнение (4.5), получим

$$Eq = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 v_g}{\rho g}} (v_e - v_g). \quad (4.6)$$

Константы η , ρ , g в уравнении (4.6) либо известны, либо могут быть измерены. Поэтому, определив скорости v_g и v_e и напряженность поля E , Вильсон смог рассчитать заряд q типичной капли из верхней части облака. Он получил величину заряда $1,03 \cdot 10^{-19}$ к, что довольно хорошо согласуется с результатами Таунсенда и Томсона.

В этом методе были устранены некоторые неопределенности, например измерение действительных размеров капель. Однако граница «верхней части облака» все еще не была сколько-нибудь точно определена. Хотя этот метод оказался в принципе более совершенным, он не дал значительного уточнения результатов по сравнению с данными, полученными предшественниками Вильсона. Интересно отметить, что Вильсон обнаружил присутствие в камере очень слабых, если можно их так назвать, «субоблаков». Скорость их движения в гравитационном и электрическом полях указывала на то, что средний заряд образующих их капель в два-три раза больше основного заряда.

Томсон в 1906 году опубликовал работу [14], в которой он на основании полученных им результатов и результатов Вильсона, используя данные о величине заряда иона водорода в электролите, доказывал идентичность любых одновалентных ионных зарядов. Используя значение, полученное Вильсоном для элементарного заряда e , он провел обратный расчет, определив с помощью константы Фарадея число Авогадро N , которое оказалось равным $8,7 \cdot 10^{23}$ молекул в грамм-молекуле. В этой статье Томсон еще раз подчеркивал, что катодно-лучевые частицы должны иметь такой же элементарный заряд, и поэтому их масса должна составлять около $1/1700$ массы атома водорода.

МЕТОДЫ ПЕРРЕНА

В течение нескольких следующих лет стало возможным получить более точные значения числа Авогадро. Французский физик Перрен, чьи эксперименты с катодными лучами имели решающее значение, разработал несколько методов для определения числа N . Они были описаны им в ряде работ, опубликованных в 1908—

1910 годах [15]. Методы Перрена основаны на анализе броуновского движения микроскопических частиц, взвешенных в жидкости. Это хаотическое движение, впервые обнаруженное английским ботаником Робертом Броуном в 1827 году, обусловлено непрерывной, но неравномерной бомбардировкой частиц отдельными атомами (молекулами) жидкости или газа. Эйнштейн в 1905 году развил теорию броуновского движения, которая связывала наблюдаемые величины (среднее смещение данной частицы за определенный промежуток времени, параметры диффузии групп частиц, вероятность того, что смещение частицы имеет заданную величину) с размерами частиц и их числом в рассматриваемой среде. Перрен и его коллеги провели серию красивых экспериментов, основанных на изучении броуновского движения в сочетании с теорией Эйнштейна. Они установили, что значение числа Авогадро должно лежать в пределах от $6,5 \cdot 10^{23}$ до $7,15 \cdot 10^{23}$.

Группа Перрена изучала также распределение в вертикальном направлении частиц заданного размера, взвешенных в капле воды на предметном стекле микроскопа. Такая суспензия быстро достигает состояния равновесия, при котором концентрация частиц как функция высоты может быть с помощью уравнений кинетической теории вещества связана с числом Авогадро. Значение числа Авогадро, полученное таким методом, составляло $7,05 \cdot 10^{23}$.

В своей статье, опубликованной в 1909 году, Перрен обсуждает различные методы определения числа Авогадро N , в том числе и методы, разработанные в других лабораториях. Приведенные в статье значения N представлены в табл. 2. К сожалению, в 1909 году еще не были развиты методы оценки надежности и точности измерений. Перрен, очевидно, больше всего полагался на результаты методов 3, 4, 5, 6, 12, 13 и 14, ибо он сообщил в своей работе, что N имеет значение очень близкое к $7,0 \cdot 10^{23}$.

Включая в статью результаты других, менее точных методов, он хотел, по-видимому, показать что все разнообразные методы дают (в пределах экспериментальной точности и даже иногда при довольно шатких предположениях) хорошо согласующиеся друг с другом значения числа N .

Значения числа Авогадро, полученные различными методами

	Метод	$N \cdot 10^{-23}$ (1909 г.)	$N \cdot 10^{-23}$ (1923 г.)
1	Измерение плотности жидкостей и газов	4,5	—
2	Измерение диэлектрической постоянной	20	—
3	Анализ с помощью уравнения состояния Ван дер Ваальса	6,0	—
4	Изучение диффузии частиц в жидкостях	7,05	6,9
5	Измерение величины броуновского смещения	7,15	6,4
6	Изучение вращательных броуновских движений	6,5	6,5
7	Изучение диффузии сферических частиц при броуновском движении	4÷9	—
8	Измерение подвижности ионов	6÷15	—
9	Изучение рассеяния света в атмосфере	3÷15	6,5
10	Вычисление отношения константы Фарадея к величине элементарного заряда, измеренной различными методами	6÷9	6,1
11	Анализ спектра излучения черного тела	6÷8	6,1
12	Метод, основанный на измерении заряда ядер гелия (α -частиц)	6,2	6,2
13	Определение количества гелия, выделяемого при распаде 1 г радия	7,1	6,6
14	Определение постоянной распада радия	7,05	6,2

ДРУГИЕ МЕТОДЫ

Интересно проанализировать другие методы определения числа Авогадро. Например, голубизна неба обусловлена неоднородностью воздуха. На основании результатов кинетической теории газов можно показать, что в любом заданном малом элементе объема газа имеют место случайные флуктуации числа молекул. В связи с этим показатель преломления света, который зависит от плотности газа, будет слабо флюктуировать при переходе от одного небольшого объема воздуха к другому, хотя его среднее значение всегда будет весьма близко к единице. Эти флуктуации являются причиной рассеяния части энергии пучка света, проходящего через воздух. Свет голубой области спектра, обладающий более короткой длиной волны, рассеивается сильнее, чем красный свет. Результаты сравнительных измерений спектрального распределения энергии после прохождения света через атмосферу и энергетического спектра прямого солнечного излучения могут быть использованы (с применением уравнений, полученных Рэлеем и Эйнштейном) для оценки количества молекул газа в данном объеме атмосферы, а следовательно, для определения числа Авогадро.

В 1900 году Макс Планк на основании ряда теоретических предпосылок вывел соотношение, устанавливающее зависимость между спектральным составом света, испускаемого раскаленными телами, и температурой этих тел. Полученное им выражение включало число Авогадро, константу, величина которой была известна из результатов измерений характеристик газа, и новую константу, введенную Планком (и называемую с тех пор постоянной Планка). Подставляя в это соотношение экспериментальные данные по спектральному распределению при определенной температуре, Планк смог найти численное значение новой постоянной и значение числа Авогадро.

Заслуживают внимания методы определения числа N из экспериментов с радиоактивными веществами. Один из этих методов (обозначенный номером 12 в табл. 2) сводится, по существу, к определению элементарного заряда e . Число Авогадро N получают затем как частное от деления константы Фарадея Ne на величину

заряда e . Такой эксперимент был проведен Резерфордом в 1908 г. [16]. Поблизости с тонким слоем α -радиоактивного вещества располагали изолированный электрод, на котором могли собираться эмиттируемые α -частицы. Полный заряд, накопившийся за определенный промежуток времени, измеряли с помощью электрометра. Для определения числа α -частиц, испускаемых за 1 сек, этот источник устанавливали перед сцинтилляционным экраном. Когда α -частица попадала в экран, возникали короткие вспышки света, и их число подсчитывалось наблюдателем, глаза которого были хорошо приспособлены к темноте. (Современным вариантом такого регистрирующего устройства является сцинтилляционный счетчик. Частицы или кванты, попадая в твердый или жидкий сцинтиллятор, вызывают в нем вспышки, которые «наблюдает» уже не человеческий глаз, а очень чувствительный фотоумножитель и связанная с ним электронная счетная схема.)

Частное от деления величины накопленного заряда на число α -частиц, испускаемых источником за данный промежуток времени, дает среднюю величину заряда, который несет одна α -частица (при условии, что отсутствует утечка зарядов с измерительной аппаратуры, что все α -частицы достигают собирающего электрода и т. д.). Из независимых измерений было известно, что α -частица имеет двойной положительный заряд, и, следовательно, величина e должна составлять половину величины заряда, определенного в описываемом опыте. Отношение константы Фарадея к значению e равно числу Авогадро $6,2 \cdot 10^{23}$ (см. табл. 2).

По числу сцинтилляций, обусловленных α -частицами, Резерфорд установил, что один грамм радия испускает $3,4 \cdot 10^{10}$ частиц в 1 сек. Кроме того, к 1908 году было уже известно, что атомный вес радия A равен 226, а его период полураспада предполагался равным 2000 лет. Имея эти данные, можно было поставить следующий вопрос: «Какое количество атомов N содержится в одной грамм-молекуле радия, если известно, что A грамм радия испускает $3,4 \cdot 10^{10} A$ частиц в секунду и что через 2000 лет число атомов радия уменьшится до $N/2$?» (Скорость распада будет меняться в зависимости от числа распавшихся атомов радия, но этот фактор можно учесть. Подробности приведены в приложении.) Резер-

форд определил таким образом, что $N = 7,05 \cdot 10^{23}$. Согласно уточненным значениям скорости распада ($3,7 \cdot 10^{10}$ частиц/(г·сек)) и периода полураспада (1600 лет) получена величина $N = 6,0 \cdot 10^{23}$.

Другой метод определения величины N был разработан в 1909 году Моулином [17]. Сэр Джеймс Девар, измеряя количество гелия, выделяющегося за определенный промежуток времени при распаде одного грамма радия, нашел, что в течение суток образуется $0,11 \text{ мм}^3$ газа при нормальной температуре и давлении. К тому времени было известно, что α -частицы являются ядрами гелия. Поскольку, согласно данным Резерфорда, один грамм радия испускает $3,4 \cdot 10^{10}$ α -частиц в 1 сек, то не трудно подсчитать, что в течение суток будет накоплено $24 \cdot 3600 \cdot 3,4 \cdot 10^{10} = 2,9 \cdot 10^{15}$ атомов гелия. Это количество атомов занимает при нормальной температуре и давлении объем в $0,11 \text{ мм}^3$. Чтобы определить, какое количество атомов гелия занимает объем 22,4 литра (объем одной грамм-молекулы гелия), необходимо составить простую пропорцию. Оказалось, что число Авогадро, определенное таким методом, равно $6,0 \cdot 10^{23}$.

В значениях числа Авогадро, полученного с помощью рассмотренных выше методов (см. табл. 2), наблюдается некоторый разброс, который не превышает, однако, возможных ошибок измерения или точности приближения. Таким образом, благодаря такому количеству хорошо согласующихся экспериментальных данных к 1909 году фактически все физики и химики не только полностью поверили в существование атомов, но и знали достаточно точно значение числа Авогадро. Это означало, что стали также известны массы отдельных атомов и заряды отдельных ионов. Такие разнообразные явления и соотношения, как законы химических соединений, голубизна неба, период полураспада радия, электролиз, поведение ионов в газах, испускание света раскаленными телами и свойства газов, оказались до некоторой степени взаимосвязанными. Это можно объяснить, по крайней мере частично, существованием некоторого присущего всем атомам свойства, характеризуемого числом $N = (6 \div 7) \cdot 10^{23}$, одинаковым для всех элементов. Оставалось одно очень существенное затруднение. Во всех изложенных выше методах определения величин N или e приходится иметь дело с большим числом час-

тиц. С помощью этих методов в действительности определяли *среднее* значение e ; при этом не было полной уверенности в том, что все ионы, например, в электролите имеют совершенно одинаковый заряд. (Можно определить среднее «жалованье» всех правительственных служащих, поделив общую сумму в платежной ведомости на общее число служащих. Однако без дополнительных данных нельзя установить, одинаковы ли все оклады или нет.)

На самом деле ситуация была значительно более сложной, чем в этой грубой аналогии, ибо не так уж трудно узнать, все ли правительственные служащие получают одинаковое жалованье или нет. Однако значение величины e , определенное различными методами, настолько мало, что возникает естественное сомнение в возможности зарегистрировать (а следовательно, и измерить) одиночный заряд. В сухой зимний день, передвигаясь по ковру, можно накопить маленький заряд на самом себе. Легко показать, что величина этого заряда составляет около одной десятимиллионной доли кулона, в то время как через нить обычной электрической лампы протекает около 1 к/сек (кулон в секунду). Однако даже маленький заряд, накопленный при ходьбе по ковру, в миллион миллионов раз больше, чем заряд электрона. Несколько миллиардов дополнительных электронных зарядов не внесли бы более или менее заметной разницы, не повлияли бы на показания обычного прибора для измерения заряда. Сравнить заряд e с величинами, которые обычно регистрирует наша измерительная аппаратура — все равно что маленькую крошку хлеба сравнивать по величине с небоскребом Эмпайр Стейт Билдинг.

Для большинства практических и научных целей, в частности при использовании уравнений Максвелла для расчета антенны радара или при проектировании конструктивных деталей самолета или электрической лампы, можно считать электричество и вещество непрерывными. Однако вследствие чрезвычайно малой величины элементарного электрического заряда и атомов всякое непосредственное изучение их индивидуальных свойств связано со значительными трудностями. Почти всегда необходимо прибегать к косвенным методам, включающим наблюдение очень большого числа зарядов или

атомов. Поэтому нелегко доказать, что измеренные характеристики справедливы для каждого заряда или атома в отдельности.

МЕТОД МИЛЛИКЕНА

Американский физик Милликен разработал наконец метод, позволивший измерить заряды индивидуальных электронов. В 1906 году он начал проводить в Чикагском университете опыты, в которых велось наблюдение за верхней частью облака водяных капелек, находящихся в переменном электрическом поле.

Первые результаты [18], полученные им с помощью этого метода, дали величину $e = 1,33 \cdot 10^{-19}$ к. Милликен, однако, столкнулся с рядом трудностей, обусловленных испарением и распылением капелек. Тогда вместо воды он стал использовать минеральное масло, которое почти не испарялось. Чтобы исключить неоднозначность, связанную с наблюдением целого облака, он решил следить за отдельными капельками. Схема аппаратуры его эксперимента показана на рис. 8. В пространство над,

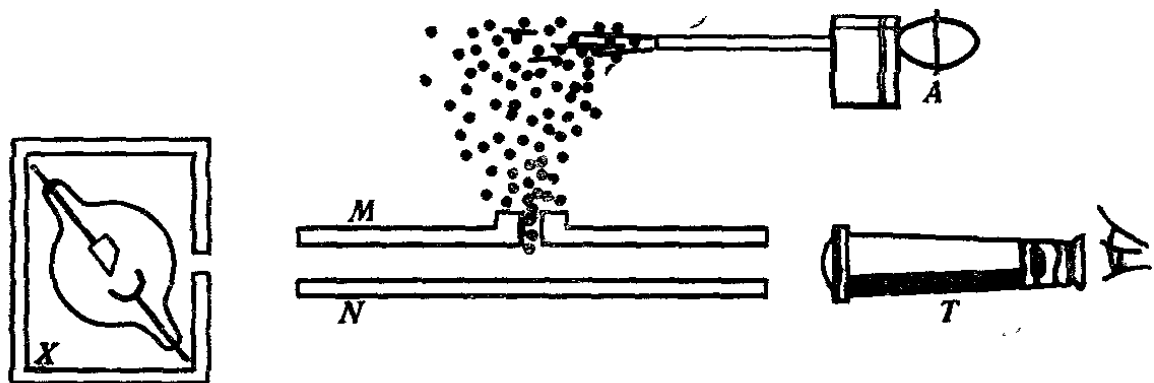


Рис. 8. Схема опыта Милликена:

A — распылитель; *M*, *N* — пластины; *T* — телескоп; *X* — рентгеновская трубка.

