

## ЛЕКЦИЯ 11 СТРОЕНИЕ АТОМОВ

### 11.1. Атом водорода и водородоподобные атомы

*Модель атома Томсона («пудинг»)*. Атомом называется наименьшая частица вещества, обладающая всеми химическими свойствами данного химического элемента. Представление об атомах как неделимых частицах вещества возникли еще в античные времена. В начале XX века встал вопрос о строении атома. Первая модель атома принадлежит Дж. Дж. Томсону. Согласно этой модели, атом представляет собой непрерывно заряженный положительным зарядом шар радиуса  $\sim 10^{-10}$  м, внутри которого около своих положений равновесия колеблются электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален (рис. 11.1).

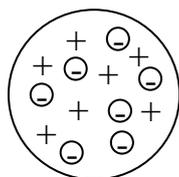


Рис. 11.1

*Модель атома Резерфорда (планетарная модель)*. Опыты Э.Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц в веществе показали, что представление о непрерывно распределенном внутри атома положительном заряде ошибочно. Резерфорд предложил ядерную («планетарную») модель атома, согласно которой, в состав атома входит положительно заряженное ядро и электроны, движущиеся в электрическом поле ядра (рис. 11.2).

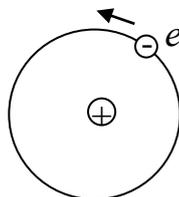


Рис. 11.2

Заряд ядра  $Ze$  по абсолютной величине равен суммарному заряду всех электронов атома ( $Z$  – порядковый номер элемента в системе Менделеева,  $e$  – элементарный заряд).

Однако, атом Резерфорда оказался неустойчивой системой. Эта модель не согласуется с наблюдаемой стабильностью атомов и противоречит

законам классической физики. По законам классической электродинамики вращающийся вокруг ядра электрон должен *непрерывно* излучать электромагнитные волны и поэтому терять свою энергию. В результате электроны будут приближаться к ядру и в конце концов упадут на него. Кроме того, эта модель не объясняет наблюдаемые на опыте оптические спектры атомов, состоящие из узких спектральных линий (согласно планетарной модели спектры атомов должны быть сплошными). Таким образом, попытки построить модель атома в рамках классической физики не привели к успеху. Возникшие трудности были успешно преодолены после создания качественно новой *квантовой* теории атома.

## 11.2. Атом водорода

Простейшим атомом, состоящим из одного протона в ядре и одного электрона, движущегося в кулоновском электрическом поле ядра, является *атом водорода*. Водородоподобными ионами (изоэлектронными водороду) являются ионы  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ ,  $\text{Be}^{+++}$ , имеющие ядро с зарядом  $Ze$  и один электрон. Среди оптических свойств атома важнейшим является его *спектр излучения* – отдельные спектральные линии или группы близко расположенных линий. Каждому элементу присущ свой, характерный только для него, линейчатый спектр излучения, позволяющий определить элемент, которому он принадлежит. Самым изученным является спектр атома водорода. Швейцарский ученый И. Бальмер подобрал эмпирическую формулу, описывающую спектральные линии атома водорода.

*Обобщенная формула Бальмера-Ридберга* (для частоты):

$$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (11.1)$$

где  $\nu$  – частоты линий в дискретном линейчатом спектре атома водорода,  $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

В каждой серии  $m$  имеет постоянное значение  $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  (определяет серию),  $n$  – принимает целочисленные значения, начиная с  $m + 1$  (определяет отдельные линии данной серии). Целые числа  $m$  и  $n$  называются *главными квантовыми числами*, причем  $n = m + 1, m + 2, m + 3$  и т.д. Группа линий с одинаковым квантовым числом  $m$  называется серией. Таким образом, серии линий водородного спектра:  $m = 1$  – серия Лаймана;  $m = 2$  – серия Бальмера;  $m = 3$  – серия Пашена;  $m = 4$  – серия Брэкета;  $m = 5$  – серия

Пфунда;  $m = 6$  – серия Хемфри. В таблице 11.1 представлен экспериментальный спектр излучения атома водорода.

Экспериментальный спектр излучения атома водорода

Таблица 11.1

Область спектра	Название серии	Сериальная формула
ультрафиолетовая	серия Лаймана	$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 2, 3, 4...]$
видимая	серия Бальмера	$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 3, 4, 5...]$
инфракрасная	серия Пашена	$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 4, 5, 6...]$
	серия Брэкета	$\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 5, 6, 7...]$
	серия Пфунда	$\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 6, 7, 8...]$
	серия Хэмфри	$\nu = R \left( \frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $[n = 7, 8, 9...]$

Так как  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , то обобщенная формула Бальмера-Ридберга (11.1) может быть переписана для длины волны

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (11.2)$$

где  $R' = \frac{R}{c} = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$  – постоянная Ридберга.

Каждому значению квантового числа  $m$  в формуле Бальмера-Ридберга соответствует граница серии с наибольшей частотой (при  $n = \infty$ ), называемой *термом*  $T_n$ :  $T_n = \frac{R}{m^2}$  (для водорода);  $T_n = \frac{Z^2 R}{m^2}$  (для водородоподобного иона).

С увеличением  $n$  линии серии сближаются; значение  $n = \infty$  определяет границу серии, к которой примыкает непрерывный спектр.

Формула Бальмера-Ридберга для водородоподобного иона:

$$\nu = Z^2 R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (11.3)$$

Приведенные сериальные формулы были подобраны эмпирически и долгое время не имели теоретического обоснования, хотя и были подтверждены экспериментально с высокой точностью.

### 11.3. Постулаты Бора. Спектр атома водорода по Бору

Спектр и энергетические уровни атома водорода были впервые истолкованы с помощью постулатов Бора.

*Первый постулат Бора* (постулат стационарных состояний): в атоме существует набор стационарных состояний, находясь в которых он не излучает энергии; эти состояния характеризуются определенными дискретными значениями энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым ускоренно движутся электроны, но излучения света при этом не происходит.

*Второй постулат Бора* (правило квантования орбит): в стационарном состоянии атома электрон, движущийся по круговой орбите, имеет *квантованные* (дискретные) значения момента импульса, удовлетворяющие условию:

$$L_n = m_e v_n r_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3...), \quad (11.4)$$

где  $m_e$  – масса электрона;  $v_n$  – его скорость на  $n$ -орбите радиуса  $r_n$ ;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – постоянная Планка.

*Третий постулат Бора* (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается один фотон с энергией, равной разности энергий соответствующих стационарных состояний  $h\nu = E_n - E_m$ . При  $E_n > E_m$  происходит излучение фотона, при  $E_n < E_m$  его поглощение. Набор возможных дискретных частот  $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$  квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома водорода.

### 11.4. Возможные орбиты в модели атома водорода

Постулаты, выдвинутые Бором позволили рассчитать спектр атома водорода и водородоподобных систем, а также теоретически вычислить

постоянную Ридберга. Рассмотрим движение электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}, \quad (11.5)$$

где  $n$  – номер орбиты. Электрон, двигаясь по круговой орбите, обладает, согласно постулату Бора, дискретными квантовыми значениями момента импульса  $m_e v_n r_n = n\hbar$ . Тогда радиус  $n$ -й стационарной орбиты можно найти, если выразить из этого уравнения скорость электрона на  $n$ -й орбите:

$$v_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n},$$

возвести это значение в квадрат и подставить в уравнение движения электрона (11.5)

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e n^2 \hbar^2}{r_n m_e^2 r_n^2} \Rightarrow r_n = n^2 \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e}, \quad (11.6)$$

где  $e$  – элементарный заряд;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $m_e$  – масса электрона;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  – постоянная Планка;  $n$  – квантовое число.

