

## 4.2. Элементы атомной физики

### 4.2.1. Строение атома. Модель Томсона

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII веке трудами Лавуазье, Ломоносова и других ученых была доказана реальность существования атомов. Движение материи понималось как механическое перемещение атомов. Изменение химического состава сложных веществ представлялось в виде взаимозамещения таких неизменных атомов, переходящих от одних соединений – молекул – к другим.

В XIX веке изучение атомистического строения вещества существенно продвинулось вперед. В 1833 году при исследовании явления электролиза Фарадей установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц – ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Его приближенное значение оказалось равным  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл. На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

Большую роль в развитии атомистической теории сыграли работы Менделеева, создавшего в 1869 г. периодическую систему элементов и впервые поставившего вопрос о единой природе атомов. Важным свидетельством сложной структуры атомов явились спектроскопические исследования, которые привели к открытию линейчатых спектров атомов. В начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атомов водорода в видимой части спектра. Впоследствии, в 1885 г. Бальмером были установлены математические закономерности, связывающие длины волн этих линий.

В 1896 году Беккерель обнаружил явление испускания атомами невидимых проникающих излучений, названное радиоактивностью. В последующие годы явление радиоактивности изучалось многими учеными (Склодовская-Кюри, Кюри, Резерфорд и др.). Было обнаружено, что атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы (альфа-, бета- и гамма-лучи). Как выяснилось впоследствии, альфа-лучи – это поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия), бета-лучи – поток электронов, а гамма-лучи – поток квантов жесткого рентгеновского излучения.

В 1897 году Томсон открыл электрон и измерил отношение  $e / m$  заряда электрона к массе. Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов.

Таким образом, на основании всех известных к началу XX века экспериментальных фактов можно было сделать вывод о том, что атомы вещества имеют сложное внутреннее строение. Они представляют собой электронейтральные системы, причем носителями отрицательного заряда атомов являются легкие элект-

троны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.

#### **Перед наукой встал вопрос о внутреннем строении атомов.**

Исторически одной из первых моделей строения атома была модель Томсона (1903), согласно которой по всему объему атома с некоторой объемной плотностью распределен положительный заряд (см. рис.1).

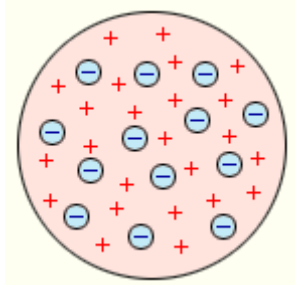


Рис. 4. 22. Модель атома Томсона

Электроны погружены в эту среду из положительного заряда. Суммарный положительный заряд среды равен заряду электрона, так что атом в целом нейтрален. Электроны взаимодействуют с элементами положительно заряженной среды атома по закону Кулона. При отклонении электрона от положения равновесия возникают силы, которые стремятся возвратить его в положение равновесия. Благодаря этому возникают колебания электрона, которые обуславливают излучение атомов.

#### **4.2.2. Опыты Резерфорда. Планетарная (ядерная) модель атома.**

Для того чтобы выяснить характер распределения положительных и отрицательных зарядов в атоме, было необходимо непосредственное опытное «зондирование» внутренних областей атома. Такое зондирование осуществили Резерфорд и его сотрудники с помощью  $\alpha$ -частиц, наблюдая изменение направления их полета (рассеяние) при прохождении через тонкие слои вещества.

В своих опытах Резерфорд использовал  $\alpha$ -частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика – порядка  $10^7$  м/с, но все же значительно меньше скорости света). Напомним, что  $\alpha$ -частицы – это полностью ионизированные атомы гелия (ядра гелия). Они были открыты Резерфордом в 1899 году при изучении явления радиоактивности. Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию  $\alpha$ -частицы, т.к. масса  $\alpha$ -частицы приблизительно в 7300 раз больше массы электрона. Рассеяние, то есть изменение направления движения  $\alpha$ -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома. Схема опыта Резерфорда представлена на рис. 2)