двумя пластинами впрыскивали с помощью распылителя капельки масла. Время от времени одна из капель проходила через булавочное отверстие в верхней изолированной пластине в область между пластинами, где ее можно было наблюдать с помощью короткофокусного телескопа. Капля освещалась сбоку, и ее изображение появлялось в поле зрения окуляра, как яркая точка на черном фоне. Поле зрения окуляра пересекали два горизонтальных волоска. Многие капли оказывались за-

ряженными электричеством вследствие трения в процессе распыления, другие можно было зарядить, облучая их рентгеновскими или γ -лучами (гамма-лучами).

Предположим, что наблюдаемая капля имеет массу m и заряд q . Она испытывает действие силы тяжести mg , направленной вниз, и действие силы Eq , направленной вверх или вниз и обусловленной электрическим полем, приложенным между пластинами M и N . Напряженность поля E легко рассчитать, исходя из расстояния d между пластинами и разности потенциалов V между ними ($E = V/d$, если диаметр пластин больше d , так что эффекты искажения поля на краях пластин незначительны). Разность потенциалов V создавалась батареями. Ее можно было изменять с помощью потенциометра и измерять точным вольтметром. В отсутствие электрического поля капля должна падать с постоянной скоростью v_g , которая определяется радиусом капли a и ее плотностью ρ , ускорением свободного падения g , а также плотностью среды ρ_1 и ее вязкостью η . Уравнение Стокса дает нам связь между скоростью v_g и всеми остальными величинами

$$v_g = \frac{2}{9} \frac{ga^2(\rho - \rho_1)}{\eta} = kmg, \quad (4.7)$$

где k — некоторая константа, соответствующая данной капле. Если приложено электрическое поле, то скорость v_e равна

$$v_e = k(mg + Eq). \quad (4.8)$$

Скорости v_g и v_e определялись по времени, необходимому капельке для прохождения расстояния, соответствующего расстоянию между двумя горизонтально натянутыми нитями. Если это расстояние есть D , то $v_g = D/t_g$ и $v_e = D/t_e$, где t_g и t_e — соответственно значения времени падения капельки в случае отсутствия поля и в электрическом поле.

В табл. 3 даны значения t_g и t_e , измеренные Милликеном с помощью секундомера в одном из его ранних экспериментов с отдельной каплей. Мы видим, что среднее время прохождения капелькой расстояния между двумя отметками под действием только силы тяжести

Результаты опыта Милликена [19]

t_g , сек	t_e , сек	v_e , см/сек	Изменение скорости v_e , см/сек	Номер разности
13,6	12,5	0,0417	+0,0003	1
13,8	12,4	0,0420	-0,0181	2
13,4	21,8	0,0239	-0,0090	3
13,4	34,8	0,0149	-0,0087	4
13,6	84,5	0,0062	-0,0001	5
13,6	85,5	0,0061	+0,0090	6
13,7	34,6	0,0151	-0,0001	7
13,5	34,8	0,0150	+0,0176	8
13,5	16,0	0,0326	-0,0176	9
13,8	34,8	0,0150	+0,0001	10
13,7	34,6	0,0151	+0,0187	11
13,8	21,9	0,0238		

составляет $(13,6 \pm 0,1)$ сек. За это время капля проходит расстояние 0,522 см и, следовательно, ее средняя скорость v_g равна 0,0384 см/сек.

В этой же таблице приведены измеренные значения интервалов времени при падении той же капли в электрическом поле. Разделив 0,522 см на эти величины, мы получим скорости, приведенные в третьей колонке. Заметим, что скорости, измеренные в двух последовательных опытах, были иногда одинаковы, иногда различны. Если они различны, значит различны и силы, действующие на каплю, что указывает на неидентичность зарядов капель. Записывая соотношение (4.8) для заря-

да q_1 и для заряда q_2 , и вычитая одно из другого, получим

$$\begin{aligned}v_{e_1} &= k (mg + Eq_1); \\v_{e_2} &= k (mg + Eq_2), \\v_{e_1} - v_{e_2} &= k (Eq_1 - Eq_2)\end{aligned}$$

или после преобразования

$$q_2 - q_1 = \frac{1}{kE} \cdot (v_{e_2} - v_{e_1}). \quad (4.9)$$

Последнее выражение показывает, что *изменение* величины заряда в любых двух последовательных опытах равно постоянному члену, умноженному на *разность* скоростей. Множитель $1/kE$ остается постоянным только при выполнении следующих условий: масса и объем всех капель одинаковы, вязкость и плотность воздуха постоянны, напряженность электрического поля фиксирована.

В четвертой колонке приведены разности между двумя последующими значениями v_e . Разница в величине заряда капли в случаях, отмеченных номерами 1, 5, 7 и 10 в пятой колонке, меньше того значения, которое может быть надежно зарегистрировано приборами. Действительно, при измерении времени падения капли секундомером точность результатов не превышает одного-двух процентов и поэтому приведенная цифра слишком мала, чтобы можно было говорить о ее достоверности. Значит, в этих случаях в пределах точности эксперимента значения заряда можно считать одинаковыми. В случаях 3 и 4 изменение величины заряда, по существу, одно и то же. Будем обозначать его символом e . Значение e численно равно некоторой постоянной, умноженной на 0,0089 или 0,0088, величина которой сейчас нас не интересует. В случае 6 заряд на капле увеличился на e , в случаях 2 и 9 — на $2e$. Номерами 8 и 11 отмечены случаи, когда он уменьшился на $2e$. Следовательно, в этих десяти случаях *изменение* заряда (в пределах достижимой точности эксперимента) всегда равно величине ne , где e — константа, а $n = +2, +1, 0, -1, -2$. Заряд капли,

независимо от его численного значения, изменялся только дискретными скачками. И то, что оказалось верным для этой капли, было справедливо и для сотен других капель, которые наблюдал в своих опытах Милликен и его коллеги на протяжении нескольких лет и с которыми с тех самых пор имеют дело студенты, хотя, конечно, числа n не ограничивались приведенными выше значениями. Но они всегда были целыми числами — Милликен никогда не наблюдал таких явлений, при которых величины зарядов изменялись бы на $0,5 e$ или на какую-либо другую нецелочисленную величину. Однако результаты этих экспериментов не доказали ни атомной природы электричества, ни существования какого-либо «наименьшего» электрического заряда. Тем не менее этот и последующие эксперименты показали, что изменение электрического заряда на масляной капле всегда было равно величине ne , где n — положительное или отрицательное целое число, а e — некоторый основной заряд.

Обсуждая поведение капли и, в частности, тот факт, что изменение заряда капли происходит вследствие захвата иона из воздуха, Милликен писал [19]: «Найденные соотношения выполняются без каких-либо исключений, независимо от вида газа, в котором взвешены капли, и от рода самих капель, захватывающих ионы. Наблюдая за какой-то фиксированной каплей в течение пяти-шести часов, можно заметить, что она захватывает не восемь или десять ионов, как в вышеупомянутом эксперименте, а целые сотни. Вообще говоря, я фактически наблюдал захват многих тысяч ионов, происходящий аналогичным образом, и ни в одном случае не обнаружил хотя бы одного значения, которое не равнялось бы точно величине наименьшего заряда или же не было кратно этому значению. Это обстоятельство может служить *прямым, не вызывающим сомнений, доказательством того, что заряд электрона не является величиной «среднестатистической» и что электрические заряды на ионах всегда точно равны или кратны одной и той же величине».*

Теперь в принципе нетрудно определить действительное численное значение величины e . Мы знаем, чему равна скорость v_g рассмотренной нами капли. Применив закон Стокса (4.7) и зная физические свойства мас-

ла и воздуха, мы сможем вычислить радиус капли a . После этого легко найти массу капли и, следовательно, константу k . Далее, поскольку мы можем определить значение E , измерив разность потенциалов между пластинами, а также расстояние между ними, то на основании данных табл. 3 и соотношения (4.8) нетрудно вычислить величину e .

Если q_1 и q_2 заряды, которые оказались на капле в процессе двух последовательных опытов, то, исходя из соотношения, (4.9), можно записать

$$q_2 - q_1 = \frac{mg}{Ev_g} (v_{e_2} - v_{e_1}) = ne,$$

где n — целое число. Из этого выражения получаем

$$e = \frac{mg}{nEv_g} (v_{e_2} - v_{e_1}). \quad (4.10)$$

Анализируя данные табл. 3, мы можем определить величину n для каждой пары наблюдений и, следовательно, найти значение e .

Когда Милликен провел эти вычисления для капель различных размеров (т. е. капель с различными скоростями падения под действием силы тяжести), он обнаружил, что величина основного заряда e для разных капель не остается одной и той же. Оказалось, что для меньших капель величина заряда e больше. Он нашел, что при уменьшении давления воздуха в камере кажущееся значение заряда e возрастает. Поскольку Милликен был убежден, что заряд электрона e в действительности не может отличаться для различных капель, он очень тщательно проанализировал результаты обоих наблюдений с учетом тех предположений, которые лежали в основе использованных им уравнений. Милликен пришел к выводу, что закон Стокса для падающей сферы, вероятно, не совсем точен в условиях его эксперимента. В силу допущений, сделанных при выводе закона Стокса из уравнений механики Ньютона, он справедлив только для сферы, движущейся в вязкой *сплошной* среде. Что касается сферичности капель, то здесь почти не было никаких сомнений. Милликен легко смог доказать, что для капель таких малых размеров силы поверхно-

стного натяжения будут исключать возможность каких-либо значительных отклонений от точной сферической формы [20]. Что касается сплошности среды, то здесь положение было несколько иным. Милликен знал, что радиус капли был равен приблизительно 10^{-4} см. При нормальном давлении средний свободный пробег молекул в воздухе составляет примерно 10^{-5} см. Следовательно, если каплю увеличить примерно в 250 000 раз, то она выглядела бы подобно сфере размером приблизительно с баскетбольный мяч, парящий в облаке очень маленьких, но быстро передвигающихся комаров, летающих в среднем на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга. Облако комаров, конечно, не воспроизводит в точности сплошную среду, и поэтому можно было ожидать, что закон Стокса для этого случая справедлив только приблизительно. Условно можно считать, что воздух как бы имеет «пустоты», диаметр которых приблизительно равен среднему свободному пробегу его молекул, который мы обозначим l . При условии, что l меньше радиуса капли a , можно считать, как отметил Милликен, что скорость капли под действием силы тяжести равна величине, определяемой законом Стокса, умноженной на некоторый поправочный коэффициент, являющийся функцией отношения l/a . Математическое выражение для этого множителя, по-видимому, можно было бы вывести теоретически, но Милликен определил его проще, предположив, что искомая функция допускает разложение (для малых значений l/a) в бесконечный степенной ряд. Исходя из этого, он записал закон Стокса в следующем виде:

$$v_g = v_0 [1 + A(l/a) + B(l/a)^2 + C(l/a)^3 + \dots], \quad (4.11)$$

где A , B , C и т. д. — коэффициенты, которые следовало определить экспериментально;

$$v_0 = \frac{2}{9} g a^2 (\rho - \rho_1) / \eta.$$

На основании анализа результатов экспериментов Милликен установил, что необходимо учитывать только первый член разложения (включающий коэффициент A). Остальные слагаемые были слишком малы и не могли оказать какого-либо существенного влияния на величину скорости v_g . С помощью методов, которые будут описа-

ны ниже, Милликен определил, что коэффициент $A = 0,874$. Предположим, мы нашли приближенное значение радиуса капли a_0 , используя для этого обычное выражение закона Стокса без поправочного множителя:

$$a_0 = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2g\rho}}. \quad (4.12)$$

Если решить уравнение (4.12) относительно скорости v_g и подставить найденное выражение для v_g и соответствующее выражение для v_0 в разложение (4.11), ограничившись при этом только первым, наиболее существенным членом, то

$$a_0^2 = a^2 (1 - Al/a), \quad (4.13)$$

откуда

$$a = a_0 \sqrt{\frac{1}{1 + A(l/a)}}. \quad (4.14)$$

Среднюю длину свободного пробега l можно вычислить, если известно давление воздуха в течение всего эксперимента с какой-либо конкретной каплей. В первом приближении для нахождения радиуса a в правой части уравнения (4.14) в члене l/a можно использовать вместо a величину a_0 . Найденное таким образом значение можно снова подставить в уравнение (4.14) и т. д. Поскольку член Al/a мал (порядка 0,1 или меньше), то этот метод последовательных приближений сходится довольно быстро к точному значению a .

Вернемся снова к соотношению (4.10)

$$e = \frac{mg}{E} \left(\frac{v_{e_2} - v_{e_1}}{v_g} \right) \frac{1}{n}.$$

Поскольку масса капли равна $4\pi a^3 \rho / 3$, то соотношение (4.10) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} e &= \frac{4\pi a^3 \rho g}{3E} \left(\frac{v_{e_2} - v_{e_1}}{v_g} \right) \frac{1}{n} = \\ &= \frac{4\pi a_0^3 \rho g}{3E} \left(\frac{v_{e_2} - v_{e_1}}{v_g} \right) \frac{1}{n} \left(\sqrt{1 + A \frac{l}{a}} \right)^{-3} \end{aligned} \quad (4.15)$$

или

$$e = e_0 \left(1 + A \frac{l}{a} \right)^{-3/2},$$

где e_0 фактически является искомым зарядом, если пренебречь поправочным членом.

Уравнение (4.15) можно записать следующим образом:

$$e_0^{2/3} = \left(1 + A \frac{l}{a} \right) e^{2/3}. \quad (4.16)$$

Таким образом, если мы для некоторого множества капель при различных давлениях, считая параметр l/a независимой переменной величиной, построим зависимость (4.16), то получим прямую линию. Отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, будет равен величине $e_0^{2/3}$, а наклон — $A e^{2/3}$. Следовательно, можно будет определить сразу оба значения e и A . Для построения указанного графика надо знать величину радиуса a , который в свою очередь зависит от неизвестного параметра A . Поэтому Милликен сначала для всех капель использовал приближенные значения радиуса a_0 , вычисленного без поправочного множителя, и построил график e_0 в зависимости от l/a . Определив затем величину A из этого графика, он смог вычислить более точные значения a и e_0 . Новый график, построенный с учетом уточненных значений, служил для определения следующего приближения величины A . Оказалось, что после первых двух приближений величины A и e , полученные из графиков, почти не менялись в процессе последующих итераций.