*Первый Боровский радиус* (радиус первой орбиты электрона при  $n = 1$ )

$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} = a = 52,8 \text{ пм} \quad (11.7)$$

Связь между  $r_n$  и  $r_1$ :  $r_n = n^2 r_1$ , т.е. радиусы орбит квантованы:  $r_1, 4r_1, 9r_1 \dots$

### 11.5. Энергия электрона в атоме водорода

Полная энергия электрона в атоме водорода складывается из его кинетической энергии  $\left(\frac{m_e v_n^2}{2}\right)$  и потенциальной энергии в электростатическом поле ядра ( $U_n$ ). Вспомним уравнение движения электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода (11.5)

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n} \Rightarrow m_e v_n^2 = \frac{e^2 r_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

Тогда *кинетическая энергия* электрона

$$\frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (11.8).$$

*Потенциальная энергия* электрона в электростатическом поле ядра

$$E_n - E_\infty = A = \int_n^\infty F dr \Rightarrow$$

*Полная энергия электрона в атоме водорода:*

$$E_{\text{полн}} = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}; \quad (11.9)$$

Учтем значение  $r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m_e e^2}$ , тогда *полная энергия электрона* в атоме водорода

$$E_{\text{полн}} = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{n^2} \frac{m_e e^2}{\hbar^2 4\pi\epsilon_0} = -\frac{1}{n^2} \frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{4\hbar^2 \pi^2 \epsilon_0^2} \Rightarrow E_{\text{п}} = -\frac{1}{n^2} \frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{h^2 \epsilon_0^2} \quad (11.10).$$

Подставим в формулу (11.10) фундаментальные постоянные:  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг;  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, тогда *полная энергия электрона* в атоме водорода (в электрон-вольтах):  $E_n = -\frac{13,6}{n^2}$  эВ.

*Вывод:* энергия электрона в атоме водорода может принимать только дискретные значения, т.е. энергия квантуется. Энергетические состояния атома водорода образуют последовательность энергетических уровней, изменяющихся в зависимости от  $n$ .

*Основное состояние* (состояние с минимальной энергией) соответствует  $n = 1$ , а его энергия  $E_1 = -13,6$  эВ. Состояния с  $n > 1$  являются

возбужденными. Уровни энергии стационарных состояний электрона схематически изображаются в виде горизонтальных прямых (рис. 11.3.)

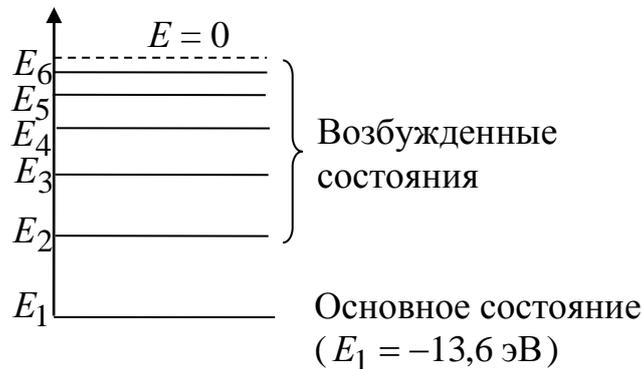


Рис. 11.3

С увеличением  $n$  энергетические уровни сближаются и при  $n \rightarrow \infty$   $E_n \rightarrow 0$ . Таким образом, электрон в атоме водорода обладает минимальной энергией  $E_1 = -13,6$  эВ при  $n = 1$  и максимальной энергией  $E_\infty = 0$  при  $n = \infty$ . Знак « $-$ » означает, что электрон находится в связанном состоянии. Если  $E_n > 0$ , то электрон – свободный и обладает любой энергией.

Значение  $E_\infty = 0$  соответствует *ионизации атом (отрыву от него электрона)*. Энергия ионизации – это энергия, необходимая для удаления электронов из атома, находящегося в *основном состоянии*. Для атома водорода энергия ионизации  $E_i = 13,6$  эВ.

*Энергия связи* для данного состояния – это энергия, необходимая для удаления электрона из атома, находящегося в *данном возбужденном состоянии*. Например, энергия связи первого возбужденного состояния ( $n = 2$ ) равна 3,48 эВ.

*Энергия возбуждения* – это энергия, которую надо сообщить атому, чтобы электрон из основного состояния перешел в возбужденное. Например, энергия для первого возбужденного состояния ( $n = 2$ )  $E_{\text{возб}} = -3,48 - (-13,6) = 10,1$  эВ.

## 11.6. Спектр атома водорода по Бору

Согласно второму постулату Бора, при переходе атома водорода из состояния  $n$  в состояние  $m$  с меньшей энергией испускается квант

$$h\nu = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

откуда частота излучения:

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (11.11)$$

где  $R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}$  – постоянная Ридберга, совпадающая с экспериментальным ее

значением в эмпирических формулах для спектра излучения атома водорода.

Подставляя в формулу (11.11)  $m=1$  и  $n=2, 3, 4, \dots$  получаем группу линий, образующих серию Лаймана и соответствующих переходам электронов с возбужденных уровней ( $n=2, 3, 4, 5, 6, \dots$ ) на основной ( $n=1$ ).

При подстановке  $m=2$  и  $n=3, 4, 5, \dots$  получаем серию Бальмера;  $m=3$  и  $n=4, 5, 6, \dots$  – серию Пашена и т.д (рис. 11.4).

По теории Бора, спектральные серии соответствуют излучению, возникающему в результате перехода атома в данное состояние из возбужденных состояний, расположенных выше данного. *Спектр поглощения* атома водорода является линейчатым, но содержит при нормальных условиях только серию Лаймана, поскольку при сообщении атомам извне определенной энергии могут наблюдаться лишь переходы атомов из основного состояния ( $n=1$ ) в возбужденные.

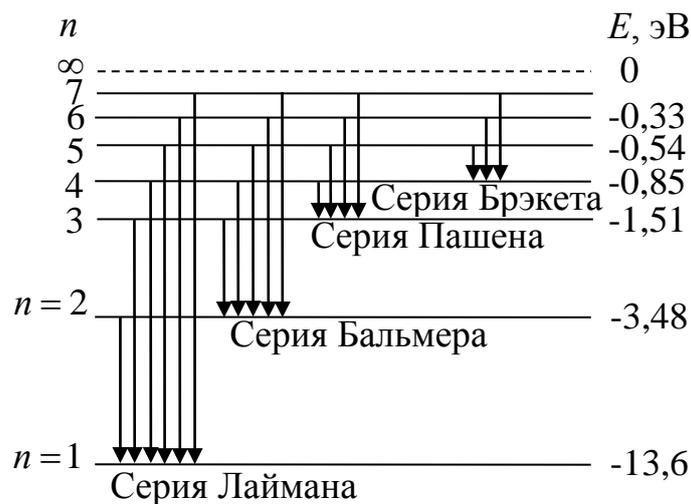


Рис. 11.4

*Достоинства и недостатки теории Бора.*

*Достоинства:*

1. Объяснила линейчатый спектр атомов;
2. Предсказала правильные значения частот спектральных линий атома водорода;
3. Правильно определила размеры атома водорода;
4. Получила верное значение постоянной Ридберга.

*Недостатки:*

1. Обладает внутренними противоречиями (с одной стороны, применяют законы классической физики, с другой стороны – основывается на квантовых постулатах);
2. Не смогла объяснить интенсивность линий в спектре;
3. Не смогла объяснить, почему совершаются те или иные переходы;
4. Оказалась несостоятельной в отношении многоэлектронных атомов (даже атома гелия – следующего за атомом водорода).

Однако, несмотря на недостатки, теория Бора явилась важным шагом в развитии атомной физики и явилась важным этапом в создании квантовой механики.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое атом? Какие модели атомов вам известны? Почему модель атома Резерфорда оказалась несостоятельной? Каковы ее недостатки?
2. Что такое спектр излучения. Что представляет из себя спектр излучения атома водорода?
3. Запишите сериальные формулы для ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областей спектра излучения атома водорода.
4. Запишите обобщенную формулу Бальмера-Ридберга для частоты и длины волны. Какой смысл имеют числа  $m$  и  $n$  в обобщенной формуле Бальмера-Ридберга. Что такое терм?
5. Определите максимальную и минимальную энергии фотона в ультрафиолетовой серии спектра атома водорода (серия Лаймана).
6. Разъясните смысл постулатов Бора. Как с их помощью разъясняется линейчатый спектр атомов водорода?
7. Получите выражение для радиуса  $n$ -й стационарной орбиты электрона в атоме водорода. Чему равен первый боровский радиус? Какова связь между  $r_n$  и  $r_1$ ?
8. Запишите выражения для кинетической, потенциальной, полной энергии электрона в атоме водорода. Покажите, что энергия электрона в основном состоянии ( $n = 1$ ) действительно равна  $-13,6$  Эв. Что означает знак « $\leftarrow$ »?

9. Что представляет собой спектр атома водорода по Бору. Как можно вычислить постоянную Ридберга? Что такое энергия связи электрона в атоме, энергия ионизации, энергия возбуждения?

10. Каковы достоинства и недостатки теории Бора?

### **Задачи**

1. Определите энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на второй. [1,89 эВ].

2. Определите скорость электрона на третьей орбите атома водорода. [0,731 Мм/с].

