

Э. БАУЭР

ТЕОРИЯ БОРА

СТРОЕНИЕ АТОМА
И ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Перевод с французского
Е. ХОТИНСКОГО



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО УКРАИНЫ

1 9 2 3

Р. О. П. (Одесса) № 705.
1-ая Гос. тип. им. К. Маркса, Стурдзовский пер. 3-а. Зак. 1995. 5000 экз.

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА.

Предлагаемая книжка представляет собой доклад, прочитанный в 1921 году в Парижском Физико-Химическом Обществе и напечатанный в 1922 г. с дополнениями и указаниями новейших работ.

Автор сумел простым языком, в сжатом и популярном виде изложить современное состояние воззрений на строение атома и указать на те изменения, которые эти новые воззрения внесли в периодическую систему элементов.

Такой краткий обзор новейших достижений в области изучения внутреннего строения атома, успехов, достигнутых главным образом в последний период, когда мы были почти совершенно лишены возможности следить за текущей научной литературой, может представить интерес для неспециалиста, интересующегося физико-химическими вопросами.

Ввиду этого предлагаемый перевод может оказаться не лишним для круга читателей, знакомых с вопросами химии и физики, но не имеющих достаточной подготовки, чтобы пользоваться первоисточниками.

Е. Хотинский.

I. Исторические данные. Можно сказать, что 1911 и 1912 гг. знаменуют начало нового периода в развитии атомистической теории.

До тех пор усилия были направлены главным образом на построение ее на все более и более прочных экспериментальных основаниях, на доказательство существования атомов, на их подсчет и измерение.

Уже в течение нескольких лет не допускалось сомнений в существовании атомов. Знали, что в грамм-молекуле содержится от 6 до $7 \cdot 10^{23}$ молекул и что диаметр атомов колеблется между 1 и 5 десятиллионными долями миллиметра (10^{-8} сант.).

К этому времени три больших экспериментальных открытия, сделанных одно за другим, позволили нам вдруг проникнуть во внутреннюю область атома.

Первое — это точные законы, управляющие прохождением через материю α -лучей радиоактивных веществ (Резерфорд).

Затем открытые Лауэ, Браггом и Мозелем интерференция рентгеновских лучей и их спектральный анализ.

Наконец, Содди и Фаянс установили химическую классификацию и законы превращений радиоактивных веществ.

С этого времени началось изучение этой новой области. Работа далеко не закончена; количество теоретических и экспериментальных исследований растет; они привели к поразительным результатам, и мы начинаем уже приобретать в некоторых отношениях точные сведения. Нет никакого сомнения в том, что достигнутые успехи будут иметь продолжение. Уже Резерфорд затронул самое сердце этой области, ядро атома, центральное место, еще в десять тысяч раз меньшее, чем сам атом; он его измерил и разложил на более простые элементы, так что, кажется, по край-

ней мере в настоящую минуту, мы достигли крайних составных частей материи, отрицательного электрона, хорошо известного с конца прошлого столетия, и ядра водородного атома, которое по всей вероятности является положительным электроном¹⁾.

Я не имею возможности изложить все новые факты, открытые с того времени и все возбужденные ими гипотезы. Я ограничусь некоторыми очень простыми идеями о строении атомов, идеями, которые относятся к теориям Резерфорда и Бора, ставшими уже почти классическими.

Я не сообщу, следовательно, ничего нового специалистам. Но я считаю необходимым точно определить некоторые основные понятия, которых в настоящее время не имеет права не знать ни один физико-химик.

II. Первые гипотезы об электрическом строении атомов.

После открытия электрона и развития электрических теорий Максвелла и Лоренца, в физике господствует одна тенденция: чтобы пользоваться возможно меньшим количеством гипотез, мы стараемся составить себе чисто электромагнитное представление о материи (оставляя в стороне явления тяготения)²⁾.

С первых лет текущего столетия физики пытались с точностью определить наши представления об электрическом строении атомов. Две возможные гипотезы были представлены. В 1902 году лорд Кельвин опубликовал статическую теорию атома, которая

¹⁾ Напоминаю, что главные свойства электрона могли быть определены одновременно и с тою же точностью, как и свойства атома. Его электрический заряд e равен $4,78 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц; его масса составляет $1/1837$ массы водородного атома; его размеры известны не так точно, но они, конечно, значительно меньше размеров атомов (его радиус, по всей вероятности, близок к $2 \cdot 10^{-12}$ сант., т. е. к двум миллионным долям одной миллионной миллиметра).

Ядро водородного атома обладает зарядом, равным и обратным по знаку заряду электрона (IV): это и называется элементарным положительным зарядом. Оно в 1846 раз тяжелее электрона, но может быть еще меньших размеров.

²⁾ Как мы увидим, эта тенденция уже наталкивается на затруднения. Мы знаем, что вселенная бесконечно богата и сложна и что ее нельзя втиснуть в одну формулу. Но электрическая теория вещества еще в периоде расцвета. Нужно исчерпать ее способность объяснять явления, или найти факты, ей противоречащие, прежде чем создавать новую.

была затем развита Дж. Дж. Томсоном и к которой я скоро возвращусь. С другой стороны, в 1901 г. Ж. Перрен¹⁾ сделал доклад, в котором предложил динамическую теорию, состоящую в следующем: атомы представляют собой системы, аналогичные солнечной; отрицательные электроны, как планеты, вращаются вокруг положительного центра, который их притягивает с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояний.

Однако в то время такого рода теория, предполагающая электроны в движении, еще не могла иметь успеха, так как она вела к выводу о неустойчивости атома. Действительно, электроны в своем эллиптическом движении вокруг положительного центра испытывают каждое мгновение значительные ускорения, так как их скорости беспрестанно меняются по величине и направлению. Между тем электромагнитная теория Максвелл-Лоренца имеет необходимым следствием следующую теорему: всякое ускорение тела, заряженного электричеством, сопровождается излучением, испусканием электромагнитной (или световой) волны, которая уносит с собой в даль некоторое количество энергии.

Если мы будем рассматривать эллиптическую траекторию электрона в атоме, в ее собственной плоскости, как ее изображает Перрен, она представится нам в виде маленького электрического осциллятора, совершенно сходного с крошечной антенной беспроводного телеграфа, по которой пробегает переменный ток. Мы можем, следовательно, ожидать, что эта система будет испускать волны с периодом, равным продолжительности обращения электрона. Но это может происходить только за счет механической энергии электрона. Он, следовательно, будет понемногу замедлять свое движение и в конце концов остановится и упадет на положительно заряженное центральное ядро. Атом не устойчив.

Вероятно, исходя из этих соображений, динамическая точка зрения была оставлена, и чисто статическое представление лорда Кельвина и Дж. Дж. Томсона казалось сначала наилучшим образом отвечающим фактам.

Вот его существенные черты: положительное электричество состоит из сферы такого же диаметра, как и атом, следовательно довольно большой. Внутри этой сферы плавают отрицательные

¹⁾ Эта теория была подробнее разработана Э. Резерфордом, который и считается обычно творцом динамической модели атома.

электроны. Они находятся в равновесии под одновременным влиянием притяжения положительного электричества — обратно пропорционально расстоянию до центра — и их взаимного отталкивания. Фигуры равновесия, которые образуют подобные системы, дают возможность в известной степени понять периодичность классификации элементов.

Это представление об атоме, теперь оставленное, имеет большое историческое значение, так как оно привело Дж. Дж. Томсона к открытию метода, позволившего ему вычислить количество электронов, находящихся внутри каждого вида атомов.

Этот метод вполне аналогичен тому, который дает возможность определить число молекул в атмосфере путем фотометрического исследования голубого цвета неба. В данном случае, однако, свет не может быть использован. Только рентгеновские лучи, представляющие лучи света очень большой частоты колебаний, могут вызывать вибрации всех электронов, даже тех, которые тесно связаны с положительным электричеством.

В случае света, длина волны которого значительно больше диаметра молекул, каждая молекула воздуха, приведенная в колебание волнами, идущими от солнца, резонирует, вибрирует в соответствии с этими волнами; она их рассеивает по всем направлениям. Рассеивающая способность атмосферы пропорциональна количеству молекулярных резонаторов, находящихся в каждом кубическом сантиметре воздуха.

Рентгеновские лучи имеют значительно меньшую длину волны, порядка размеров атома. Когда они проходят сквозь молекулу, они последовательно ударяются о каждый электрон, и их фаза изменяется от одного электрона к другому. Здесь, следовательно, уже не молекула, а электрон представляет элементарный резонатор. Рассеивающая способность алюминиевой или медной пластинки для этих лучей пропорциональна количеству атомов, умноженному на число электронов, находящихся в каждом из них.

Я не останавливаюсь на экспериментальных трудностях. Баркла и Сандлер сумели произвести достаточно точные измерения, чтобы показать, что число N электронов, находящихся внутри атома данного элемента очень близко соответствует половине атомной массы. Эти опыты могли быть произведены только с некоторыми легкими элементами (C, Al).

Так как атомы электрически нейтральны, то N представляет в то же время число положительных элементарных зарядов e , скопление которых образует положительную сферу (каждый из этих положительных зарядов равен по абсолютной величине заряду электрона).

Таким образом впервые была измерена основная величина, которую теперь называют атомным числом N : число электронов внутри атомов, число элементарных зарядов, составляющих положительный центр.

III. Прохождение α лучей через материю. Атом Резерфорда. К этому времени¹⁾ Резерфорд нашел уже значительно более мощный и плодотворный метод для исследования внутреннего устройства атомов, чем изучение рассеяния материей рентгеновских лучей.

Известно, что α -лучи, выбрасываемые в пространство вследствие распада радиоактивных атомов, состоят из материальных частичек, значительно более тяжелых, чем электроны. Как уже давно показал Резерфорд, это — атомы гелия, несущие каждый по два элементарных положительных заряда (мы их будем обозначать символом He^{++}) и движущиеся со скоростью порядка в двадцать тысяч километров в секунду.

Обычные законы механического удара, которые принимаются в кинетической теории газов, совершенно не применимы к таким огромным скоростям.

Опыт показывает, что α -лучи проникают сквозь материю почти по строгой прямой линии. Для них атомы не являются непроницаемыми, и они проходят сквозь атомы, как болиды сквозь атмосферу.

Если принять, как это является естественным для электрической теории материи, что взаимодействие атомов и α -частиц носит чисто электромагнитный характер, то эти факты оказываются в полном соответствии с идеями Дж. Дж. Томсона. Положительная сфера велика, но электрическая плотность ее сравнительно

¹⁾ Первые опыты относятся к 1906 г., точные результаты получены в 1909.

мала; поэтому она не имеет времени значительно отклонить во время ее быстрого пролета частицу He, электроны же отбываются в сторону, как пыль.

Вычисление, следовательно, предвидело лишь очень малые отклонения, и это, повидимому, подтвердилось первыми опытами, но Резерфорд понял, какой интерес здесь могут представить точные измерения. Он в этот момент почувствовал, что α -частицы, которые доходят до самого сердца атомов, являются замечательными орудиями диссекции, ни с чем не сравнимыми зондами.

Он побудил Гейгера и Марсдена предпринять экспериментальное исследование вопроса. Результат получился удивительный. Теория Дж. Дж. Томсона не нашла подтверждения. В то время как большая часть частиц едва отклоняется, некоторые из них, в очень малом количестве (приблизительно одна на десять тысяч), испытывают значительные отклонения, достигающие 120 градусов и больше, т.-е. поворачивают назад.

После этого Вильсон нашел способ, позволяющий видеть эти траектории. Известно, что если сразу разредить воздух, насыщенный водяным паром, то этот пар становится пересыщенным, вследствие охлаждения, произведенного расширением. Если в воздухе содержатся пылинки или какие-нибудь ионы, пар конденсируется на каждом из этих центров и образует вокруг них капельки воды, которые можно видеть при надлежащем освещении. Но α -частица, проникающая сквозь молекулы воздуха, ионизирует большое их количество. Если произвести быстрое расширение тотчас после ее пробега, все ионы, находящиеся вдоль ее траектории, становятся видимыми. На фотографии траектория вырисовывается сама собой, подобно траектории падающей в воздухе звезды (Рис. 1).

Результаты чрезвычайно определены. В общем траектории приближаются к прямым линиям, но на некоторых из них, очень редких (на рисунке имеется одна такая траектория), наблюдается перелом, указывающий на особенно сильный толчок.

Эти толчки совершенно не могут быть объяснены моделью атома Дж. Дж. Томсона. Действительно, значительное отклонение может произойти только в том случае, если α -частица ударится о какое-нибудь тяжелое тело, масса которого должна быть

величиной того же порядка или большей, чем у α -частицы. Следовательно, эти имеющие место лишь в исключительных случаях столкновения могут происходить только с самими ядрами атомов, в которых концентрируется почти вся инертная масса атома. С другой стороны, редкость этих столкновений показывает, что ядра представляют лишь чрезвычайно малое препятствие прохождению α -лучей: большая часть частиц проходит мимо, не затрагивая их. Они составляют, следовательно, ничтожную часть объема, занимаемого материей. Понятно, что достаточно подсчитать количество столкновений, следствием которых было заметное отклонение, точнее, измерить, как углы отклонений распределяются между всеми наблюдаемыми траекториями, чтобы из них вывести диаметр атомных ядер (или скорее, верхний предел этого диаметра). Опыт дает еще нечто: закон отталкивательных сил, которые проявляются в момент столкновения ядер с α -частицами.

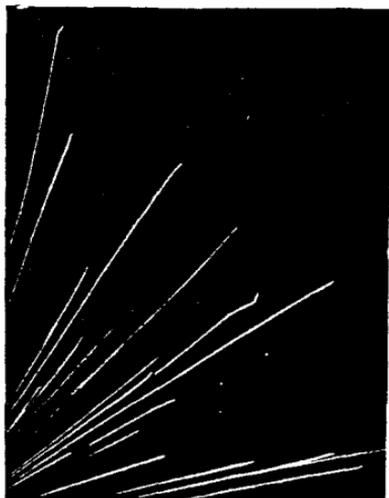


Рис. 1.

Вот результаты этих опытов, которые все более и более совершенствовались в течение пятнадцати лет и привели недавно к измерениям высокой точности (Чадвик, 1920).

