

3) спектры излучения и поглощения атомов являются линейчатыми.

Отметим, что с точки зрения классической электродинамики эти факты являются несовместимыми.

15.3. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА. ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА АТОМОМ

Первая попытка создания неклассической теории атома была предпринята датским физиком Н. Бором в 1913 г. Ученый попытался связать в единое целое закономерности линейчатых спектров, ядерную модель Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света атомом. Н. Бор не отказался от использования при описании движения электрона в атоме законов классической физики. Он считал, что электрон движется вокруг ядра по круговой траектории с постоянной по модулю скоростью, под воздействием электростатических сил в соответствии с законами Ньютона. При этом Бор дополнил классическое описание некоторыми ограничениями, которые накладывались на возможные состояния электронов в атоме. Эти ограничения были сформулированы им в виде двух постулатов и правила для отбора разрешенных орбит, которое можно считать третьим постулатом теории.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) утверждает, что *существуют стационарные состояния атома, находясь в которых он не излучает энергии. Этим стационарным состояниям соответствуют определенные стационарные орбиты, по которым движутся электроны. При движении по стационарным орбитам электроны не излучают электромагнитные волны.*

Первый постулат содержит две основные идеи: дискретность (квантованность) энергетических состояний электрона в атоме (из бесконечного множества орбит, разрешенных классической физикой, реализуются только некоторые "избранные" орбиты) и отсутствие излучения, несмотря на ускоренное движение электрона. Другими словами, первый постулат утверждает, что планетарная модель атома является устойчивой.

В соответствии со вторым постулатом (его иногда называют правилом частот) *при переходе атома из одного стационарного состояния в другое излучается или поглощается квант энергии.* Излучение происходит при переходе атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Поглощение

имеет место при переходе атома в состояние с большей энергией. Математически правило частот может быть записано следующим образом:

$$E_m - E_n = h\nu_{m \rightarrow n},$$

где E_m и E_n — энергии атома в двух стационарных состояниях; m и n — номера стационарных орбит.

При $E_m > E_n$ происходит излучение кванта; при $E_m < E_n$ — его поглощение. Фактически второй постулат утверждает, что спектр излучения (поглощения) атома в рамках планетарной модели является линейчатым.

Третий постулат Бора представляет собой правило квантования орбит. Согласно ему, *в стационарном состоянии атома электрон, который движется по круговой орбите, должен иметь квантованные (дискретные) значения момента импульса, которые удовлетворяют условию*

$$m\omega r_n = n\hbar,$$

где m — масса электрона; r_n — радиус стационарной орбиты; $n = 1, 2, 3, \dots$; $\hbar = h/(2\pi)$.

Если учесть, что линейная скорость электрона $v = \omega r_n$, правило квантования можно записать в виде $m\omega r_n^2 = n\hbar$, где ω — его угловая скорость. Анализ движения электрона вокруг ядра атома водорода на основе законов классической механики с учетом этих постулатов дает возможность рассчитать спектр излучения атома водорода и других водородоподобных систем (однозарядный ион гелия, двухзарядный ион лития и др.). Если учесть, что стационарная орбита представляет собой окружность радиусом r_n , а движение электрона происходит под действием силы электростатического притяжения электрона к ядру (гравитационное взаимодействие в расчет не принимается), то, согласно второму закону Ньютона, $ma = F_{\text{кл}}$. Центробежное ускорение электрона $a = \omega^2 r_n$ или с учетом правила квантования

$$a = \frac{n^2 \hbar^2}{2 m r_n^3},$$

а сила, удерживающая его на круговой орбите,

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{eZe}{r_n^2},$$

где e – заряд электрона; Ze – заряд ядра.
Следовательно,

$$\frac{n^2 \hbar^2}{m r_n^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n^2},$$

откуда

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{mZe^2} n^2.$$

При $n = 1$ для атома водорода ($Z = 1$) получим

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ м},$$

где r — радиус первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода. Как уже отмечалось, классическая теория не может объяснить, почему атом имеет размеры $\sim 10^{-10}$ м.

Из формулы для расчета радиусов стационарных орбит следует, что они увеличиваются пропорционально квадратам целых чисел.

Энергия электрона в водородоподобном атоме равна сумме его кинетической W_k и потенциальной W_n энергий в электростатическом поле ядра. Причем потенциальная энергия системы является отрицательной. Это обусловлено тем, что между ядром и электроном действуют силы притяжения. Если учесть, что W_n равна нулю на очень большом расстоянии между ядром и электроном, то

$$W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_r} = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_r}.$$

Если в последнюю формулу подставить значение r_n , получим формулу для расчета полной энергии электрона, который движется по стационарной орбите:

$$W_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0}.$$

Энергия водородоподобного атома в основном энергетическом состоянии ($n = 1$)

$$W_1 = -\frac{Z^2 e^4 m}{8h^3 \epsilon_0^2} = -2.16 \cdot 10^{-18} \text{ Дж.}$$

В атомной и ядерной физике энергию измеряют в электрон-вольтах. 1эВ равен энергии, которую приобретает электрон, прошедший в ускоряющем электрическом поле расстояние между точками с разностью потенциалов 1 В. По определению 1эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл · 1В = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Поэтому энергия основного состояния атома водорода $W_1 = -13,55$ эВ.