3. Используя теорию Бора для атома водорода, определите: 1) радиус ближайшей к ядру орбиты (первый боровский радиус); 2) скорость движения электрона по этой орбите. [52,8 пм; 2,19 Мм/с].

## ЛЕКЦИЯ 12 ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

### 12.1. Атом водорода в квантовой механике

Решение задачи об энергетических уровнях электрона в атоме водорода сводится к задаче движения электрона в кулоновском поле ядра. Так как масса протона много больше массы электрона, протон можно считать закрепленным в центре атома и его можно рассматривать как неподвижный силовой центр, к которому притягивается электрон. Потенциальная энергия электрона в электростатическом поле протона равна

$$U(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad 12.1$$

где  $r$  – расстояние между электроном и ядром;  $e$  – заряд электрона. График этой функции, имеющей вид гиперболы приведен на рис. 12.1. Потенциальная энергия  $U(r)$  при приближении электрона к ядру неограниченно убывает

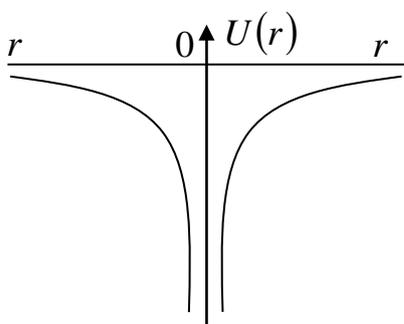


Рис. 12.1

С точки зрения квантовой механики для нахождения энергетического спектра электрона в потенциальном поле ядра необходимо решить стационарное уравнение Шредингера

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0. \quad \text{Здесь } E \text{ –}$$

значение полной энергии электрона в атоме. Состояние электрона описывается волновой функцией  $\psi$ , зависящей от всех трех координат  $x, y, z$ , так как атом представляет собой трехмерное образование.

Решение уравнения Шредингера непрерывно, однозначно и конечно в следующих случаях: 1. При любых положительных значениях энергии, что

соответствует электрону, пролетающему вблизи ядра и удаляющемуся в бесконечность (свободные электроны); 2. При дискретных отрицательных значениях энергии, равных  $E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$  ( $n = 1, 2, 3...$ ), что соответствует

электрону, связанному с ядром.

На рис. 12.2 в виде горизонтальных прямых показаны энергетические уровни, каждому из которых соответствует определенная волновая функция  $\Psi(n)$  и определенные радиусы орбит электронов.

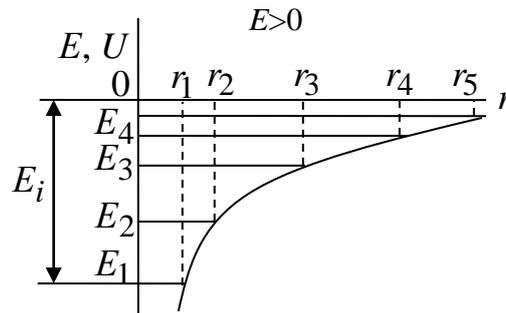


Рис. 12.2

*Вывод:* Решение уравнения Шредингера для атома водорода без каких-либо постулатов приводит к появлению *дискретных энергетических уровней*. Самый нижний уровень  $E_1 = -13,6$  эВ, отвечающий минимально возможной энергии – *основной*. Все остальные уровни  $E_n > E_1$  ( $n = 2, 3...$ ) – *возбужденные*. По мере роста главного квантового числа  $n$ , энергетические уровни располагаются теснее и при  $n = \infty$ ,  $E_\infty = 0$ .

Движение электрона при  $E < 0$ , когда электрон находится внутри гиперболической «потенциальной ямы» называется *связанным*. При  $E > 0$  движение электрона является свободным. Область непрерывного спектра  $E > 0$  соответствует *ионизированному атому*. *Энергия ионизации атома водорода* – энергия, необходимая для отрыва электрона, находящегося в основном состоянии, от ядра равна:

$$E_i = -E_1 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} = 13,6 \text{ эВ.}$$

Это выражение совпадает с формулой, полученной Бором для энергии атома водорода. Заметим, что в квантовой механике дискретные значения

энергии вытекают непосредственно из решения уравнения Шредингера, не нуждаясь в введении специальных постулатов.

## 12.2. Квантовые числа

Решение уравнения Шредингера приводит к еще одному важному результату: *каждому из дискретных возбужденных энергетических состояний электрона в атоме водорода соответствует несколько собственных функций  $\psi_{nlm_l m_s}$* . Собственные функции определяются квантовыми числами. Всего их четыре. Рассмотрим физический смысл каждого из них.

1. *Главное квантовое число  $n$*  – определяет энергию электрона в атоме

$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{1}{8} \frac{m_e e^4}{h^2 \epsilon_0^2}$ , совпадает с номером энергетического уровня и может

принимать любые целочисленные значения, начиная с единицы:

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

2. *Орбитальное квантовое число  $l$*  – определяет величину орбитального момента импульса электрона (механический орбитальный момент) в атоме и при заданном  $n$  принимает значения

$$l = 0, 1, \dots, (n - 1).$$

Из решения уравнения Шредингера вытекает, что момент импульса электрона *квантуется*, т.е. принимает дискретные значения, определяемые по формуле:

$$L_e = \hbar \sqrt{l(l+1)} \quad (12.2)$$

*Пример:* состоянию с энергией, характеризующейся  $n = 1$  соответствует одна волновая функция  $\psi_1$  с  $L_e = 0$ ; состоянию с  $n = 2$  соответствуют две волновые функции:  $\psi_1$  с  $L_e = 0$  и  $\psi_2$  с  $L_e = \hbar\sqrt{2}$ . Поскольку квадрат волновой функции характеризует вероятность нахождения электрона в данной точке пространства, то различие  $\psi_1$  и  $\psi_2$  означают разную форму электронного облака при одной и той же энергии электрона: в первом случае это сферическое облако, в другом – облако в виде гантели.

Состояние электрона, обладающего различными значениями орбитального квантового числа, в атомной физике и химии принято обозначать следующим образом:  $l = 0$  ( $s$ -состояние);  $l = 1$  ( $p$ -состояние);  $l = 2$  ( $d$ -состояние);  $l = 3$  ( $f$ -состояние) и т.д. в порядке латинского алфавита.

3. *Магнитное квантовое число*  $m_l$  определяет проекции момента импульса на заданное направление внешнего поля. При заданном  $l$  магнитное квантовое число может принимать  $(2l+1)$  различных значений:

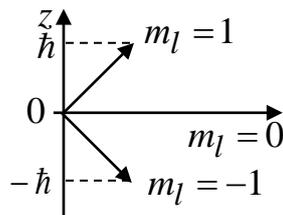
$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l.$$

Таким образом, если атом находится в магнитном или электрическом поле, то *вектор орбитального момента импульса*  $\vec{L}_l$  ориентируется определенным квантованным образом: возможны лишь такие ориентации  $\vec{L}_l$ , при которых его проекция  $L_{lz}$  на направлению  $z$  внешнего магнитного поля принимает значения, кратные  $\hbar$ :

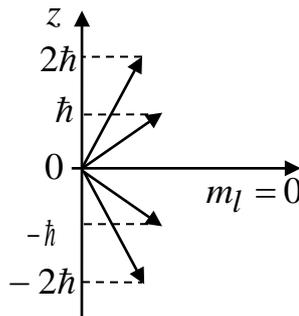
$$L_{lz} = m_l \hbar. \quad (12.3)$$

Это условие часто называют *пространственным квантованием*. Наличие квантового числа  $m_l$  приводит в магнитном поле к расщеплению уровня с главным квантовым числом  $n$  на  $2l+1$  подуровней. В спектре атома наблюдается расщепление спектральных линий – *эффект Зеемана*.

*Например:* 1. Возможные ориентации вектора  $\vec{L}_l$  в пространстве для электронов в  $p$ -состоянии ( $l = 1$ ),  $m_l = \pm 1$



2. Для  $d$ -состояния ( $l = 2$ ),  $m_l = \pm 2$



4. *Магнитное спиновое квантовое число*  $m_s$  характеризует собственный момент импульса электрона (*спиновый момент импульса*), не связанный с движением электрона в пространстве – *спин*  $L_s$ . *Спин* – это квантовая величина, не имеющая классического аналога – особое свойство электрона, наряду с его массой и зарядом. Наличием спина объясняется тонкая структура спектральных линий атома водорода, которая впервые наблюдалась в опытах О. Штерна и В. Герлаха.

Согласно общим выводам квантовой механики спин квантуется по закону

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}, \quad (12.4)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число.