В табл. 4 представлены данные, полученные Милликеном в ходе наблюдений за 58 каплями при различных условиях: в процессе экспериментов значения l/a различались в 30 раз, давление (и, следовательно, средняя длина свободного пробега) — в 7 раз, а размеры капель — в 12 раз, а количество зарядов на капле изменялось от 1 до 136. Все результаты опытов, представленные в таблице, были получены Милликеном в течение 60 дней. На основании этих данных Милликен построил график зависимости $e_0^{2/3}$ от l/a . Экспериментальные точки хорошо легли на прямую линию, и, следовательно, поправочный коэффициент к закону Стокса действи-

Таблица 4

Результаты опытов Милликена для серии из 58 капель [19]

№ опыта	Температура, °C	Разность по- тенциалов, в	t , сек	v_1 , см/сек	$(v_1 - v_2)e$	n	$a \cdot 10^5$, см	ρ , см рт. ст.	$\frac{1}{\rho a}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \cdot 10^{10}$	$e_1^{3/2} \cdot 10^8$	$e_1^{3/2} \cdot 10^8$
1	23,00	5168	4,363	0,2357	0,003293	77—102	58,56	75,80	22,52	0,01615	4,877	61,00	61,14
2	22,80	5120	8,492	0,1202	0,004670	27—36	32,64	75,00	40,85	0,02933	4,981	62,82	61,26
3	23,46	5100	9,905	0,1032	0,004996	22—27	30,29	73,71	44,88	0,03212	4,971	62,75	61,04
4	22,85	5163	10,758	0,09489	0,005211	18—36	28,94	75,20	45,92	0,03288	5,001	63,00	61,24
5	23,08	5072	10,663	0,00575	0,005176	20—30	29,14	73,25	46,85	0,03353	4,982	62,82	61,13
6	22,82	5085	11,880	0,08584	0,005497	17—24	27,54	75,62	48,11	0,03437	4,991	62,93	61,09
7	23,79	5090	11,950	0,08368	0,005480	19—22	27,57	75,10	48,44	0,03466	4,981	62,82	61,07
8	23,50	5158	12,540	0,08141	0,005623	16—19	26,90	75,30	49,52	0,03544	5,016	63,12	61,23
9	22,87	5139	13,562	0,07375	0,005962	19—23	25,71	75,00	51,73	0,03702	5,016	63,13	61,15
10	23,25	5015	15,380	0,06641	0,006174	13—22	24,31	76,27	55,09	0,03871	5,010	63,08	61,02
11	23,01	5066	15,193	0,06720	0,006087	11—14	24,36	73,90	55,52	0,03973	5,015	63,12	61,00

№ опыта	Температура, °C	Разность потенциалов, в	t , сек	v_1 , см/сек	$(v_1 - v_2) e$	n	$a \cdot 10^8$, см	P , см рт. ст.	$\frac{1}{pa}$	$\frac{t}{a}$	$e_1 \cdot 10^{10}$	$e_1^{2/3} \cdot 10^8$	$e_1^{3/5} \cdot 10^8$
12	23,00	5080	15,985	0,06375	0,006416	12—16	23,70	75,14	56,15	0,04018	5,028	63,24	61,10
13	23,00	5024	15,695	0,05463	0,006873	9—15	21,91	76,06	59,94	0,04290	5,043	63,35	61,06
14	23,09	5077	18,730	0,05451	0,006988	8—16	21,85	75,28	60,78	0,04348	5,064	63,53	61,21
15	23,85	5078	18,959	0,05274	0,006966	8—18	21,78	75,24	61,03	0,04368	5,040	63,33	61,07
16	23,70	5103	18,738	0,05449	0,007005	9—16	21,87	74,68	61,33	0,04390	5,065	63,54	61,21
17	23,06	5060	18,415	0,05545	0,006890	9—18	22,06	73,47	61,69	0,04411	5,054	63,43	61,00
18	22,83	5093	26,130	0,03907	0,008339	5—13	18,45	75,54	71,74	0,05134	5,098	63,82	61,08
19	22,95	5033	28,568	0,03570	0,008651	5—9	17,63	75,87	74,77	0,05350	5,120	64,00	61,12
20	23,00	5094	9,480	0,10772	0,005058	23—32	30,54	41,77	78,40	0,05612	5,145	64,22	61,23
21	23,08	5018	35,253	0,02893	0,009660	4—11	15,80	74,32	85,08	0,06089	5,166	64,36	61,11
22	23,22	5005	40,542	0,02515	0,010332	3—9	14,75	76,42	88,70	0,06350	5,168	64,40	61,01
23	22,76	5098	39,900	0,02554	0,010510	3—6	14,85	75,40	89,35	0,06395	5,190	64,59	61,18

Продолжение табл. 4

№ опыта	Температура, °C	Разность потенциалов, в	t_g , сек	v_1 , см/сек	$(v_1 - v_2)e$	n	$a \cdot 10^5$, см	p , см рт. ст.	$\frac{1}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \cdot 10^{10}$	$e_1^{2/3} \cdot 10^8$	$e_1^{1/3} \cdot 10^8$
24	23,16	5050	12,466	0,08189	0,005896	15—28	26,44	37,19	101,8	0,07283	5,260	65,24	61,35
25	22,98	5066	15,157	0,06737	0,006399	12—17	24,01	38,95	107,2	0,07660	5,278	65,28	61,20
26	23,20	4572	7,875	0,12980	0,004324	33—40	33,07	24,33	124,4	0,08892	5,379	66,06	61,31
27	23,18	4570	9,408	0,1085	0,004730	23—29	30,23	25,37	130,4	0,09330	5,381	66,16	61,18
28	23,00	5145	84,270	0,1211	0,01595	1—4	4,60	75,83	130,3	0,09322	5,379	66,14	61,16
29	22,99	5073	23,223	0,04393	0,008488	6—12	19,06	33,47	156,8	0,1117	5,529	67,36	61,37
30	23,19	5090	26,830	0,03801	0,009111	5—10	17,77	35,18	160,2	0,1147	5,507	67,18	61,06
31	22,89	5098	38,479	0,02649	0,011180	3—5	14,71	36,51	176,5	0,1263	5,621	68,12	61,38
32	23,06	5070	14,060	0,07246	0,006762	12—17	24,29	21,12	195,0	0,1394	5,692	68,67	61,22
33	23,07	4582	18,229	0,05601	0,006981	10—13	21,33	23,86	196,6	0,1405	5,687	68,64	61,13
34	23,06	5061	38,010	0,02682	0,011205	3—8	14,72	34,01	199,8	0,1429	5,714	68,84	61,20
35	23,00	4246	9,265	0,11032	0,004653	27—34	29,84	16,00	209,5	0,1499	5,739	69,07	61,07

№ опыта	Температура, °C	Разность по- тенциалов, θ	t_g , сек	v_1 , см/сек	$(v_1 - v_2) e$	n	$a \cdot 10^6$, см	p , см рт. ст.	$\frac{l}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \cdot 10^{10}$	$e_1^{2/3} \cdot 10^8$	$e_1^{3/8} \cdot 10^6$
36	22,91	4236	9,879	0,10340	0,004863	24—28	28,74	15,67	222,0	0,1589	5,820	69,71	61,23
37	23,06	4236	12,040	0,08496	0,005362	18—24	26,27	16,75	227,5	0,1625	5,821	69,72	61,03
38	22,94	2556	10,657	0,09581	0,003109	32—43	27,49	14,70	247,5	0,1771	5,935	70,61	61,16
39	23,00	5054	19,950	0,05115	0,008370	8—15	20,12	19,73	251,8	0,1802	5,910	70,41	60,79
40	23,09	5058	21,130	0,04830	0,008865	7—9	18,38	18,54	278,3	0,1993	6,076	71,72	61,09
41	23,05	5062	24,008	0,04254	0,009496	6—8	18,16	19,01	289,6	0,2073	6,110	72,03	60,97
42	22,94	4238	18,347	0,05564	0,007110	9—17	20,60	15,72	308,8	0,2210	6,224	73,04	61,24
43	23,18	3254	13,909	0,07340	0,004729	16—28	23,70	13,55	311,0	0,2227	6,214	72,83	60,95
44	23,04	4231	29,114	0,03503	0,009273	5—9	16,16	17,17	360,6	0,2579	6,466	74,77	61,00
45	22,57	3317	29,776	0,03425	0,007430	5—12	15,90	17,27	364,2	0,2606	6,537	75,30	61,39
46	22,81	3401	25,909	0,03937	0,007311	6—19	16,90	14,68	403,3	0,2886	6,719	76,71	61,30
47	22,83	2550	12,891	0,07921	0,003935	18—42	23,80	9,70	432,8	0,3097	6,841	77,66	61,13

№ опыта	Температура, °C	Разность по- тенциалов, в	t , сек	v_1 , см/сек	$(v_1 - v_2)_e$	n	$a \cdot 10^5$, см	p , см рт. ст.	$\frac{1}{pa}$	$\frac{l}{a}$	$e_1 \cdot 10^{10}$	$e_1^{2/3} \cdot 10^8$	$e_1^{2/3} \cdot 10^8$
48	22,80	2559	32,326	0,03150	0,006286	7—14	15,01	15,35	433,8	0,3104	6,866	77,85	61,28
49	23,02	3370	14,983	0,06815	0,011353	8—9	22,00	10,10	448,8	0,3221	6,936	78,36	61,22
50	23,45	2535	11,659	0,08757	0,003783	25—30	24,88	8,60	466,7	0,3340	6,978	78,67	60,85
51	23,48	2539	10,924	0,09346	0,003615	27—34	25,69	8,26	470,7	0,3368	7,024	79,02	61,04
52	22,98	3351	50,400	0,02021	0,010775	2—6	11,83	16,95	498,5	0,3568	7,210	80,40	61,36
53	23,16	2451	33,379	0,03055	0,006623	5—10	14,39	12,61	551,3	0,3945	7,470	82,19	61,13
54	23,46	2533	19,227	0,05347	0,005314	11—17	18,87	9,03	587,8	0,4112	7,661	83,73	61,18
55	22,90	2546	24,254	0,04206	0,006041	9—18	16,72	10,11	591,5	0,4233	7,672	83,82	61,22
56	23,21	1700	5,058	0,20256	0,001861	117—136	36,53	4,46	614,2	0,4396	7,777	84,57	61,11
57	23,12	2321	15,473	0,06599	0,004360	18—24	20,85	7,74	619,7	0,4435	7,774	84,54	60,87
58	23,03	3388,5	24,33	0,04196	0,008183	6—10	16,62	9,070	620,2	0,4439	7,81	84,83	61,14

Примечание. Среднее значение всех чисел в последней колонке 61,138, первых 23 чисел — 61,120.

тельно может быть представлен только первым членом разложения в бесконечный ряд.

Значение $e^{2/3}$, определенное в точке, где отношение $l/a=0$, составляло $(61,2 \pm 0,1) \cdot 10^8$, т. е. $e = (4,78 \pm \pm 0,01) \times 10^{-10}$ электростатических единиц заряда. (Милликен и другие физики в то время обычно пользовались электростатической единицей для измерения малых зарядов. Одна электростатическая единица заряда равна $3,336 \cdot 10^{-10}$ к, так что в более привычных единицах результат Милликена может быть выражен как $1,59 \cdot 10^{-19}$ к.) Если с помощью графика определить величину A и затем по формуле (4.15) вычислить заряд e для каждой капли, то среднее значение этих зарядов может быть найдено более точно, чем при графическом построении. Этим методом на основании имевшихся данных было получено, что $e = (4,779 \pm 0,002) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Взяв из таблицы результаты только для первых 23 капель, для которых поправочный множитель $A/l/a$ был минимальным и для которых данные эксперимента находились в лучшем согласии между собой, и воспользовавшись более точным значением вязкости воздуха, Милликен несколько позже опубликовал новую численную величину для e , равную $4,774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц [или $(1,592 \pm \pm 0,002) \cdot 10^{-19}$ к].

В 1914 году Милликен более тщательно повторил эксперимент, приняв меры к тому, чтобы измерить все величины с максимальной точностью. В его приборе имелись две пластины, расстояние между которыми можно было фиксировать с точностью до одной сотой доли процента. Разность потенциалов между этими пластинами измерялась с точностью до одной трехтысячной доли от напряжения, создаваемого стандартным элементом Вестона. Новый хронометр позволял регистрировать время в пределах одной сотой секунды. В своих сообщениях Милликен не касался проблемы, связанной с неопределенностью, обусловленной запаздыванием во времени реакции экспериментатора, однако можно было ожидать, что в ходе измерения какого-либо промежутка времени такие ошибки будут сами собой исключаться, поскольку время запаздывания регистрации при пересечении капель верхнего и нижнего волосков, по видимому, одно и то же.

Коллеги Милликена разработали остроумные методы для точного определения вязкости воздуха. В результате была получена величина заряда e , которая численно совпадала со значением, полученным в 1913 году, но точность измерений была несколько выше, именно $e = (4,774 \pm 0,005) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц или $(1,592 \pm 0,0017) \cdot 10^{-19}$ к. В сочетании с известным в то время значением постоянной Фарадея (96 494 кулон на одну грамм-молекулу вещества) это позволило определить число Авогадро N , которое оказалось равным $6,062 \cdot 10^{23}$. Для этой серии измерений поправочный коэффициент A был равен 0,863. В середине тридцатых годов величины e и N были несколько подправлены, поскольку установили, что при определении вязкости воздуха не учитывались систематические ошибки.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАСЛЯНОЙ КАПЛЕЙ

Теперь было бы весьма полезно поразмыслить над тем, что именно доказали эксперименты Милликена и чего они не смогли доказать. Эксперименты, несомненно, доказали, что когда небольшой заряд на масляной капле *изменяется*, то величина этого изменения всегда равна ne , где n — целое число, а e всегда имеет одно и то же значение в пределах ошибки эксперимента. Далее, Милликен показал, что независимо от знака заряда иона, захватываемого каплей из окружающего газа, значение e , определяемое соответствующим изменением заряда капли, остается всегда одним и тем же. Значит, положительное и отрицательное изменения заряда одинаковы по абсолютной величине. Таким образом, не существует различия между значениями основного заряда для положительного электричества и для отрицательного. Кроме того, эксперименты показали, что величина основного заряда на капле, обусловленного трением при распылении, совпадает с соответствующей величиной заряда при захвате ионов, возникших под действием рентгеновских лучей или каких-либо других лучей от радиоактивных веществ.

Однако эксперименты *не доказали*, что в природе не существует еще меньший заряд. Можно, например, предположить, что заряды величиной $e/2$ в экспериментах Милликена всегда двигались парами, а заряды, равные

$e/4$, перемещались скоплениями по четыре. Эти исследования фактически также не доказали, что электричество имеет «гранулярную» или атомную структуру. Заряды, которые наблюдал Милликен, в принципе по своей внутренней структуре могли состоять из меньших зарядов или вообще из некоторого «супообразного» вещества, т. е. в математическом понятии быть непрерывными. Эксперименты в действительности *доказали*, что независимо от природы электричества электрические заряды постоянно находятся в движении, причем масляные капли либо приобретают, либо теряют их в количестве, равном ne , где n — целое число, а $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц заряда. Эксперименты в том виде, в каком они проводились, по сути дела можно сравнить с турникетом, который считает количество проходящих людей, но ничего не говорит нам об их внутреннем строении.

Опыты Милликена были подтверждены многочисленными дополнительными экспериментами. Вся система наших современных представлений о природе атомов и молекул тесным образом связана с идеей о том, что элементарный заряд равен e и что все фундаментальные частицы имеют заряд e , 0 или $-e$. Ряд недавних экспериментов касался так называемой электрической подструктуры некоторых из этих частиц, но теперь ни у кого не возникает мысли, что вообще когда-либо будут найдены свободные заряды, по величине отличные от e . Это опять-таки не доказывает, что заряды, равные, скажем $1/4 e$ или $1/17 e$, не существуют вообще. Но экспериментальные и теоретические данные дают основание полагать, что вероятность существования таких зарядов чрезвычайно мала. (Для пояснения этого обстоятельства можно провести следующую аналогию. Наблюдения и опыт человечества на протяжении всего времени его существования наряду с теоретическими соображениями о прочности скелета, теплообмене тела через кожу с окружающей средой и т. д. показывают, насколько мала вероятность рождения на планете Земля человека, который в зрелом возрасте имел бы, например, пятиметровый рост и вес, равный всего лишь десяти килограммам.)