В основном состоянии атом может находиться очень долго. Все другие состояния атома ($n = 2, 3, 4, \dots$) являются возбужденными. Время жизни в этих состояниях составляет $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$ с. За это время электрон успевает совершить около ста миллионов оборотов вокруг ядра. Если $n = 2$, то $W_2 = W_1/4 = -3,39$ эВ (энергия второго стационарного состояния). Если $n = 3$, то $W_3 = W_1/9 = -1,51$ эВ (энергия третьего стационарного состояния), и т. д.

В соответствии со вторым постулатом Бора возможные частоты излучения атома водорода определяются по формуле

$$\nu_{m \rightarrow n} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{Z^2 e^4 m}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = Z^2 R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где $R = \frac{me^4}{8h^3 \epsilon_0^2} = 3,28 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ — постоянная величина.

Все частоты излучений атома водорода образуют ряд серий, каждой из которых соответствует определенное значение n и разные значения $m > n$.

При $n = 1$ получается серия линий, расположенная в дальней ультрафиолетовой части спектра (серия Лаймана):

$$\nu_{m \rightarrow 1} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 2, 3, \dots$$

При $n = 2$ наблюдается серия Бальмера, расположенная в видимой части спектра:

$R = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$

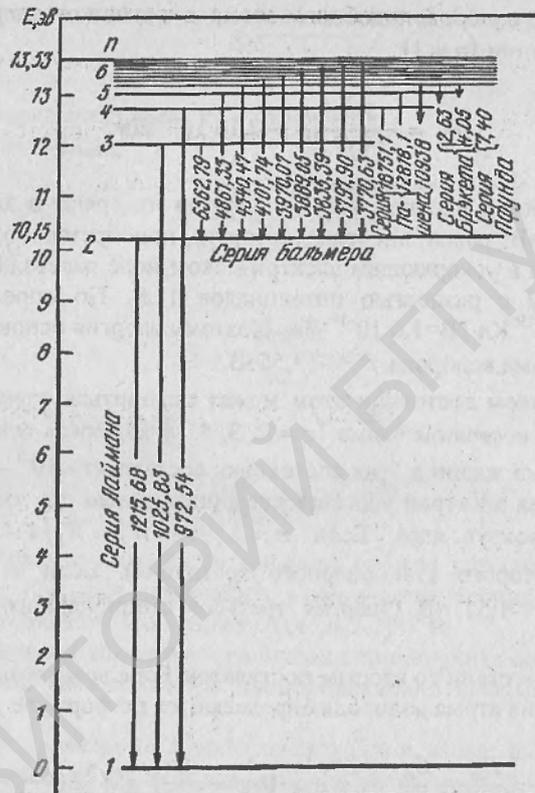


Рис. 15.2

$$\nu_{m \rightarrow 2} = \tilde{\nu} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 3, 4, \dots$$

При $n > 2$ излучаются серии спектральных линий, расположенных в инфракрасной части спектра. Схема энергетических уровней электрона в атоме водорода и механизм образования спектральных серий показаны на рис. 15.2.

Теория Бора сыграла значительную роль в создании и развитии ядерной физики. На основе этой теории был систематизирован и математически описан большой экспериментальный материал. Но вместе с тем в теории Бора имеются и недостатки. Наи-

более существенный — абсолютная невозможность ее применения к многоэлектронным атомам, например к атому гелия, который содержит, кроме ядра, два электрона. Поэтому теория Бора представляет собой только переходный этап на пути к созданию квантовой механики.

15.4. НЕПРЕРЫВНЫЕ И ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Немецкий ученый Р. Бунзен в 1859 г. установил, что различные вещества, попадая в пламя созданной им газовой горелки, окрашивают его в разные цвета. Так, например, медь давала зеленое пламя, поваренная соль — желтое, стронций — малиново-красное.

Свечение тел связано с переходами внутриатомных электронов из возбужденных состояний в состояния с меньшей энергией и представляет собой совокупность монохроматических лучей с определенной длиной волны λ . Частота излучения ν при переходе внутриатомного электрона из состояния, которому соответствует энергия E_m , в состояние с меньшей энергией E_n определяется из соотношения $\nu_{m \rightarrow n} = (E_m - E_n)/h$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка.

Совокупность длин волн, которые присутствуют в излучении любого вещества, называется *спектром излучения*. Совокупность длин волн, которые поглощаются этим веществом, называется его *спектром поглощения*.

Нагретые газы или пары, состоящие из отдельных атомов, излучают свойственный только им спектр, т. е. набор монохроматических лучей. Каждому излучению в спектре принадлежит своя линия, между линиями находятся темные промежутки. Такой спектр называют *линейчатым*.

Каждая линия представляет собой изображение щели спектрального аппарата в определенном узком промежутке длин световых волн. Линейчатые спектры химических элементов различаются цветом, расположением и числом светящихся линий. Характерные для каждого химического элемента линии излучаются не только в видимой, но и в инфракрасной и ультрафиолетовой частях спектра. Молекулярные газы и пары дают *полосатые спектры* излучения, в которых множество тесно расположенных спектральных линий образуют группы — полосы, разделенные