Число ориентаций  $L_s$  равно  $(2s+1)$ . Для электрона  $2s+1=2$  (в опытах Штерна и Герлаха наблюдалось только две ориентации), следовательно,  $s = \frac{1}{2}$ . Проекция *спинового момента импульса*  $L_s$  на направление внешнего магнитного поля тоже является квантованной величиной и определяется по формуле:

$$L_{sz} = m_s \hbar, \quad (12.5)$$

где  $m_s$  – *магнитное спиновое квантовое число*, которое может принимать только два значения  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ . Таким образом, проекция *спинового момента импульса* на направление поля может принимать два значения  $L_{sz} = \pm \frac{1}{2} \hbar$ .

Несмотря на то, что энергия электрона в атоме зависит только от квантового числа  $n$ , каждому собственному значению энергии  $E_n$  (кроме  $E_1$ ) соответствует  $n^2$  собственных функций, отличающихся значениями квантовых чисел  $l$  и  $m_l$ . Поэтому атом водорода может иметь одно и тоже значение энергии, находясь в нескольких различных состояниях: а) электрон в состоянии  $n=2$  и  $l=0$  –  $2s$ -электрон; б) электрон в состоянии  $n=2$  и  $l=1$  –  $2p$ -электрон.

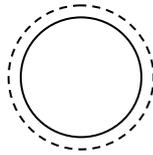
Квантовые числа и их значения являются следствием решений уравнений Шредингера и условий однозначности, непрерывности и конечности, налагаемых на волновую функцию  $\Psi$ . Поскольку при движении электрона в атоме существенны волновые свойства электрона, то квантовая

механика отказывается от классического представления об электронных орбитах. Вероятность обнаружения электрона в некоторой точке определяется квадратом модуля волновой функции. Расчет показал, что электрон как бы «размазан» по всему объему, образуя «электронное облако», плотность которого характеризует вероятность нахождения электрона в различных точках объема атома. Таким образом, с точки зрения квантовой механики точной траектории электрона не существует. Это объясняется его волновыми свойствами и соотношениями Гейзенберга.

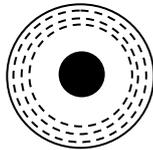
Квантовые числа  $n$  и  $l$  характеризуют размер и форму электронного облака, квантовое число  $m_l$  – характеризует ориентацию «электронного облака» в пространстве;  $m_s$  – характеризует добавочную внутреннюю степень свободы электрона.

*Пример:* Рассмотрим распределение электронной плотности (формы электронного облака) для состояний атома водорода при  $n=1$  и  $n=2$ , определяемое  $|\psi_{n,l,m_l}|^2$ . Оно зависит от  $n$ ,  $l$  и  $m_l$ .

При  $l=0$  и  $m_l=0$  электронная плотность отлична от нуля в центре и не зависит от направления (сферически симметрична).



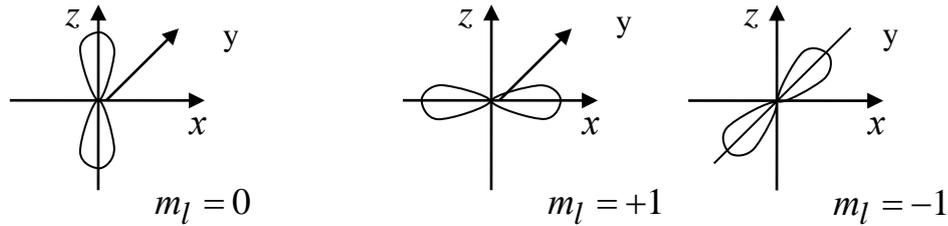
Электрон может находиться в  $1s$ -состоянии ( $n=1$ ,  $l=0$ ,  $m_l=0$ ), определяемом волновой функцией  $\psi_{100}$  и в  $2s$ -состоянии ( $n=2$ ,  $l=0$ ,  $m_l=0$ ), определяемом волновой функцией  $\psi_{200}$ .



Видно, что электронные облака, соответствующие состояниям  $1s$  и  $2s$  обладают сферической симметрией. Для остальных состояний электронная плотность в центре равна нулю и зависит от направления.

Например: при  $n=2$ ,  $l=1$

$m_l = 0$	$\psi_{210}$	}	$2p$ – состояние
$m_l = -1$	$\psi_{21-1}$		
$m_l = +1$	$\psi_{211}$		



Видно, что электронные облака для  $2p$ -состояний представляют собой вытянутые «гантели», ориентированные вдоль соответствующей координатной оси.

Так как энергия электрона зависит только от главного квантового числа  $n$  и не зависит от  $l$  и  $m_l$ , то данному значению  $E_n$  соответствует не одно, а несколько состояний, которые различаются квантовыми числами  $l$  и  $m_l$ . Такие состояния называются *вырожденными*.

Общее число состояний, отвечающих данному значению  $n$  можно определить следующим образом. При данном  $n$  орбитальное квантовое число  $l$  может изменяться от 0 до  $(n-1)$ , а каждому  $l$  соответствует  $(2l + 1)$  состояний с разными  $m_l$ . Просуммируем  $(2l + 1)$  по всевозможным значениям  $l$ , т.е. в пределах от 0 до  $(n-1)$ . Тогда *кратность вырождения* или *общее число состояний, отвечающих данному значению  $n$* :

$$z = \sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2. \quad (12.6)$$

В связи с тем, что для полной характеристики состояния электрона в атоме необходимо знать не 3, а 4 квантовых числа:  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ , то число состояний, отвечающее данному значению главного квантового числа  $n$  (кратность вырождения) удвоится ( $n^2$  состояний со спином  $+\frac{1}{2}\hbar$  и  $n^2$  состояний со спином  $-\frac{1}{2}\hbar$ ) и будет равна:  $z = 2n^2$ .

### 12.3. Правило отбора

Квантовые числа  $n$ ,  $l$  и  $m_l$  позволяют более полно описать спектр испускания (поглощения) атома водорода, полученного в теории Бора.

В квантовой механике вводится *правило отбора*, ограничивающее число возможных переходов электронов в атоме, связанных с испусканием и поглощением света.

Для дипольного излучения электрона, движущегося в центрально-симметричном поле ядра, могут осуществляться только такие переходы, для которых:

1. Изменение орбитального квантового числа  $\Delta l$  удовлетворяет условию  $\Delta l = \pm 1$  (орбитальное квантовое число меняется на единицу);
2. Изменение магнитного квантового числа  $\Delta m_l$  удовлетворяет условию  $\Delta m_l = 0, \pm 1$ .

Правило отбора в основном выполняется в оптических спектрах, хотя могут наблюдаться и очень слабые «запрещенные» линии, возникающие при квадрупольных переходах с  $\Delta l = 2$ . Учитывая число возможных состояний, соответствующих данному  $n$  и правилу отбора, рассмотрим спектральные линии атома водорода (рис. 12.3).

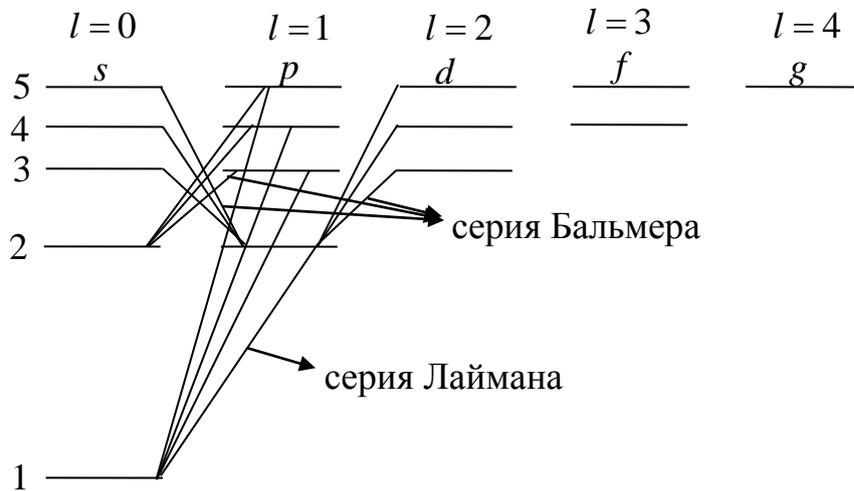


Рис. 10.3

Серия	Соответствующие переходы
Серия Лаймана	$np \rightarrow 1s$ ( $n = 2, 3, 4 \dots$ )
Серия Бальмера	$np \rightarrow 2s$ $ns \rightarrow 2p$ ( $n = 3, 4, 5 \dots$ ) $nd \rightarrow 2p$

Переход электрона из основного состояния в возбужденное может происходить за счет поглощения атомом фотона. Так как поглощающий атом находится обычно в основном состоянии, то спектр атома водорода должен состоять из линий, соответствующих переходам  $1s \rightarrow np$  ( $n = 2, 3, 4 \dots$ ) – серия Лаймана, что находится в полном согласии с опытом.