Обсудим теперь механизм изменения величины заряда на данной капле. Милликен для изменения заряда

на капле направлял в установку пучок рентгеновских лучей или поток γ -квантов, излучаемых радием. Эти лучи могли выбить отрицательные заряды (явление фотоэффекта), вследствие чего заряд капель становился более положительным. В действительности оказалось, что капли приобретают отрицательные заряды примерно так же часто, как они их теряют, поэтому значительно более вероятен процесс захвата положительного или отрицательного заряда от ионизованных атомов или молекул окружающего газа. Рентгеновские лучи или γ -кванты вызывают ионизацию, а капли как бы подбирают один или большее число ионов. (При этом общее изменение массы капли, конечно, незначительно.)

Известно, что одноименные заряды отталкивают друг друга. Поэтому может возникнуть вопрос, почему же капли, заряженные положительно (отрицательно) присоединяют к себе некоторый положительный (отрицательный) заряд. Ведь на таких малых расстояниях, о которых здесь идет речь, действующие на ионы силы должны быть сравнительно большими. Нетрудно, однако, убедиться (с помощью элементарных расчетов), что кинетическая энергия хаотического движения атомов (или ионов) в газе при комнатной температуре достаточно велика; поэтому, несмотря на электрическое отталкивание, положительные ионы действительно *могут* присоединиться к капле, положительный заряд которой близок к соответствующей величине в опытах Милликена.

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА e

Примерно в то же время, когда Милликен проводил свои первые эксперименты с масляной каплей, Ф. Эренхафт [21] в Австрии проделал приблизительно аналогичные эксперименты с микроскопическими частицами различных веществ. Работая, например, с маленькими частицами серебра, он обнаружил заряды, величина которых, по его расчетам, была $1 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц, что составляло примерно одну пятую от величины «наименьшего заряда», измеренного Милликеном. Эренхафт, ссылаясь на большой разброс в величине зарядов, заключил, что результаты Милликена неправиль-

ны. Даже в 1925 году Эренхафт [22] все еще защищал свою позицию, утверждая, что могут существовать заряды, которые он назвал «подэлектронными»; но большинство физиков в это время уже полностью приняли точку зрения Милликена. Например, Регенер [23] в 1910 году по существу теми же методами, что и Милликен, определил величину заряда e . Согласно его данным, $e = 4,90 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц.

В 1923 году Ишида [24], ученик Милликена, использовал эксперимент с масляной каплей для определения относительной вязкости многих газов. В процессе исследований он получил величину заряда, которая оказалась равной $(4,770 \pm 0,014) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. В 1925 году Дж. Маттаух [25] в Германии установил, что $e = 4,76 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Он счел нужным обменяться статьями с Эренхафтом [26] по поводу возможного существования подэлектронов.

РЕНТГЕНОВСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

В 1930 году Комптон предложил метод определения величины e на основании надежных данных по измерению длины волны рентгеновских лучей. Впервые применили очень точный метод, не связанный с наблюдениями за масляными каплями; оказалось, что результаты отличались от данных Милликена приблизительно на 0,67%, т. е. расхождение было примерно в шесть раз больше, чем величина ошибки в эксперименте Милликена. Метод сводился к следующему: с помощью регулируемых дифракционных решеток с высокой точностью измеряют длину волны определенной, четко выраженной линии в спектре рентгеновских лучей. (Первые исследователи рентгеновских лучей считали, что такие измерения не могут быть выполнены, но в 1925 году появилась возможность определить длину волны рентгеновских лучей, направляя их на тщательно регулирующую дифракционную решетку таким образом, чтобы они почти скользили по ее поверхности.) Эта же спектральная линия рентгеновских лучей служит также для определения межплоскостных расстояний некоторых простых кристаллов с кубической решеткой, таких как NaCl, KCl или LiF, используемых в спектрометре Брэгга.

Представим себе типичный куб в кристалле, содержащий a атомов элемента A и b атомов элемента B . Для простого кубического кристалла (например, NaCl) $a=b$. Масса такого куба равна величине a (M/N) (M — масса грамм-молекулы кристалла, N — число Авогадро), объем куба равен d^3 (d — расстояние между смежными слоями атомов), плотность куба (или всего кристалла) $\rho = aM/Nd^3$. Поэтому число Авогадро можно определить соотношением

$$N = aM/\rho d^3. \quad (4.17)$$

Величины M и ρ можно точно измерить, а значение величины a (небольшое целое число) известно из результатов кристаллографических исследований; таким образом, если из экспериментов с рентгеновскими лучами найдено значение d , нетрудно вычислить число Авогадро N . Если кристалл имеет не кубическую форму, соотношение (4.17) следует умножить на коэффициент, зависящий от формы кристалла. Этот коэффициент можно точно вычислить на основании результатов измерений углов между поверхностями кристалла, в частности ромбического кристалла, такого, как кальцит, который обычно используется в спектроскопии рентгеновских лучей.

Дж. Берден [27] в 1930—1931 годах провел серию блестящих экспериментов, выполненных с высокой точностью, и сравнил длины волн рентгеновских лучей, измеренные методом регулируемых дифракционных решеток, с результатами кристаллографических исследований. Согласно данным Бердена, расстояние между дифракционными слоями в кальците равно $(3,0359 \pm \pm 0,003) \cdot 10^{-8}$ см. Подставив это значение d в соотношение (4.17), Берден получил, что число Авогадро $N = (6,019 \pm 0,003) \cdot 10^{23}$ и основной заряд $e = (4,806 \pm \pm 0,003) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц или $(1,603 \pm \pm 0,001) \cdot 10^{-19}$ к. Так как эти значения отличались от полученных Милликеном данных на 0,7%, что значительно превышало известную экспериментальную ошибку, Берден усомнился в правильности своих собственных результатов. Он назвал полученное им значение «исключительно высоким», а в обсуждениях отметил: «Ввиду многообразия путей, по которым эти константы (N , e/m , e) входят в теоретические расчеты, почти не-

возможно принять такие высокие значения». Таким образом, данные Милликена, по-видимому, строго вписываются в логическую и внутренне весьма последовательную систему вычислений различных величин, связанных со строением атомов и эмиссией и поглощением света. Берден же считал, что его результаты вероятно нарушают эту стройную систему расчетов. Однако позже выяснилось, что он был излишне пессимистичен.

Предполагалось, что возникающие трудности связаны с некоторыми микроскопическими отклонениями в структуре кристаллов. Действительно, плотность кристалла может флуктуировать от слоя к слою; в основном рентгеновские лучи будут претерпевать дифракцию от правильно расположенных слоев; однако наличие особо плотных слоев будет изменять среднюю плотность, если ее измеряют для большого объема кристалла; это может внести ошибки в расчетное значение величины d . Было предложено множество различных, но по существу схожих теорий, большинство из которых принимало без доказательств наличие некоторой подструктуры в строении кристаллов. В 1936 году Дюмонд и Болман [28] опровергли все эти теории, используя для спектроскопии рентгеновских лучей тщательно измельченные кристаллы. С тех пор предложенный ими метод известен как метод порошковой спектроскопии. Порошки имели такую же плотность, как и кристаллы больших размеров; по результатам дифракции рентгеновских лучей исследователи получили то же самое значение d , а следовательно, те же самые значения N , e/m и e , которые были определены Берденом.

Между тем с помощью спектроскопических, фотоэлектрических и других измерений с рентгеновскими лучами на основании различных косвенных расчетов удалось определить величины N и e , в результате чего этим данным начали отдавать большее предпочтение, чем результатам, полученным из экспериментов с масляными каплями. Указанным исследованиям подвел итог Шибя (Токио) [29]. Он впервые в 1932 году предположил, что значения вязкости воздуха, использованные Миллиkenом в расчетах, были неточными (данные по вязкости воздуха получил в 1916 году Харрингтон, применивший метод, разработанный Джилхристом и Миллиkenом). Ошибка на 0,5% при измерениях вязкости воздуха даст

ошибку в 0,75% в величине заряда e , определяемой методом масляной капли. В 1937 году Берден [30] измерил вязкость воздуха, согласно его данным $\eta = 1,831 \cdot 10^{-4}$ единиц CGS; в расчетах Милликена фигурировала величина $1,824 \cdot 10^{-4}$. Пересчет данных Милликена с учетом нового значения вязкости воздуха приводит к следующему результату: $e = 4,8035 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц или $1,602 \cdot 10^{-19}$ к.

В 1937 году Хьюстон [31], работавший в Калифорнийском технологическом институте, выполнил еще более точные измерения вязкости воздуха, обнаружив, что в экспериментах 1916 года не был учтен небольшой по величине, но очень важный поправочный множитель. Он установил, что $\eta = (1,8292 \pm 0,0045) \cdot 10^{-4}$ единиц CGS и соответственно $e = (4,796 \pm 0,005) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц заряда. В 1938 году индийские ученые Маджамдар и Ваджифдар [32] нашли, что $\eta = (1,83438 \pm \pm 0,0035) \cdot 10^{-4}$ единиц CGS, а $e = 4,816 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц.

Таким образом, к 1938 году уже не было какой-либо неясности в вопросе о величине заряда e , «исключительно высокое», полученное Берденом, считали теперь достоверным. Вся история перехода от величины $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ к значению $e = 4,803 \cdot 10^{-10}$ была хорошо описана самим Миллиkenом в статье, опубликованной в 1938 году в связи с 80-летием со дня рождения Макса Планка в журнале «Annalen der Physik» [33]. В течение последних 10 лет общепринято значение величины e , вычисленное Дюмондом и Козном [34] непосредственно на основании результатов серии точных измерений; оно составляет $(4,80286 \pm 0,00009) \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц заряда.

В 1874 году Дж. Стони оценил величину заряда гипотетического электрона с точностью в несколько сот процентов. В 1906 году Томсон и его коллеги уменьшили неопределенность в величине заряда почти до 30%. К 1909 году Перрен провел опыты по изучению броуновского движения, а Резерфорд и другие исследователи применили радиоактивное излучение для определения заряда электрона, благодаря чему соответствующий разброс был уменьшен до одной десятой. В 1913 году Милликен полагал, что полученные им данные достоверны в пределах одной тысячной доли, и они действительно до-

стигли такой точности после исключения систематической ошибки из результатов измерения вязкости воздуха. В 1930 году после обработки данных, полученных с использованием рентгеновских лучей, неопределенность в значении e была уменьшена примерно до одной пяти тысячной доли. Последнее значение, приведенное выше и вычисленное Дюмондом и Коэном, претендует на точность в одну пятидесятитысячную долю. (Человеку, пожелавшему измерить свой вес с такой точностью, необходимы весы, способные надежно отличить разницу в 1 грамм.)

В заключение коснусь коротко причин, побуждающих ученых стремиться к достижению высокой точности при определении некоторых физических величин. Конечно, возможность получения точных результатов приносит своего рода моральное удовлетворение и даже эстетическое наслаждение; и все же существуют более серьезные побуждающие факторы. Разумеется, нет смысла измерять с точностью до пяти-шести значащих цифр *любые* величины, например высоту небоскреба Эмпайр Стейт Билдинг или средний рост рыжих, проживающих в Чикаго. Величины, которые физики измеряют с высокой точностью, являются обычно фундаментальными константами. Скорость света, масса протона, магнитный момент нейтрона, заряд электрона или масса некоторых атомов — вот примеры таких величин. Эти константы входят в важные теоретические расчеты, и очень часто возможность проверки предлагаемых физических моделей или теорий, описывающих строение или свойства материи, определяется той точностью, с которой измерены эти величины. В таком случае иногда даже небольшое несогласие в результатах двух различных методов измерений одного и того же параметра может указать путь к новому, более глубокому пониманию некоторых концепций и идей.

ИДЕНТИЧНЫ ЛИ ЗАРЯД ТОМСОНОВСКОГО ЭЛЕКТРОНА И ВЕЛИЧИНА e ?

Как мы помним, Томсон и другие исследователи установили, что катодные лучи представляют собой поток отрицательно заряженных частиц с фиксированным отношением заряда к массе. Однако не только частицы

катодных лучей, но и отрицательные частицы, испускаемые раскаленной нитью, некоторыми радиоактивными веществами или веществами, облучаемыми ультрафиолетовым светом, — все эти частицы, как было обнаружено, имеют одно и то же отношение заряда к массе. Кроме того, наличие частиц с таким же отношением заряда к массе *внутри* самих атомов позволило объяснить эффект Зеемана.

Большинство физиков после Томсона да и сам Томсон, считали, что заряд этих частиц численно равен величине e . Какими же экспериментальными данными подтверждаются эти предположения? Фактически при более или менее тщательном рассмотрении обнаруживается, что таких доказательств очень мало, а *прямых* подтверждений этого нет вообще. Никому не удалось выделить какую-либо отдельную частицу из пучка катодных лучей или отдельную фотоэлектрическую частицу* или, наконец, β -частицу и присоединить ее к масляной капле, а затем измерить соответствующее изменение заряда этой капли.

Таким образом, предположение Томсона было скорее следствием косвенных рассуждений, чем результатом прямых доказательств. Первым толчком к этому была, вероятно, мысль, что результаты работ Ленарда и ряда других исследователей, обнаруживших значительную проникающую способность катодных лучей можно объяснить, предположив, что *размеры катодно-лучевых частиц гораздо меньше размеров атома*. В таком случае, если допустить, что заряд q на самом деле равен величине e , то численное значение отношения q/m будет указывать на необходимость если не малых размеров, то по крайней мере малой массы у этих частиц. Тогда, исходя из электронной модели атомов, нетрудно объяснить явление ионизации, обусловленное либо присоединением, либо потерей электрона при столкновении с другими ато-

* Возможно, что некоторое изменение заряда на каплях, наблюдавшееся Милликеном, было обусловлено фотоэлектрическим эффектом непосредственно на самих каплях при облучении их рентгеновскими лучами или γ -квантами. Однако ясно, что в основном изменение заряда было вызвано захватом положительных или отрицательных ионов, образовавшихся в окружающем газе в результате действия лучей.

мами или частицами, а также под воздействием пучка света или рентгеновских лучей.

В настоящее время все эти предположения подтверждены целой серией экспериментов и теорий, которые объединены в одно целое внутренними логическими связями и могут быть объяснены только при допущении, что заряд катодно-лучевых частиц, заряд отрицательных частиц, испускаемых различными веществами, а также заряд частиц, вызывающих эффект Зеемана, одинаков и равен $4,802 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. Во всех этих экспериментах и теориях рентгеновские лучи и явление радиоактивности сыграли очень важную роль, точно так же как и в многочисленных исследованиях в области спектроскопии и в изучении электрических, магнитных и оптических свойств газов, жидкостей и твердых веществ. Все эти исследования, начатые примерно в 1900 году, содействовали постоянному совершенствованию моделей атомов и их взаимодействий, причем концепции электрона в том виде, в каком она была выдвинута Томсоном, отводилась в этих моделях центральная роль.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ, ОБЪЯСНЯЮЩИХ СТРОЕНИЕ АТОМА

Сам Томсон в первом десятилетии XX века пытался объяснить некоторые химические и оптические свойства атомов, исходя из того, что отдельный атом представляет собой сферическое облако, состоящее из положительных зарядов, в которое вкраплены отрицательно заряженные электроны. (Эту модель иногда называют моделью «пудинг с изюмом».) Путем математических расчетов он показал, что при определенном расположении электронов система может быть механически устойчива. Он полагал, что различием в конфигурациях систем можно объяснить разнообразие химических элементов. Движение электронов внутри такого облака могло включать колебания, частоты которых соответствовали частотам испускаемого и поглощаемого света. Вероятно, в некоторых случаях внешние электроны могли легко отделиться от атома, чем объяснялась электропроводность ряда веществ, эмиссия катодных лучей, фотоэлектронов и β -частиц. Эта модель обещала по крайней мере

качественно объяснить многие известные свойства атомов. К сожалению, оказалось очень трудным сделать какие-либо точные предсказания на основании этой модели, которые можно было бы проверить экспериментально.

