

## 15. ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ

### § 15.1 Строение атома по Бору

Ядерная модель атома явилась результатом опытов Резерфорда (1911г.), изучавшего прохождение  $\alpha$  - частиц через металлические пленки. Анализируя рассеяние  $\alpha$  - частиц, Резерфорд предложил **ядерную (планетарную) модель атома**. Согласно этой модели, атом состоит из ядра, вокруг которого по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Почти вся масса атома сосредоточена в положительно заряженном ядре. Согласно теореме Ирншоу, атом в виде статической системы не может быть устойчив, поэтому Резерфорд предположил, что электроны вращаются вокруг ядра.

Модель атома Резерфорда была шагом вперед, так как впервые атом был представлен как система движущихся зарядов. Однако эта модель не укладывалась в рамки классической физики. В чем же недостатки?

1. Расчет показывает, что при радиусе орбиты  $r = 10^{-10}$  м электрон обладает очень большим ускорением. Поэтому в соответствии с законами классической электродинамики, электрон должен излучать электромагнитные волны. Вследствие этого он должен двигаться по свертывающейся траектории, приблизиться к ядру и упасть на его, при этом атом прекратил бы свое существование. Следовательно, модель атома Резерфорда неустойчива. В действительности же все атомы устойчивы.

2. По классической электродинамике спектр излучения атома электромагнитных волн должен быть сплошной. В действительности, как показали исследования спектров излучения разреженных газов, каждому газу присущ вполне определенный **линейчатый спектр**.

#### 15.1.1 Закономерности в атомных спектрах

Изолированные атомы в виде разреженного газа испускают **линейчатые спектры**, состоящие из отдельных спектральных линий, сгруппированных **в серии**. Наиболее отчетливо это проявляется в спектре простейшего из атомов - атома водорода.

Изучение атомных спектров послужило ключом к познанию строения атомов. Было замечено, что линии в спектрах расположены не беспорядочно, а объединяются в группы. Первой была обнаружена и изучена швейцарским физиком **Бальмером** серия атомарного водорода в видимой области спектра. Частоты, соответствующие линиям этой серии выражаются формулой

$$\omega = R \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.1)$$

где  $n$  - целое число, принимающее значение 3,4,5...,

**$R$ - постоянная Ридберга**, вычисленная из опытных данных. Она равна  $R = 3,28985 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ .

Формула (15.1) называется формулой **Бальмера-Ридберга**, а соответствующая серия - **серией Бальмера-Ридберга**. Позже были обнаружены серии излучения атома водорода и в других областях спектра. Все они могут быть представлены обобщенной **формулой Бальмера-Ридберга**

$$\omega = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.2)$$

где  $m$  - целое число, постоянное для каждой серии, а  $n$  - ряд цел чисел, начиная с  $n = m + 1$ . Значению  $m = 1$  соответствует серия Лаймана,  $m = 2$  - серия Пашена,  $m = 3$  - серия Брекета,  $m = 4$  - серия Бркета,  $m = 5$  - серия Пфунда и т.д.

При возрастании  $n$  частота линии излучения в каждой серии стремится к предельному значению, которое называется границей серии. Частота любой линии спектра может быть представлена в виде разности двух чисел ряда  $R/1^2, R/2^2, R/3^2, \dots$  и т. д.

Эти числа называются термами и обозначаются  $T(n)$ . Поэтому можно записать  $\omega = T_1(m) - T_2(n)$ .

Дискретность в структуре атомных спектров указывает на наличие дискретности в строении самих атомов.

### 15.1.2 Опыт Франка и Герца

В опытах немецких физиков В.Франка и Г.Герца (1913 г.) было получено прямое экспериментальное доказательство дискретности состояний. Атомы возбуждаются только при передаче им энергии, превышающей разность энергий первого возбужденного и основного состояний (двух низших стационарных). В опыте В.Франка и Г.Герца исследовалась зависимость силы тока  $I$  от ускоряющего потенциала  $U$  между катодом и анодом в запаянной трубке с парами ртути. Между анодом и коллектором была приложена небольшая задерживающая разность потенциалов. Электроны, ускоренные в промежутке между анодом и катодом, испытывают столкновения с атомами паров ртути (или другого вещества), которыми заполнена трубка. Те из электронов, которые после соударений имеют достаточную энергию, чтобы пролететь задерживающий потенциал, попадают на коллектор.