### Контрольные вопросы

1. К каким важным выводам приводит решение стационарного уравнения Шредингера для атома водорода?
2. Что характеризуют квантовые числа: главное, орбитальное и магнитное? Какие значения они могут принимать?
3. Что такое спин электрона? Какие значения может принимать спиновое квантовое число для электрона?
4. Каковы правила квантования орбитального механического  $L_l$  и собственного механического моментов импульса электрона? Их проекций на направление внешнего магнитного поля?
5. В чем заключается эффект Зеемана?
6. Почему атом водорода может иметь одну и ту же энергию, находясь в различных состояниях? Какие состояния называются вырожденными?
7. Что такое кратность вырождения? Сколько различных волновых функций соответствует главному квантовому числу  $n = 4$ ?
8. Сформулируйте правила отбора в квантовой механике. Какие переходы разрешены в спектре атома водорода?

### Задачи

1. Каковы возможные значения  $l$  и  $m_l$  для главного квантового числа  $n = 5$ ?
2. Электрон находится в  $f$ -состоянии. Определите возможные значения (в единицах  $\hbar$ ) проекции момента импульса  $L_{lz}$  орбитального движения электрона в атоме на направление внешнего магнитного поля.
3. Определите во сколько раз орбитальный момент импульса  $L_l$  электрона, находящегося в  $f$ -состоянии, больше, чем для электрона в  $p$  – состоянии. [2,45].
4. Определите числовое значение: 1) собственного механического момента импульса (спина)  $L_s$ ; 2) проекции спина  $L_{sz}$  на направление внешнего магнитного поля.

## ЛЕКЦИЯ 13. МНОГОЭЛЕКТРОННЫЙ АТОМ

### 13.1. Механический и магнитный моменты электрона в атоме

Существование у атомов механического и магнитного момента импульса и дипольного магнитного момента изначально связывалось с движением электрона по орбитам. И хотя представление об орбитах в квантовой механике неправомерно, оно удобно для представления происходящих в атоме процессов. Действительно, круговое движение электронов по орбите в атоме обуславливает существование у электронов *орбитального механического момента импульса*  $L_l$ . С другой стороны, движение электрона эквивалентно существованию кругового тока и связанного с ним *магнитного момента электрона*  $\mu_l$ . Согласно законам квантовой механики эти моменты не могут быть произвольными, а могут принимать только дискретные значения, т.е. *квантуются*:

$$L_l = \hbar\sqrt{l(l+1)}; \quad \mu_l = -\frac{e\hbar}{2mc}\sqrt{l(l+1)}, \quad (13.1)$$

где  $l$  – орбитальное квантовое число, которое принимает ряд значений  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона;  $c$  – скорость света. Знак « $\leftarrow$ » указывает на то, что направления механического и магнитного моментов противоположны.

Для орбитального движения электрона отношение магнитного момента к механическому равно  $\frac{\mu_l}{L_l} = -\frac{e}{2mc}$ . Однако из ряда опытов следует, что это отношение на самом деле в 2 раза больше. В связи с этим была выдвинута гипотеза, что электрон обладает собственным моментом импульса  $L_s$ , не связанным с движением электрона в пространстве, а так же собственным магнитным моментом  $\mu_s$

$$L_s = \hbar\sqrt{s(s+1)}; \quad \mu_s = -\frac{e\hbar}{mc}\sqrt{s(s+1)}, \quad (13.2)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число. Число ориентаций  $L_s$  равно  $(2s+1)$ . Для электрона  $2s+1=2$ , следовательно,  $s = \frac{1}{2}$ . Собственный момент импульса определяется по формуле:

$$L_s = \hbar m_s$$

где  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  – магнитное спиновое квантовое число.

Для других микрочастиц спиновое квантовое число может быть как полуцелым, так и целым и даже равным нулю. Спин составных микрочастиц, например, атомов, определяется спинами, входящих в него частиц.

### 13.2. Принцип тождественности микрочастиц. Бозоны и фермионы

В классической физике, как бы ни были сходны частицы, всегда принципиально возможно проследить за их движением и отличить одну от другой. В квантовой механике тождественные частицы полностью теряют свою «индивидуальность» и становятся неразличимыми, поскольку состояние микрочастицы описывается волновой функцией, имеющей вероятностный смысл.

Фундаментальный принцип квантовой механики – *принцип тождественности одинаковых микрочастиц*, согласно которому все одинаковые микрочастицы, образующие данную квантово-механическую систему, являются совершенно тождественными и экспериментально различить их не возможно. Принцип тождественности ведет к свойству *симметрии волновой функции*: при перестановке частиц волновая функция системы либо остается неизменной, либо меняет свой знак

$$\psi(x_1, x_2) = \pm \psi(x_2, x_1), \quad (13.3)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – совокупность пространственных и спиновых координат первой и второй частицы.

Итак, возможны только два класса состояний:

1. Если при перемене частиц местами волновая функция не меняет знака, то она называется *симметричной*;
2. Если при перестановке частиц волновая функция меняет знак, то она называется *антисимметричной*.

Изменение знака волновой функции не сказывается на состоянии, т.к. физический смысл имеет только квадрат модуля волновой функции. Характер симметрии волновой функции сохраняется во времени. Выбор того или иного класса состояний для какой-либо системы частиц может быть продиктован только природой частиц.

Установлено, что симметрия или антисимметрия волновых функций определяется спином частиц. В зависимости от характера симметрии все

элементарные и составные частицы (атомы, молекулы) делятся на 2 класса: бозоны и фермионы (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Класс частиц	Определение	Разъяснение
Бозоны ( $\pi$ -мезоны, фотоны)	Частицы описываемые симметричными функциями и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна	Симметричными волновыми функциями описываются системы тождественных частиц с нулевыми и целыми спинами
Фермионы (электроны, протоны)	Частицы описываются антисимметричными волновыми функциями и подчиняются статистике Ферми-Дирака	Антисимметричными волновыми функциями описываются системы тождественных частиц с полуцелыми спинами

Сложные частицы (например, атомные ядра), составленные из нечетного числа фермионов являются фермионами, а из четного – бозонами.

### 13.3. Многоэлектронный атом. Принцип Паули

Квантовая механика дает описание свойств простейшего атома – атома водорода. Выражение потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром имеет в этом случае простой вид  $U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ , что позволяет провести решение уравнения Шредингера до конца. Значительно сложнее обстоит дело для атомов, содержащих большое число электронов. Потенциальная энергия каждого такого электрона складывается из энергии притяжения его к ядру и энергии отталкивания от других электронов. Наличие последнего слагаемого не позволяет получить точного решения уравнения Шредингера. Существуют приближенные методы решения этого уравнения. Один из методов, получивших название *метода самосогласованного поля*, состоит в том, что рассматривают движение электрона в некотором результирующем поле, образованном ядром и остальными электронами (это поле называют *самосогласованным*). Движение электрона в самосогласованном поле можно рассматривать, в первом приближении, как движение в водородоподобном атоме. Состояние каждого электрона в атоме характеризуется теми же четырьмя квантовыми числами, что и в атоме водорода:  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ .

В атоме водорода энергия электрона зависит только от главного квантового числа  $n$  и не зависит от  $l$  и  $m_l$ . Поэтому данному значению

энергии  $E_n$  соответствует несколько *вырожденных* состояний, которые различаются квантовыми числами  $l$  и  $m_l$ .

Наличие взаимодействия между электронами в многоэлектронном атоме приводит к тому, что величина энергии электрона зависит не только от  $n$ , но и от  $l$ . Уровень энергии электрона оказывается расщепленным на  $n$  подуровней, соответствующих различным значениям квантового числа  $l$ .

Если бы электроны в атоме были классическими частицами, то при температуре абсолютного нуля, все они разместились бы на самом низком энергетическом уровне, а все другие уровни были бы пустыми. В действительности этого не происходит. Распределение электронов в атоме по состояниям происходит согласно *принципу Паули*: в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых стационарных состояниях, определяемых набором четырех квантовых чисел: главного  $n$ , орбитального  $l$ , магнитного  $m_l$  и спинового  $m_s$ . Применительно к системе электронов в атоме *принцип Паули* можно записать следующим образом:

$$Z(n, l, m_l, m_s) = 0 \text{ или } 1, \quad (13.4)$$

где  $Z(n, l, m_l, m_s)$  – число электронов, находящихся в состоянии, описываемом набором квантовых чисел  $n, l, m_l, m_s$ .