В 1909 году Гейгер и Марсден [35] в лаборатории Резерфорда в Манчестере начали серию экспериментов по изучению прохождения пучков α -частиц сквозь тонкие фольги из золота или других металлов. Эти фольги имели толщину около 0,00005 см, что приблизительно соответствовало толщине 2000 атомов. К тому времени было уже известно, что α -частицы представляют собой атомы гелия, которые потеряли (а возможно и никогда не имели) два электрона. Поэтому если предположить, что атомы более или менее равномерно заполняют вещество (как в модели «пудинг с изюмом»), то эти эксперименты можно сравнить с игрой в теннис, когда мячи с большой скоростью ударяются о каменную стену, толщина которой составляет, по-видимому, несколько десятков метров. Результаты экспериментов были замечательны в двух отношениях: во-первых, большинство α -частиц проходило через фольги, отклоняясь самое большее на один-два градуса от первоначального направления; во-вторых, изредка частицы отклонялись на 45° и более, а некоторые даже вылетали в обратном направлении. Резерфорд использовал эти результаты Гейгера и Марсдена и в 1911 году предложил [36] новую модель атома, согласно которой большая часть массы и весь положительный заряд атома сконцентрированы в ядре, радиус которого равен примерно 10^{-12} см, что составляет примерно одну десятитысячную долю радиуса типичного атома. Только с помощью такой модели атома можно качественно и количественно объяснить результаты экспериментов по рассеянию α -частиц.

Резерфорд не был первым, кто выдвинул такую идею о строении атома. Эту возможность обсуждал Джонстон Стони, а в 1901 году Жан Перрен опубликовал статью под названием «Ядерно-планетарная структура атома» [37], в которой он предположил, что атом состоит из положительного ядра, окруженного отрицательными электронами. Он показал, что электроны должны двигаться по индивидуальным орбитам со скоростями, соответствующими частотам световых волн, причем электроны с

внешних орбит могут легко отщепляться, образуя тем самым катодные лучи, β -частицы и т. п. В 1903 году Нагаока [38] опубликовал в Японии и Англии пространную статью о длинах световых волн, испускаемых такими атомами. Тем не менее Резерфорд был первым, кто подтвердил подобную модель надежными экспериментальными данными.

Ученик Резерфорда Чадвик проводил эксперименты по рассеянию α -частиц, пропуская их через различные металлические фольги. На основании полученных результатов он смог показать, что положительный заряд ядра в пределах экспериментальных ошибок равен величине Ze [здесь Z — атомный номер элемента, используемого в качестве рассеивателя (т. е. порядковый номер, определяющий положение элемента в периодической таблице Менделеева), а e — численное значение заряда электрона]. Внешнее пространство атома, согласно результатам Чадвика, должно быть занято Z отрицательными электронами.

Согласно этой модели, α -частица, которую мы считали атомом гелия без двух электронов, есть просто ядро гелия, поскольку для гелия как второго элемента периодической системы $Z=2$. Следовательно, атом водорода устроен особенно просто: положительно заряженное ядро с одним внешним отрицательным электроном. Отношение массы ядра водорода к массе электрона, как отметил Томсон, составляет около 1800.

Аналогия с мячами, ударяющимися о толстую каменную стену, использованная нами для наглядного представления сущности экспериментов Гейгера — Марсдена — Резерфорда может, таким образом, ввести в заблуждение. Легче понять суть этого эксперимента, представив себе следующую картину. Стена толщиной примерно 13 км, состоящая из свинцовых шариков (ядер) диаметром около 0,6 см, обстреливается дробинками, имеющими очень большую скорость. Среднее расстояние между шариками равно приблизительно 6 м, а остальное внутреннее пространство в этой стене заполнено комнатными мухами (так можно представить электроны), причем на каждый свинцовый шарик приходится около 80 мух. Если исключить возможность гравитационного отклонения дробинки, то на основании такой аналогии можно понять, почему большинство α -частиц проходит

через фольгу и почему некоторые из них сильно отклоняются. В реальном эксперименте, конечно, α -частицы не должны обязательно касаться ядер, чтобы иметь возможность испытать отклонение; рассеяние α -частиц объясняется сильным электрическим отталкиванием частиц, которые проходят от ядер на расстоянии нескольких радиусов ядра. (Фактически путем изучения относительного числа рассеянных частиц на различные углы Резерфорд смог определить наиболее вероятный максимальный диаметр ядра.)

Разумеется, любой электрон, оказавшийся вблизи траектории α -частицы, будет сметен ею с пути. Поскольку электрон — сравнительно легкая частица, то α -частица не будет заметно отклоняться от своего первоначального направления. Действительно, при каждом столкновении с электроном α -частицы теряют незначительную часть своей энергии, только приблизительно после 100 000 таких столкновений α -частица замедлится настолько, что сможет присоединить два электрона и превратиться в обычный атом гелия. α -Частицы, испускаемые радиоактивными веществами (с начальной энергией примерно от 3 до 6 миллионов электронвольт), проходят при этом в воздухе (при нормальной температуре и давлении) путь около 4—5 см. Если такая частица движется в пересыщенном паром пространстве камеры Вильсона, то на ионах, образующихся на ее пути, происходит конденсация капелек воды из пара.

В некотором смысле толчком к развитию многочисленных областей современной экспериментальной и теоретической физики послужили попытки ответить на две основные серии вопросов, выдвинутых в связи с появлением ядерной модели атома Резерфорда:

1) Какова структура ядра? Из каких частиц оно состоит и как может такой большой положительный заряд находиться в столь малом объеме?

2) Каким образом отрицательные электроны заполняют свободное пространство в атоме и как их движение связано с оптическими, электрическими, магнитными, химическими и механическими свойствами атомов?

Ответы на эти вопросы выходят за рамки данной книги. Можно только сказать, что на вторую серию вопросов получены вполне удовлетворительные ответы по крайней мере в общих чертах. Как писали Райс и Тел-

лер в своей книге «Строение вещества» [39], «теория атомной физики в принципе дает возможность предсказать все химические и большинство физических свойств веществ, и, таким образом, экспериментальная химия становится излишней». Другими словами, уровень современной теоретической физики в принципе позволяет определить все возможные пути, по которым атомы соединяются в молекулы, а также предсказать основные свойства таких молекул. На различие между теорией и практикой пока что остается весьма существенным для химии ближайшего будущего. Однако важно то, что вся система внутренних связей и соотношений современной экспериментальной и теоретической атомной физики построена на модели электрона, который, согласно концепции Томсона, представляет собой малую, отрицательно заряженную частицу с элементарным зарядом e и с отношением заряда к массе $1,76 \cdot 10^{22}$ к/кг. Доказательства идентичности основного заряда e , определенного Милликеном, с зарядом, входящим в измеренное Томсоном отношение e/m , являются, как мы отмечали выше, скорее косвенными. И тем не менее они значительно более определены, чем косвенные свидетельства взаимосвязи, например, таких двух фактов, как обнаружение на кухне пустой банки из-под варенья и почти одновременно наблюдаемый уход из кухни маленького мальчика со скромно потупленным взором и перепачканными вареньем щеками.

ЛИТЕРАТУРА

1. O'Rahilly A. Electromagnetics. Longmans, Green for Cork University Press, Cork, Ireland, 1938.
2. Schuster A. The Progress of Physics during 33 Years, 1875—1908. Cambridge, Cambridge University Press, 1911, p. 55.
3. Planck M. A Survey of Physics. London, Methuen & Co., 1925, p. 161.
4. Lenard P. Über Kathodenstrahlen. Berlin — Leipzig, 1920.
5. Kelvin. Nature, 55, 84 (1897).
6. Thomson J. J. Recollections and Reflections. London, Bell, 1936, p. 341.
7. Stoney G. Philos. Mag., 11, 384 (1881).
8. Helmholtz H. V. J. Chem. Soc., 39, 277 (1881).
9. Ebert. Wiedemann's Annalen 10 (1893), translated in Philos. Mag., 38, 332 (1894); Stoney's letter of protest is found in Philos. Mag., 38 (1894).
10. Thomson J. J. Conductivity, Chap. 1.

11. Townsend J. S. E. Proc. Cambridge Philos. Soc., **9**, 244 (1897).
12. Stokes G. Trans. Cambridge Philos. Soc., **9**, 8 (1851).
Reprinted in; Stokes. Mathematical and Physical Papers. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1901, Vol. **III**, p. 60.
13. Wilson H. A. Philos. Mag., **5**, 429 (1903).
14. Thomson J. J. Op. cit., Chap. 7.
15. Perrin J. P. Mouvement Brownien et le Realite Moleculaire.
In Ann. chim. et phys., 8e series, **18**, 1 (1909).
16. Rutherford E. Proc. Roy. Soc. A, **A81**, 141, 162 (1908).
17. Moulin M. Le Radium, **6**, 163 (1909).
18. Millikan R. A. Philos. Mag., **19**, 209 (1910).
19. Millikan R. A. The Electron. 2 nd ed. Chicago, University of
Chicago Press, 1924, p. 71.
20. Millikan R. A. Op. cit., p. 95.
21. Ehrenhaft F. Physik Z., **11**, 940 (1910).
22. Ehrenhaft F. Z. Physik, **37**, 816 (1926).
23. Regener E. Physik Z., **12**, 135 (1910).
24. Ishida Y. Phys. Rev., **21**, 550 (1923).
25. Mattauch J. Z. Physik, **32**, 439 (1925); Physik Z., **25**, 620
(1924).
26. Ehrenhaft F. Z. Physik, **37**, 816 (1926); Mattauch, J. Z. Physik,
37, 803 (1926).
27. Bearden J. A. Phys. Rev., **37**, 1210 (1931).
28. Du Mond J. W. M., Bollman V. L. Phys. Rev., **50**, 524 (1936).
29. Shiba, Inst. Phys. and Chem Research, Tokyo, Sci. Papers, No.
385, 87 (1932); No. 434, 128 (1933).
30. Bearden J. A. Phys. Rev., **51**, 378 (1937).
31. Houston W. V. Phys. Rev., **52**, 751 (1937).
32. Majumdar V. D., Vajifdar M. B. Proc. Indian Acad. Sci.,
8A, 171 (1938).
33. Millikan R. A. Ann. Physik, **32**, 34 (1938).
34. Du Mond J. W. M., Cohen E. R. In E. U. Condon and H. Odi-
shaw's Handbook of Physics. New York; McGraw-Hill, 1958,
Chap. 7—10.
35. Geiger H., Marsden E. Proc. Roy. Soc. A, **82**, 495 (1909).
36. Rutherford E. Philos. Mag., **21**, 669 (1911).
37. Perrin J. P. Rev. scientifique, **15**, 449 (1901).
38. Nagaoka H. Proc. Tokyo Math. Phys. Soc., **2**, 92 (1903); Philos.
Mag., **7**, 445 (1904).
39. Rice F. O., Teller E. The Structure of Matter, New York,
Wiley, 1949, p. 1.

Глава 5

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕКТРОНА

Для постоянного развития теоретических представлений об объектах, изучаемых физикой, равно как и любой другой наукой, необходимы два условия: поступление информации и наличие способов использования этой информации. Что касается атомной физики, то ученые нуждались как в методах для исследования компонент атома, так и в методах описания взаимодействий этих компонент. Грубо говоря, первое из этих требований сводилось к необходимости новых достижений в экспериментальной физике, второе — к дальнейшему развитию теоретической физики. Открытие электрона и логически связанные с ним открытия рентгеновских и каналовых лучей и явления радиоактивности представили новые возможности для экспериментальных исследований. Когда была усовершенствована техника эксперимента и увеличена точность наблюдений, стало ясно, что классические теории физики, например теория электромагнитных полей Максвелла, не способны объяснить поведение очень малых частиц. Со временем были разработаны более удовлетворительные теоретические положения, что в свою очередь отразилось на наших представлениях об электроне и других составляющих атома.

Таким образом, за последние 60 лет наблюдалось бурное развитие как экспериментальных методов получения новой информации, так и новых теоретических методов и концепций для обобщения этой информации и ее практического использования. Основным толчком для таких исследований послужила полемика о природе катодных лучей. В процессе этой полемики был сделан

ряд важных открытий и развиты новые методы исследований:

а. Идентификация катодных лучей как электронов; измерение отношения их заряда к массе, измерение величины самого заряда.

б. Обоснование единого характера электронов как универсальной составляющей материи, проявляющейся не только в виде катодных лучей, но и в виде идентичных частиц, испускаемых раскаленными металлами, радиоактивными веществами, в виде фотоэлектронов и частиц, эмиттируемых из некоторых веществ под действием света, и, кроме того, электронов, которые сами способны вызывать эмиссию света из атомов (эффект Зеемана).

в. Открытие рентгеновских лучей, с помощью которых были развиты методы изучения структуры кристаллов, а со временем — и методы проверки различных теорий, описывающих поведение электронов внутри атомов.

г. Открытие явления радиоактивности, на основании которого были разработаны методы для исследования строения атома; выдвинуты предположения о существовании изотопов и поставлен вопрос о возможности существования других компонент атомов, отличных от электронов.

д. Открытие каналовых лучей, обеспечивших возможность идентификации нерадиоактивных изотопов.

е. Возрождение интереса к теории атомных и податомных частиц. Дж. Дж. Томсон и другие ученые, используя уравнения Максвелла, развили различные теории строения электрона. Электрон как движущаяся заряженная частица должен создавать электромагнитное поле, которое обладает энергией. Чтобы отклонить электрон, движущийся прямолинейно с постоянной скоростью, потребуется сила, отличная от той, которая необходима для отклонения «обычной» массы, свойственной любой частице; в данном случае сила должна также изменить связанное с движением электрона электромагнитное поле. Поэтому часть массы или даже вся кажущаяся масса электрона является по своей природе электромагнитной. Томсон, Абрагам и другие ученые смогли показать, что эта кажущаяся масса электрона будет зависеть от предполагаемой формы и распределения электрического заряда внутри и вокруг электрона, а также от того, насколько отклоняется это распределе-

ние от сферически симметричного в процессе движения электрона. Таким образом, получила развитие важная область теоретической физики, связанная со стремлением объяснить предполагаемые свойства малых частиц на основании их структуры.

РАЗВИТИЕ АТОМНОЙ ТЕОРИИ

Томсон был одним из первых, кто попытался объяснить свойства атомов, исходя из предположения о существовании электронов и некоего положительного заряженного вещества. Правда, с помощью его моделей не удалось достигнуть необходимого количественного согласия с наблюдаемыми свойствами атомов, тем не менее эти несовершенные теории помогли по крайней мере сосредоточить внимание на проблеме создания удовлетворительной модели строения атома.