1. Атомы,—это планетные системы, аналогичные тем, которые изображал Перрен. Положительный заряд сконцентрирован в очень маленьком ядре, диаметр которого порядка $3 \cdot 10^{-13}$ сант. для гелия, максимум $3 \cdot 10^{-12}$ сант. для золота.

2. Отталкивание между α -частицами и ядрами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояний. Это, следовательно, просто электростатические отталкивания, происходящие между положительными зарядами ядра и α -частицы.

3. Масса атома сконцентрирована почти целиком в ядре, на электроны приходится лишь ничтожная часть.

4. Электрический заряд ядра (от которого зависит интенсивность сил, отталкивающих и отклоняющих α -частицы) может быть определен с точностью до 1,5% его величины; таким образом, получаются числа, помещенные в четвертом столбце (N опыт) ниже следующей таблицы. A обозначает массу атома, N истинное атомное число в том виде, в котором оно могло быть вычислено со всею точностью (IV и X).

Элемент	A	A/2	N опыт.	N истин.
Cu . .	63,57	31,7	29,3	29
Ag . .	107,88	54	46,3	47
Pt . .	195,2	98	77,4	78

В третьем столбце находятся половины атомных весов масс, которые совпадают с атомными числами для некоторых легких элементов, но отклоняются от них по мере повышения атомного веса в ряду элементов.

Эти опыты вынуждают нас совершенно оставить точку зрения Дж. Дж. Томсона. Их доказательность так велика, что идеи Резерфорда не могут больше оспариваться.

Они представляют наиболее прямое средство узнать заряд ядра.

Мы знаем, что атомные числа N должны быть целыми.

Для меди только одно целое число 29 отличается от 29,3 меньше, чем на 1,5%. Таким образом, атомное число меди установлено с точностью: оно равняется 29.

IV. Периодическая система и строение атомов. Атомы состоят, таким образом, из очень маленьких положительных ядер, окруженных электронами. Заряд ядер и количество электронов увеличивается почти пропорционально половине атомного веса, немного медленнее, как показывает выше приведенная таблица.

Как располагаются эти электроны в различных атомах? Каково их точное число, которое метод Резерфорда дал пока только для меди? Какое влияние оказывают атомные числа на свойства элементов?

На все эти вопросы химические данные дадут нам наиболее простые и прямые ответы.

На стр. 14 приведена периодическая система Менделеева в ее современной форме. Вы знаете, что она дает очень ясную картину взаимоотношений между различными элементами. Если расположить их в порядке возрастания их атомных весов, то через довольно правильные промежутки (за исключением нескольких отклонений) повторяются вещества, обладающие аналогичными свойствами. Они располагаются, таким образом, в девять естественных семейств или групп, каждая из которых соответствует вертикальному столбцу.

В течение долгого времени думали, что каждая горизонтальная линия образует период, после которого появляются снова элементы того же семейства. В настоящее время, повидимому, лучше рассматривать периоды неодинаковой длины. Прежде всего, первый элемент, водород, должен быть поставлен отдельно. Затем следуют два почти тождественных малых периода по восьми членов, занимающих каждый по одной горизонтальной линии. Соответствующие элементы двух периодов обладают близкими химическими свойствами (за исключением, может быть, элементов групп II и III). Затем следуют два больших периода по 18 элементов, которые состоят из двух полу-периодов, занимающих по одной строчке в таблице. Их первые члены очень близки к соответствующим элементам первых периодов.

Далее обнаруживаются отклонения; главным из них является необходимость введения новой группы, VIII-й, в которой помещаются рядом железо, кобальт и никкель. Элементы, обнаруживающие отклонения в свойствах, окружены в таблице пунктирной линией.

Второй полу-период является дополнительным к первому. Ничего нет в 0 группе, ничего в группе VIII. То же явление правильно повторяется в четвертом и пятом периодах. Отсюда мы уже теперь можем заключить, что здесь дело не в случайно незанятых местах, которые когда-нибудь будут заполнены вновь открытыми элементами, эти клетки должны оставаться пустыми. Мы к тому же увидим, что если бы это не было так, атомное число меди не могло бы быть 29, как это доказано опытами Чадвика. Исследования Мозелея над спектрами рентгеновских лучей, к которым я сейчас перейду, окончательно зафиксировали наши выводы по этому вопросу.

Периодическая система элементов.

Периоды	Группа 0	Группа I	Группа II	Группа III	Группа IV	Группа V	Группа VI	Группа VII	Группа VIII		
		1) H 1.008									
1	2) He 4.00	3) Li $\begin{cases} 6.0 \\ 7.0 \end{cases}$	4) Be 9.1	5) B $\begin{cases} 10.0 \\ 11.0 \end{cases}$	6) C 12.0	7) N 14.01	8) O 16.00	9) F 19.00			
2	10) Ne $\begin{cases} 20.0 \\ 22.0 \end{cases}$	11) Na 23.00	12) Mg $\begin{cases} 24.0 \\ 25.0 \\ 26.0 \end{cases}$	13) Al 27.1	14) Si $\begin{cases} 28.0 \\ 29.0 \end{cases}$	15) P 31.04	16) S 32.06	17) Cl $\begin{cases} 35.0 \\ 37.0 \end{cases}$			
3	18) Ar $\begin{cases} 40.00 \\ 36.00 \end{cases}$	19) K $\begin{cases} 39.0 \\ 41.0 \end{cases}$	20) Ca 40.07	21) Sc 44.1	22) Ti 48.1	23) V 51.0	24) Cr 52.0	25) Mn 54.93	26) Fe 55.84	27) Co 58.97	28) Ni 58.68
		29) Cu 63.57	30) Zn 65.37	31) Ga 69.9	32) Ge 72.5	33) As 74.96	34) Se 79.2	35) Br $\begin{cases} 79 \\ 81 \end{cases}$			
4	36) Kr $\begin{cases} 78.80 \\ 82.83 \\ 84.86 \end{cases}$	37) Rb $\begin{cases} 85 \\ 87 \end{cases}$	38) Sr 87.83	39) Y 87.7	40) Zr 90.6	41) Nb 93.5	42) Mo 96.0	43) —	44) Ru 101.7	45) Rh 102.9	46) Pd 106.7
		47) Ag 107.88	48) Cd 112.40	49) In 114.8	50) Sn 118.7	51) Sb 120.2	52) Te 127.5	53) J 126.92			
5	54) Xe $\begin{cases} 129 \\ 131 \\ 132 \\ 134 \\ 136 \end{cases}$	55) Cs 132.81	56) Ba 137.37	57 до 72) Редкие металлы		73) Ta 181.5	74) W 184.0	75) —	76) Os 190.9	77) Ir 193.1	78) Pt 195.2
		79) Au 197.2	80) Hg $\begin{cases} 197 \\ \text{до } 204 \end{cases}$	81) Tl $\begin{cases} 204 \\ \text{до } 210 \end{cases}$	82) Pb $\begin{cases} 206 \\ \text{до } 214 \end{cases}$	83) Bi $\begin{cases} 208 \\ \text{до } 214 \end{cases}$	84) Po $\begin{cases} 210 \\ \text{до } 218 \end{cases}$	85) —			
6	86) Em $\begin{cases} 218 \\ 220 \\ 222 \end{cases}$	87) —	88) Ra $\begin{cases} 222 \\ \text{до } 228 \end{cases}$	89) Ac $\begin{cases} 226 \\ \text{до } 228 \end{cases}$	90) Th $\begin{cases} 226 \\ \text{до } 234 \end{cases}$	91) Pa $\begin{cases} 230 \\ \text{до } 234 \end{cases}$	92) U $\begin{cases} 234 \\ \text{до } 238 \end{cases}$				

Второй большой период, четвертый в таблице, почти тождествен с третьим. Отклонения, которые в третьем периоде проявлялись по сравнению с двумя первыми, воспроизводятся и здесь с точностью в тех же местах.

Пятый период еще более длинен. Он включает 32 члена. Он похож на два предыдущих с той разницей, что в первом полу-периоде, клетки III и IV групп заняты 16-тью элементами очень близкими между собой, — редкими металлами.

Наконец, шестой период начинается, как другие, но его элементы неустойчивы, радиоактивны. Он заканчивается ураном. Возможно, что это, так сказать, случайная остановка, вызванная просто степенью прочности, так как наиболее тяжелые элементы слишком радиоактивны, чтобы существовать в заметных количествах на поверхности нашей планеты.

Рассмотрим ближе некоторые характерные свойства семейств или групп элементов, соответствующих каждая вертикальному столбу периодической таблицы. Мы ограничимся первыми двумя наиболее простыми периодами. Как заметил уже Менделеев, химическая валентность изменяется непрерывно от одной группы к другой.

Это сразу видно из нижеследующей таблицы (стр. 16). Но чтобы результаты были ясны, нужно:

1. Делать различие между соединениями с хлором или кислородом, в которых проявляются электро-положительные валентности, и соединениями с водородом или щелочными металлами, которые соответствуют электро-отрицательным валентностям ¹⁾);

2. Обозначать в каждом случае только максимальную валентность (мы поместили в таблицу, насколько это возможно, только обычные, хорошо известные вещества).

Из рассмотрения этой таблицы непосредственно вытекают следующие законы, имеющие значение по крайней мере для первых периодов таблицы.

1. Число электроположительных валентностей равняется порядковому номеру группы. По мере

¹⁾ Щелочные металлы и водород представляют тип электроположительных элементов, хлор и кислород — электроотрицательных. Валентности одного знака насыщаются путем соединения с валентностями противоположного знака.

Группы	0	I	II	III	IV	V	VI	VII
Электроположительные валентности	—	LiCl Li ₂ O	MgCl ₂ MgO	AlCl ₃ Al ₂ O ₃	CCl ₄ CO ₂	NCl ₅ N ₂ O ₅	SO ₃ CrO ₃	Cl ₂ O ₇ Mn ₂ O ₇
Характер насыщенных окислов	—	сильные основания	сильные основания	слабые основания или кислоты	слабые кислоты	сильные кислоты	сильные кислоты	сильные кислоты
	—	очень устойчивы	очень устойчивы	понижающаяся устойчивость →				
Электроотрицательные валентности	—	—	—	—	CH ₄ SiH ₄	NH ₃ PH ₃	OH ₂ SH ₂	FH SiH
Характер насыщенных водородных соединений	—	—	—	—	нейтральные	основные или нейтральные	слабые кислоты или нейтральные	сильные кислоты
	—	неизвестны	←			понижающаяся устойчивость	устойчивы	очень устойчивы
Ионы в водном растворе	—	⁺ Li	⁺⁺ Be	⁺⁺⁺ Al	—	—	[—] O	[—] F
	—	⁺ Na	⁺⁺ Mg	—	—	—	[—] S редки	[—] Cl

того как оно увеличивается, уменьшаются отчетливость положительных свойств и соответствующие средства¹⁾.

2. Число электроотрицательных валентностей равняется 8 минус порядковый номер группы. По мере того как оно возрастает, уменьшаются отчетливость отрицательных свойств и соответствующие средства.

3. Общее число валентностей (положительных и отрицательных) постоянно и равно 8.

Элементы IV группы, в особенности углерод, представляют чрезвычайно интересный случай. Этот элемент находится в середине таблицы, на равном расстоянии от щелочных металлов и от галоидов; четыре его валентности могут быть рассматриваемы по желанию, как положительные или отрицательные, их электрохимический характер зависит от тех веществ, которые они удерживают. Это по существу пассивный элемент и может дать, следовательно, большое разнообразие соединений, так как он вступает в связь со всеми веществами, которые ему представляются. Этим же объясняется его почти постоянная четырехвалентность.

Электронная интерпретация этих законов так проста, что она тотчас же сама собой напрашивается.

Прежде всего, как известно, с электроположительным характером металлов связан ряд физических свойств, обнаруживающих ту особенную легкость, с которой атомы теряют электроны: металлическая проводимость, сильное отражение света и в особенности положение в ряду напряжений Вольта. Это положение представляет количественное выражение того стремления, которое проявляет элемент к восприятию положительного заряда, теряя электроны под влиянием различных причин: ультрафиолетового света, теплоты или простого соприкосновения с другим элементом.

Этот ряд фактов приводит нас к положениям, уже давно открытым Друде²⁾, Дж. Дж. Томсоном, Штарком и другими.

¹⁾ Правила устойчивости справедливы только в общем, в среднем.

²⁾ Друде пришел к ним путем истолкования формул дисперсии (нормальная дисперсия света); это другая группа фактов, приводящих к тем же заключениям.

Каждая положительная валентность вызвана электроном, который стремится удалиться от своего атома, оставив ему положительный заряд. Этот электрон в силу необходимости находится на периферии атома. Количество периферических электронов равняется, следовательно, положительной валентности атома, т. е. порядковому номеру группы, в которой он находится.

Нам не было абсолютно необходимо прийти к этим выводам. Но из совокупности фактов создалось определенное впечатление, что наши положения очень близки к истине, по крайней мере, для первых двух групп периодической системы.

Существуют ли периферические электроны у благородных газов, не обладающих совершенно валентностью? Мы вскоре получим ответ на этот вопрос.

Попробуем сначала извлечь все возможные следствия из полученного нами результата: в одном и том же периоде переход от одного элемента к следующему совершается прибавлением одного периферического электрона. С другой стороны необходимо, чтобы весь атом оставался электрически нейтральным. Простейшая гипотеза, которая к тому же вытекает из постепенного приращения массы атомов, состоит в том, что с каждым новым электроном ядро приобретает положительный элементарный заряд.

Итак, атомное число возрастает на единицу при переходе от одного элемента к следующему.

Что же произойдет, когда мы подходим к концу периода, например, к галондам, имеющим семь положительных валентностей? Чтобы понять это, нужно заняться сначала отрицательными валентностями.

Атом обладает отрицательной валентностью, если он стремится приобрести отрицательный электрон.

Таким образом, всякая отрицательная валентность соответствует свободному месту в периферической области атома. Эта область насыщена лишь тогда, когда все отрицательные валентности заполнены.