*Принцип Паули* (квантово-механическая формулировка): *в системе одинаковых фермионов любые два из них не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии, или, системы фермионов встречаются в природе в состояниях, описываемых антисимметричными волновыми функциями.*

Отметим, что бозоны могут находиться в одном и том же состоянии, и их количество в этом состоянии не лимитировано.

### 13.4. Распределение электронов в атоме по состояниям

Итак, распределение электронов по состояниям управляется принципом Паули: в каждом состоянии, характеризующемся квантовыми числами  $n=1,2,3,\dots$ ;  $l=0,1,2,\dots,(n-1)$ ;  $m_l=-l,-(l-1),\dots,-1,0,1,\dots,(l-1)$ ; и  $m_s=\pm\frac{1}{2}$ , может находиться только один электрон, причем предполагается, что меньшим значениям квантовых чисел соответствуют меньшие значения энергии. Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемом главным квантовым числом  $n$ , равно

$$Z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2. \quad (13.5)$$

Электроны с одним и тем же главным квантовым числом  $n$  образуют электронный слой:  $n=1$  –  $k$ -слой;  $n=2$  –  $l$ -слой и т.д. В каждом слое, электроны распределяются по оболочкам (подслоям), соответствующим квантовому числу  $l$ :  $l=0$  –  $s$ -оболочка;  $l=1$ :  $p$ -оболочка;  $l=2$ :  $d$ -оболочка и т.д. В каждой оболочке с данным  $l$  может разместиться  $2(2l+1)$  электронов. Принцип Паули ограничивает число электронов в каждом слое и оболочке. В таблице 13.2 представлена периодическая система химических элементов, составленная на основе принципа Паули. Порядок заполнения электронных оболочек и определяет химические свойства данного элемента.

Таблица 13.2

Главное квантовое число $n$	1		2			3			4				5						
Символ оболочки	$K$		$L$			$M$			$N$				$O$						
Максимальное число электронов в оболочке ( $2n^2$ )	2		8			18			32				50						
Орбитальное квантовое число $l = n - 1$	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4				
Символ подоболочки	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g				
Максимальное число электронов в подоболочке $2(2l+1)$	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18				
Магнитное квантовое число $m_l$	0	0	-1 0 +1	0	-1 0 +1	-2 -1 0 +1 +2	0	-1 0 +1	-2 -1 0 +1 +2	-3 -2 -1 0	+1 +2	0	-1 0 +1 +2	-2 -1 0	+1 +2 +3	-3 -2 -1 0	+1 +2 +3	-4 -3 -2 -1 0	+1 +2 +3 +4

### 13.5. Периодическая система элементов Менделеева

Являясь одним из важнейших законов природы, периодический закон Менделеева составляет основу современной химии, атомной и ядерной физики. Теория периодической системы основывается на следующих положениях:

1. Порядковый номер химического элемента равен общему числу электронов в атоме данного элемента;

2. Состояние электронов в атоме определяется набором из квантовых чисел  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  и  $m_s$ . Распределение электронов в атоме по энергетическим состояниям должно удовлетворять принципу минимума энергии: с возрастанием числа электронов каждый следующий электрон должен занять возможное энергетическое состояние с наименьшей энергией;

3. Заполнение электронами энергетических состояний в атоме должно происходить в соответствии с принципом Паули.

В периодической системе элементов наблюдается повторяемость в структуре внешних оболочек у атомов родственных элементов. Так инертные газы (Ne, Ar и Kr) имеют одинаковые внешние оболочки из 8 электронов (заполненные  $s$ - и  $p$ -состояния). Во внешней оболочке щелочных металлов (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) имеется лишь один  $s$ -электрон. Во внешней оболочке щелочно-земельных металлов (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) имеется два  $s$ -электрона. Галоиды (F, Cl, Br, I, At) имеют внешние оболочки инертного газа. Так как химические и некоторые физические свойства элементов определяются внешними электронами в атомах, то периодичность свойств химических элементов должна быть связана с определенной периодичностью в расположении электронов в атомах. Считается, что каждый последующий элемент образован из предыдущего прибавлением к ядру одного протона и соответственно одного электрона в электронной оболочке атома. В таблице 13.3 представлена периодическая система химических элементов Менделеева.

Таблица 13.3

Период	Атомный номер $Z$	Элемент	$K$			$L$			$M$			$N$		
			1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f		
I	1	$H$	1											
		$He$	2											
II	3	$Li$	2	1										
	4	$Be$	2	2										
	5	$B$	2	2	1									
	6	$C$	2	2	2									
	7	$N$	2	2	3									
	8	$O$	2	2	4									
	9	$F$	2	2	5									
	10	$Ne$	2	2	6									
III	11	$Na$	2	2	6	1								
	12	$Mg$	2	2	6	2								
	13	$Al$	2	2	6	2	1							
	14	$Si$	2	2	6	2	2							
	15	$P$	2	2	6	2	3							
	16	$S$	2	2	6	2	4							
	17	$Cl$	2	2	6	2	5							
	18	$Ar$	2	2	6	2	6							
IV	19	$K$	2	2	6	2	6	–	1					
	20	$Ca$	2	2	6	2	6	–	2					
	21	$Sc$	2	2	6	2	6	1	2					

Рассмотрим кратко последовательность заполнения электронами состояний в атомах некоторых химических элементов. В атоме водорода единственный электрон находится в состоянии  $1s$ , характеризуемом квантовыми числами  $n=1$ ,  $l=0$ ,  $m_l=0$ ,  $m_s = \frac{1}{2}$  или  $-\frac{1}{2}$ . В атоме  $He$  имеются два электрона. Второй электрон этого атома тоже может находиться в состоянии  $1s$ , т.е. при  $n=1$ ,  $l=0$ ,  $m_l=0$ , но спин второго электрона должен быть ориентирован противоположно спину первого (для одного  $m_s = \frac{1}{2}$ , для другого  $m_s = -\frac{1}{2}$ ). Группа состояний с  $n=1$ ,  $l=0$ ,  $m_l=0$

$m_s = \pm \frac{1}{2}$  образует заполненный  $K$ -слой атома, соответствующий завершению первого периода системы Менделеева.

Следующий по порядку атом  $Li$  содержит три электрона. Но по принципу Паули, третий электрон атома  $Li$  уже не может разместиться в целиком заполненном  $K$ -слое и занимает самое низкое энергетическое состояние в слое с  $n=2$  ( $L$ -слой):  $2s$ -состояние ( $n=2, l=0, m_l=0$ ).  $Li$  начинается второй период системы Менделеева. Электронная конфигурация для атома  $Li$ :  $1s^2 2s$ .

Четвертый электрон  $Be$  занимает состояние  $2s$ , а пятый электрон  $B$  должен уже занять энергетически более высокое состояние  $2p$  ( $n=2, l=1$ ).

Электроны всех атомов вплоть до  $Ne$  ( $Z=10$ ) размещаются в подслое с  $l=1$  и  $n=2$ . У  $Ne$  таких электронов 6 – число, максимально возможное для такого состояния. Таким образом,  $L$ -слой  $Ne$  оказывается полностью застроенным и на этом элементе завершается второй период системы Менделеева.

Одиннадцатый электрон  $Na$  ( $Z=11$ ) размещается в  $M$ -слое ( $n=3$ ), занимая наинизшее состояние  $3s$ . Электронная конфигурация имеет вид:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s$ . Далее, вплоть до  $Ar$  ( $Z=18$ ) идет последовательно застройка  $M$ -слоя. Она заканчивается заполнением всех состояний подслоя  $3p$  у  $Ar$ , завершающего третий период системы Менделеева.

Девятнадцатый электрон калия  $K$  ( $Z=19$ ) должен был занять  $3d$ -состояние в  $M$ -слое. Однако химические и оптические свойства  $K$  аналогичны свойствам  $Li$  и  $Na$ , у которых валентный электрон в  $s$ -состоянии. Поэтому у  $K$  его девятнадцатый электрон должен находиться в  $s$ -состоянии уже в следующем  $N$ -слое ( $n=4$ ) –  $4s$ -состоянии. Таким образом, начиная с  $K$  при незаполненном  $3d$ -подслое  $M$ -слоя начинается застройка  $N$ -слоя. Начиная со  $Sc$  ( $Z=21$ ), возобновляется нормальное заполнение  $3d$ -подслоя, которое заканчивается у  $Cu$  ( $Z=29$ ).

