

модели, спектры атомов должны были бы быть не линейчатыми, а непрерывными.

Во-вторых, являясь, согласно (43.4), механически устойчивой, модель Резерфорда оказалась неустойчивой с точки зрения законов классической электродинамики. Электроны-корпускулы (крупинки вещества), несущие отрицательные заряды, движущиеся по круговым орбитам, обладают нормальным ускорением

$$\omega_n = \frac{v^2}{r}.$$

При радиусе орбиты $r = 10^{-8}$ см из (43.4) можно оценить скорость электрона $v \sim 10^8$ см/сек, частоту обращения

$$v = \frac{v}{2\pi r} \sim 10^{15} \text{ сек}^{-1}$$

и ускорение $\frac{v^2}{r} \sim 10^{24}$ см/сек². При таких огромных ускорениях электроны должны интенсивно излучать электромагнитные волны. Их энергия будет быстро уменьшаться, вследствие чего они должны непрерывно приближаться к ядру. Атом — «солнечная система» Резерфорда не может существовать дольше миллионных долей секунды.

§ 44. Постулаты Бора

Первая попытка разобраться в особенностях, свойственных атомам, была сделана известным датским физиком Н. Бором. Бор указал на некоторые закономерности, которые должны иметь место, коль скоро атомы оказываются устойчивыми, и которые позволяют вычислить спектр простейшего, водородного атома (а также одноэлектронных ионов He^+ , Li^{++} и др.).

Бор исходил из того опытного факта, что элементарные излучатели — атомы — отдают излучение в виде порций:

$$e = h\nu, \quad (44.1)$$

причем набор возможных значений e_i (или ν_i) образует не непрерывную последовательность, но дискретный ряд.

Отсюда Бор сделал вывод, что энергия атомов не может меняться непрерывно. Возможные состояния атома образуют дискретную последовательность, и энергии атома в этих состояниях образуют дискретный ряд

$$E_1, E_2, \dots, E_n, \dots \quad (44.2)$$

Находясь в одном из таких, по терминологии Бора — «разрешенных», состояний, атом не испускает и не поглощает излучения, его энергия не меняется. Изменение состояния (и энергии) атома

может происходить лишь в виде скачка — от одного возможного состояния к другому.

Первый постулат Бора устанавливает связь между возможными значениями энергии атома и частотами испускаемого (поглощаемого) им излучения.

Излучение испускается (поглощается) при переходе атома из одного разрешенного состояния в другое, причем частота излучения определяется соотношением

$$h\nu_{ik} = E_k - E_i. \quad (44.3)$$

Второй постулат представляет собой правило для нахождения энергий разрешенных состояний атома применительно к модели Резерфорда. Принимая для простейшего — одноэлектронного — атома водорода круговые орбиты, Бор полагает, что на разрешенных орбитах момент количества движения электрона mvr должен быть равен целому числу $h/2\pi$. Вводя общепринятое ныне обозначение

$$\frac{h}{2\pi} \equiv \hbar = 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек} = 6,583 \cdot 10^{-16} \text{ эв} \cdot \text{сек}, \quad (44.4)$$

можем записать второй постулат Бора следующим образом:

$$mvr = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (44.5)$$

Если принять эти постулаты, то линейчатый спектр атомарного водорода может быть вычислен и полученные результаты совпадут с опытными с большой степенью точности (см. ниже). Сейчас же отметим, что постулаты Бора находятся в противоречии с классической механикой и электродинамикой. Правда, если принять, что электрон представляет собой отрицательно заряженную корпускулу, то движение по круговой орбите происходит в соответствии с законами классической механики.

Но классическая механика разрешает непрерывную последовательность орбит, и исключение большинства из них с сохранением только тех, которые удовлетворяют условию (44.5), не может быть объяснено в ее рамках. Возможность устойчивого движения заряженной корпускулы по круговой орбите (т. е. с ускорением, но без излучения) исключается законами электродинамики (см. конец § 43).