Только благодаря экспериментам Резерфорда с α -частицами (1909) была получена общая картина строения атома, которой мы придерживаемся до сих пор и согласно которой атом состоит из весьма малого по размерам положительно заряженного ядра, сосредоточивающего в себе почти всю массу атома и окруженного соответствующим числом электронов. Другие физики, в частности Перрен и Нагаока, предложили планетарную модель атома. Исходя из известных свойств электронов и размеров атомов, они показали, что электроны не будут падать на положительно заряженное ядро, если их скорость вращения по орбите составит примерно 10^{15} об/сек (оборотов в секунду). Эта скорость вращения как раз соответствует частоте световых волн, испускаемых атомами. Но из уравнений Максвелла следует, что электроны, вращающиеся по орбите, излучают свет; таким образом, можно было надеяться объяснить испускание и поглощение света, допустив существование соответствующих электронных орбит. Однако в этом случае возникал вопрос: «почему абсолютно все атомы не испускает свет непрерывно?» В соответствии с уравнениями Максвелла любой электрон, движущийся по атомной орбите, должен излучать энергию в виде электромагнитных волн, и следовательно, опуститься через некоторое время по спирали на ядро. Итак, эксперименты Резерфорда можно было интерпретировать с помощью

планетарной модели атома, но, согласно законам Максвелла, такой атом оказывался нестабильным.

Молодой датский физик Нильс Бор, проводивший исследования вместе с Резерфордом, в 1913 году смело предположил, что законы классической физики, выведенные на основании изучения явлений природы в сравнительно крупном масштабе, не обязаны распространяться на внутриатомные объекты. Воспользовавшись идеей «квантовой» природы излучения и поглощения света, которая была выдвинута в предыдущее десятилетие Планком и Эйнштейном, Нильс Бор предложил теорию строения атома водорода, хорошо объяснявшую наблюдавшиеся на опыте спектральные линии водорода. Структура атома водорода оставалась, по существу, такой же, как ее представлял Резерфорд. Предполагалось, что атом водорода состоит из положительно заряженного ядра с одним орбитальным электроном. В основу теории Бора был положен постулат, согласно которому вращающийся электрон может быть стабильным только на орбите с определенным значением углового момента количества движения. Допустимые значения орбитального углового момента определялись некоторым соотношением, в соответствии с которым для очень больших орбит (подчиняющихся по предположению классическим законам механики и электромагнитной теории) переход электрона с одной орбиты на другую сопровождается испусканием или поглощением света с длиной волны, предсказываемой классической теорией. Допустимые переходы на меньших орбитах в этом случае с большой точностью соответствовали значениям длин волн в наблюдаемых на опыте спектрах. Фактически были получены весьма обнадеживающие результаты, но как отмечал один физик [1], познакомившийся с первой статьей Бора по этому вопросу, автор произвел значительную встряску умов своими «безумными» допущениями, положенными в основу теории. Легче было бы согласиться, что локомотив способен двигаться со скоростями 7, 14, 28 км/час или с любой другой скоростью, превышающей, скажем, 100 км/час, а передвижение с промежуточными скоростями невозможно. Но только с помощью модели Бора можно было успешно установить количественные соотношения между оптическими свойствами водорода и вероятным внутренним строением атома водорода.

Со временем удалось распространить теорию Бора для объяснения спектра ионизованного атома гелия, некоторых особенностей спектров щелочных металлов, инфракрасной части спектра ряда двухатомных молекул и линейчатого спектра рентгеновских лучей. За десять лет с 1913 по 1924 год теория достигла значительных успехов в объяснении отдельных свойств атомов; однако вскоре стало ясно, что необходима более общая теория. Атомная физика в то время находилась примерно в том же состоянии, в котором была механика непосредственно перед открытием Ньютона. Настало время для нового синтеза, для нового объединения в единое целое того большого количества разрозненных данных, которые накопились к этому моменту.

Осуществить такой синтез позволила гипотеза де Бройля, выдвинутая им в начале 1925 года. Идея де Бройля состояла в том, что движению электрона (или любой другой частицы) может быть приписана соответствующая длина волны, которая, согласно этой гипотезе, равна величине $\lambda = h/p$ (здесь h — постоянная Планка, а p — момент количества движения частицы). Тогда разрешенными будут только те орбиты Бора, в окружности которых укладывается целое число длин волн. Гипотеза де Бройля была выражена в удобных для работы математических формулах Гейзенбергом, Шредингером и другими учеными. Уравнения описывали поведение волн, которые не были ни механическими, ни электромагнитными в обычном смысле, однако они достаточно точно предсказывали наблюдаемые энергетические уровни и другие характеристики электронов в атомах.

В течение ряда лет не удавалось разрешить проблему, связанную с созданием своего рода наглядной модели для описания этих волн. Эту проблему можно представить себе таким образом. Допустим, мы видим и слышим, как играют на музыкальных инструментах; тогда то, что мы видим и слышим, можно объяснить с помощью звуковых волн, обладающих определенной длиной и амплитудой и распространяющихся в определенной среде от источника к детектору. В случае звуковых волн среда (обычно это воздух) имеет хорошо известные свойства. Другими словами, для звуковых волн мы имеем вполне наглядную модель. В случае све-

товых волн многие явления можно связать с короткими электромагнитными волнами; и если среду и механизм распространения волн не легко представить себе наглядно, то по крайней мере каждый, кто знаком с законами электричества и магнетизма, сможет составить уравнения, которые вполне удовлетворительно описывают поведение пучка света. Благодаря работам Шредингера и Гейзенберга мы теперь можем записать уравнения, которые будут очень хорошо предсказывать поведение электрона или любой другой частицы, если известны силы, действующие на эти частицы. Из вида этих уравнений следует, что электрон должен иметь определенные волновые свойства. Уравнения дают нам также возможность представить строение атома, которое будет соответствовать наблюдаемым «макрофизическим» свойствам атома в оптике, в химии и в других областях науки. Однако эти уравнения нельзя связать с какой-либо простой, наглядной механической моделью по аналогии с обычными окружающими нас объектами. Другими словами, чтобы понять до конца, если это возможно, поведение электрона (или другой микрочастицы), нельзя представлять его подобным очень маленькому бейсбольному мячу или интерпретировать его просто как некоторый вид волны. Электрон имеет свойства и волны и частицы одновременно, но ни одна из этих характеристик в отдельности не может описать поведение электрона в целом. Итак, мы пришли к заключению, что свойства объектов микромира отличаются от свойств окружающих нас в повседневной жизни предметов, размеры которых уменьшены в соответствующем масштабе.

Наш жизненный опыт, так же как и законы классической физики, определяется явлениями макромира, в котором предметы обычных размеров движутся с привычными для нас скоростями. Мы вправе ожидать, что модели и теории, описывающие поведение объектов микромира, будут правильно предсказывать явления, наблюдаемые в макромире, однако отсюда отнюдь не следует, что законы физики, полученные для макроскопических явлений, будут применимы ко всем процессам без исключения, в частности к процессам, происходящим в мире очень малых частиц или протекающим с весьма высокими скоростями.

ЭЛЕКТРОН С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Как мы уже отмечали, в квантовой механике де Бройля, Шредингера и Гейзенберга устанавливалась связь между волновыми явлениями и движением электронов. Но если такая связь существует, то на пучках электронов обязательно должны наблюдаться эффекты дифракции и интерференции аналогично тому, как это происходит со световыми волнами или рентгеновскими лучами. Действительно, в 1921 году Дэвиссон [2] из лаборатории «Bell Telephone» в Нью-Йорке, изучая относительное число электронов, рассеянных в различных направлениях от поверхности никелевой пластины обнаружил своего рода аномальный эффект. Дэвиссон и его коллеги изучали эмиссию вторичных электронов, т. е. электронов, испускаемых некоторыми веществами в результате бомбардировки их электронами. Типичные экспериментальные результаты таких исследований показаны на рис. 9. Падающий пучок направлен к поверх-

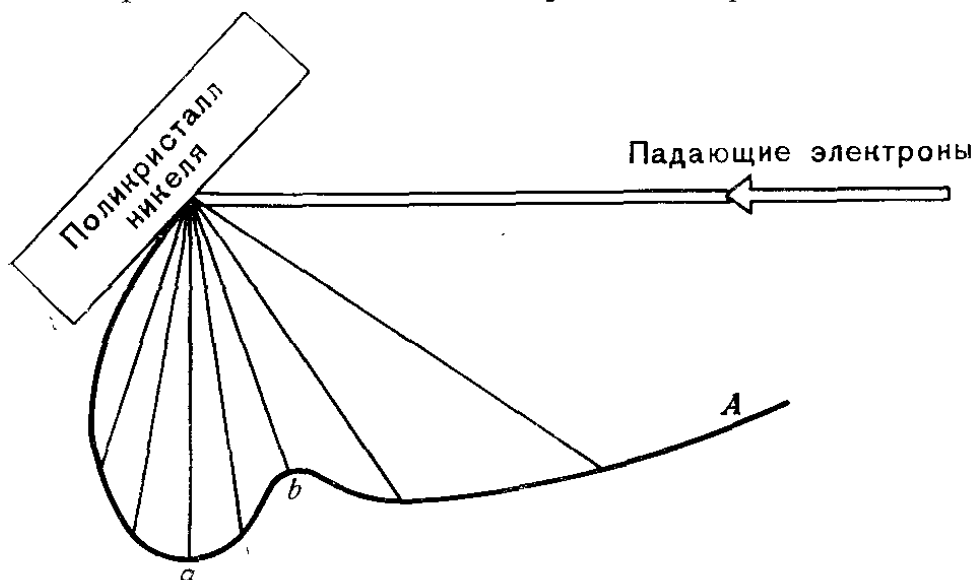


Рис. 9. Дифракция электронов на поликристаллическом никеле. Кривая *A* показывает относительную интенсивность рассеянных электронов.

ности никелевой пластины под углом 45° . Оказалось, что электроны рассеиваются преимущественно под определенным углом. Если бы падающие электроны представляли собой обычные частицы, подобные мячам, то следовало бы ожидать рассеяния в довольно широком диапазоне углов без выделения какого-либо преимущественного направления. Направление, в котором рассеивается максимальное количество электронов, зави-

сит от энергии и, следовательно, от момента количества движения электронов в пучке.

В статье, опубликованной в 1922 году в журнале «The Physical Review», Дэвиссон и Кунсман [3] интерпретировали свои результаты как рассеяние электронов на ядрах никеля, экранированных оболочками из электронов. Расчет рассеяния на реальных атомах никеля связан с большими математическими трудностями, и его провести не удалось, но Дэвиссон и Кунсман установили, что упрощенная модель позволяет предсказать результаты, довольно хорошо согласующиеся с их экспериментальными данными.

В 1925 году молодой немецкий физик Вальтер Эльзассер высказал предположение, что если идея де Бройля верна, то пучок электронов подобно рентгеновским лучам будет дифрагировать при отражении от кристалла. Эльзассер указал, что результаты опытов Дэвиссона и Кунсмана с поликристаллическим никелем подтверждают его предположение. Он вычислил, что электроны, ускоренные разностью потенциалов в 150 в будут иметь дебройлевскую длину волны, равную приблизительно 1 \AA (ангстрем), что по порядку величины равно длине волны типичных рентгеновских лучей, а также расстоянию между атомами в обычных кристаллах.

Однако Дэвиссон имел свои собственные идеи по этому вопросу. В начале 1925 года в его лаборатории произошел случай, описанный им позднее в одной из статей (1927) [4]:

«В процессе эксперимента в момент, когда мишень (никель) имела высокую температуру, взорвался сосуд с жидким воздухом; экспериментальная трубка была разбита, и мишень сильно окислилась воздухом. Окись счистили, а тонкий верхний слой удалили с мишени путем испарения в результате продолжительного нагревания при различных высоких температурах в атмосфере водорода и в вакууме. По возобновлении экспериментов было обнаружено, что угловое распределение рассеянных электронов совершенно изменилось... Такое значительное изменение в распределении было связано с рекристаллизацией мишени вследствие длительного нагревания. В экспериментах до аварии мы бомбардировали большое количество малых по размерам кристал-

лов, а в опытах после аварии мы работали только с несколькими большими кристаллами...»

Дарроу в превосходном обзоре работ Дэвиссона [5] приводит следующую запись, которую он сделал в 1937 году со слов самого Дэвиссона:

«К. Дж. Дэвиссон обратил внимание на заметку Эльзассера в 1925 году, но не придал ей особого значения, поскольку считал, что теория Эльзассера не была применима к его (Дэвиссона) первоначальным результатам. Эта заметка не оказала влияния на проведение дальнейших экспериментов. Действительно, начало открытию было положено известной аварией с поликристаллическим образцом, которая, по существу, навела на мысль, что одиночные кристаллы позволят наблюдать интересующие эффекты. Ожидалось, что в результате опытов с отдельным кристаллом в кристаллической решетке будут найдены «прозрачные направления» (т. е. направления, вдоль которых должны свободно проходить корпускулярные электроны подобно пушечным ядрам, пролетающим напрямик в некоторых направлениях через правильно разбитый фруктовый сад). В 1926 году Дэвиссон совершил очень удачную поездку в Англию, где посетил заседание Британской ассоциации содействия развитию науки в Оксфорде. Он привез с собой некоторые результаты по рассеянию электронов на отдельных кристаллах. Дэвиссон показал эти данные Борну и Хартри, Борн познакомил с ними других европейских физиков. Состоялось детальное обсуждение представленных Дэвиссоном результатов. Пересекая Атлантический океан в обратном направлении, Дэвиссон изучал все время работы Шредингера, ибо дискуссия в Оксфорде натолкнула его на мысль о возможности интерпретации на основе этой теории полученных им экспериментальных результатов.

Осенью 1926 года Дэвиссон провел ряд расчетов, в соответствии с которыми он надеялся обнаружить рассеянные в определенных направлениях пучки электронов, но ничего не обнаружил. Тогда он приступил к планомерным и основательным исследованиям и 6 января 1927 года получил отчетливые пучки, обусловленные отражением от поверхностной решетки атомов, как и было предсказано им расчетным путем в том же месяце».

Примерно тогда же Г. П. Томсон [16] (сын Дж. Дж. Томсона) в Абердине начал исследования по дифракции пучков электронов. После упомянутого заседания Британской ассоциации Томсон посетил Кавендишскую лабораторию, где ему показали несколько фотографий, сделанных с помощью пучков электронов, рассеянных в газообразном гелии. Действительно, на фотографиях было нечто похожее на дифракционную картину — во всяком случае они напомнили Томсону некоторые эффекты дифракции пучков света, которые он наблюдал во время занятий в учебной лаборатории за несколько лет до этого. Позднее оказалось, что фотографии предполагаемой дифракции электронов в газообразном гелии были фальшивыми, но, к счастью, Томсон тогда не знал об этом. Он был полон решимости найти доказательства существования дифракции электронных пучков от тонких фольг. Вернувшись в Абердин, он и студент-практикант, который работал с аппаратурой для получения каналовых лучей, просто «изменили полярность схемы» и таким образом получили на выходе узкий пучок электронов, который мог бы пройти через тонкие фольги из целлулоида (а позднее и из металлов) и зарегистрироваться фотографической пластиной. В течение месяца с того момента, как Дэвиссон и Гермер успешно продемонстрировали явление дифракции электронов, аналогичные результаты были получены независимо от них Томсоном. Томсону и Дэвиссону за их работу была присуждена в 1937 году Нобелевская премия.