Далее, до  $Kr$  ( $Z=36$ ) происходит нормальное заполнение  $N$ -слоя.  $Kr$  завершает четвертый период системы Менделеева.

Изложенное выше показывает, что периодичность химических свойств элементов объясняется повторяемостью электронных конфигураций во внешних электронных оболочках у атомов родственных элементов.

Теоретическое объяснение периодического закона Менделеева – одного из важнейших законов естествознания явилось важнейшим достижением современной физики. Принцип Паули ограничивает число электронов в каждом слое и оболочке.

### Контрольные вопросы

1. В чем суть принципа неразличимости тождественных частиц? Какие волновые функции называют симметричными? антисимметричными?
2. Какие частицы являются бозонами? фермионами? Приведите примеры.
3. Сформулируйте принцип Паули.
4. На каких положениях основана периодическая система элементов Д.И. Менделеева? Чем объясняется периодичность в химических свойствах элементов?

### Задачи.

1. Запишите электронную конфигурацию для атомов: 1) неона; 2) никеля; 3) германия; 4) кобальта.
2. Сколько электронов может быть в атоме, у которого в основном состоянии заполнены  $K$ - и  $L$ -слои,  $3s$ -оболочка и два электрона в  $3p$ -оболочке? Что это за атом?
3. Заполненной электронной оболочке соответствует главное квантовое число  $n = 3$ . Определите число электронов в этой оболочке, которые имеют следующие одинаковые квантовые числа: 1)  $m_s = 1/2$  и  $l = 2$ ; 2)  $m_s = -1/2$ ;  $m_l = 0$ .

## ЛЕКЦИЯ 14. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ

### 14.1. Поглощение. Спонтанное и вынужденное излучения

Атомы могут находиться лишь в состояниях с дискретными значениями энергии  $E_1, E_2, E_3 \dots$ . Существует три типа переходов атомов из одного состояния в другое (рис. 14.1): а) поглощение излучения; б) спонтанное излучение; в) вынужденное излучение.

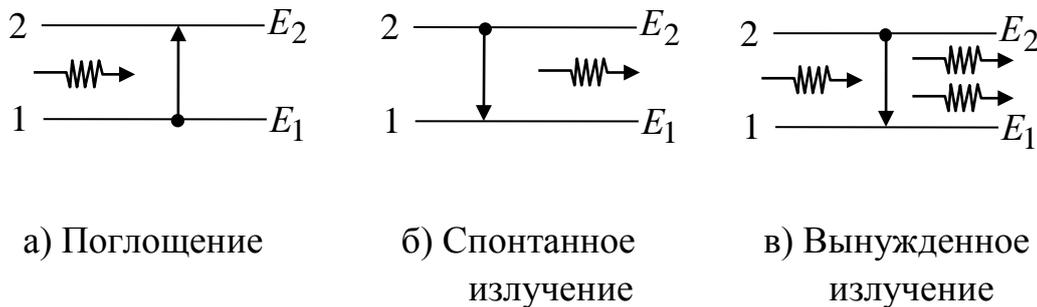


Рис. 14.1

Рассмотрим подробнее эти типы переходов.

а) *Поглощение излучения*. Атом, находясь в основном состоянии, может осуществить вынужденный переход в возбужденное состояние путем поглощения фотона, когда энергия фотона совпадает с разностью энергий между возбужденным и основным уровнями  $h\nu = E_2 - E_1$  (рис. 14.1 а);

б) *Спонтанное излучение* (самопроизвольное). Атом, находясь в возбужденном состоянии, может осуществить спонтанные переходы в основное состояние без каких-либо внешних воздействий, испуская при этом фотон с энергией  $h\nu = E_2 - E_1$ . Процесс испускания фотона возбужденным атомом без каких-либо внешних воздействий называется *спонтанным* (самопроизвольным) *излучением* (рис. 14.1 б). Так как спонтанные акты излучения взаимно не связаны между собой, то *спонтанное излучение* некогерентно;

в) *Вынужденное* (индуцированное) *излучение*. Атом, находясь в возбужденном состоянии, может осуществить *вынужденный* переход в основное состояние под действием внешнего излучения с частотой  $h\nu = E_2 - E_1$  с излучением фотона той же энергии  $h\nu = E_2 - E_1$ . При подобном переходе происходит излучение атомом фотона *дополнительно* к тому фотону, под действием которого произошел переход. Такое излучение называется *вынужденным*. Таким образом, в процесс вынужденного

излучения вовлечено два фотона: первичный фотон и вторичный фотон. Вторичный фотон, испускаемый атомом, неотличим от первичного фотона, стимулирующего переход, т.е. вынужденное излучение *строго когерентно* с вынуждающим излучением и имеет такую же частоту, фазу, поляризацию и направление распространения, как и вынуждающее излучение.

Для усиления вынужденного излучения необходимо, чтобы число актов вынужденного излучения фотонов превышало число актов поглощения фотонов. Это возможно, если система находится в *неравновесном состоянии*. *Неравновесное состояние* системы атомов, в котором число атомов в возбужденных состояниях больше, чем их число в основном состоянии называется состоянием с *инверсией населенностей* (*инверсное состояние*). Процесс перевода системы в *инверсное состояние* называется *накачкой*. Накачку можно осуществить оптическими, электрическими и другими способами.

В средах с инверсными состояниями (активных средах) вынужденное излучение может превышать поглощение света атомами, и падающий пучок света при прохождении через вещество будет усиливаться. Это явление описывается законом *Бугера-Ламберта-Фабриканта*

$$I = I_0 e^{|\alpha|x}, \quad (14.1)$$

где  $I_0$  – интенсивность света, входящего в среду (при  $x = 0$ );  $I$  – интенсивность света, прошедшего слой толщиной  $x$ ;  $|\alpha|$  – положительный коэффициент, соответствующий усилению света при его прохождении через вещество. В данном случае явление протекает так, как если бы в законе Бугера-Ламберта  $I = I_0 e^{-\alpha x}$ , коэффициент поглощения  $\alpha$ , зависящий от интенсивности излучения, стал бы отрицательным. Активные среды поэтому можно рассматривать в качестве сред с отрицательным коэффициентом поглощения.

Таким образом, *активные среды (среды с инверсией населенностей) могут усиливать электромагнитное излучение, падающее на них*. Открытие явления усиления электромагнитных волн и способ их генерации лежит в основе квантовой электроники, положения которой позволили осуществить квантовые усилители и квантовые генераторы света.

## 14.2. Оптические квантовые генераторы (лазеры)

Практически инверсное состояние среды осуществлено в *оптических квантовых генераторах (лазерах)* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения).

*Лазеры* – это приборы, генерирующие узкий пучок монохроматического когерентного излучения высокой интенсивности в видимой, инфракрасной и ближней ультрафиолетовой областях (в оптическом диапазоне). Идея нового принципа усиления и генерации электромагнитных волн в *мазерах* (генераторы и усилители, работающие в сантиметровом диапазоне радиоволн) и *лазерах* принадлежит Н.Г.Басову, А.М. Прохорову и Ч. Таунсу, удостоенным в 1964 году Нобелевской премии.

Лазеры делятся по типу активной среды, методу накачки и режиму генерации:

Тип активной среды	Методы накачки	Режим генерации
Твердотельные; Газовые; Полупроводниковые; Жидкостные.	Оптические; Тепловые; Химические; Электроионизационные.	Непрерывный; Импульсный.

Лазер обязательно содержит три компонента: 1) *активную среду*, в которой создаются состояния с инверсией населенностей; 2) *систему накачки* – устройство для создания инверсии в активной среде; 3) *оптический резонатор* – устройство, выделяющее в пространство избирательное направление пучка фотонов и формирующее выходящий пучок света.

*Принцип действия твердотельного лазера.* Первым твердотельным лазером был *рубиновый лазер* (США, 1960, Т. Мейман). Кристалл рубина – это оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), содержащий в качестве примеси (0,03 - 0,05 %) ионы  $Cr^{3+}$ . Инверсная населенность уровней иона  $Cr^{3+}$  осуществляется по трехуровневой схеме, предложенной в 1955 г. Н.Г. Басовым и А.М. Прохоровым (рис. 14.2)

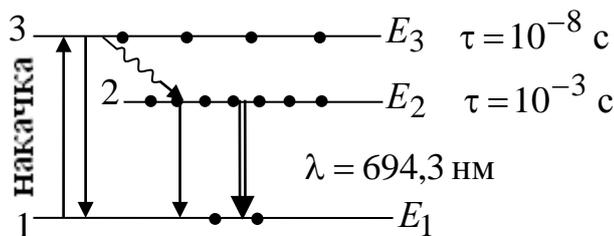


Рис. 14.2

Среди энергетических уровней иона  $\text{Cr}^{3+}$  рассмотрим три:  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$ . В состоянии с энергией  $E_3$  ион  $\text{Cr}^{3+}$  живет  $\tau = 10^{-8}$  с. В состоянии с энергией  $E_2$  ион существует достаточно долго –  $\tau = 10^{-3}$  с. Такое возбужденное энергетическое состояние атомной системы, в котором она может существовать длительное время, в результате чего, переход в более низкое состояние происходит благодаря вынужденному, а не спонтанному излучению называется *метастабильным*.