При увеличении ускоряющего напряжения вплоть до 4.9 В сила тока, регистрируемая микроамперметром, возрастает монотонно. Следовательно, соударения электронов с атомами ртути при энергиях  $W < 4.9$  эВ - упругие и не меняют внутренней энергии атомов. Если  $U$  превышает 4.9 В (и кратные значения 9.8 В, 14.7 В,...), на кривой  $I(U)$  появляются спады, указывающие на то, что при энергиях электронов  $W > 4.9$  эВ их соударения с атомами становятся неупругими, т.е. энергия электронов переходит во внутреннюю энергию атомов. При значениях энергии, кратных 4.9 эВ, электроны могут несколько раз испытывать неупругие столкновения, отдавая каждый раз по 4.9 эВ атому. Следовательно, опыт Франка и Герца показал, что 4.9 эВ - наименьшая возможная порция энергии (наименьший квант энергии), которая может быть поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии.

Выше основного лежат различные возбужденные состояния, разделенные промежутками. Последовательность энергий этих состояний называется энергетическими уровнями атома. Эти возбужденные состояния возникают, когда атому ударяющим электроном сообщается соответствующая данному уровню порция энергии. Наконец, когда об атом ударяется электрон с достаточно высокой энергией, то атом ионизируется. Из атома выбрасывается электрон, после чего остается положительный ион. Так как энергия выброшенного электрона может иметь любое значение, то атом может принять любую порцию энергии, которая превышает энергию ионизации. Как известно, элементы в газообразном состоянии обладают линейчатыми спектрами. Каждому элементу свойственны определенные спектральные линии, отличные от линий других элементов.

**Таблица 15.1**

*Характеристики атомов некоторых элементов I группы.*

	натрий Na	цезий Cs	медь Cu	калий K	ртуть Hg	водород H
энергия возбуждения 1-го уровня, эВ	2.1	1.39	3.8	1.6	4.9	10.2
энергия ионизации, эВ	5.1	3.9	7.7	4.3	10.4	13.6

### 15.1.3 Постулаты Бора

Исходя из представлений о дискретности энергетических состояний атома, датский физик **Нильс Бор** в 1913 г усовершенствовал атомную модель **Резерфорда**, создав квантовую теорию строения атома. В ее основу он положил следующие постулаты:

1. атомная система может находиться только в особых стационарных (или квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарном состоянии атом не излучает,
2. из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются лишь орбиты, удовлетворяющие следующему квантовому условию: электрон может двигаться только по таким орбитам, для которых момент импульса электрона кратен постоянной Планка:

$$mvr = \frac{h}{2\pi} n = \hbar n, \quad (15.3)$$

где  $m$  - масса электрона,  $v$  - его скорость,  $r$  - радиус орбиты,  $n$ -квантовое число,  $h$  и  $\hbar$  - постоянная Планка.

3. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией  $E_1$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_2$ . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$\hbar\omega = E_1 - E_2,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  - энергии стационарных состояний атома до и после излучения.

Правильность основного положения Бора о дискретности возможных значений энергии атомов была экспериментально доказана в 1914 г. опытами **Д.Франка** и **Г.Герца**

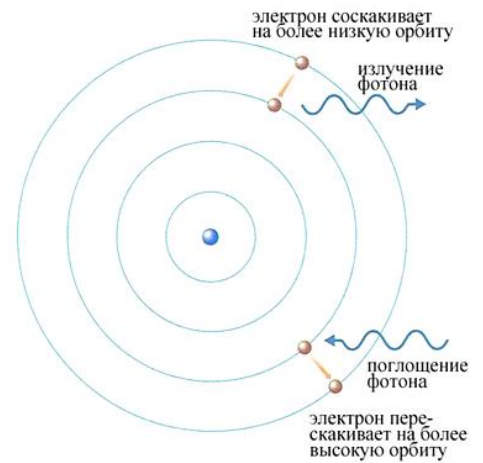


Рис. 15.1

### 15.1.4 Теория атома водорода по Бору

Рассмотрим применение теории **Бора** к атому водорода - простейшему атому с одним электроном. Ядро можно считать неподвижным, поскольку его масса в 1840 раз больше массы электрона. Орбиты электрона примем за круговые. Электрон движется в поле атомного ядра.