Одним словом, положительные валентности соответствуют электронам, имеющимся налицо, отрицательные валентности — электронам, которые атом стремится приобрести. Так как сумма обеих валентностей равна восьми, то можно сказать:

Периферическая область атома насыщена, когда она содержит восемь электронов (по крайней мере, для первых периодов системы, — оставляя гелий в стороне).

Если же прибавить один электрон (и один положительный элементарный заряд) к одному из галоидов (фтору), мы получим насыщенный элемент, чрезвычайно устойчивый и химически инертный, один из благородных газов (неон). От атома неона легко перейти к соседнему атому, натрию. Так как периферический слой неона насыщен, новый электрон может поместиться только вне этого слоя, который из периферического становится внутренним. Соответствующий элемент, следовательно, одновалентен и положителен, как литий.

Атомное число всегда увеличивается на единицу при переходе от одного элемента к следующему как внутри одного периода, так и при переходе от одного периода к другому. В новом поверхностном слое у натрия всего один электрон, у хлора 7, у аргона 8. Еще один электрон даст новый щелочной металл, калий: начинает образовываться новый периферический слой. Таким образом объясняется периодичность таблицы Менделеева: химические свойства сходны, если поверхностные слои содержат одинаковое количество электронов (расположенных, вероятно, так же, как и внутри).

Та же теоретическая картина объясняет, почему периодичность не соблюдается строго.

По мере того как атомы усложняются и последовательные слои электронов покрываются одни другими, подобно шелухе луковицы, становится возможным обмен электронов между разными слоями. В то же время атомы делаются более тяжелыми, вырастают, поверхностные слои занимают большее протяжение и содержат все большее и большее количество электронов.

Правила валентности становятся все менее и менее отчетливыми, отрицательные валентности в конце концов исчезают, нет больше металлоидов, атомы содержат слишком много электронов, поверхностные слои слишком удалены от центра, притяжение внешних электронов становится едва заметным ¹⁾.

¹⁾ Дж. Дж. Томсон нашел в гейслеровых трубках атомы ртути, потерявшие восемь электронов.

В последних периодах законы валентности могут быть заменены более общим положением (Лангмюир)¹⁾.

Атомы стремятся приблизиться к наиболее близкой устойчивой форме, т. е. к наиболее близкому благородному газу.

Таким образом, атомы иода и теллура стремятся, соединяясь с другими атомами, поглотить один или два поверхностных электрона, чтобы принять внешнюю форму атомов ксенона. Цезий и барий стремятся к той же форме, но путем потери электронов. Химическое соединение — это просто обмен электронов между атомами. Например, в иодистом цезии каждый из двух атомов принял устойчивую форму, с восемью периферическими электронами, так как металл отдал свой лишний электрон металлоиду.

Валентность и понятие о химическом семействе отчетливы только для элементов, очень близко расположенных к благородному газу. Для других все становится более расплывчатым, более сложным. В частности, вещества группы VIII (Fe, Pt и т. д.), расположенные на равном расстоянии от двух благородных газов, обладают в известной степени пассивными свойствами углерода. Отсюда стремление их образовать комплексы, аналогичные органическим соединениям.

Попутно можно заметить, что в частях периодической таблицы, где наблюдаются отклонения, сходные элементы вместо того, чтобы располагаться в вертикальные столбцы, следуют друг за другом в горизонтальных рядах: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni;—редкие металлы;—и т. д. Это аналогии иного порядка, чем первые; они будут объяснены, когда будет лучше известна структура поверхностного слоя электронов (Лангмюир уже пытался найти такое объяснение).

Выходит, как будто, что доводы, которые мы привели для установления закона последовательности атомных чисел, не пригодны более для элементов пятого и шестого периода: однако, по счастливой случайности, новые явления—радиоактивные превращения, указывают, что те же законы применимы и к этим элементам, и даже с еще большей убедительностью. Здесь само ядро своим взрывом открывает нам свои свойства.

¹⁾ Это же положение было высказано и подробно развито на три года раньше германским ученым Коссеелем.

Известны два вида радиоактивных превращений. В одних атом разрушается, теряя α -частицу, в других, теряя электрон (β -луч), посылаемый в пространство с огромной энергией (его скорость может достигнуть 290 000 километров в секунду). Мы имеем все основания думать, что этот электрон происходит из ядра так же, как и α -частица. Это ядерный электрон.

Рассмотрим сначала превращения, сопровождающиеся испусканием α -лучей. Ядро, распадаясь, теряет ядро He^{++} , т. е. два элементарных положительных заряда. Его атомное число N уменьшается на две единицы. Если закон последовательности атомных чисел справедлив, можно предвидеть, что он отступит на две клетки в системе Менделеева.

Это проверено опытом во всех случаях (Содди). Таким образом, радий, щелочно-земельный металл, становится эманацией, благородным газом.

Напротив, в превращениях, сопровождающихся β -лучами, ядро теряет отрицательный электрон, его атомное число (положительный заряд) увеличивается на одну единицу, он подвигается вперед на одну клетку в ряду элементов. Таким образом, Ug X , который соответствует торью по своим реакциям, после двух последовательных превращений с β -излучением дает Ug II , тождественный с Ug I .

Нам известно, что с начала до конца серии атомное число возрастает на единицу при переходе от одного элемента к соседнему.

Чтобы окончательно установить эти числа, остается рассмотреть первые элементы таблицы: водород и гелий. Место гелия не подлежит сомнению: это инертный газ, непосредственно предшествующий литию. Количество его электронов также не подлежит сомнению: он содержит их всего два. Мы можем почти с уверенностью это утверждать; α -частицы, какова бы ни была их энергия (которая колоссальна), каковы бы ни были силы, прилагаемые к ним при исключительных толчках (достигающие 5 килограмм), никогда не обладают больше, чем двумя элементарными зарядами.

Известны три формы гелия, — He^+ , He , He^{++} (α -частица) и ни одной больше. Атомное число гелия, следовательно два¹⁾. Что же каса-

¹⁾ Мы приходим к тому же заключению из факта, что α -частицы не

ется водорода, то уже давно известно, что его атомное число равняется единице. К такому заключению пришел Дж. Дж. Томсон в 1911 г. из своих опытов над положительными или канальными лучами, производимыми электрическими разрядами в газах. Никогда не удавалось наблюдать ион водорода, несущий больше одного положительного заряда, а количество наблюдений было значительно.

Первый электронный слой отличается, следовательно, от следующих: он образован всего двумя электронами.

Что касается ядра, $\overset{+}{\text{H}}$ несет один элементарный заряд, $\overset{++}{\text{He}}$ — два, $\overset{+++}{\text{Li}}$ — три и так далее.

Атомное число элемента равняется порядковому номеру, который ему принадлежит в таблице Менделеева.

Для меди порядковый номер 29. Как мы видели, Чадвик нашел прямым измерением $N = 29,3$; следовательно, здесь достигнуто полное совпадение. То же самое число, наконец, было найдено Мозелеем при изучении спектров рентгеновских лучей (XI).

Следовательно, основной величиной, которой подчинены ряды элементов, является заряд ядра, атомное число, а не масса атома. Таким образом объясняются обращения, так долго смущавшие химиков: $\text{A} — \text{K}$; $\text{Co} — \text{Ni}$; $\text{Te} — \text{J}$.

Нужно сделать еще один шаг вперед. Мы знаем с 1913 г., что в одной и той же клетке периодической системы иногда уместятся несколько элементов, имеющих разные атомные массы, но почти неразличимые по их физико-химическим свойствам: это изотопные элементы. Их ядра могут иметь разную структуру и массу; если они несут в целом одинаковые электрические заряды (алгебраическая сумма положительных и отрицательных зарядов), то их химическое сродство, физические свойства, световые и рентгеновские спектры — одинаковы ¹⁾. Эти свойства поверхностно излучают никакого света, не имеют, следовательно, никакого спектра. Они не обладают электронами, способными лученспускать. Все эти соображения к тому же в точности подтверждаются результатами, полученными Боро и Мозелеем (VIII и XI).

1) Некоторые свойства, зависящие непосредственно от массы ядра, слегка изменяются от одного изотопа к другому; таково, например, влияние массы на спектральные линии (IX), но эти изменения очень малы.

сти вполне определяются расположением электронов в атоме, т. е. строением электрического поля, которое там господствует, или, в конечном счете, зарядом ядра. Масса атома становится, следовательно, второй степенной величиной.

Только некоторые более глубокие явления, местом которых является само ядро, а именно радиоактивные явления, зависят от его внутреннего строения, а не от его электрического заряда. Эти явления дали нам впервые возможность различать изотопы, и благодаря им изотопы были открыты (Содди и Фаянс). С тех пор понятие об изотопии было обобщено, многие обыкновенные элементы были разложены (Дж. Дж. Томсон и Астон)¹⁾. Теперь уже вещества действительно простые кажутся исключением.

Резюмируя, мы приходим к следующему представлению об атоме: он обладает очень маленьким (10^{-13} до 10^{-12} сант.) сложным ядром, несущим положительный заряд равный Ne , где e — заряд электрона, N — атомное число или порядковый номер в периодической системе. Электроны, нейтрализующие этот заряд, вращаются вокруг ядра на минимальных расстояниях порядка 10^{-10} сант. и максимальных — порядка 10^{-8} сант. Они располагаются концентрическими слоями, покрывающими друг друга. От последнего периферического слоя зависят химические и световые явления. Рентгеновские же лучи, наоборот, происходят из внутренних слоев.

Два замечания, чтобы закончить этот параграф:

1. Почему щелочные металлы, столь бедные периферическими электронами (у них всего один), с легкостью теряют его, тогда как галоиды, более богатые, содержащие семь электронов, стремятся поглотить восьмой? Ответ очень прост, по крайней мере с качественной точки зрения: одновременно с возрастанием количества электронов увеличивается также заряд ядра, а вследствие этого и сила, притягивающая электроны. Следовательно, чем дальше элемент расположен в периоде, тем он больше сжимается, и его диаметр уменьшается²⁾. Электроны связываются с ядром все более

1) См. элементы, соединенные скобкой в таблице на стр. 14.

2) Это проверено на опыте в общих чертах, но не с абсолютной точностью. Атомный объем, вычисленный, как это делает Лотар Мейер,

и более тесно, их стремление удалиться от него становится все меньше и меньше.

2. Если мы рассмотрим атомные числа благородных газов, поверхностный слой которых насыщен, то увидим, что эти числа подчиняются простому закону (Ридберг, 1914):

Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Ксенон	Эманация
2	10	18	36	54	86
2[1 ² + 2 ² + 2 ² + 3 ² + 3 ² + 4 ² + . . .] ¹).					

Я не имею возможности развить здесь все следствия, пока еще довольно неопределенные, но интересные во многих отношениях, которые вывел Лангмюир из этого замечательного числового закона.

В них проявляется глубокий порядок, который царит в атомах.

V. Устойчивость атома. Попробуем теперь определить более точно представление, которое у нас сложилось об атомах. Электроны, притягиваемые ядром с силой, обратно пропорциональной квадратам расстояний, не могут находиться в равновесии под влиянием одних электростатических сил.

Перед нами открываются два пути:

Первый намечен лордом Кельвином и Дж. Дж. Томсоном. Он нас приводит к статической теории атома. Но так как положительное ядро очень мало, равновесие возможно только при введении новых сил, например, магнитного происхождения. Это сделали американские физико-химики Льюис и Лангмюир. Но, какова бы ни была важность их работ, полных остроумных замечаний и представляющих большой интерес для химиков, какова бы ни была простота их модели атома (образы, которые они рисуют нашему уму, геометрического характера, статические), мы

уменьшается, согласно теории, в начале каждого периода но затем, увеличивается. Как это, повидимому, следует из недавних прямых измерений Брагга, вместо того, чтобы увеличиваться, он остается почти постоянным, начиная с IV группы до благородных газов включительно. Во всяком случае он перестает уменьшаться, начиная с III и IV групп. Здесь какое-то затруднение, не разрешенное еще теорией.

1) $2 = 2 \times 1^2$; $10 = 2 \times (1 + 4) = 2(1^2 + 2^2)$; $18 = 2(1^2 + 2^2 + 2^2)$ и т. д.

не можем решиться им следовать. Действительно, их теория, чисто качественная, применима к самым разнообразным химическим явлениям только при введении на каждом шагу новых гипотез.

Вернемся же вместе с Бором к динамическому представлению об атоме, предложенному Э. Резерфордом: электроны вращаются вокруг ядра; электрические силы уравниваются центробежной силой, силой инерции.

Но здесь мы сталкиваемся с только что указанным затруднением: постоянное ускорение электронов, каждое мгновение направляемых к положительному центру, сопровождается излучением. Атом неустойчив.

Мы, следовательно, вынуждены и с этой точки зрения ввести дополнительную гипотезу. Необходимо, чтобы, по неизвестной причине, эллиптические траектории электронов вокруг ядра пробегались ими без излучения, чтобы они были стационарными, т. е. устойчивыми.

Однако, в то время как Резерфорд развивал свою ядерную теорию атома, было уже известно, что явления излучения в общем не повинуются уравнениям электромагнитной теории Максвелла и Лоренца. В частности, было известно, что во многих случаях на опыте не оправдывается основной закон, в силу которого каждое ускорение должно сопровождаться излучением волны. С 1900 г. получила развитие новая теория; она разрешила по немногу большое количество противоречий, которые опыт обнаружил между фактами и классическими идеями. Это—теория квант М. Планка. Было естественно подумать о квантах, чтобы дополнить наше представление об атоме. Можно было в то же время предвидеть возможность объяснить испускание спектральных линий и их группировку в серии,—эта задача давно занимала физиков, но она считалась неразрешимой при помощи классических методов.

VI. Кванты ¹⁾. Гипотеза квант представляется в двух видах.

¹⁾ В дальнейшем будет часто речь о частоте периодических явлений, световых колебаний, обращений электронов. Это — число полных колебаний (или обращений), совершаемых в секунду. Переменный ток с тридцатью периодами в секунду имеет частоту $\nu = 30$. Его период $T = \frac{1''}{30} = \frac{1}{\nu}$.