Таким образом, постулаты Бора несовместимы с классической физикой. Если они отвечают действительному положению вещей, то это значит, что классические законы физики ограничены в своей применимости. Следует искать новые законы природы, правильно описывающие свойства мельчайших частиц вещества.

В этом плане было очень важно выяснить, не обусловлен ли характер излучателя свойствами самого излучения. Необходимо

было установить правильность основного положения Бора — дискретности возможных значений энергии атомов.

Дискретность значений энергии атома была доказана в 1913 г. прямыми опытами Д. Франка и Г. Герца. Идея этих опытов заключается в следующем. При абсолютно упругих столкновениях внутренняя энергия частиц не меняется. Кинетическая энергия сталкивающихся частиц остается такой же, какой она была до столкновения (импульс сохраняется при любых столкновениях).

Столкновение атомов с другими частицами, в том числе электронами, может быть и неупругим. Так, при столкновении электрона с атомом внутренняя энергия атома может увеличиться за счет кинетической энергии сталкивающихся частиц. Относительная скорость частиц после столкновения станет меньше, чем до него. Такие удары принято называть ударами первого рода. Может иметь место и обратное явление. Это происходит, если внутренняя энергия атома до удара не является минимально возможной для него, т. е. если атом возбужден. При столкновении с электроном такой атом может не только сохранить или увеличить свою внутреннюю энергию (упругий удар, соответственно удар первого рода), но и уменьшить ее. Относительная скорость, суммарная кинетическая энергия частиц после удара будут больше, чем до удара, но внутренняя энергия атома уменьшится. Такие удары называются ударами второго рода.

Представим себе одноатомный газ, атомы которого могут находиться на следующих энергетических уровнях: E_1 (наинизший), E_2, E_3, \dots . Энергия теплового движения мала и недостаточна для возбуждения атомов:

$$\frac{3}{2} kT \ll E_2 - E_1, \quad (44.6)$$

так что атомы находятся в невозбужденном состоянии, с энергией E_1 .

В газ впускается пучок электронов, каждый из которых обладает энергией ϵ , одинаковой для всех электронов пучка. Если

$$\epsilon < E_2 - E_1, \quad (44.7)$$

то при столкновениях электронов с атомами удары как первого, так и второго рода исключаются, так как при ударе электрона атом не может менять своего состояния.

В силу того, что масса атома превышает массу электрона в тысячи раз, при упругом соударении электрона с атомом скорость атома практически не меняется и кинетическая энергия электрона также остается неизменной. Меняется лишь направление движения электрона.

Таким образом, если энергетический спектр атомов дискретен, то при энергии электронов $\epsilon < E_2 - E_1$ соударения электронов с атомами могут изменить лишь направление движения электронов, но не их энергию.

Будем теперь постепенно увеличивать кинетическую энергию электронов ϵ .

Как только величина ϵ превысит $E_2 - E_1$, станут возможны удары первого рода. При этом кинетическая энергия атома практически меняться не будет, а внутренняя возрастет на величину $E_2 - E_1$. Энергия электрона уменьшится на эту же величину и станет равной ϵ' , где

$$\epsilon' = \epsilon - (E_2 - E_1). \quad (44.8)$$

Конечно, не всякий удар должен быть ударом первого рода. Некоторые электроны при столкновениях с атомами рассеются упруго, сохранив свою энергию, но часть их испытает и неупругое столкновение. Если $\epsilon < 2(E_2 - E_1)$, дальнейшая потеря энергии электронами уже невозможна. Если же $\epsilon > 2(E_2 - E_1)$, то электрон может испытать два неупругих соударения и т. д. *).

Подчеркнем, что если бы атом обладал свойствами томсоновской модели, то он мог бы принимать любые порции энергии, в том числе и сколь угодно малые. Удары первого рода имели бы место при любых энергиях электронов. Никаких «ступенек» в отдаче энергии в зависимости от величины ϵ не наблюдалось бы. Какую же картину подтверждает опыт? На рис. 2.4 показана схема опыта.