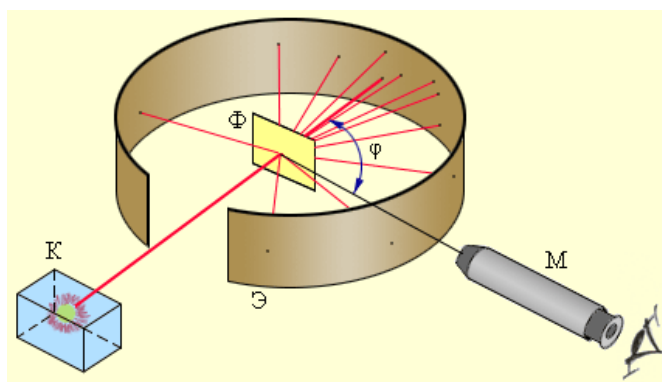
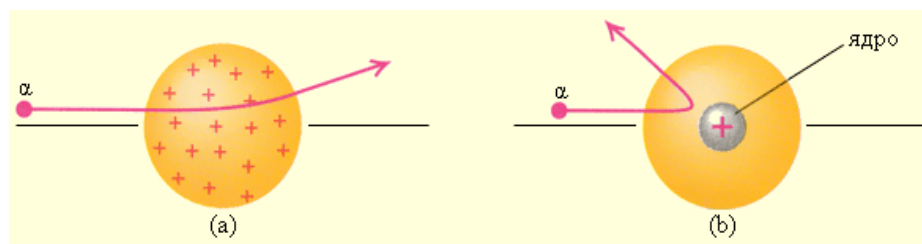


Рис.2. Схема опыта Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц (слева): К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком,  $\Phi$  – золотая фольга, М – микроскоп

Внутри полости К, сделанной в куске свинца, помещалось радиоактивное вещество, служившее источником  $\alpha$ -частиц, которые могли выходить наружу лишь через узкое отверстие. На пути получавшегося таким способом узкого пучка  $\alpha$ -частиц располагалась тонкая металлическая фольга  $\Phi$ . При прохождении через фольгу  $\alpha$ -частицы отклонялись от первоначального направления движения на различные углы  $\varphi$ . Рассеянные  $\alpha$ -частицы ударялись об экран, покрытый сернистым цинком, и вызываемые ими сцинтилляции. (Сцинтилляцией называется вспышка света, производимая заряженными частицами при ударе их о вещество, способное люминесцировать) наблюдались в микроскоп. Микроскоп М и экран Э можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр рассеивающей фольги, и устанавливать таким образом под любым углом  $\varphi$ . Весь прибор помещался в вакуумную камеру, чтобы устранить торможение  $\alpha$ -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха.

Было обнаружено, что большинство  $\alpha$ -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие  $30^\circ$ . Очень редкие  $\alpha$ -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к  $180^\circ$ .

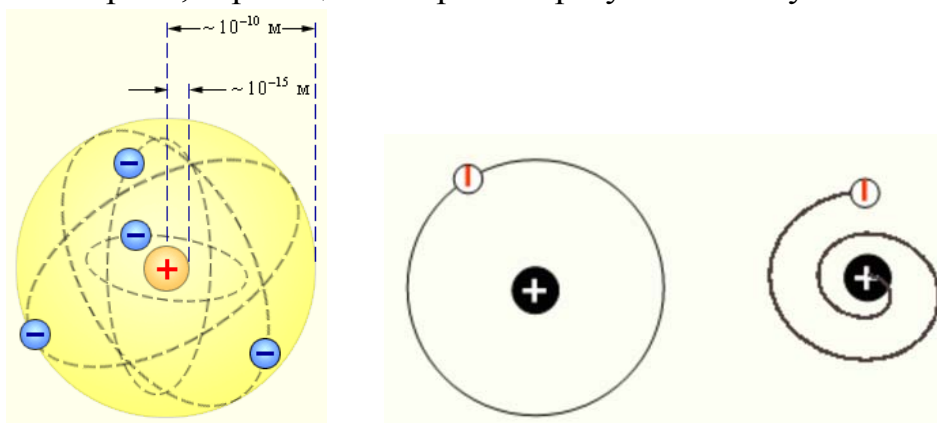
Таким образом, опыты Резерфорда и его сотрудников привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  м. Это ядро занимает только  $10^{-12}$  часть полного объема атома, но содержит **весь** положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Веществу, составляющему ядро атома, следовало приписать колоссальную плотность порядка  $\rho \approx 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.



**Рис.3.** Рассеяние  $\alpha$ -частицы в атоме Томсона (а) и в атоме Резерфорда (б)

Радикальные выводы о строении атома, следовавшие из опытов Резерфорда, заставляли многих ученых сомневаться в их справедливости. Не был исключением и сам Резерфорд, опубликовавший результаты своих исследований только в 1911 г. через два года после выполнения первых экспериментов. Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил **планетарную (ядерную) модель атома**.

Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, под действием кулоновских сил со стороны ядра, описывая замкнутые траектории, вращаются электроны. Находясь в состоянии покоя электроны не могут, т.к. такая система была бы неустойчивой, и электроны упали бы на ядро. Но поскольку в этом случае электрон будет двигаться с ускорением, в связи с чем, согласно классической электродинамике, он должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Процесс излучения сопровождается потерей энергии, так что электрон должен в конечном счете упасть на ядро. На **рис. 3** слева показана модель атома Резерфорда, а справа траектория движения электрона, теряющего энергию в результате излучения.



**Рис. 3**

### Постулаты Бора. Боровская теория атома водорода

Ядерная модель атома Резерфорда в сочетании с классической механикой и электродинамикой оказалась неспособной объяснить ни устойчивость атома, ни дискретный характер атомного спектра. Выход из создавшегося тупика был най-

ден в 1913 г. датским физиком Нильсом Бором, правда, ценой введения предположений, противоречащих как классической механике, так и классической электродинамике. Допущения, сделанные Бором, содержатся в двух высказанных им постулатах.

1. Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются в действительности только те из них, для которых момент количества движения электрона  $p$  равен целому кратному от величины  $\hbar$   $\hbar = h/2\pi$

$$p = m_e v r = n \hbar, \quad (1)$$

$n=1,2,3,\dots$  – целое число.

Электрон, находящийся на одной из этих орбит, называемых стационарными, не излучает электромагнитных волн, несмотря на то, что он движется с ускорением. Число  $n$  называется главным квантовым числом.

2. Излучение испускается или поглощается в виде светового кванта энергии  $\hbar\omega$  при переходе электрона из одного стационарного (устойчивого) состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается квантовый скачок электрона:

$$\hbar\omega = E_n - E_m. \quad (2)$$

Рассмотрим электрон, движущийся в поле атомного ядра атома водорода, заряд которого  $Z = 1$ . В случае  $Z \neq 1$  такая система (с одним электроном) будет соответствовать водородоподобному иону, т. е. атому с порядковым номером  $Z$ , из которого удалены все электроны, кроме одного. Согласно второму закону Ньютона произведение массы электрона  $m_e$  на его центростремительное ускорение  $v^2/r$  должно равняться кулоновской силе:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (3)$$

но согласно (1), радиус  $n$ -той орбиты электрона равен

$$m_e v r = \frac{n \hbar}{v}, \quad (4)$$

откуда следует, что

$$\frac{n^2 \hbar^2}{m_e r^3} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (5)$$

и что радиус допустимых (стационарных) электронных орбит в атоме может принимать лишь ряд дискретных значений:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} n^2, \quad (6)$$

( $n=1,2,3,\dots$ ).

Для первой орбиты водородного атома, называемой боровской орбитой, ( $n = 1$ ) получается

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{e^2 m_e} = 0,529 \text{ \AA}, \quad (7)$$

т. е. величина порядка газокинетических размеров атома.

Рассчитаем внутреннюю энергию атома, соответствующую стационарным состояниям которая складывается из кинетической и потенциальной энергии. Т.к. масса ядра во много раз больше массы электрона, то в первом приближении можно считать, что ядро неподвижно, и кинетическая энергия атома определяется движением электрона:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}. \quad (8)$$

Потенциальная энергия определяется произведением заряда электрона на потенциал ядра

$$E_n = -e\varphi = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (9)$$

Т.о., полная внутренняя энергия атома будет определяться выражением:

$$E = E_k + E_n = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (10)$$

Поскольку из (3) следует, что  $m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ,  $\frac{m_e v^2}{2r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r^2}$ ,  $\frac{m_e v^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$ , то

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}. \quad (11)$$

Подставив в (10) выражение  $r_n$  из (6), найдём разрешённые значения внутренней энергии атома:

$$E_n = -\frac{e^4 m_e}{32\pi\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -\frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2}, \quad (12)$$

где  $n = 1, 2, 3, 4 \dots$

При переходе атома водорода из состояния  $n$  в состояние  $m$  ( $n > m$ ) излучается фотон, энергия которого

$$h\nu = E_n - E_m, \hbar\omega = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{8 \cdot \hbar^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (13)$$

Формула, описывающая частоты всех линий атома водорода,

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{m_e e^4}{8 \cdot \hbar^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \tilde{R} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (14)$$

называется обобщенной формулой Бальмера. Она впервые была получена эмпирическим путем. Величина  $\tilde{R} = 9.3 \cdot 10^{15}$  Гц.