1. Чтобы отдать себе отчет в распределении энергии в спектре черного тела, абсолютно необходимо предположить, что материя может обмениваться энергией с эфиром только прерывистыми скачками — квантами. Когда атом лучеиспускает свет частоты ν , он может это сделать только посредством ряда когерентных¹⁾ волн, уносящих целиком конечное количество энергии (закон Планка, обобщенный Эйнштейном):

$$(a) \quad W = h\nu.$$

Для него невозможно излучить часть этой энергии.

Явления поглощения подчиняются, по всей вероятности, тому же закону прерывности.

Коэффициент h в уравнении (a) независим от излучающего источника. Это универсальная константа.

В 1900 г. Планк вычислил ее из данных очень простых в принципе опытов над излучением черного тела (измерение общей излученной энергии при данной температуре, изменение с температурой энергии определенного цвета).

Пользуясь последними результатами, мы получаем при помощи вычисления:

$$h = 6,55 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \times \text{секунд.}$$

Гипотеза прерывного излучения нам навязана фактами. Во многих случаях ее оказалось возможным подвергнуть прямому контролю опыта.

Рассмотрим, например, трубку Кулиджа. Электроны, испускаемые накаленной вольфрамовой нитью (катод) в пустоту настолько совершенную, насколько это возможно, приобретают значительную скорость под влиянием электростатического поля и падают на антикатод. Между катодом и антикатодом имеется разность потенциалов V , которою, по самому ее определению, измеряется энергия, сообщенная электрическим полем единице электрического заряда во время ее прохождения через трубку. Так, в момент падения на антикатод электроны, заряд которых равен e , обладают энергией $W = eV$.

¹⁾ Когерентными называются волны, имеющие на всем своем протяжении одинаковые фазы.

Антикатод под влиянием электронных ударов, испускает рентгеновские лучи. Они обыкновенно образуют довольно сложный спектр, который можно анализировать при помощи спектрографа с кристаллической пластинкой: помимо линий, характеризующих металл антикатада, имеется сплошной спектр, обладающий совершенно отчетливой границей со стороны коротких длин волны.

Частота ν этой границы может быть измерена очень точно. При увеличении вольтажа трубки Кулиджа наблюдается правильное увеличение этой частоты и перемещение в спектре согласно закону пропорциональности, т. е. закону Планка - Эйнштейна.

$$(a') \quad Ve = W = h\nu.$$

Это уравнение дает математическое выражение факта, известного со времени открытия рентгеновских лучей: жесткость лучей увеличивается с вольтажем¹⁾. Это было проверено с большой точностью, между прочим, Блэком и Дуаном в Америке. Эти опыты допускают, вероятно, наиболее простое и точное измерение константы Планка h . Принимая для заряда электрона величину, непосредственно определенную Милликаном, $e = 4,774 \cdot 10^{10}$ электростатических единиц, американские физики нашли:

$$h = 6,555 \cdot 10^{-27} \text{ C. G. S.}$$

Я настаиваю на глубоком значении этих фактов, которые, так сказать, дают нам возможность дотронуться пальцем до кванта: какова бы ни была его природа, антикатод, ударяемый электронами с кинетической энергией W , не дает никакого излучения с частотой высшей, чем $\nu = \frac{W}{h}$. От этой границы резко начинается сплошной спектр. Затем, если W достаточно велико, появляются характерные линии антикатада, но только те, частота которых ниже частоты границы ν сплошного спектра.

Совершенно аналогичные явления имеют место при испускании видимого спектра.

Возьмем маленькую трубку Кулиджа, наполненную, например, парами натрия при низком давлении, установим между метал-

¹⁾ Жесткость — способность проникать через непрозрачные тела, увеличивается с уменьшением длины волны.

лической нитью (катод) и анодом разность потенциалов, которую будем медленно увеличивать. Сначала мы ничего не видим. Но, начиная с вполне определенного значения потенциала V , атомы натрия становятся светящими и начинают излучать линию D ¹⁾. Эта разность потенциалов, называемая резонансным потенциалом линии D , связана с частотой излучаемой линии уравнением (a')

$$eV = h\nu.$$

Длина волны λ линии D — 0,589 микрона, $\nu = 5,09 \cdot 10^{14}$. Уравнение Планка, следовательно, дает:

$$V = \frac{h\nu}{e} = \frac{6,55 \cdot 10^{-27} \cdot 5,09 \cdot 10^{14}}{4,77 \cdot 10^{-10}} = 6,94 \cdot 10^{-2} \text{ электростат. единиц} = \\ = 6,94 \cdot 10^{-2} \cdot 300 = 2,08 \text{ вольта } ^2).$$

Опыт дает 2,12 вольта. Совпадение с теорией очень хорошее. Пары других металлов дают сходные результаты (Франк и Герц, Тэт и Фут, Дэвис и Гаучер, Мак Леннан и др.).

Явления поглощения, превращения световой энергии в кинетическую, подчиняются аналогичным законам. Свет или рентгеновские лучи, падая на металл, вызывают излучение катодных частичек (корпускул, электронов). Они выбрасываются в пространство с кинетической энергией, которая связана с частотой уравнением Планка-Эйнштейна, или уравнением, очень близким ему по форме. Таковы явления, составляющие фотоэлектрический эффект, к которым Эйнштейн применял теорию квант, начиная с 1905 года. Точная экспериментальная проверка была сделана очень недавно (Милликаном для света; де-Брольи для X-лучей).

2. Переходим к второму виду новой теории.

Как мы видели, материя излучает энергию только квантами, уносящими в пространство конечное количество энергии.

Отсюда следует, что атом должен находиться в некоторых особых условиях, чтобы быть светящим. Например, он может испускать спектральную линию частоты ν только в том случае, если обладает квантом энергии, соответствующим $h\nu$. Более того, как только механизм лучеиспускания пущен в ход, оно продолжается до конца.

¹⁾ В действительности опыт не так прост. Первые результаты этого рода были получены с парами ртути.

²⁾ Электростатическая единица потенциала равна 300 вольт.

Если, напротив, механизм не начал действовать, электрические заряды, составляющие атом, могут получать ускорения, не лучеиспуская, могут возвращаться в свое первоначальное состояние, описывать замкнутые орбиты, не обмениваясь энергией с эфиром. Они сохраняют, следовательно, беспредельно свою начальную энергию. Эти орбиты будут устойчивыми, или, как выражается Бор, стационарными

Все это справедливо не только по отношению к электронам, но и к положительным ядрам, которые отличаются от электронов только своей бóльшей массой.

Итак, мы видим, что гипотеза лучеиспускания квантами ведет к выводу о существовании стационарных траекторий. Теперь нужно найти, каковы эти траектории. Было довольно трудно определить, каким динамическим условиям они соответствуют. Случайность обусловила эволюцию наших идей в этом вопросе. Только понемногу и постепенно мог быть установлен порядок. В конце концов пришли к очень общему выражению, хотя и очень абстрактному, которое в нашем уме не соответствует еще никакому физическому представлению. Постараемся сказать об этом несколько слов.

Рассмотрим сначала вместе с Планком электрический осциллятор, способный производить периодические колебания вполне определенной частоты ν (Планк называет его резонатором). Оказывается, что атомы твердых тел совершают вокруг своего положения равновесия периодические колебания¹⁾ и образуют резонатор в смысле Планка.

Но, мы только что видели, что в эфире энергия световых колебаний (в действительности электромагнитных), частоты ν , может увеличиваться или уменьшаться только квантами $h\nu$. Кажется вполне естественным распространить этот закон на резонаторы, представляющие собой колеблющиеся системы²⁾, энергия которых

¹⁾ В действительности, эти колебания не одной частоты ν , а образуют целый гармонический спектр. Можно для упрощения пренебречь этим спектром и приписать одному виду атомных резонаторов одну только частоту колебаний ν . Это то и сделал Эйнштейн в своей теории удельных теплот (1905). Существование гармонических обертонов ничего не меняет в принципе и очень мало влияет на результаты.

²⁾ Эта гипотеза кажется еще более естественной, если принять вместе с Планком и Эйнштейном, что подобные резонаторы могут посылать или поглощать только волны с частотой, равной их собственной

также весьма вероятно электромагнитного вида. Итак, состояние покоя, для которого энергия равна нулю, очевидно устойчивое состояние. Резонатор с частотой ν может прийти в движение, только поглощая квант $h\nu$; тогда он придет в новое состояние, колебательное, которое тоже будет устойчивым, так как понадобится выделение или поглощение целого кванта, чтобы выйти из него. Энергия этого нового состояния будет $h\nu$. Поглощение второго кванта приводит нас к третьему устойчивому состоянию энергии $2h\nu$ и так далее. Стационарные состояния резонатора с частотой ν , будут, следовательно, определяться условием:

$$W = nh\nu,$$

где W —энергия, а n какое-нибудь целое положительное число.

Это уравнение представляет основу теории удельных теплот Эйнштейна. Ее следствия совпадают с экспериментальными результатами.

Теперь можно было бы попробовать распространить этот основной закон на движения электронов внутри атома, хотя это уже не колебания, а обращения вокруг положительного ядра. Стационарными траекториями могли бы быть еще те, которые удовлетворяют уравнению $W = nh\nu$, где ν — частота обращения электрона вокруг ядра.

Возможно, что такая гипотеза приходила в голову Бору, но ее следствия не оправдались на опыте.

После некоторых колебаний Бор нашел наконец условие, которому отвечают стационарные орбиты, в форме уже открытой несколько ранее Никольсоном. Он заметил, что это условие в применении к колебательным явлениям равноценно Планковскому. С тех пор Зоммерфельд, Планк, Шварцшильд и Эйнштейн обобщили условие Бора и Никольсона. Мы

частоте ν . Переход из одного устойчивого состояния в другое происходит в таком случае путем выделения или поглощения кванта света. Это последнее предположение совершенно оправдалось на опыте для случая твердых тел. Частоты полос оптического поглощения и испускания твердых тел (остаточные лучи) равняются тем, которые предвидит для собственных колебаний атомов теория удельных теплот (Нернст) или теория упругости. Наоборот, периоды обращения электронов вокруг положительного ядра имеют лишь отдаленное отношение к периодам спектральных линий, которые они могут излучать (IX).

обладаем в настоящее время настолько же точным, насколько изящным, выражением гипотезы квант, которое применяется ко всем без исключения частным случаям. К сожалению, оно представлено в очень абстрактной форме, так как вводит понятие действия (кинетической энергии, умноженной на время, или количества движения, умноженного на длину), основной механической величины, играющей столь же важную роль в теории относительности, как и в теории квант, но с которой мы еще не привыкли обращаться. Не нужно удивляться, что здесь вводится понятие действия, так как константа h , представляющая собой энергию, умноженную на время, это атом действия, физическая единица такой же важности, как электрон, единица электрического заряда¹⁾.

Я здесь ограничусь указанием на изменение этого общего условия стационарных траекторий в случае, если движущееся тело (электрон) вращается вокруг притягивающего центра (ядра), описывая круговую траекторию радиуса a . В этом случае действие,

¹⁾ Вот одно из наиболее общих выражений. Если дана материальная система, состояние которой зависит от некоторого количества независимых переменных или параметров (координаты, углы и т. д.), то всякое стационарное движение этой системы удовлетворяет следующему условию: когда один какой-нибудь из параметров q возвращается в свое первоначальное состояние, описав замкнутый цикл, действие, которое он проявляет во время этого движения, является целым кратным числа h . Действие, проявленное параметром q , выражается интегралом $\int p dq$, распространяемым на весь цикл значений, пройденных параметром; p — это количество движения или, правильнее, момент, соответствующий параметру q ; следовательно $\int p dq = nh$. Если имеется r независимых параметров, имеется r условий такого рода.

Легко видеть, что уравнение (1) представляет непосредственное применение этого условия к круговому движению. Возьмем в качестве независимого параметра q длину дуги, описываемой электроном по кругу, начиная от какого-нибудь начального положения; соответствующий момент p — это количество движения mv , которое постоянно, $\int p dq = mv \int dq = mv \times 2\pi a$, т. е. интеграл взят на протяжении полного круга.

Легко проверить, что уравнение Планка, относящееся к прямолинейному осцилятору, представляет другой частный случай этого общего закона. Действие, проявленное во время полного колебания, равняется энергии W , умноженной на период T . Следовательно, $WT = nh$, и, так как $T = \frac{1}{\nu}$, $W = nh\nu$.

проявленное электроном в то время как он описывает полный круг, равно произведению количества движения $m\nu$ (остающегося постоянным)¹⁾ на длину окружности $2\pi a$.

Это произведение кратно h , т. е.

$$m\nu \times 2\pi a = nh.$$

Мы скоро используем это уравнение, которое должно быть принято за исходную точку, хотя в настоящее время мы не можем его связать ни с чем. Можно смело сказать, что в настоящее время никто не познал еще глубокого смысла законов квант. Все, что известно, сводится к тому, что следствия из них согласуются с опытом во всех случаях, где теория могла быть развита до конца.

VII. Серии спектральных линий.—Раньше чем видеть, каким образом изложенные гипотезы позволили Бору развить наши представления об атомах, нужно вкратце изучить экспериментальные результаты, которые он координировал в своей теории и которые постоянно руководили им в его работах.

Основной факт сводится к следующему: линии наиболее простых спектров группируются в серии, которые следуют совершенно особым законам.

Первая открытая серия и наиболее важная из всех—это серия водорода. Хорошо известные линии $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ и следующие затем ультрафиолетовые линии. (всего их известно 28, последние только в спектрах некоторых звезд) располагаются по очень точному закону Бальмера (1885).

Перенумеруем каждую из последовательных линий в том порядке, в каком они расположены, от красного к ультрафиолетовому. Возьмем две оси координат и отложим на оси абсцисс номера.

Было бы правильно нанести на ось ординат частоты ν , но более удобно взять числа, непосредственно получаемые из опыта и пропорциональные частотам, именно—обратные величины длин

¹⁾ Единственная сила, действующая на электрон, притяжение ядра, радиальна, нормальна к орбите и, следовательно, неспособна изменить скорость ν . Она остается постоянной по абсолютной величине и меняет только направление.

волн в пустоте

$$\nu' = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c},$$

где c — скорость света в пустоте ¹⁾.