Таким образом, к 1928 году были получены надежные экспериментальные доказательства правильности концепции де Бройля—Шредингера о волновых свойствах, присущих в известном смысле электронам и любым другим частицам. Кроме того, огромный успех выпал на долю теоретической квантовой механики, базировавшейся на той же самой концепции и позволившей обеспечить рациональную логическую основу для развития теории Бора. Однако достижения, связанные с успехами квантовой механики, вышли далеко за пределы теории Бора и выразились в блестящем объединении в стройную систему большого количества теоретических и экспериментальных данных. По крайней мере принципиально (поскольку математические трудности

зачастую становятся весьма угрожающими) с помощью уравнений квантовой механики можно теперь объяснить: 1) каким образом атомы поглощают или испускают свет или рентгеновские лучи; 2) свойства проводников, изоляторов и полупроводников; 3) возможные способы соединения различных атомов в молекулы; 4) множество других электрических, магнитных, тепловых и механических свойств веществ.

Необходимо отметить, что открытие явления дифракции электронных пучков дало Томсону, Дэвиссону, Кикучи и многим другим ученым чрезвычайно ценный инструмент для исследования внутренней структуры кристаллов в дополнение к отчасти аналогичным исследованиям, которые стали возможны благодаря работам Брэгга по дифракции рентгеновских лучей. Другим примером технического использования концепции о волновой природе электронов явилось изобретение электронного микроскопа Р. Руденбергом в Берлине в 1930 году. Его сын заболел полиомиелитом, но врачи не могли провести тщательное обследование, поскольку вирус, вызывающий это заболевание, был, по-видимому, слишком мал и его нельзя было изучить с помощью обычных оптических микроскопов. (Через микроскоп нельзя наблюдать предметы существенно меньших размеров, чем длина волны используемого света.) Руденберг проникся идеей создать электронный микроскоп, с помощью которого можно было бы, согласно результатам Дэвиссона и Томсона, наблюдать объекты в тысячу раз меньше, чем с использованием обычного микроскопа. За годы, прошедшие со дня его изобретения, электронный микроскоп стал незаменимым исследовательским прибором в медицине и промышленности [7].

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ЭЛЕКТРОНЕ

Итак, открытие явления дифракции электронов подтвердило замечание Лоуренса Брэгга, высказанное им в начале 1920 года Г. П. Томсону: «Я не думаю, что электрон так прост, как нам кажется». В самом деле, оказалось, что наряду с волновыми свойствами электрону кроме заряда и массы следует приписать нечто большее; в противном случае представлялось невозможным

объяснить на основе квантовой механики некоторые результаты спектроскопических исследований. Паули [8], Гоудсмит и Уленбек [9] предположили, что электрон должен обладать соответствующими механическим и магнитным моментами. Другими словами, по их мнению, электрон должен представлять собой одновременно и вращающийся волчок (хотя весьма необычный, поскольку его механический момент принимает определенные «квантовые» значения), и маленький магнит определенной силы. Любой вращающийся электрический заряд, если он не есть просто геометрическая точка, будет, конечно, обладать этим магнитным свойством. Полный заряд электрона, его распределение в пространстве и скорость вращения связаны с величиной магнитного момента электрона. Эта взаимосвязь, хотя и очень сложная, была первым указанием на возможность существования некоторой внутренней структуры электрона.

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОН

Начиная с 1928 года П. А. Дирак (Кембридж) опубликовал ряд работ [10], в которых привел уравнения, описывающие поведение электрона; эти уравнения согласовывались с выводами сравнительно новой области науки — квантовой механики — и с принципами теории относительности. Теория электрона Дирака блестяще воспроизводила наблюдаемые на опыте свойства электрона, но имела как будто бы некоторый изъян. Из нее следовало, что электроны должны существовать не только в своем обычном виде с отрицательным зарядом, но также в состояниях, которые можно характеризовать как состояния с «отрицательной энергией» или с «положительным зарядом». Было трудно представить, что такое «отрицательная энергия» с физической точки зрения, а единственными известными положительно заряженными частицами были протоны, которые почти в 2000 раз тяжелее электронов. Кроме того, теория предсказывала, что эти положительно заряженные частицы в течение конечного промежутка времени должны аннигилировать с отрицательными электронами. Таким образом, должно было бы исчезнуть вещество, из которого построены и лаборатории, и сами физики.

Были предприняты различные попытки избавить теорию Дирака от этого противоречия, и постепенно к 1931—1932 году установилось мнение, что положительные электроны могут существовать только в виде «дырок» в неподдающемся наблюдению гипотетическом море отрицательных электронов.

ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

В двадцатых годах Милликен, работавший в то время в Калифорнийском институте технологии, начал заниматься исследованием космических лучей, представляющих собой странную смесь частиц и волн, непрерывно падающих на Землю. Первичные космические лучи, как полагал в 1930 году, состоял из γ -квантов очень высокой энергии, которые в верхних слоях атмосферы могли рождать «ливни» (перемежающиеся вспышки) электронов с очень высокой энергией. Для изучения таких электронов К. Д. Андерсон и Милликен сконструировали камеру Вильсона, внутри которой можно было создавать сильное горизонтальное магнитное поле. Любый электрон, летящий вниз через камеру, должен был отклоняться по круговой траектории. Зная радиус кривизны траектории и напряженность магнитного поля, можно было определить импульс электрона. Через камеру пролетали также положительно заряженные частицы, но предполагалось, что это протоны. Вообще более тяжелая частица производит на своем пути бóльшую ионизацию и, значит, след от нее более плотный. Но это справедливо только для частиц, скорость которых гораздо меньше скорости света; поэтому если частицы в камере Вильсона движутся с весьма высокими скоростями, то очень трудно различить следы легкой и тяжелой частиц с единичным зарядом.

Даже если кривизна указывает как будто на положительный заряд частиц, то это вовсе не означает, что треки обусловлены протонами, поскольку их можно связать также с электронами космических лучей, каким-то образом отраженными обратно в камеру. Уместно привести слова Андерсона, сказанные им в Нью-Йорке на заседании Американской ассоциации учителей физики в феврале 1961 года [11]:

«Чтобы разрешить этот кажущийся парадокс (большое количество «положительных» треков. — Д. А.), в камеру на высоте ее центра поместили свинцовую пластинку, что позволило определить направление движения этих имеющих небольшую скорость частиц и разделить движущиеся вверх отрицательные и летящие вниз положительные частицы.

Вскоре был получен прекрасный снимок, изображавший след положительно заряженной частицы небольшой массы, пересекавшей камеру снизу вверх. Измерение степени ионизации и кривизны трека показало, что масса частицы гораздо меньше массы протона; фактически ее масса точно совпадала с массой электрона. Примечательно, что это был пример регистрации движущейся вверх космической частицы, что, по решительному утверждению Милликена, являлось весьма редким событием».

На рис. 10 показан эскиз широко известного в наши дни снимка, сделанного в камере Вильсона, который иллюстрирует описанный выше пример. Над свинцовой пластиной трек частицы искривлен сильнее, а это означает, что импульс этой частицы над пластиной меньше, чем в нижней половине камеры. Если отбросить таинственную возможность значительного увеличения энергии частицы при ее движении вниз, то наблюдаемую картину можно объяснить только присутствием положительно заряженной частицы, движущейся вверх. Убедившись, что такая частица действительно может существовать, Андерсон приступил к детальному изучению других фотографий и вскоре обнаружил ряд дополнительных примеров. (В действительности и другие исследователи еще до Андерсона, по меткому замечанию Хансона [12], видели положительные электроны, или «позитроны», но не смогли их заметить.) Андерсон опубликовал свои выводы в 1932 году и в начале 1933 года [13]. Он использовал теорию Дирака для объяснения не-

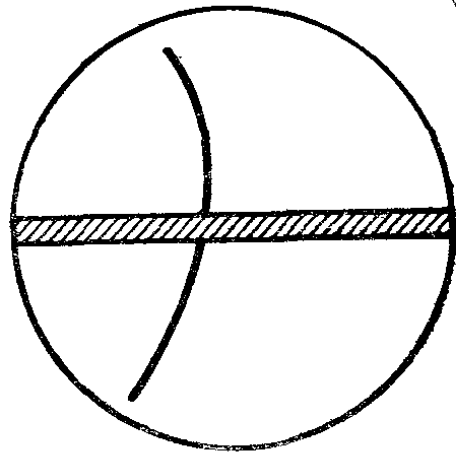


Рис. 10. Трек позитрона, полученный Андерсоном в камере Вильсона.

которых процессов, в результате которых могли образоваться позитроны в космических лучах. Он сказал: «Мне не сразу стал ясен детальный механизм этого явления. Не из ядра ли получают позитроны каким-то образом свой положительный заряд? Могут ли они испускаться из ядра, если их там, по-видимому, нет вообще? Тогда я еще не догадывался, что позитроны образуются из самого излучения; мысль об этом пришла ко мне лишь спустя несколько месяцев после того, как Блэкетт и Оккилаини [14] выдвинули гипотезу об образовании пар, когда весной 1933 года они сообщили о результатах своих блестящих экспериментов с космическими лучами с использованием камеры Вильсона, контролируемой счетчиками Гейгера» [15].

Таким образом, теория Дирака предсказала существование новой частицы. Однако было бы ошибочно думать, что Андерсон руководствовался в своей работе теорией Дирака. Поскольку даже физики-теоретики не обращали большого внимания на нежелательное «положительное» решение уравнений Дирака, то неудивительно, что физики-экспериментаторы поступали так же. Андерсон [16] высказался об этом следующим образом: «Открытие позитрона было совершенно случайным, хотя релятивистская теория электрона Дирака предсказывала также и существование позитрона, и это было хорошо известно почти всем физикам; в открытии позитрона теория не сыграла существенной роли . . . Цель эксперимента, который привел к открытию . . ., состояла просто в измерении энергетического спектра вторичных электронов, образующихся в атмосфере и других материалах, благодаря приходящему из космоса излучению . . .»

Открытие положительных электронов ознаменовало конец целой эпохи. Со времен Дж. Дж. Томсона считалось, что только протон и электрон являются единственными фундаментальными или элементарными частицами. Если десятилетие с 1896 года по 1906 год замечательно как начало новой эпохи, связанной с определением природы катодных лучей, с открытием рентгеновских и каналовых лучей, явления радиоактивности, с началом развития квантовой теории и теории относительности, то тридцатые годы можно назвать новым переходным периодом. В начале этого десятилетия были

открыты позитрон и нейтрон, а затем уже мезоны и «странные частицы» (всего около 30), обилие которых теперь уже и смущает, и восхищает современных физиков.

Если в настоящее время электрон и представляется многим физикам чем-то вроде старого друга, раскрывшего почти все свои тайны, в отличие от загадочных новых частиц, то это не мешает использовать его в лабораториях в качестве трудолюбивой рабочей лошадки [17]. В последние годы появилась возможность строительства установок, позволяющих ускорять электроны до энергий в несколько миллиардов электронвольт. Чтобы почувствовать масштаб этих цифр, достаточно вспомнить, что электроны в атомах, участвующие в процессах поглощения и испускания видимого света, а также в процессах химических взаимодействий между атомами, имеют энергию порядка нескольких электронвольт. Электроны в радиолампах достигают энергий нескольких сот электронвольт. В катодно-лучевых или телевизионных трубках энергия электронов равна примерно десяти тысячам электронвольт, а в некоторых современных рентгеновских установках она доходит до миллиона электронвольт. Современные ускорители позволяют получить энергии в тысячи, десятки тысяч раз большие, чем миллион электронвольт. Дебройлевская длина волны у таких электронов крайне мала — фактически она меньше диаметра протона или нейтрона. Увы, к сожалению, мы не можем использовать пучки таких электронов в своего рода сверхэлектронном микроскопе, предназначенном для исследования свойств и структуры протонов. Но можно направить пучок электронов с такой энергией на мишень, состоящую из протонов (или протонов и нейтронов), и изучить их рассеяние на различные углы.

На основании результатов экспериментов по рассеянию сверхбыстрых электронов можно попытаться создать модель внутренней структуры протонов и нейтронов, а также самих электронов. В некотором смысле эти эксперименты похожи на опыты Резерфорда, который для выявления структуры атома бомбардировал α -частицами различным мишени. Теперь мы применяем пучки электронов для изучения строения частиц, которые в десять тысяч раз меньше самих атомов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saunders F. A. Private communication, 1962.
2. Davisson C. J., Kunsman C. H. Science, **54**, 522 (1921).
3. Davisson C. J., Kunsman C. H. Phys. Rev., **19**, 253 (1922).
4. Davisson C. J., Germer L. H. Phys. Rev., **30**, 707 (1927).
5. Darrow K. K. The Scientific work of C. J. Davisson. Bell System Tech. J., **30**, 786 (1950).
6. Thomson G. P. Am. J. Phys., **29**, 821 (1961).
7. Wyzanski. Charles Rüdénberg v Clark, 72 F. Supp. 381 (D. Mass, 1947).
8. Pauli W. Z. Physik, **31**, 765 (1925).
9. Uhlenbeck G. E., Goudsmit S. A. Naturwissenschaften, **13**, 953 (1925); Nature, **117**, 264 (1926).
10. Dirac P. A. M. Quantum Theory of the Electron. Proc. Roy. Soc. A, **117**, 610 (1928); Part II, Proc. Roy. Soc. A, **118**, 351 (1928); Annihilation of Electrons and Protons. Proc. Cambridge Philos. Soc., **26**, 361 (1930); Electrons and Protons. Proc. Roy. Soc. A, **126**, 360 (1930); The Proton, Nature, **126**, 605 (1930).
11. Anderson C. D. Early work on the Positron and Muon. Am. J. Phys., **29**, 825 (1961).
12. Hanson. Discovering the Positron. Brit. J. Philos. Sci., **12**, 194 (1961); **12**, 299 (1962).
13. Anderson C. D. Science, **76**, 238 (1932); Phys. Rev., **43**, 491 (1933).
14. Blackett P. M. S., Occhialini G. P. S. Proc. Roy. Soc. A, **A139**, 699 (1933).
15. Anderson C. D. Am. J. Phys., **29**, 826 (1961).
16. Anderson C. D. Ibid., p. 825.
17. Dirac P. A. M. Proc. Roy. Soc. A, **A268**, 57 (1962).

Глава 6

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА КАК ИСТОРИЧЕСКИЙ ПРИМЕР МЕТОДОВ НАУЧНОГО ПОИСКА

ПРОЦЕСС НАУЧНОГО ПОИСКА

Открытия, эксперименты, модели и теории, связанные с открытием и идентификацией электрона, хорошо иллюстрируют подход к научной проблеме и пути ее решения, столь характерные для науки вообще. Упомянутая в первой главе деревянная головоломка дает нам некоторую модель научного процесса. Теперь мы можем оглянуться назад и внимательно посмотреть на те проблемы, с которыми мы столкнулись при попытке обобщения разрозненных результатов. Конечно, для процесса научного поиска возможны также и другие модели. Так, например, некоторые люди предпочитают модель «детективного романа», в котором есть те же самые элементы тайны, путаницы, случайных открытий, упорная тяжелая работа, выдвижение гипотез, проблемы проверки данных и неожиданные ответвления, хотя, конечно, относительная эффективность каждого из этих элементов будет различной. Существует также географическая модель, согласно которой поиск научной истины уподобляется работе первооткрывателя в ранее неизвестной стране. Большинство ученых сочтут, вероятно, эту модель наименее подходящей.