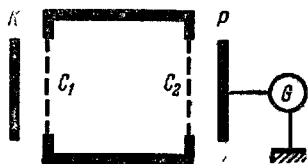


Рис. 2.4.

Электронные, эмитируемые раскаленным катодом K , ускоряются между K и сеткой C_1 . Дальше в пространстве между C_1 и C_2 электрическое поле отсутствует и электроны движутся, испытывая соударения с атомами ртути, парами которой (при давлении ~ 1 мм рт. ст.) наполнен объем. Часть электронов диффундирует сквозь сетку C_2 и, преодолевая малый задерживающий потенциал ($\sim 0,5$ в), попадает на пластинку P , соединенную через гальванометр с землей. На рис. 2.5 дан график зависимости тока в приборе как функции начальной энергии электронов ϵ , выраженной в электронвольтах. Резкие спады кривой тока отвечают энергии электронов, кратной $4,9$ эв, что составляет как раз энергию возбуждения ($E_2 - E_1$) атомов ртуты и т. д. В дальнейшем улучшенная методика позволила определить три первые энергетические ступени.

* При этом возможны и возбуждения атомов на более высокие уровни. Это качественно не меняет картины, так как они гораздо более близкие, чем уровни E_2 и E_1 (см. § 49).

пеньки атомов гелия: $E_2 - E_1 = 21,2$ эв, $E_3 - E_2 = 1,6$ эв, $E_4 - E_3 = 0,8$ эв.

Боровская концепция дискретных энергетических уровней атома, таким образом, подтверждается. С ее помощью можно объяснить известную закономерность в спектрах некоторых атомов, например водорода, формулируемую обычно в виде «комбинационного принципа» Ритца.

Рассмотрим график энергетических уровней электронов в атоме водорода (рис. 2.6). Согласно принятой терминологии, частоты излучения, возникающего при переходе электрона на основной, невозбужденный уровень E_1 с других, более высоких, образуют первую серию частот в спектре испускания. Все возможные переходы на следующий уровень E_2 порождают вторую серию, на E_3 — третью серию и т. д. Отметим у частоты ν первым индексом номер серии, вторым — номер уровня, с которого совершил переход электрон при испускании фотона данной частоты. Так, для частоты первой серии, возникшей при переходе $E_5 \rightarrow E_1$, имеем:

$$h\nu_{1,5} = E_5 - E_1,$$

для фотона третьей серии, возникшей при переходе $E_6 \rightarrow E_3$, имеем:

$$h\nu_{3,6} = E_6 - E_3$$

и т. д. В общем виде:

$$h\nu_{n,k} = E_k - E_n. \quad (44.9)$$

Выпишем значения всех частот первой серии:

$$\nu_{1,2} = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad \nu_{1,3} = \frac{E_3 - E_1}{h}, \quad \dots, \quad \nu_{1,k} = \frac{E_k - E_1}{h}, \quad \dots \quad (44.10)$$

Возьмем теперь разность любых двух частот этого ряда, вычтя из большей меньшую. Это значит, что при $k > n$ имеем:

$$\nu_{1,k} - \nu_{1,n} = \frac{E_k - E_1}{h} - \frac{E_n - E_1}{h} = \frac{E_k - E_n}{h} = \nu_{n,k}. \quad (44.11)$$