ν' можно назвать, как это сделал Риц, числом волн; это количество волн, занимающих на протяжении луча длину, равную одному сантиметру. Длины волн λ и, следовательно, числа ν' хорошо известны, с приближением до одной миллионной их величины. Скорость света известна значительно хуже с возможной ошибкой в $10/100$; следовательно, лучше ее не вводить в вычисления.

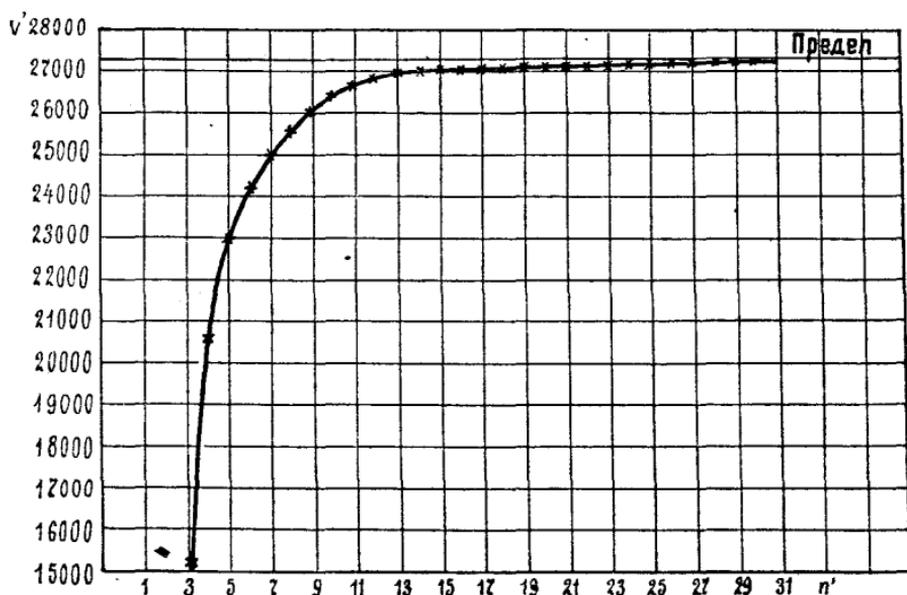


Рис. 2.

Как видно на рис. 2, полученные таким образом для различных линий точки располагаются на очень правильной кривой. Ее

¹⁾ Напомню хорошо известные отношения $\lambda = cT$ (T -период) и

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

уравнение сравнительно простой формы:

$$\nu' = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R = 109\,677,69.$$

n' представляет абсциссу точки ν' . Нас интересуют только целые значения порядковых номеров n' , и среди них те, которые дают положительные величины для числа волн ν' . Можно, следовательно, брать для n' все целые значения большие двух (при $n' = 2$, $\nu' = 0$): $n' = 3, 4 \dots$ и т. д. Каждому из них соответствует линия. Линия $n' = 3$ — это основная линия водорода, первая в серии H_α .

Кривая и предыдущее уравнение выражают закон Бальмера, вероятно, наиболее точный во всей физике: числа волн, вычисленные по этой формуле, совпадают с измеренными с точностью не меньшей, чем $\frac{1}{200\,000}$ их величины.

На кривой можно заметить, что серия не распространяется до бесконечности в сторону ультрафиолетовых лучей, но что она имеет предел, к которому стремятся линии, сближаясь все больше и больше по мере увеличения их порядкового номера n' . Рис. 3 ясно показывает правильное расположение линий и их скопление

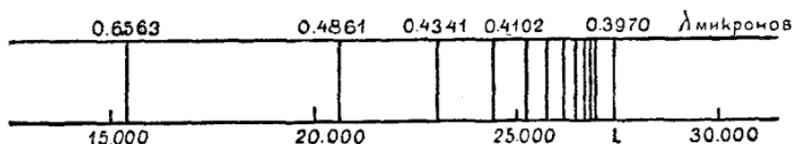


Рис. 3.

у предела L , к которому они приближаются, становясь все менее и менее интенсивными.

Число волн ν'_∞ этого предела получается, принимая в предыдущей формуле $n' = \infty$:

$$\nu'_\infty = \frac{R}{4}.$$

Величина R является основной в этой теории, ее называют константой Ридберга; она повторяется, как мы увидим, во всех формулах спектральных серий.

У водорода имеется еще одна ультрафиолетовая серия (Лайман)

$$\nu' = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' = 2, 3, 4, \dots,$$

и серия инфра красная (Пашен)

$$\nu' = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' = 4, 5, \dots,$$

так что можно сказать вместе с Ридом, что все возможные линии водорода вытекают из следующей общей формулы:

$$(2) \quad \nu' = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right),$$

где n и n' какие-нибудь целые числа.

У гелия найдены аналогичные серии, которые в течение долгого времени приписывались водороду. Но Бор из теоретических соображений, которые скоро будут выяснены, не колеблясь признал в них излучение положительных одновалентных ионов гелия He^+ . Опыт скоро подтвердил его соображения. Эти серии изображаются формулами:

$$\nu' = 4R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' = 5, 6, \dots \quad (\text{серия Пикеринга})$$

$$\nu' = 4R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad n' = 4, 5, 6, \dots \quad (\text{серия Фаулера}).$$

Константа R сохраняет с очень большим приближением ту же величину, что у водорода.

Линии иона He^+ могут, следовательно, быть выражены общей формулой, вполне аналогичной формуле Бальмера-Рица (2)

$$(2) \quad \nu' = 4R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right).$$

Много других элементов, не ионизированный гелий, щелочные, щелочноземельные металлы и т. д. образуют серии, подчиняющиеся формулам того же типа, но более сложным.

Всегда частота ν , или величина ν' , даются, как в формуле (2), разностью двух членов, из которых каждый за-

висит от целого числа n и n' . Эта разность всегда множится на константу Ридберга R , являющуюся универсальной.

VIII. Теория Бора. Прелыдушее замечание и послужило точкой отправления для работы Бора: частота дается разностью двух членов. Сравним это с уравнением Планка-Эйнштейна $W = h\nu$, или (разделив обе части равенства на h) $\nu = \frac{W}{h}$. Мы приходим естественным образом к изображению этого уравнения в форме разности: $\nu = \frac{w - w'}{h}$ и можем истолковать его следующим образом: $w - w'$ представляет излученную атомом энергию во время его перехода из одного стационарного динамического состояния в другое. Следовательно, w и w' это энергия каждого из этих двух состояний.

Таким образом, мы приходим вместе с Бором к следующему представлению:

Стационарная траектория не излучает; излучение имеет место, когда электрон переходит с одной стационарной траектории на другую; частота этой линии пропорциональна уменьшению энергии, которая сопровождает этот переход.

Остается вычислить энергию стационарных состояний атома.

Попробуем выразить со всей возможной ясностью гипотезы, лежащие в основе этих вычислений.

1. Динамическое равновесие атомов в их стационарном состоянии управляется обычными законами механики [или более общими законами принципа относительности, если скорости очень велики (XII)]. Силы, действующие между электронами и ядром — это электростатические силы Кулона.

2. К механическим законам просто и ясно присоединяется условие стационарных траекторий. Мы всегда вынуждены брать в основание теории одновременно гипотезу квант и механические принципы, которые на первый взгляд кажутся противоречащими друг другу. Возможно, что этого противоречия не существует ¹⁾. Новые идеи противоречат классическим предста-

¹⁾ Это стало особенно вероятным после новых работ Бора о „принципе соответствия“.

влениям только в одном случае: теории излучения, испускания и поглощения света.

3. Электрон в атоме обладает теми же свойствами, что и в свободном состоянии, тем же электрическим зарядом, что очевидно, и тою же массой, что может показаться более странным; но это диктуется фактами ¹⁾.

Исходя из этих гипотез, вычисление может быть проделано до конца лишь в одном очень простом случае, в случае ядра с зарядом $+Ne$, вокруг которого обращается один электрон с зарядом $-e$. Это случай атома водорода, ядро которого в 1847 раз тяжелее электрона, но несет тот же заряд e ($N=1$), а также иона гелия He^+ (ядро гелия He^{++} , вокруг которого обращается один электрон, $N=2$).

Орбита электрона обычно представляет эллипс. Механическая задача не отличается от той, которая представляется при изменении движения планет (Кеплер, Ньютон).

Чтобы упростить вычисление, рассмотрим только круговые траектории. Пусть a радиус одной из этих окружностей. Условие квант принимает в таком случае форму (1).

Сила, удерживающая электрон около ядра — электростатическое притяжение $\frac{Ne^2}{a}$, где a радиус орбиты.

Электрон упал бы на ядро под влиянием этой силы, если бы его не удерживала на расстоянии центробежная сила, значение которой $\frac{mv^2}{a}$ хорошо известно. Здесь v — скорость движения электрона по его траектории.

Написав, что между центробежной силой и электростатическим притяжением существует равновесие, получим уравнение:

$$(3) \quad \frac{mv^2}{a} = \frac{Ne^2}{a^2}$$

Назовем f частоту обращения, число оборотов, совершаемых электроном вокруг ядра в секунду, через T — время одного оборота;

¹⁾ Это станет скоро более понятным. Результаты, полученные Коттоном и Вейссом при изучении явления Зеемана, сделали эту идею более приемлемой.

тогда

$$f = \frac{1}{T}.$$

Скорость v определяется отношением пройденного расстояния (т. е. длины одного оборота $2\pi a$) ко времени T :

$$(4) \quad v = \frac{2\pi a}{T} = 2\pi a f.$$

Уравнение (3) траектории может быть написано:

$$(5) \quad 4\pi^2 a f^2 m = \frac{Ne^2}{a^2}.$$

Вычислим полную энергию системы w , т. е. сумму энергий кинетической и потенциальной. Сначала, кинетическая энергия может быть написана по (4)

$$w_{\text{кин.}} = \frac{mv^2}{2} = 2\pi^2 a^2 f^2 m$$

или, принимая во внимание (5), оба члена которого умножаются на $\frac{a}{2}$,

$$w_{\text{кин.}} = \frac{Ne^2}{2a}.$$

Потенциальная энергия представляет результат электростатического притяжения. Она достигает максимума, когда электрон удален от ядра, насколько это возможно, и уменьшается по мере его приближения. Назовем w_∞ максимальную потенциальную энергию электрона, бесконечно удаленного от ядра; из хорошо известных электростатических формул и из теории притяжения следует:

$$w_{\text{пот.}} = w_\infty - \frac{Ne^2}{a}.$$

Отсюда, полная энергия равняется:

$$(6) \quad w = w_{\text{кин.}} + w_{\text{пот.}} = w_\infty - \frac{Ne^2}{2a};$$

это все, что нам дает чистая механика.

Теперь нужно ввести уравнение (1) теории квант, которое определит среди всех возможных траекторий те из них, которые стационарны. Количество движения $m v$ может быть написано, по (4),

$$2\pi a f m.$$

Условие стационарных траекторий принимает, следовательно, вид

$$2\pi a f m \times 2\pi a = n h,$$

или

$$f = \frac{n h}{4\pi^2 m a^2}.$$

Заменяя в (5) f этой последней величиной, получаем

$$\frac{4\pi^2 a n^2 h^2 m}{(4\pi^2)^2 m^2 a^4} = \frac{N e^2}{a^2}$$

или, по сокращении:

$$(7) \quad a = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m N e^2}.$$

Радиусы стационарных орбит относятся между собой, как квадраты последовательных целых чисел n . Введя, наконец, величину радиуса (7) в уравнении энергии (6), получим:

$$(8) \quad w = w_{\infty} - \frac{2\pi^2 m N^2 e^4}{n^2 h^2}.$$

Сколько имеется стационарных орбит, столько же целых чисел n , столько и вполне определенных значений радиуса a и энергии w .

Когда электрон переходит с одной стационарной траектории, характеризующейся числом квант n , на другую с числом квант n' , он претерпевает уменьшение энергии:

$$W = w_n - w_{n'} = \frac{2\pi^2 m N^2 e^4}{h^2} \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right].$$

Это уравнение уже очень напоминает уравнение Бальмера и Риза. Остается связать частоту с энергией. Приложение фор-

мулы Планка $\nu = \frac{W}{h}$ само напрашивается. Бору пришла действительно гениальная мысль ввести во второй раз величину h . Он получил таким образом для излучаемой линии.

$$(9) \quad \nu = \frac{W}{h} = \frac{2\pi^2 m^2 N e^4}{h^3} \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right]$$

и для числа волн

$$(10) \quad \nu' = \frac{\nu}{c} = \frac{2\pi^2 m N^2 e^4}{ch^3} \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right] = N^2 R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right),$$

при чем константа R не зависит от природы излучающего атома. Если для водорода примем $N=1$, то в точности воспроизведем формулу Бальмера-Рица.

Число $R = \frac{2\pi^2 m e^4}{ch^3}$ может быть вычислено a priori по данным Милликана $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$, Планка $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ и из данных разных экспериментаторов, которые измерили отношение заряда к массе электрона $\frac{e}{m} = 1,765 \cdot 10^{17}$ электромагнитных единиц $= 5,3 \cdot 10^{17}$ электростатических единиц.

Это вычисление дает $R = 1,0955 \cdot 10^5$.

Из опыта найдено $R = 1,0967769 \cdot 10^5$.

Получается совершенное совпадение.

Что касается диаметров последовательных орбит, их можно вычислить из уравнения (7); для более близкой к ядру орбиты получается ($n=1$) $2a_1 = 1,1 \cdot 10^{-8}$ сант., для следующей, конечной в серии Бальмера, ($n=2$) $2a_2 = 4,4 \cdot 10^{-8}$ сант. и так далее.

Кинетическая теория предвидит для молекулы водорода H_2 диаметр $2,3 \cdot 10^{-8}$, что очень близко к четырехкратному радиусу a_1 . Но это может быть простым совпадением. Не следует смешивать диаметр первой орбиты с диаметром сферы действия атома.

Формула (10) применима к иону He^+ , который отличается от атома H только двойным зарядом ядра, $N=2$, откуда

$$\nu' = 4R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right);$$

это формула, написанная выше. Теперь понятно, почему серии Пикеринга и Фаулера должны были быть отнесены к гелию.