Между электроном и протоном действует сила кулоновского притяжения, равная  $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ . Она

сообщает электрону центростремительное ускорение  $\frac{v^2}{r}$ , удерживая его на орбите радиуса  $r$ .

По второму закону Ньютона

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}. \quad (15.4)$$

Решая уравнение (15.4) совместно с (15.3), получим выражение для скорости электрона

$$v = \frac{1}{n} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \quad (15.5)$$

и радиуса стационарных орбит

$$r = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}. \quad (15.6)$$

Радиусы боровских орбит пропорциональны  $n^2$ , главному квантовому числу, которое может принимать значения  $n = 1, 2, 3, \dots$

Радиус первой орбиты ( $n = 1$ )

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} = 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Этот радиус часто используют в атомной физике как единицу длины и называют **боровским радиусом**.

Определим энергию атома водорода. Полная энергия складывается из кинетической энергии  $E_k$  движущегося электрона и потенциальной энергии  $E_p$  взаимодействия электрона с ядром. Из уравнения (15.5) находим

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}.$$

Потенциальная энергия двух зарядов, находящихся на расстоянии  $r$ , равна

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Полная энергия равна

$$E = E_k + E_p = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\pi\epsilon_0^2 \hbar^2}, \quad (15.7)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

В основном состоянии ( $n = 1$ ) энергия  $E_1 = -13,56$  эВ. Значение  $E_1$  совпадает с работой ионизации атома, равной энергии связи электрона в атоме. Согласно формуле (15.7), энергия атома возрастает с увеличением квантового числа  $n$ , или что тоже самое, с увеличением радиуса электронной орбиты.

При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую (ближайшую к ядру) орбиту, излучается квант энергии, равный

$$\hbar\omega = E_n - E_m = \frac{m_e e^4}{2\hbar^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Отсюда частота испущенного света получается равной

$$\omega = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где введено обозначение  $R = \frac{m_e e^4}{2\hbar^3} = 3,28985 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{с}}$

Эта константа называется **постоянная Ридберга**.

На основе теории Бора подобным образом могут быть рассчитаны спектры водородоподобных ионов, содержащих один электрон и имеющих заряд ядра  $Ze$ . В этом случае

$$\omega = Z^2 R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Теория Бора имела огромное значение для раскрытия физической сущности закона периодичности в системе элементов Д. И. Менделеева. Теория Бора имела ряд недостатков:

1. Она носила явно полуклассический характер.
2. Теория Бора, объясняя частоты спектральных линий, не могла объяснить их интенсивность.
3. Теория Бора, успешно расшифровав особенности спектра простейшего атома водорода, не могла быть распространена на более сложные атомы.

Теория Бора по существу оставалась на позициях классической физики. Она явилась лишь переходным этапом от классической физики к квантовой.

## § 15.2 Современные представления о строении атома

1. Атом состоит из тяжёлого ядра радиусом  $\approx 10^{-15}$  м из  $Z$  положительно заряженных протонов  $p$  и определённого числа не имеющих заряда нейтронов  $n$ , которые окружены  $Z$  отрицательно заряженных электронов (так что в целом атом электрически нейтрален).
2. Размеры атомов определяются размерами их электронных оболочек, которые не имеют строго определённых границ. Линейные размеры атомов  $\approx 10^{-10}$  м.
3. Энергия электронов в атоме может принимать лишь ряд дискретных значений, что является следствием волновых свойств электронов.
4. Движение электронов в атоме рассматривается как сложный колебательный процесс, напоминающий стоячие волны.
5. Состояние электрона в атоме характеризуется распределением в пространстве его электрического заряда, то есть распределением его электронной плотности. То есть электрон в атоме рассматривается как «размазанный» в пространстве и образующий вокруг ядра электронное облако определённой конфигурации. Наибольшая электронная плотность из всех возможных соответствует основному состоянию атома.
6. В многоэлектронных атомах электроны группируются в электронные оболочки, окружающие ядро на различных расстояниях и характеризующиеся определёнными значениями электронной плотности.
7. Все электроны в атоме подчиняются принципу Паули, согласно которому в любом квантовом состоянии может находиться не более одного электрона, то есть каждый электрон в атоме отличается от другого хотя бы одним квантовым числом.  
(принцип Паули позволил объяснить таблицу Менделеева, то есть существование периодичности в химических свойствах элементов).