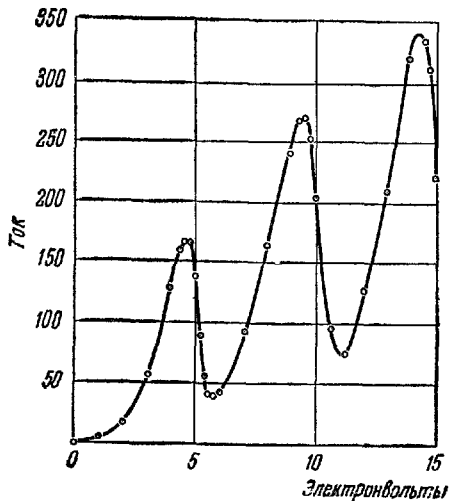


Рис. 2.5

Таким образом, разность двух частот первой серии дает частоту одной из последующих серий. Легко видеть, что, вычитая из $\nu_{1,2}$ последовательно $\nu_{1,8}$, $\nu_{1,4}$, ..., получаем частоты второй серии; вычитая из $\nu_{1,8}$ частоты $\nu_{1,4}$, $\nu_{1,5}$, ..., получаем третью серию и т. д. Таким же образом разности частот, скажем, третьей серии дадут частоты последующих: четвертой, пятой и других серий и т. д., что и составляет комбинационный принцип Ритца.

Таким образом, постулаты Бора позволяют истолковать важные закономерности простейшего водородного спектра. Однако

постулаты Бора не позволяют трактовать спектры и вообще свойства сложных, многоэлектронных атомов.

Остается открытым вопрос о том, по каким причинам совершается переход с удаленных орбит на близкие, и в каком порядке он происходит (например, в атоме водорода возможны переходы прямо с орбиты 4 на 1, а также «по ступенькам», $4 \rightarrow 2$, затем $2 \rightarrow 1$; $4 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$ и, наконец, $4 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$). Различным вариантам переходов отвечают определенные фотоны, и в спектрах они наблюдаются. Однако интенсивность их разная, следовательно, одних фотонов испускается больше, соответствующие переходы предпочтительнее. Почему? Этот вопрос

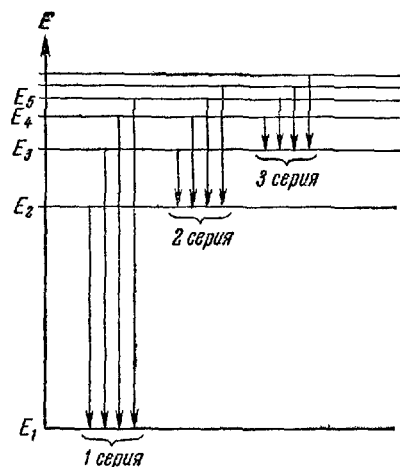


Рис. 2.6.

также остается без ответа.

Тем не менее постулаты Бора сыграли большую роль в истории развития науки об атоме. Они показывали неправильность распространения законов природы, открытых и подтвержденных опытом для больших тел, на малые тела — атомные системы, ограниченность старых представлений и законов.

Этот естественный процесс развития научных представлений об атомах был расценен некоторыми метафизически мыслящими учеными как крах науки. К такому заключению пришел создатель электронной теории Лоренц, потому что он абсолютизировал законы электродинамики и представление об электроне как о движущейся точечной заряженной частице.

Познание есть бесконечный процесс, в котором каждый шаг дает все более точное отражение объективной реальности, но ни

один из достигнутых этапов не может быть абсолютно полным ее отражением. В. И. Ленин писал:

«Новая физика свихнулась в идеализм, главным образом, именно потому, что физики не знали диалектики. Они боролись с метафизическим (в энгельсовском, а не в позитивистском, т. е. юмистском, смысле этого слова) материализмом, с его односторонней «механичностью», — и при этом выплескивали из ванны вместе с водой и ребенка. Отрицая неизменность известных до тех пор элементов и свойств материи, они скатывались к отрицанию материи, то есть объективной реальности физического мира. Отрицая абсолютный характер важнейших и основных законов, они скатывались к отрицанию всякой объективной закономерности в природе, к объявлению закона природы простой условностью, «ограничением ожидания», «логической необходимостью» и т. п. Настаивая на приблизительном, относительном характере наших знаний, они скатывались к отрицанию независимого от познания объекта, приблизительно-верно, относительно-правильно отражаемого этим познанием. И т. д., и т. д. без конца *)».

Дальнейший прогресс в понимании природы микрочастиц связан с именем французского теоретика Луи де Бройля.

*) В. И. Ленин, Материализм и эмпириокритицизм, стр. 244—245, Госполитиздат, 1948.