В общем, вот картина, которую можно себе представить относительно излучения водородной линии:

Электрон атома, вследствие удара блуждающего электрона или другого атома или, наконец, при поглощении излучения, приобретает достаточную энергию, чтобы удалиться от ядра и обратиться вокруг него на расстоянии

$$a = \frac{n'^2 h^2}{4\pi^2 m e^2},$$

его движения в этом случае стационарны. Но вдруг, под каким-то еще неизвестным, но, вероятно, очень слабым влиянием, он снова падает на траекторию $n=2$, обладающую особой устойчивостью. Это падение сопровождается абсолютно монохроматическим излучением, частота которого вполне определяется разностью W энергии начального и конечного состояний.

Схема на рисунке 4 показывает орбиты, между которыми перемещается электрон и между которыми излучаются разные линии водорода¹⁾. Каждой серии соответствует вполне определенная траектория, на которую перемещается электрон; наиболее близкой к ядру, для которой число квант n равно единице, соответствует ультрафиолетовая серия Лаймана, траектория $n=2$ соответствует серии Бальмера, $n=3$ — инфракрасной серии.

Нам известны орбиты отправления и орбиты прибытия электрона. Каковы его промежуточные состояния? Посредством какого механизма происходит излучение линии? Мы об этом ничего не знаем.

Все, что нам известно, это то, что некоторая энергия W освобождается и что эта энергия превращается в монохроматический свет частоты $\nu = \frac{W}{h}$.

Мы стоим перед атомом, как дети перед автоматом-распределителем, не зная его механизма. Мы знаем, что положив в него

¹⁾ На рисунке оказалось невозможным увеличивать радиусы стационарных орбит пропорционально квадратам целых последовательных чисел. Последние орбиты должны были быть значительно более удалены от ядра.

несколько монет (некоторую энергию W) мы получим эквивалентное количество лакомств (спектральную линию $\nu = \frac{W}{h}$). Вот и все.

Для других спектров теория более трудна. Приложимы те же принципы, но вычисления представляют громадные трудности. Как только имеется больше одного электрона, мы стоим перед задачей трех тел, которая в течение двух столетий приводит в отчаяние математиков.

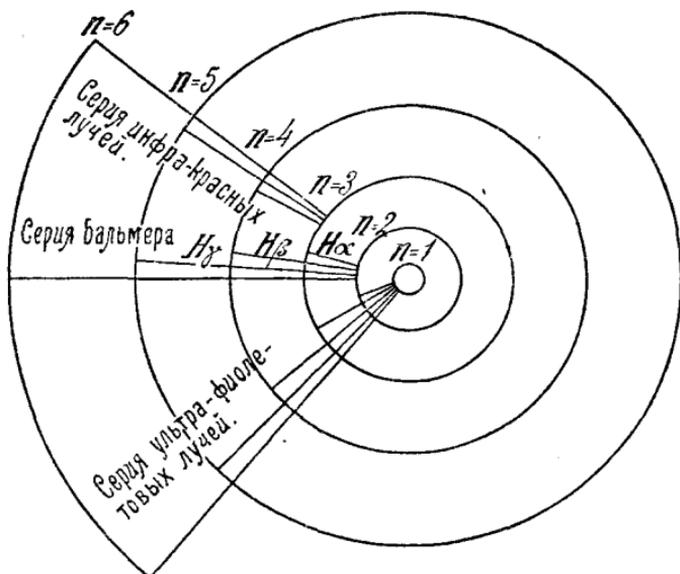


Рис. 4.

Тем не менее были найдены формулы, аналогичные тем, которые получаются из опыта.

Общий механизм всегда один и тот же: электрон периферического слоя удаляется от остального атома и описывает стационарные орбиты, более или менее удаленные; он падает на другую, более близкую орбиту, излучая линию.

Таким образом понятно, почему всегда входит константа Ридберга. Речь идет всегда о светящем электро́не, удаляющемся от атома, общий заряд которого (заряд ядра и оставшихся электронов) равен e для нейтральных атомов, Ze для одновалентных ионов и т. д. Нам приходится в настоящее время довольствоваться

этим качественным результатом¹⁾. Однако, Бору удалось приложить свою теорию к новым проблемам и найти новые численные соответствия, о которых мы скажем несколько слов.

IX. Увлечение ядра. — Одно важное обстоятельство в вычислении линий водорода и иона гелия может обратить на себя внимание. Мы предположили ядро неподвижным, но масса его, правда очень большая, не бесконечна по отношению к массе электрона. При каждом обращении электрона, ядро само вращается вокруг центра тяжести всего атома.

Точная теория должна учитывать это небольшое осложнение. Вычисление просто. В механике доказывается, что законы движения электрона вокруг центра тяжести атома те же, что и вокруг неподвижного ядра. Нужно просто заменить в формулах массу m электрона результирующей массой $\frac{m}{1 + \frac{m}{M}}$, где M — масса ядра.

То же изменение нужно сделать в первом (1) квантовом условии.

Поправка очень мала, так как $\frac{m}{M}$ всегда меньше $\frac{1}{1840}$.

Никаких других изменений в теории не требуется.

Но из этого маленького изменения вытекает очень важное следствие, которое можно проверить на опыте: константа Ридберга R изменяется от одного элемента к другому.

¹⁾ С некоторого времени с одной стороны Ландау, с другой Франк и его сотрудники занялись решением задачи не ионизированного атома гелия, наиболее простого после водорода: одно ядро и два электрона. Теоретические вычисления Ландау представляют, понятно, только приближения, но они уже начинают разъяснять прежние эмпирические результаты, так же, как и новые факты, открытые Франком. Оба электрона не обращаются на одинаковых расстояниях от ядра, хотя обе их траектории соответствуют одинаковому числу квант $n = 1$. Атом гелия существует в двух различных формах в одной, менее устойчивой, орбиты обоих электронов находятся в одной плоскости; в другой — их плоскости пересекаются. Таким образом объясняются два совершенно различных спектра, образованных полными сериями каждый, которые давно наблюдались у гелия и приписывались раньше двум разным элементам — гелию и паргелию. Положения их линий могли быть приблизительно вычислены Ландау. Электрические свойства газа (потенциал и резонанс ионизации) в общем совпадают с теорией.

Действительно, заменив в формуле (10) массу m результирующей массой, мы получим для водорода:

$$(11) \quad R_H = \frac{2\pi^2 e^4}{ch^3} \frac{m}{1 + \frac{m}{M_H}},$$

где M_H — масса ядра водорода; для гелия:

$$(12) \quad R_{He} = \frac{2\pi^2 e^4}{ch^3} \frac{m}{1 + \frac{m}{M_{He}}}.$$

Отношение массы электрона к массе водородного иона $\frac{m}{M_H}$ известно.

Действительно, опыты над отклонением катодных лучей электрическим и магнитным полем дают для отношения электрического заряда к массе электрона: $\frac{e}{m} = 1,765 \cdot 10^7$ электромагнитных единиц.

С другой стороны, константа Фарадея — 9649,4 электромагнитных единиц — это заряд одного грамм-атома водорода, т. е. 1,008 грамма. Следовательно, мы имеем для отношения заряда к массе водородного иона $\frac{e}{M_H} = \frac{9649,4}{1,008}$ электромагнитных единиц¹⁾.

Находим:

$$\frac{m}{M_H} = \frac{e}{M_H} : \frac{e}{m} = \frac{9649,4}{1,008 \cdot 1,765 \cdot 10^7} = \frac{1}{1847};$$

для гелия, атомная масса которого 4,00:

$$\frac{m}{M_{He}} = \frac{m}{M_H} \times \frac{M_H}{M_{He}} = \frac{1}{1847} \times \frac{1,008}{4,00}.$$

Формулы (11) и (12) были проверены опытами Пашена. Измерения, произведенные с наибольшей точностью, какая возможна

¹⁾ Необходимо маленькая поправка, вытекающая из факта, что ион H^+ легче атома H , так как содержит меньше одним электроном. Эту поправку легко принять во внимание, что и сделано в конечном результате.

в спектроскопии, а она, как известно, очень велика, дали:

$$(11') \quad R_{\text{H}} = 109677,691$$

$$(12') \quad R_{\text{He}} = 109722,144.$$

Этими числами мы скоро воспользуемся.

Когда масса ядра очень велика, дробью $\frac{m}{M}$ можно пренебречь, уравнение (10) применяется целиком, и константа Ридберга принимает предельную величину (действительно постоянную):

$$(13) \quad R_{\infty} = \frac{2\pi^2 e^4}{ch^3} m.$$

Очень простое элементарное вычисление дает из уравнений (11) и (12):

$$(13') \quad R_{\infty} = 109\,737,11.$$

Очевидно, что ядро гелия уже можно рассматривать почти как бесконечно тяжелое по отношению к электрону. Для всех других элементов константа Ридберга практически имеет значение R_{∞}^1 .

Х. Вычисление характерных величин электрона.

Предыдущие вычисления чрезвычайно важны для вычисления констант молекулярной теории. Обе величины R_{H} и R_{He} даются опытом с точностью до одной полумиллионной их величины. Мы знаем два уравнения (11) и (12), которые связывают три характерных константы электрона и атомного излучения e , m и h .

Ряд совершенно элементарных вычислений, простых алгебраических преобразований, дает из этих уравнений следующие числовые результаты:

$$\frac{\text{масса электрона}}{\text{масса атома водорода}} = \frac{1}{1\,846,9'}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{\text{заряд электрона}}{\text{масса электрона}} = 1,768\,6 \cdot 10^7 \text{ электромагнитных единиц.}$$

¹⁾ Тем не менее недавно удалось разделить линии двух изотопов свинца. Различие атомных масс M как раз достаточно, чтобы позволить эти опыты.

Прямой опыт дает $1,765 \cdot 10^7$.

Совпадение опыта с теорией прекрасное, но не совершенное; остается уклонение приблизительно в $1,5\%$, что легко объяснить. Прежде всего, непосредственные измерения очень трудны. Затем в вычисление входит разность $R_{\text{He}} - R_{\text{H}}$, очень малая величина по отношению к каждому из этих чисел и, следовательно, менее хорошо известная.

Чтобы вычислить в отдельности каждую из трех величин e , m и h , нужно найти между ними третью зависимость. Теория спектров не дает нам такой зависимости, которую можно было бы проверить с достаточной точностью. Обыкновенно берут величину заряда электрона e , которую Милликан определил непосредственно.

Можно поступать иначе и обойтись без всякого прямого измерения атомных величин, каковыми бы они ни были.

Мы видели в VI, что Блэк и Дуан проверили с крайней точностью зависимость $W = h\nu$ в случае рентгеновских лучей. Можно пользоваться их числовыми данными, устанавливающими третью эмпирическую зависимость между тремя основными величинами e , m и h . Во втором добавлении будут видны подробности вычисления. Здесь приводятся только результаты:

	e в электро- статич. един.	N (число Авогадро) ¹⁾	h
Вычисление из спектроскопических данных	$4,792 \cdot 10^{-10}$	$60,4 \cdot 10^{23}$	$6,55 \cdot 10^{-27}$
Непосредственные измерения (Мил- ликан)	$4,774 \cdot 10^{-10}$	$60,7 \cdot 10^{23}$	$6,545 \cdot 10^{-27}$

Между двумя рядами чисел остается несоответствие только в 5% . В настоящее время мы с достоверностью знаем основные константы атомной теории с точностью того же порядка.

XI. Спектры рентгеновских лучей. Теория спектров рентгеновских лучей очень похожа на теорию серий Бальмера.

Нам известно, что рентгеновский спектр различных элементов состоит из таких же тонких линий, как и световой спектр. Эти линии группируются в несколько серий различной жесткости,

¹⁾ Здесь N означает число Авогадро-Лошмидта, т. е. число молекул газа в одной грамм-молекуле его, а не атомное число элемента, как повсюду.

обозначаемых буквами К, L и M. Рентгеновские спектры различных элементов состоят из одинаковых серий или групп, которые повторяются почти тождественным образом от одного элемента к другому. Наиболее жесткая группа (с наибольшей частотой) — группа К и наиболее яркая из ее линий — K_{α} .

Главными сведениями по этому поводу мы обязаны Мозелею. Начиная с 1913 года, он создал спектральный анализ рентгеновских лучей. Он подверг систематическому измерению линии различных элементов, именно линии группы К.

Вот некоторые из открытых им законов.

По мере того как возрастает атомное число, группа К, состоящая из четырех линий, непрерывно и правильно перемещается вся целиком в сторону коротких длин волн. Это отчетливо видно на рис. 5, который мы позаимствовали из классического мемуара Мозелея. Это также справедливо и относительно других групп L и M.

Рассмотрим более подробно

линию K_{α} . Если отложить на оси ординат корень квадратный ее частоты ν (или, лучше, числа волн ν') в спектрах различных элементов, а на оси абсцисс атомное число N, то получается с большим приближением прямая, уравнение которой:

$$\sqrt{\nu'} = \sqrt{\frac{3}{4} R(N-1)},$$

или, возведя обе части в квадрат и изменив несколько форму:

$$(14) \quad \nu' = R(N-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right),$$

где R — как всегда, константа Ридберга.

Аналогия этой эмпирической зависимости и формул

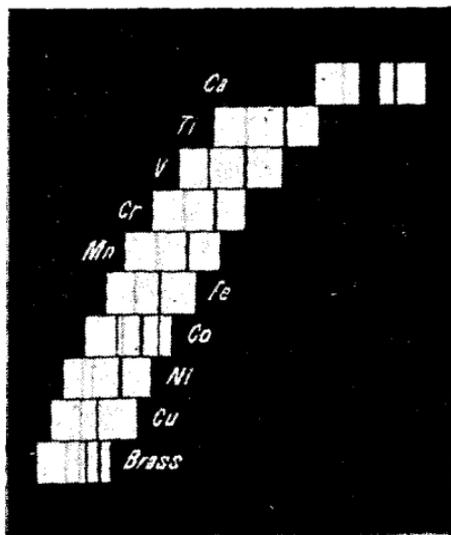


Рис. 5.