### Вопросы для самопроверки

1. Строение атома по Бору. Опыт Франка и Герца.
2. Закономерности в атомных спектрах.
3. Модель атома водорода по Бору. Постулаты Бора.
4. Современные представления о строении атома.

## § 15.3 Примеры решения задач

**Пример 15.1** Электрон в атоме водорода с первой орбиты переходит на орбиту, радиус которой в девять раз больше. Какую энергию  $\Delta E$  должен поглотить атом?

**Решение:**

Радиусы разрешённых орбит  $r_n = r_1 n^2$ , следовательно, электрон переходит на третью боровскую орбиту. Атом при этом должен поглотить энергию

$$\Delta E = E_3 - E_1 = \left( -\frac{Z^2 q_e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{3^2} \right) - \left( -\frac{Z^2 q_e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \frac{1}{1^2} \right) = \frac{Z^2 q_e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2} \frac{8}{9} = \frac{Z^2 q_e^4 m}{9 \varepsilon_0^2 h^2},$$

Подставив числовые значения, получим:

$$\Delta E = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{9(8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2} \text{ Дж} = 1,91 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

**Ответ:**  $\Delta E = 1,91 \cdot 10^{-18}$  Дж .

**Пример 15.2** В результате поглощения фотона электрон в атоме водорода перешёл с первой боровской орбиты на вторую. Определить частоту этого фотона.

**Решение:**

Длину волны поглощённого фотона можно определить по формуле Бальмера

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

Частота фотона  $\nu = c/\lambda$ , где  $c$ -скорость света, равная  $3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ , следовательно,

$$\nu = cR \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

$$\nu = 3 \cdot 10^8 \cdot 1,0974 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) Гц = 2,5 \cdot 10^{15} Гц$$

**Ответ:**  $\nu = 2,5 \cdot 10^{15} Гц$ .

**Пример 15.3** Найти наибольшую длину волны  $\lambda_{max}$  света, который вызовет ионизацию атома водорода.

**Решение:**

Ионизация атома водорода произойдет при поглощении кванта света с энергией большей, чем потенциал ионизации атома. Выражая энергию кванта света через длину волны, запишем это условие в виде неравенства:

$$\frac{hc}{\lambda} > \frac{me^4}{8\pi\epsilon_0^2\hbar^2}$$

Из него следует неравенство для длины волны

$$\lambda < \frac{8\pi\epsilon_0^2 hc\hbar^2}{me^4}.$$

Следовательно, наибольшая длина волны света, при облучении которым может произойти ионизация атома водорода,

$$\lambda_{max} = \frac{8\pi\epsilon_0^2 hc\hbar^2}{me^4}$$

Подставляем значения физических величин и выполняем вычисления:

$$\lambda_{max} = \frac{8 \cdot 3.14 \cdot (8.85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot (1.05 \cdot 10^{-34})^2}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19})^2} = 92 \cdot 10^{-9} м = 92 нм$$

Ионизацию атома водорода может вызвать свет с длиной волны меньше чем 92 нм.

**Ответ:**  $\lambda_{max} = 92 нм$ .

**Пример 15.4** Пользуясь теорией Н. Бора, вычислит величину радиуса атома водорода, находящегося в основном состоянии.

**Решение:**

По теории Н.Бора радиус орбиты электрона может быть вычислен с помощью формулы (15.6). Основное состояние соответствует значению  $n = 1$ . Подставим в формулу (15.6)  $n=1$  и значения других физических величин и выполним вычисления:

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2} = \frac{4 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot (1.05 \cdot 10^{-34})^2}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (1.6 \cdot 10^{-19})^2} = 0,53 \cdot 10^{-10} м.$$

В атомной физике для измерения длины часто применяется единица, называемая **ангстрем** ( $\text{\AA}$ ),  $1 \text{\AA} = 10^{-10} м$ . В этих единицах радиус атома водорода в его основном состоянии

$r_1 = 0,53 \text{\AA}$ .