Обратная длина волны испускаемого света, называемая спектроскопическим волновым числом, в соответствии с тем, что  $\lambda = cT = c/\nu$ , рассчитывается по формуле:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2 c} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (15)$$

Множитель перед скобкой  $R$  называют постоянной Ридберга

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \varepsilon_0^2 c} = \frac{\tilde{R}}{c} = 1,09737317 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}. \quad (16)$$

Физический смысл постоянной Ридберга – это величина, пропорциональная энергии ионизации атома, т.е. энергии, необходимой для удаления электрона с основного уровня с минимальной энергией ( $m=1$ ,  $E \approx -13,6$  эв), на бесконечно большое расстояние ( $n = \infty$ ,  $n > m$ ):  $E_{\text{ион}} = hcR$ .

**Экспериментальные закономерности.** Анализ эмпирического материала атома водорода показал, что отдельные линии в спектрах могут быть объединены в группы линий, которые принято называть сериями. В 1885 г. Бальмер обнаружил, что линии в видимой части спектра водорода можно представить следующей простой формулой:

*Серия Бальмера* ( $m = 2$ ) видимая часть спектра

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (17)$$

Затем были обнаружены и другие серии спектральных линий:

*Серия Лаймана* ( $m=1$ ) – ультрафиолетовая часть спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (18)$$

*Серия Пашена* ( $m = 3$ ) - инфракрасная часть спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (19)$$

*Серия Бреккета* ( $m = 4$ ) - инфракрасная часть спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (20)$$

*Серия Пфунда* ( $m = 5$ ) - инфракрасная часть спектра:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (21)$$

На рис. 3 показаны серии спектральных линий, а также шкала соответствующих значений энергии атома водорода.

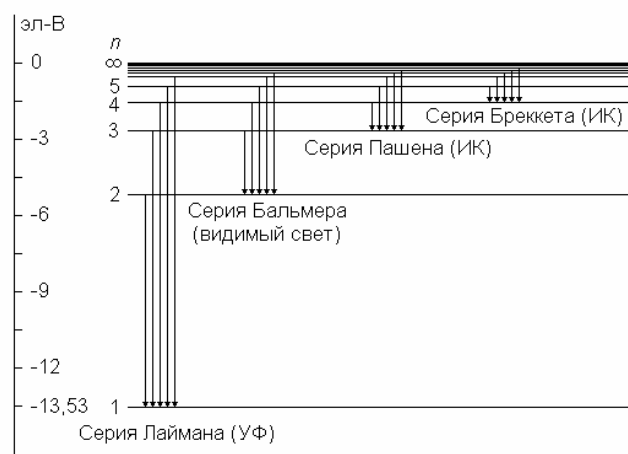


Рис.3.

Заметим, что первоначально спектральные закономерности излучения атома водорода были описаны на языке спектральных термов:  $1/\lambda = T_m - T_n$ , где  $T_{n(m)} = \frac{R}{n^2(m^2)}$ . При этом разности или суммы спектральных термов могут быть равны другим спектральным термам данного спектра. Из проведенного рассмотрения следует, что термы – это с точностью до множителя  $hc$  значения энергии электрона в стационарном состоянии.

Выводы теории Бора полностью совпали с опытными данными для водорода. Теория Бора была весьма крупным шагом в развитии теории атома. Она с полной отчетливостью показала неприменимость классической физики к внутриатомным явлениям и главенствующее значение квантовых законов в микромире. Изложенная выше элементарная теория была подвергнута дальнейшему развитию и уточнениям, и в настоящее время имеет преимущественно историческое значение.

После первых успехов теории все яснее давали себя знать ее недочеты. Особенно тягостной была неудача всех попыток построения теории атома гелия - одного из простейших атомов, непосредственно следующего за атомом водорода. Самой слабой стороной теории Бора, обусловившей последующие неудачи, была ее внутренняя логическая противоречивость: она не была ни последовательно классической, ни последовательно квантовой теорией. В настоящее время, после открытия своеобразных волновых свойств вещества, совершенно ясно, что теория Бора, опирающаяся на классическую механику, могла быть только переходным этапом на пути к созданию последовательной теории атомных явлений.