Бальмера, Риза и Бора настолько очевидна, что сразу является желание искать соответствующую теорию

Рентгеновские линии, как и видимые линии, очевидно излучаются, когда электрон переходит с одной стационарной траектории на другую. О каком электроне идет речь? Это не может быть периферический электрон, так как положение линий зависит только от природы атома и не изменяется при переходе от простого вещества к его соединениям. Следовательно, речь идет о внутреннем электроне, и так как группа К имеет наибольшую частоту (оставляя в стороне некоторые γ -лучи), то этот электрон должен принадлежать слою наиболее близкому к ядру. Но обыкновенно он там не один. Как мы видели в IV, у него, вероятно, есть сосед¹⁾. Следовательно, поле, под влиянием которого находится излучающий электрон—это поле ядра, слегка измененное его соседями. Что касается внешних слоев, то их поле в среднем исключается почти само собою. Действительно, в первом приближении их можно сравнить с шарами, равномерно заряженными электричеством, внутреннее поле которых равно нулю. Пренебрежем сначала вносящим изменения полем электронов и сохраним только поле ядра. Мы получаем почти в точности случай водородного атома: один электрон в присутствии ядра с зарядом Ne . По уравнению (10) возможные линии даются формулой

$$(15) \quad \nu' = RN^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right).$$

Если мы предположим, что конечная орбита наиболее близка к ядру, нужно принять $n = 1$ (формула 7); если начальная орбита соседняя, $n = 2$, получаем уравнение:

$$\nu' = RN^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right),$$

очень близкое к уравнению Мозелея.

В разнице между теоретическим множителем N^2 и эмпирическим $(N - 1)^2$ нет ничего удивительного. Мы приняли для упрощения вычислений, что светящийся электрон находится один в присутствии ядра. Но на слое $n = 1$, так же, как и на слое $n = 2$, в

¹⁾ См. дополнение стр. 56.

действительности их несколько, они взаимно отталкиваются, и их поле ослабляет поле $\frac{Ne}{a^2}$ ядра. Следовательно, N должно быть заменено меньшим числом.

Дебай пытался дать более полную теорию. Но, чтобы довести вычисления до конца, он принял, как это уже сделал раньше его Бор, что электроны располагаются не сферическими или эллипсоидальными слоями, а плоскими кольцами.

Формула, которую он получил, более обща, чем формула Мозелея. Она хорошо согласуется с экспериментальными результатами и позволяет вычислить количество электронов, занимающих последовательные кольца $n = 1$ и $n = 2$. Эти числа, вероятно, не точны, так как атомы далеко не плоски.

Практическое значение формулы Мозелея очень велико. Она помогла установить, начиная с 1913 г., атомные числа элементов и придать периодической таблице ее современный вид. Исторически она послужила и служит и теперь существенным основанием теории атома Резерфорда и Бора.

Частоты других линий группы К, частоты групп L и M даются формулами аналогичными (14), но менее простыми.

Между этими частотами существуют чрезвычайно интересные зависимости комбинаций, открытые Косселем:

Например, частота линии L_α равна разности частот линий K_β и K_α .

Обозначим частоту линии символом самой линии, тогда предыдущий закон выразится уравнением:

$$(16) \quad \begin{cases} L_\alpha = K_\beta - K_\alpha; \text{ опыт показывает, что точно так же} \\ L_\gamma = K_\gamma - K_\alpha \\ M_\alpha = L_\gamma - L_\alpha = K_\gamma - K_\beta \text{ и т. д. }^1) \end{cases}$$

Объяснение этих фактов очень просто. Как всегда, мы представляем себе, что рентгеновская линия излучается при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую, при чем каждая орбита соответствует данному числу квант n . Но в то время как атом водорода имеет один электрон, атомы, для которых наблюдались рентгеновские спектры, содержат большое количество электро-

1) Зависимости (16) не вполне точны. Это одно из затруднений теории.

нов. Эти электроны должны распределиться между разными стационарными орбитами. В виду сложности атомных систем, несколько электронов могут одновременно существовать на одной и той же траектории и образовать кольцо; несколько колец, соответствующих одному и тому же числу квант, могут переплетаться одно с другим и образовать слой или область, и эти последовательные области, входящие одна в другую (так как диаметр орбит быстро увеличивается с увеличением числа квант n), очевидно те-же, которые нам открывает периодическая система и химические свойства элементов. Только картина сделалась более точной, благодаря введению числа квант n ¹).

Обозначим последовательные слои $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ и т. д. буквами K , L , M и т. д. Очевидно, обозначая через W_M энергию электрона слоя M , будем иметь:

$$W_M - W_L = (W_M - W_K) - (W_L - W_K)$$

и применяя выражение $W_M - W_L = h\nu_L^M$ (ν_L^M — частота линии, излученной во время перехода из области M в область L), а также другие аналогичные выражения для переходов $M \rightarrow K$, $L \rightarrow K$, получим уравнение $\nu_L^M = \nu_K^M - \nu_K^L$, которое в точности воспроизводит тип (16).

Мы приходим таким образом к изображению атома и его последовательных слоев электронов следующей схематической фигурой (Рис. 6). Каждая стрелка соответствует линии рентгеновского спектра, и длина ее пропорциональна частоте. Все зависимости (16) сразу находятся из сравнения длин разных стрелок.

Конечно, это изображение очень не полно, оно далеко не объясняет всех рентгеновских линий. Его пришлось усложнить, подразделить каждую из областей K , L , M , N , и это оказалось еще недостаточным. Из четырнадцати линий серии L имеются только

¹) Два первых электрона, которые находятся в атоме гелия, вероятно, образуют первый слой $n = 1$. Следующие восемь электронов, которые накапливаются в атоме на протяжении первого периода системы элементов ($Li - Ne$), составляют второй слой $n = 2$ и т. д. Но начиная с четвертого у нас нет еще уверенности. Одновременное изучение химических свойств разных элементов и их рентгеновских спектров (в особенности мягких лучей) вскоре даст возможность установить наш взгляд на этот вопрос (см. дополнение I, стр. 56).

пять, происхождение которых кажется хорошо известным¹⁾). Атомные системы настолько сложны, что допустимы всякие гипотезы. С первых шагов, как только мы оставляем атом водорода и ион He^+ , нам

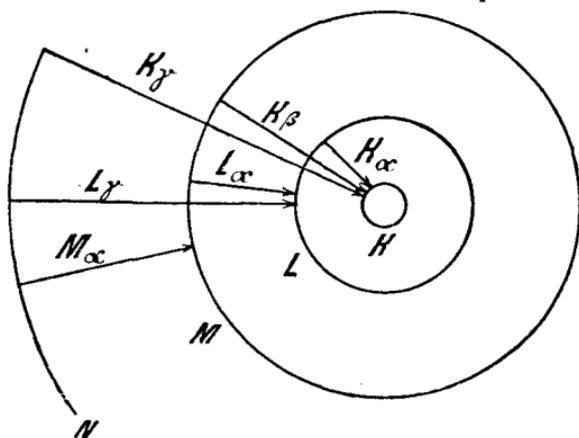


Рис. 6.

не хватает математического аппарата, и мы вынуждены оставаться в неопределенности и действовать ощупью. Но основы теории кажутся верными²⁾).

ХII. Развитие теории. Я могу вам дать лишь краткие указания о последовательных успехах теории Бора.

Прежде всего Зоммерфельд исправил некоторые слишком узкие допущения. В VIII было предположено, что орбиты электронов вокруг ядра атома водорода — окружности. Однако, траектории движущегося тела, притягиваемого центром с силой обратно пропорциональной квадратам расстояний, обычно эллиптически.

Как показал Зоммерфельд, стоит приписать гипотезе квант достаточно общую форму³⁾, чтобы найти в этом случае те же результаты, как и в упрощенной теории.

¹⁾ Недавние работы осветили этот вопрос. Повидимому, в тяжелых атомах существует три различных уровня в слое L, пять в слое M и т. д. См. напр., заметки М. А. Довилье в *Comptes Rendus*, 1921).

²⁾ См. дополнение I, стр. 56.

³⁾ Я намекаю на распространение гипотезы квант на системы, имеющие несколько степеней свободы.

Тогда можно прийти к важному результату: одному и тому же числу квант n соответствует несколько эллипсов, обладающих одинаковой энергией¹⁾. Следовательно, одна и та же линия Бальмера может быть вызвана несколькими различными, но совершенно эквивалентными механизмами: электрон может уйти с какого-нибудь из эллипсов n' , чтобы попасть на какой-нибудь из эллипсов n . Разность энергий n , следовательно, частота линий при этом не изменяются.

Однако, эти различные механизмы эквивалентны только при простейшем допущении, что один электрон находится в присутствии ядра, вдали от всякого нарушающего действия и что динамические законы электрона являются законами обычной механики.

Но скорости v электронов внутри атома значительны. Полагая, например, в водородном атоме $n=2$, находим $v=10^8 \frac{\text{сант}}{\text{сек}}$; в атоме урана, полагая $n=1$, $v=2 \cdot 10^{10}$, или $\frac{2}{3}$ скорости света.

Мы не имеем, следовательно, права пренебрегать изменением массы электрона со скоростью. Нам нужно применить динамику принципа относительности, по отношению к которой обычная динамика является лишь приближением. Это то и сделал Зоммерфельд.

Орбиты остаются почти эллипсами, но с перемещением точки перигелия; их форма и их энергия могут быть вычислены. Орбиты, имеющие одинаковое число квант, не обладают более совершенно одинаковой энергией. Следовательно, различные механизмы, которым обязана линия Бальмера, уже не абсолютно эквивалентны. Частоты, которые они излучают, слегка различны. Линия Бальмера не проста, но комплексна.

Это вполне проверено опытом как для водорода (Майкельсон-Фабри и Бюиссон²⁾), так и для серий иона гелия He^+ (Пашен) и для всех спектров рентгеновских лучей (дублеты K и L). Наблюдаемая тонкая структура оказывалась всегда в полном соответствии с теоретическими результатами. Расстояние обеих линий дублета L урана по шкале частот в семьдесят миллионов

¹⁾ Число этих возможных эллипсов равняется числу квант n .

²⁾ В этом случае опыты предшествовали теории.

раз больше, чем такое же расстояние в дублете H_{α} Бальмера¹⁾, и они оба одинаково хорошо предвидятся теорией. Все эти факты, вместе взятые, представляют наиболее блестящую и наиболее точную проверку теории квант и теории относительности.

Можно еще больше подчеркнуть разницу между возможными механизмами излучения одной и той же линии. Достаточно поместить атом в электрическое поле. В этих условиях орбиты, соответствующие одному и тому же числу квант, а следовательно, и посылающие одну и ту же линию, разделяются; их отклонение пропорционально полю: это эффект Штарка-Ло Сурдо.

Для водорода разложения, наблюдаемые в 1913 г., были прекрасно объяснены теорией (Эпштейн, 1916). Эти факты оставались совершенно необъяснимыми с точки зрения классической теории.

Магнитное поле производит эффект, аналогичный эффекту электрического поля. Это давно известный эффект Зеемана, который новая теория объясняет так же хорошо, но не лучше, чем теория Лоренца.

Мне остается еще сказать о некоторых новых теориях, не находящихся в тесной связи с идеями Бора, но непосредственно вытекающих из электрического представления об атоме: это теории сцепления в кристаллах (М. Борн) и в жидкостях (Дебай).

В твердых телах все упругие силы, притягательные (сцепление) и отталкивательные (сопротивление сжатию), повидимому электростатического происхождения. Больше того, химическое сродство, соединяющее атомы натрия и хлора в кристаллах поваренной соли, теплота, выделяющаяся при соединении этих двух элементов, могут быть определены а priori простым электростатическим вычислением на основании модели атома Резерфорда и Бора.

Точно так же капиллярные силы, внутреннее давление Ван-дер-Ваальса являются лишь выражением электростатических действий между молекулами.

Вы видите, как широко значение электрической теории атома. Тысячи разрозненных фактов без видимой связи между ними, как то: химические явления, световые и рентгеновские спектры, сцепление,

¹⁾ Это отклонение пропорционально четвертой степени атомного числа. Для U , $N = 92$, $N^4 = 7,2 \cdot 10^7$. Этот дублет соответствует двум траекториям, совместимым с числом квант $p = 2$ (см. прим. 1, стр. 52).

капиллярность, упругость, самые различные области, для которых было придумано столько различных форм энергии, классифицируются и находят себе объяснение. Перегородки падают. Все эти виды энергии повидимому сводятся к одной — электромагнитной.

Мы присутствуем в настоящее время при объединении физики, аналогичном тому, которое явилось следствием открытия электрона (1896—1905).

Имеются два новых основания теории: существование положительного ядра, электрона и их электрического и магнитного полей; существование квант.

Введение этой двойной прерывности в естественные законы обновило наше представление о мире.

В эфире — сплошном, текучем и неуловимом пространстве Эйнштейна, — вкраплены атомы электричества положительного и отрицательного, и имеется атом действия h ; это точки опоры, центры всякого силового поля, центры излучения энергии, позволяющие нам еще верить в существование материи.

Но нужно признаться, что гипотезы, лежащие в основе, неясны.

Электрон, образованный отрицательными электрическими зарядами, которые взаимно отталкиваются, не устойчив, если принимать в соображение только его электрическую энергию. Как мыльный пузырь, заряжаемый электрической машиной, раздувается и, наконец, лопается, как только электрические силы начинают превышать капиллярное сцепление, так и электрон разлетелся и дробился бы до бесконечности, если бы его не сдерживала неизвестная энергия, энергия электрического сцепления, которая не может быть электромагнитного происхождения (Макс Абрагам, Г. Пуанкаре). Те же замечания относятся к положительным ядрам, которые, вероятно, мы не вправе отделять от электронов. До сих пор еще не выведены все возможные следствия из принципа сохранения электричества, который связывает каждый отрицательный заряд с эквивалентным положительным зарядом, каждый электрон с ядром водорода, несущим одинаковый, но разноименный заряд.

Что касается гипотезы квант, бесполезно повторять еще раз, что мы ее не понимаем. Она выражает неизвестные свойства электростатического поля, поля электрического взаимодействия положительных ядер, поля более сложного и богатого, чем поле обычного закона Кулона. Электрический заряд ядра сам по

себе определяет всю архитектуру атома, строение, сложность и порядок которого нам открывают световые спектры. Материя, вероятно, состоит только из электричества. Но бедное представление, покрывающее это название, соответствует, вероятно, крайне упрощенному взгляду на действительность.