**Ответ:**  $r_1 = 0,53 \text{\AA}$ .

**Пример 15.5** Определите значение энергии, соответствующее первому (низшему) и второму энергетическим уровням в атоме водорода (энергию вычислить в электрон-вольтах).

**Решение:**

Формула для значения энергии имеет вид:  $E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 e^4 m}{8 \varepsilon_0^2 h^2}$ ,

поэтому подставив табличные значения, получим:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{1^2 (1,6 \cdot 10^{-19})^4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{8 (8,85 \cdot 10^{-12})^2 (6,62 \cdot 10^{-34})^2} = -2,17 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{1}{n^2} \text{ Дж}$$

или в электрон-вольтах:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ эВ.}$$

Окончательно имеем:  $E_1 = -\frac{13,6}{1^2} = -13,6 \text{ эВ}$ ,  $E_2 = -\frac{13,6}{2^2} = -3,4 \text{ эВ}$ .

**Ответ:**  $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ ;  $E_2 = -3,4 \text{ эВ}$ .

**Пример 15.6** Определите, на какую орбиту с основной ( $n = 1$ ) перейдет электрон в атоме водорода при поглощении фотона энергией  $E_\phi = 2,46 \cdot 10^{-18}$  Дж.

**Решение:**

Переход электрона с первой орбиты на более высокую орбиту происходит при поглощении фотона. Энергия фотона связана с длиной волны формулой

$$E_\phi = h\nu = hc / \lambda .$$

Согласно формуле Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

где  $R = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ , поэтому  $k = \frac{1}{\sqrt{1 - R\lambda}} = \frac{1}{\sqrt{1 - Rhc / E_\phi}}$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - 1,0974 \cdot 10^7 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 2,46 \cdot 10^{-18}}} = 3 .$$

**Ответ:**  $k = 3$

*Задачи для самостоятельной работы*

<p><b>Задача 15.1</b> Вычислите радиусы второй и третьей орбиты электрона в атоме водорода.  <b>Ответ:</b> <math>r_2 = 212 \text{ нм}</math>; <math>r_3 = 477 \text{ нм}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.2</b> Определите скорость электрона на второй орбите атома водорода.  <b>Ответ:</b> <math>v = 1.1 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.3</b> Определите потенциальную, кинетическую и полную механическую энергии электрона, находящегося на первой орбите атома водорода.  <b>Ответ:</b> <math>\Pi = -27.2 \text{ эВ}</math>; <math>T = 13.6 \text{ эВ}</math>; <math>E = -13.6 \text{ эВ}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.4</b> Определите длину волны, соответствующую третьей спектральной линии в серии Бальмера. <b>Ответ:</b> <math>\lambda = 434 \text{ нм}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.5</b> Фотон с энергией 16.5 эВ выбил электрон из невозбуждённого атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от атома водорода? <b>Ответ:</b> <math>v = 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.6</b> Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны 121.5 нм. Определите радиус электронной орбиты возбуждённого атома водорода.  <b>Ответ:</b> <math>\lambda = 212 \text{ нм}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.7</b> Вычислите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на первый. <b>Ответ:</b> <math>E_\phi = 12.1 \text{ эВ}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.8</b> Электрон в атоме водорода переходит со стационарной орбиты с энергией - 8.2 эВ на орбиту с энергией - 4.7 эВ. Определите энергию поглощённого при этом фотона.  <b>Ответ:</b> <math>E_\phi = 3.5 \text{ эВ}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.9</b> Найти электрическую мощность <math>P</math> атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД <math>\eta</math> станции равен 16%. Принять энергию <math>Q</math>, выделяющуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ. <b>Ответ:</b> <math>P = 15 \text{ МВт}</math>.</p>
<p><b>Задача 15.10</b> Определите массовый расход <math>m_t</math> ядерного горючего <math>^{235}\text{U}</math> в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность <math>P</math> электростанции равна 10 МВт. Принять энергию <math>Q</math>, выделяющуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ. КПД <math>\eta</math> электростанции составляет 20%. <b>Ответ:</b> <math>m_t = 53 \text{ г}</math>.</p>