Есть еще и классическая формулировка «научного метода», четко определяющая систему, которой должен следовать каждый, претендующий на роль ученого. Эта процедура заключается в сборе фактов или данных,

выдвижении предварительных гипотез, сопоставлении этих гипотез с экспериментальными данными и как итог — в создании единой и проверенной теории. Беда, конечно, не в том, что такая программа слишком надуманна, а скорее в том, что она только наполовину соответствует действительности, ибо она чрезмерно упрощена. Только в редких случаях ученый-физик может установить с достоверностью, на какой стадии научного поиска он находится в данный момент. Кроме того, в такой классической формулировке творческая роль воображения сведена до минимума или совсем отсутствует. Попробуем выразить все это иным образом. Как отмечал Геральд Холтон [1], есть «наука в процессе становления», сочетающая в себе деятельность рационального ума и порывы пылкого воображения, — и этим характеризуется всякий творческий процесс, поиск фигурок головоломки и экспериментальная проверка; и уже затем есть «наука в стадии публикации» — это прекрасно вылепленная и очень выразительная статуя, выставленная для обозрения только после того, как убраны все рабочие подмости и снят налет пыли и стружек, принадлежащих «науке в процессе становления». Если в этой книге мы уделили много внимания рабочим подмосткам и производственным отходам, то только потому, что это и есть истинный путь развития науки. Наука — это не просто упорядоченная коллекция фактов, тщательно отшлифованных и помещенных в учебнике.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕОРИЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Если проведение опытов является методом накопления фактов, то вид того или иного эксперимента будет, очевидно, зависеть от того, что исследователь пытается установить. Если, например, он предполагает, что имеет дело с новым видом лучей, то он попытается проверить, способны ли эти лучи отклоняться в магнитном или электрическом полях, могут ли они отражаться или преломляться, поляризуются ли они и т. д. Если предварительные данные свидетельствуют о том, что лучи имеют волновой характер, то должны быть выполнены эксперименты, подтверждающие или опровергающие такой подход. Затем возникают другие вопросы, связанные с определением длины волны лучей, установлением

связи с уже известными волнами и т. п. Например, Герц и Ленард, твердо убежденные в волновой природе катодных лучей, провели серию весьма остроумных экспериментов, надеясь подтвердить свою модель и опровергнуть корпускулярную модель Крукса. Эренкафт, считавший доводы Милликена неубедительными, выполнил ряд экспериментов, которыми он пытался доказать, что существуют заряды, величина которых меньше e .

Конечно, выводы могут быть ошибочными, если те или иные предположения ограничивают возможную интерпретацию экспериментальных данных. Так, в свое время Герц и Ленард обнаружили, что катодные лучи могут проникать сквозь тонкие фольги. Самые маленькие из известных тогда частиц (молекулы водорода) не обнаруживали такой способности, в то время как электромагнитные волны обладали ею. Поэтому было решено, что эти лучи не могут быть заряженными частицами. Подобным же образом, будучи уверенным в волновой природе катодных лучей, Герц неверно истолковал результаты измерений тока в катодно-лучевой трубке. Легко обнаружить логические ошибки, сделанные в прошлом. В свое время все представлялось далеко не столь ясным. (Утром в понедельник всегда легко распланировать прошедшую неделю.) Ученые, так же как и другие люди, имеют обыкновение втискивать новые данные, даже если они являются весьма неожиданными, в рамки старых идей. Они часто бессознательно попадают в положение того самого молодого адвоката, который, заканчивая изложение своей версии судебного дела, драматично восклицает: «Вот, господа присяжные, выводы, на которых я основываю мои факты!» Берден считал, что определенная им с помощью рентгеновских лучей величина заряда электрона e оказалась «невероятно высокой». Сам Дирак пытался интерпретировать теоретически предсказанные им положительные электроны как некоторую разновидность протонов. Казалось, рентгеновские лучи ведут себя точно так же, как волны, и сомнения Брэгга остались без внимания. Дэвиссон не распознал дифракционных эффектов, когда впервые их увидел.

Таким образом, установившиеся взгляды на природу физического мира и теоретические уравнения, в ко-

торых эти взгляды выражаются, одновременно и способствуют прогрессу науки и в то же время тормозят в какой-то степени проведение экспериментов и интерпретацию полученных результатов. Опыт прошлого необходим нам как советчик и руководитель; в противном случае наука будет лишь случайной коллекцией безделушек. Не следует отмахиваться от рассмотрения возможных необычных теорий и фактов, не сбиваясь в то же время с правильного пути при столкновении с неожиданными и странными явлениями. Недаром в мире, так богатом компетентными учеными, на протяжении многих веков было только несколько поистине монументальных фигур, так же как было относительно немного людей, имена которых вошли в историю вместе с именами Шекспира, Баха и Пикассо. Мало быть готовым просто рассматривать факты, кажущиеся невероятными; нужно иметь блестящее воображение, чтобы осмыслить их, и обладать хорошей технической подготовкой, чтобы суметь ими воспользоваться.

Во второй половине нашего столетия резко изменилось отношение физиков к необычным фактам и идеям. Тем не менее все так же трудно, как и раньше, найти оригинальное решение той или иной научной проблемы. Однако мы научились спрашивать: «Согласуется ли такое решение с экспериментальными данными?», — и задаем этот вопрос гораздо чаще, чем «Согласуется ли это решение с нашими прежними идеями и представлениями о природе?»

РОЛЬ СЛУЧАЯ

В истории науки известно довольно много драматических случайностей, приведших к важным открытиям. Рентген заметил флюоресцирующий экран случайно, однако эта удача имела весьма существенные последствия. Беккерель открыл явление радиоактивности отчасти потому, что случайно небо над Парижем в течение нескольких дней было покрыто облаками. Поликристаллические образцы никеля у Дэвиссона оказались случайно окисленными. В результате термообработки, необходимой для устранения пленки окислов, произошло изменение структуры одного из нескольких больших кристаллов. После этого открытие дифракции электрон-

ных пучков стало почти неизбежным. Существуют примеры еще более неуловимых случайностей. Работа С. Вильсона (Кавендишская лаборатория) по изучению процесса образования облаков позволила создать метод определения заряда электрона, который использовали Таунсенд, Томсон и Х. А. Вильсон. Исследования Эвальда, связанные с изучением структуры кристаллов, помогли Лауэ открыть дифракцию рентгеновских лучей. Несомненно, что рано или поздно кто-то должен был открыть эти лучи и явление радиоактивности, так же как кто-то должен был измерить заряд электрона и использовать кристаллы для изучения дифракции рентгеновских лучей. И все же случай сыграл во всем этом определенную роль. Конечно, не следует переоценивать роль случая, поскольку случай помогает только тогда, когда назрела соответствующая ситуация. Но открытия никогда нельзя запрограммировать или запланировать заранее, и об этом тоже нельзя забывать.

ТВОРЧЕСКАЯ АТМОСФЕРА

Один из движущих факторов в научных исследованиях, суть которого становится ясной на примере истории открытия электрона, — это сама атмосфера творческой работы, царящая в той или иной лаборатории. Многие выдающиеся научные открытия были сделаны, по существу, одиночками при скудном экспериментальном оборудовании. Однако в последние десятилетия большинство значительных работ проводилось в университетских, правительственных или промышленных лабораториях. Раньше не было необходимости создавать большие группы ученых, работающих над одной и той же проблемой. Однако многие работы были выполнены небольшими группами исследователей, входящих в состав более крупных объединений. Кавендишская лаборатория под руководством Дж. Дж. Томсона и Резерфорда служила как бы прототипом таких лабораторий и одновременно блестящим примером разумного сотрудничества. Лоуренс Брэгг, вспоминая о совместной работе со своим отцом в Кавендишской лаборатории в 1913 г., писал [2]: «Именно эти первые результаты (спектрометрия рентгеновских лучей. — Д. А.) вдохновили Мозли провести систематический анализ рентгеновских спек-

тров различных элементов, объяснить их на основании теории спектров Бора и таким образом определить атомные номера элементов. Я имел возможность целиком отдаться изучению кристаллов с помощью спектрометра. Это было замечательное время, когда новые захватывающие результаты получались почти каждую неделю, подобно открытию новых золотоносных районов, где самородки золота можно подбирать прямо с земли. Это продолжалось вплоть до начала войны, прекратившей нашу совместную работу...»

ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР НАУКИ

История открытия электрона — яркий пример того, как исследования вышли за стены определенных лабораторий и даже за границы отдельных стран. Действительно, с 1880 по 1897 год шел довольно острый спор между немецкими и английскими физиками о природе катодных лучей (опровергавший распространенное мнение о том, что ученые — это люди «ледяного спокойствия»), но когда эти головоломки науки были разгаданы каждая в отдельности и объединены вместе, оказалось, что как конкретные решения, так и изобретательность, с которой они были обобщены, являются заслугой немецких, английских, французских, американских, датских, японских, новозеландских, канадских и многих других физиков. Конечно, время от времени были перемены в общении между учеными, сопровождавшиеся довольно язвительной критикой. Но международные связи и сотрудничество ученых существовали и в прошлом, и теперь, и нет оснований сомневаться в их прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holton G. *Foundations of Modern Physical Science*. Addison — Wesley, Reading, Mass., 1958.
2. Bragg L. Sir William Henry Bragg. *New Scientist*, 14, 711 (1962).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА АВОГАДРО

Установлено, что радиоактивный распад подчиняется во времени экспоненциальному закону, который может быть записан в виде

$$n = n_0 e^{-\lambda T}, \quad (\text{A.1})$$

где n и n_0 — число атомов радиоактивного вещества соответственно в моменты времени t и t_0 . λ — постоянная распада данного вещества.

Период полураспада T радиоактивного вещества определяется как время, в течение которого распадается половина первоначально присутствующих ядер. Он может быть легко связан с постоянной распада λ . Действительно, согласно определению T , уравнение (A.1) можно в этом случае записать как

$$\frac{1}{2} n_0 = n_0 e^{-\lambda T}.$$

Логарифмируя написанное равенство, получим

$$\ln \frac{1}{2} + \ln n_0 = \ln n_0 - \lambda T,$$

откуда $\lambda = 0.693/T$.

Теперь вернемся к уравнению (A.1). Дифференцируя обе части этого уравнения по t , получим скорость распада атомов (для нашего случая скорость испускания альфа-частиц):

$$\frac{dn}{dt} = (n_0 e^{-\lambda t}) \lambda = n\lambda. \quad (\text{A.2})$$

Резерфорд знал, что период полураспада радия составляет примерно 2000 лет или $6,3 \cdot 10^{10}$ сек, т. е. $\lambda = 1,09 \cdot 10^{-11}$ сек⁻¹. Он также

знал, что 1 г радия испускает $3,4 \cdot 10^{10}$ α -частиц в 1 сек. Поэтому, используя уравнение (A.2), он смог написать

$$\lambda n = \frac{dn}{dt}.$$

Пользуясь последним соотношением, можно определить число атомов в 1 г радия, т. е. $1,09 \cdot 10^{-11} n = 3,4 \cdot 10^{10}$, откуда $n = 3,12 \cdot 10^{21}$. Умножив полученную величину n на молекулярный вес радия, равный 226, Резерфорд смог найти число атомов в одной грамм-молекуле, или число Авогадро N . Оказалось, что $N = 7,05 \cdot 10^{23}$.

(В настоящее время мы пользуемся более точным значением числа Авогадро, поскольку известно, что период полураспада радия составляет 1600 лет, а скорость α -распада близка к $3,7 \cdot 10^{10}$. Этим величинам соответствует $N = 6,0 \cdot 10^{23}$.)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	
Глава 1. Открытие электрона	7
Что такое электричество?	7
История вопроса	8
Описание явлений	8
Модели	13
Химические эффекты электрического тока	16
Другое великое открытие Фарадея — индуцированные токи	19
Обзор общих теорий электричества	21
Природа электричества	25
Природа научного поиска	26
Литература	28
Глава 2. Катодные лучи	30
Открытие катодных лучей	30
Наблюдаемые свойства лучей	31
Дискуссия	35
Эксперименты Гольдштейна	38
Эксперимент Шустера	40
Эксперименты Герца и Ленарда	42
Первые измерения скорости катодных лучей, проведенные Томсоном	49
Эффект Зеемана	57
Отношение q/m для фотоэлектрических частиц	60
Частицы, испускаемые раскаленными металлами	62
Частицы, испускаемые радиоактивными веществами	62
Литература	65
Глава 3. Рентгеновские лучи и радиоактивность	
Открытие рентгеновских лучей	67
Практическое использование рентгеновских лучей	71
Первые признаки существования рентгеновских лучей	73
Дальнейшие исследования свойств рентгеновских лучей	74
Измерение длины волны рентгеновских лучей	75
Доводы в пользу корпускулярной природы рентгеновских лучей	76

Дифракция рентгеновских лучей	77
Спектрометрия рентгеновских лучей	79
Открытие радиоактивности	80
Каналовые лучи	83
Литература	85

Глава 4. Атомная природа электрического заряда

Введение	87
Метод Гаунсенда для определения величины заряда e	90
Метод Томсона	92
Метод Вильсона	93
Методы Перрена	95
Другие методы	98
Метод Милликена	102
Анализ экспериментов с масляной каплей	117
Другие методы измерения заряда электрона e	119
Рентгеновский метод определения заряда электрона	120
Идентичны ли заряд томсоновского электрона и величина e ?	124
Развитие моделей, объясняющих строение атома	126
Литература	130

Глава 5. Дальнейшее развитие физики электрона

Развитие атомной теории	134
Электрон с точки зрения квантовой механики	138
Дальнейшее развитие представлений об электроны	142
Положительный электрон	143
Открытие позитрона	144
Литература	148

Глава 6. Открытие электрона как исторический пример методов научного поиска

Процесс научного поиска	149
Связь между теорией и экспериментом	150
Роль случая	152
Творческая атмосфера	153
Интернациональный характер науки	154
Литература	154
Приложение. Определение числа Авогадро	155

Дэвид Л. Андерсон

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

(Развитие атомных концепций электричества)

Редактор В. А. Кузьмичева

Художественный редактор А. С. Александров

Технический редактор Н. А. Власова

Корректор Л. С. Алиева

Сдано в набор 6/IX 1967 г. Подписано
в печать 28/XI 1967 г. Бумага 84×108/32,
типографская № 2 Усл. печ. л. 8,4
Уч.-изд. л. 7,99 Тираж 45 000 экз.
Заказ изд. 1609 Заказ тип. 4266

Цена 38 коп.

Атомиздат, Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В продаже имеется книга:

Е. Кюри. Мария Кюри. Пер. с франц. Изд. 2. 1967, 352 стр., 1 р. 19 к.

Ни одна женщина-ученый не пользовалась такой популярностью, как Мария Кюри. Ей было присуждено десять премий и шестнадцать медалей. М. Кюри была избрана почетным членом ста шести научных учреждений, академий и научных обществ. Так, в частности, она была почетным членом Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии в Москве, с 1912 года — членом Института экспериментальной медицины в Петербурге, с 1914 года — почетным членом Научного института в Москве и с 1926 года — почетным членом Академии наук СССР.

Биография Марии Кюри написана ее младшей дочерью Евой (род. в 1904 году), журналисткой по профессии. Книга вышла в свет на французском языке в 1937 году и выдержала во Франции более ста изданий. Помимо этого, она переведена на двадцать пять языков и в переводах иногда выходила в десяти — двенадцати изданиях на одном языке.

Наши читатели с большим интересом прочтут эту книгу.

Заказы на книги направляйте по адресу:

Москва, Центр, ул. Петровка, 15. Книжный магазин № 8.
Книги будут высланы наложенным платежом.

АТОМИЗДАТ