В этом имеется что то одновременно смущающее и ободряющее.

По мере того как известные факты находят себе место, возникают новые проблемы, открываются новые горизонты.

ДОПОЛНЕНИЕ I

О КОЛИЧЕСТВЕ И О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ

Некоторые физики в последнее время пытались установить точную модель различных атомов и в частности отыскать распределение их электронов (в количестве равном их атомному числу) между слоями K, L, M и т. д. Можно указать на Лангмюира, Вегарда, Довиллье и Л. де-Брольи, самого Бора.

Химические явления сложны, данные рентгеновской спектрографии еще немногочисленны. Очень трудно сделать выбор между всеми возможными гипотезами. Вот, тем не менее, некоторые указания.

В первых двух периодах Менделеевской таблицы (стр. 14) и в начале третьего нет никаких явных затруднений; каждый раз, как атомное число N увеличивается на единицу, новый электрон присоединяется к периферическому слою. Так, гелий имеет один слой из двух электронов, который сохраняется в целой серии элементов: слой K; неон имеет их два, один из двух, другой из восьми электронов; аргон ($N = 18$) — три, обозначаемые буквами K, L и M и несущие соответственно 2, 8 и 8 электронов. Наконец, титан ($N = 22$) имеет четыре слоя электронов и может быть охарактеризован символом строения [2, 8, 8, 4], где каждая цифра изображает электронный заряд последовательных слоев.

Начиная с титана появляются „анормальные“ элементы, окруженные пунктирной линией в таблице на стр. 14. Первые шесть очень похожи друг на друга: V, Cr, Mn и в особенности Fe, Co, Ni. Они образуют серию, или горизонтальное семейство аналогичных элементов (совершенно отличное от вертикальных групп или семейств).

Обычные правила максимальной валентности кажутся еще применимыми к трем первым элементам, по крайней мере в тех соединениях, где они играют роль металлоидов. Это приводит к обозначению их символами: ванадий [2, 8, 8, 5]; хром [2, 8, 8, 6]; марганец [2, 8, 8, 7]. Но в этих символах несколько не выражается аналогия, которую они проявляют между собою и с тремя металлами, следующими за ними. Вот почему была предложена следующая довольно правдоподобная гипотеза: в горизонтальных семействах новые электроны присоединяются не к поверхностному слою, а к одному из лежащих под ним, обычно к первому (ближайшему).

Эти горизонтальные семейства усложняют таблицу Менделеева, начиная с первого большого периода. Предыдущая гипотеза достаточно хорошо объясняет эти осложнения, но она недостаточна, чтобы вполне объяснить строение различных атомов. Для многих из них, в частности для атомов аномальных элементов, остается несколько возможных символов.

Я думаю, что эти атомы могут существовать в нескольких изомерных формах, и электроны могут с некоторой свободой переходить с последнего слоя на предпоследний и в пределах одного слоя с одного уровня на другой. Таким образом могли бы быть объяснены для этих веществ их многократная химическая валентность, разнообразие их магнитных свойств и чрезвычайная сложность их световых спектров. Внутренние слои, наоборот, постоянны, как это показывают постоянство и относительная простота рентгеновских спектров.

За никкелем следует медь ($N=29$), которая помещается в группе щелочных металлов. Теперь принимают, что в атоме меди два последних электронных слоя никкеля соединяются в один слой M, в то время как новый электрон кладет начало области N; откуда символ [2, 8, 18, 1]. Однако, один из восемнадцати электронов слоя M еще играет роль валентного электрона в соединениях окиси меди. Здесь ясно обнаруживается подвижность электрона в аномальных элементах.

Следующий за этим периодом благородный газ криптон ($N=36$) имеет символ [2, 8, 18, 8]. Четвертый период системы мало отличается от третьего. После него идет ксенон ($N=54$) [2, 8, 18, 18, 8]. В цезии и барии зарождается новый поверхностный слой P.

Затем начинается ряд из шестнадцати редких металлов, горизонтальное семейство, почти совершенное, занимающее всего две клетки в таблице Менделеева. Два электрона из шестнадцати перемещаются на периферический слой (редкие металлы трех- и четырехвалентны). Четырнадцать других электронов присоединяются к прилегающим слоям.

Аналогия тантала с ниобием и ванадием, аналогия группы Os, Ir, Pt с группой Ru, Rh, Pd придает некоторый вес гипотезе, согласно которой они присоединяются не к предпоследнему слою O, но к предшествующему N. Этот слой, таким образом, из восемнадцати-электронного переходит в тридцатидвух-электронный. Результаты, даваемые рентгеновскими спектрами, повидимому подтверждают эту гипотезу.

Пятый период заканчивается, как предыдущие. Мы доходим до эманации ($N = 86$) [2, 8, 18, 32, 18, 8] и до последнего элемента урана, символ которого обладает некоторой симметрией [2, 8, 18, 32, 18, 8, 6].

Достаточно этого короткого наброска. Я настаиваю еще на двух пунктах: провизорном характере предложенных решений; вероятном существовании изомерных форм одного и того же атома (в особенности для аномальных элементов).

Что касается характерного для каждого слоя количества квант, то Бор, после тщательного изучения внутренней динамики атомов, предлагает следующую таблицу:

	K	L	M	N	O	P	Q
Количество электронов в полном слое	2	8	18	32	18	8	6 (в Ur)
Число квант	1	2	3	4	3	2	1

ДОПОЛНЕНИЕ II

О ВЫЧИСЛЕНИЯХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОНСТАНТ

1. Использование результатов изучения рентгеновских лучей (Блек и Дуан). Измерение в абсолютных единицах длин волны λ рентгеновских лучей основано на хорошо известном уравнении

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 2 d \sin \theta;$$

θ — это угол отражения, d — константа кристаллической решетки, значение которой для обычно употребляемых кристаллов (NaCl) дается формулой

$$Nd^3 = \frac{M}{2\rho},$$

где N обозначает число Авогадро, ρ — плотность кристалла, M — его молекулярную массу. Следовательно,

$$\nu = \frac{c}{2 \sin \theta} \sqrt[3]{\frac{2\rho N}{M}}.$$

Блек и Дуан проверили (VI) своими опытами уравнение

$$eV = h\nu.$$

V — это вольтаж, необходимый, чтобы вызвать X лучи частоты ν .
Заменив в этом уравнении e через $\frac{F}{N}$, (F — константа Фарадея),
и ν его величиной, получим

$$(1) \quad N^{\frac{3}{2}} h = \frac{FV}{c} 2 \sin \theta \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho}}.$$

Американские физики предположили известной величину заряда электрона e , т. е. величину N и приняли числа Милликана $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц. $N = 6,062 \cdot 10^{23}$.

Из уравнения (1), вторая часть которого содержит лишь хорошо известные или поддающиеся непосредственному наблюдению величины, они вычислили $h = 6,555 \cdot 10^{-27}$.

Они не обсуждали степени точности своих измерений. Принимая во внимание совпадение их результатов, можно принять возможную относительную ошибку во втором члене уравнения (1) приблизительно в одну тысячную. Заменяя в первом члене этого уравнения буквы N и h принятыми для них величинами, получаем

$$(1') \quad N^{\frac{1}{3}} h = [6,062 \cdot 10^{23}]^{\frac{1}{3}} \times 6,555 \cdot 10^{-27} (1 \pm \eta) = 3,363 \cdot 10^5 (1 \pm \eta),$$

где η порядка $\frac{1}{1,000}$.

С другой стороны, из уравнений (13) и (13') (VIII) получаем

$$N^5 h^3 = F^5 \frac{\pi}{c} \frac{2}{\frac{e}{m} R_{\infty}}.$$

Все величины во втором члене хорошо известны, кроме отношения $\frac{e}{m}$ заряда к массе электрона, которое выводится из спектроскопических измерений с относительной ошибкой в $1,6\%$.

Наконец, заменяя буквы числами, которые они представляют и которые прямо или косвенно получаются из спектроскопических измерений (кроме константы Фарадея F и скорости света c), получаем

$$(2') \quad N^5 h^3 = 2,297 \cdot 10^{40} \pm 1,6\%$$

и по (1')

$$(1'') \quad N^4 h^3 = 3,804 \cdot 10^{16} (1 \pm 3\eta).$$

Откуда

$$N = 6,038 \cdot 10^{23} (1 \pm 3\eta \pm 0,0016).$$

Если принять $\eta = \frac{1}{1000}$, возможная ошибка в N становится

3,6⁰/₀₀. Из этой величины N выводится

$$e = 4,792 \cdot 10^{-10} \text{ электростат. ед. } (1 \pm 3\eta \pm 0,0016)$$

$$h = 6,56 \cdot 10^{-23} (1 \pm 5\eta).$$

II. Использование фотоэлектрических данных (Милликан). Опыты дают в конечном результате угловой коэффициент прямой $V = f(\nu)$, т. е.

$$(3) \quad \frac{dV}{d\nu} = \frac{h}{e} = \frac{Nh}{F},$$

где ν хорошо известно.

Произведение Nh дается, следовательно, прямо с приближением, которое Милликан определяет в 5⁰/₀₀. Милликан находит

$$(3') \quad Nh = 6,062 \cdot 10^{23} \times 6,57 \cdot 10^{-27} = 3,983 \cdot 10^{-3} (1 \pm 0,005)$$

(2') и (3') дают

$$N = 6,030 \cdot 10^{23} (1 \pm 0,008)$$

$$e = 4,80 \cdot 10^{10}$$

$$h = 6,60 \cdot 10^{-23} (1 \pm 0,013).$$

Обе величины, найденные для N , совершенно совпадают и весьма вероятно приближаются к истинной величине, по крайней мере, на 1⁰/₀ и даже на 0,5⁰/₀. Они очень близки к величине, найденной Милликаном прямым измерением e ; h известно с меньшей точностью.

НЕКОТОРЫЕ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работы общего характера.

- A. Sommerfeld. — *Atombau und Spektrallinien* (Строение атома и спектральные линии). Замечательная книга, в которой следует несколько дополнить библиографию.
- J. Perrin. — *Les Atomes* (Атомы). (Paris, Alcan).
- F. Soddy. — *Le Radium* (Радий). (Paris, Alcan).

Первые гипотезы об атоме.

- Lord Kelvin. — *Phil. Mag.* 3 (1902), p. 257.
- Jean Perrin. — *Revue scientifique*, 15 (1901), p. 449.
- J.-J. Thomson. — *Corpuscular theory of matter*. Корпускулярная теория материи. — *Phil. Mag.* 7, p. 234, 1904.

Дисперсия α -лучей. Модель атома Резерфорда. Строение ядра.

- Rutherford. — *Philosophical Magazine*, 21 (1911), p. 669.
- Geiger et Marsden. — *Le Radium*, 6 (1909), p. 201.
- Rutherford. — *Phil. Mag.*, 37 (1919) p. 537. Cf. *Le Radium*, 11 (1919), p. 370.
- Недавние работы: Bakerian lecture. *Proc. Roy. Soc.*, 97 A (1920), p. 374.
- C. T. R. Wilson. — *Journal de Physique*, III (1913), p. 529.

Классификация элементов.

- A. Begg. — *Zeitschr. f. physik. Chem.*, 43 (1903), S. 385.
- W. Kossel. — *Ann. der Phys.*, 49 (1916), S. 329.
- Soddy. — *loc. cit.*
- Mme Curie. — *Conférences à la Société de physique*, 1913—1914.
- Lewis. — *Journ. of the Americ. Chem. Soc.* 38 (1916), p. 762.
- I. Langmuir. — *id.* 41 (1919), p. 368 и 1543.

Кванты.

- M. Planck. — *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*. *Conférences à la Société de Physique*, 1912—13.

La Théorie du rayonnement et les quanta (Conseil Solvay, 1911).
См. ниже: развитие теории.

Серии линий.

Rydberg. — Rapport au congrès de physique, 1900, tome III.
Ritz. — Oeuvres (Paris, Gauthier-Villars).
Fabry. — Revue Générale des Sciences (1903), p. 237.

Теория Бора.

Мемуары Бора. Philosophical Magazine (1913—15).

Спектры рентгеновских лучей.

Laue. — Le Radium, 10 (1913), p. 47.
Moseley. — Phil. Mag., 26 (1913), p. 1024; 27 (1914), p. 703.
De Broglie. — Conférences à la société de Physique, 1913—1914 и послед.
W. Kossel. — Verh. der deutschen Phys. Ges. (1914), S. 899 et 953
(1916), S. 339.

Развитие теории.

Работы Зоммерфельда, Дебая, Шварцшильда, Эйнштейна,
Эпштейна в немецких журналах, начиная с 1916 (в особенности
в Ann. der Phys. и в Berichte der D. Phys. Ges.)

Для справок книга Sommerfeld'a.

Мемуары Бора (Académie des sciences de Copenhague, 1918).

M. Born et Landé. Verh. d. d. phys. Ges. (1918), S. 210; (1919), S. 13.

Fajans. — *Id.* (1919), p. 549 et 709.

Деbye. — Phys. Zeitschr., 21 (1920), S. 178.

Bohr. — Nature, 107 (1921), p. 104.

По русски теории Бора и строению атома вообще посвящен ряд статей в «Успехах физических наук», выходящих в Москве под редакцией акад. П. П. Лазарева.

Госиздат Украины выпустил популярную книгу Греча „Теория атома в ее новейшем развитии“ (Научная библиотека, № 3).

ОГЛАВЛЕНИЕ

	СТР.
От переводчика	3
I. Исторические данные	5
II. Первые гипотезы об электрическом строении атомов	6
III. Прохождение α -лучей через материю. Атом Резерфорда	9
IV. Периодическая система и строение атомов	12
V. Устойчивость атома	24
VI. Кванты	25
VII. Серии спектральных линий	32
VIII. Теория Бора	36
IX. Увлечение ядра	43
X. Вычисление характерных величин электрона	45
XI. Спектры рентгеновских лучей	48
XII. Развитие теории	51
Дополнение I.	
О количестве и о природе электрических слоев	56
Дополнение II.	
О вычислениях молекулярных констант	59
I. Использование результатов изучения рентгеновских лучей (Блек и Дуан)	
II. Использование фотоэлектрических данных (Милликен)	
Некоторые библиографические указания	62