При интенсивном облучении рубина светом мощной импульсной лампы ( $\lambda \sim 560$  нм) ион хрома переходит с уровня 1 на уровень 3 и затем спонтанно «сваливается» в метастабильное состояние с энергией  $E_2$  с передачей избытка энергии решетке кристалла рубина, в результате чего кристалл нагревается. Переход 2-1 запрещен правилом отбора, поэтому время жизни метастабильного состояния велико:  $\tau \sim 10^{-3}$  с. В результате оказывается, что большинство ионов  $\text{Cr}^{3+}$  находится в возбужденном состоянии, т.е. имеет место инверсная населенность, необходимая для генерации лазерного излучения. В какой-то момент один из ионов  $\text{Cr}^{3+}$  спонтанно перейдет с уровня  $E_2$  в основное состояние. Вследствие этого появится фотон, который, столкнувшись с другим возбужденным ионом  $\text{Cr}^{3+}$ , приводит к появлению второго, дополнительного фотона с той же частотой. В результате появляется лавина вторичных фотонов – зарождается лазерная генерация. Фотоны испускаются в разных направлениях, поэтому излучение не может обладать высокими когерентными свойствами.

Для выделения направления лазерной генерации используется *оптический резонатор* – система обращенных друг к другу параллельных зеркал, расположенных на концах рубинового стержня (рис. 14.3).



Рис. 14.3

При попадании фотонов на зеркала, большинство из них отражается и, двигаясь в обратном направлении, продолжают стимулировать испускание ионами  $\text{Cr}^{3+}$  новых фотонов. Многократно усиленный поток фотонов, летящих то в одну, то в другую сторону между зеркалами, выходит через полупрозрачное зеркало на одном из концов трубки, создавая строго

направленный световой пучок огромной яркости. Таким образом, резонатор служит для усиления фотонного потока и формирования лазерного излучения с высокими когерентными свойствами. Лазеры на рубине работают в импульсном режиме (несколько вспышек в минуту).

*Принцип действия газового лазера (He-Ne).* На практике чаще используются лазеры непрерывного действия, рабочим веществом которых являются газы ( $\text{CO}_2$ , Ne, Ar). Инверсия населенностей уровней осуществляется электрическим разрядом, пропускаемым через газ (рис. 14.4).

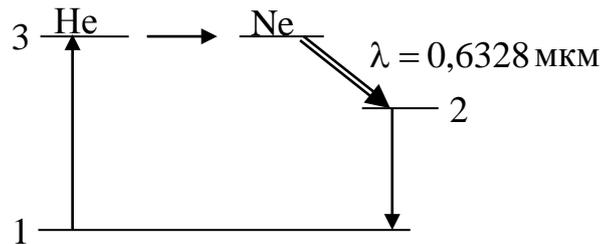


Рис. 14.4

Гелий He служит носителем энергии возбуждения, а неон Ne дает лазерное излучение. В процессе разряда часть атомов He возбуждается и переходит в состояние 3. При столкновении возбужденных атомов He с атомами Ne происходит возбуждение последних, и они переходят на метастабильный уровень и далее на один из нижних уровней с испусканием фотонов, что приводит к лазерному излучению с  $\lambda = 0,6328$  мкм.

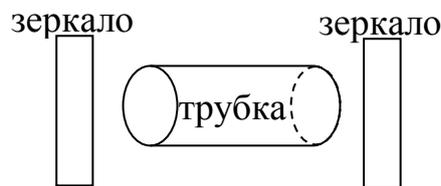


Рис. 14.5

С помощью параллельных диэлектрических зеркал, отражающих 99 % излучения, осуществляется усиление света (рис. 14.5). Для повышения степени поляризации генерируемого света на концы трубки наклеиваются пластинки под углом Брюстера ( $\text{tg} i_B = n$ ).

*Свойства лазерного излучения:*

1. *Временная и пространственная когерентность.* Время когерентности составляет  $\tau_{\text{ког}} = 10^{-3}$  с, что соответствует длине когерентности  $l_{\text{ког}} = \tau_{\text{ког}} \cdot c = 3 \cdot 10^5$  м, т.е. на 7 порядков выше, чем для обычных источников света ( $10^{-2}$  м);

2. *Строгая монохроматичность* ( $\Delta\lambda < 10^{-11}$  м);

3. *Большая плотность потока энергии;*

*Пример:* если рубиновый стержень получил  $W = 20$  Дж энергии при накачке и высветился за  $\tau = 10^{-3}$  с, то поток излучения  $\Phi_e = \frac{20}{10^{-3}} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 2 \cdot 10^4$  Вт.

Фокусируя это излучение на площади  $S = 1 \text{ мм}^2$ , получим плотность потока энергии  $\frac{\Phi_e}{S} = \frac{2 \cdot 10^4}{10^{-6}} = 2 \cdot 10^{10} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

4. *Очень малое угловое расхождение в пучке;*

5. *КПД лазеров*, составляет от 0,1 % (для He-Ne-лазера) до 75 % (для лазера на стекле с неодимом). КПД  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия, генерирующего в инфракрасной области  $\sim 30$  %;

6. *Полная поляризация выходящего излучения.*

*Применение лазеров.* Можно указать два основных направления применения лазеров в науке и технике: воздействие когерентного оптического излучения на вещество и использование лазеров для передачи и обработки информации. Лазеры применяют:

1. Для резки и микросварки твердых материалов, выжигания калиброванных отверстий в алмазе;
2. Для обнаружения дефектов в изделиях;
3. Для проведения сложных тонких операций в медицине (бескровный хирургический нож);
4. Для исследования механизмов химических реакций и влияния на их ход;
5. Для получения сверхчистых материалов;
6. Для исследования высокотемпературной плазмы;
7. Для светолокации (измерено расстояние от Земли до Луны с точностью до 10 м);
8. Для точного измерения расстояний, нивелирования (определения разности высот), задания определенного направления в геодезии;
9. Для сверхточных измерений линейных перемещений, коэффициентов преломления среды, давления, температуры;
10. Для передачи, получения и обработки информации. (Например, по одному лазерному лучу можно передать до  $10^9$  телефонных разговоров или  $10^5$  телевизионных программ. Лазерный луч может нести столько же информации, сколько все каналы радиосвязи в настоящее время). Когерентность излучения в оптическом диапазоне дает возможность

передавать огромную информацию и может быть использован для создания быстродействующих ЭВМ с большим объемом памяти.

11. Использование в голографии – особом способе записи и последующего восстановления волнового поля, основанном на регистрации интерференционной картины.

*Основные выводы:*

1. Существуют два типа излучения: спонтанное и вынужденное. *Спонтанное* излучение атомов происходит хаотично с разными фазами, в разных направлениях, т.е. оно не когерентно и характерно для всех обычных источников света. *Вынужденное* излучение происходит с верхнего метастабильного уровня энергии атома под действием падающего на него фотона. Направление распространения, частота, фаза и плоскость поляризации вынужденного излучения полностью совпадает с падающим излучением, его вызывающим. Поэтому вынужденное и внешнее излучения являются когерентными;

2. Для работы лазера необходимо, чтобы атомы рабочего вещества имели инверсную населенность, т.е. число атомов с большей энергией должно превосходить число атомов с меньшей энергией;

3. Излучение атомов характеризуется большой мощностью, острой направленностью, монохроматичностью и поляризацией выходящего излучения.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют типы переходов атомов из одного состояния в другое?

2. Что такое спонтанное и вынужденное излучение? Каковы их свойства? Что можно сказать о фазе, поляризации и направлению испускаемых электромагнитных волн в случае спонтанного излучения? в случае вынужденного излучения,

3. Какое условие необходимо для возникновения вынужденного излучения в веществе?

4. Что такое инверсная населенность атомов? Как осуществляются состояния с инверсной населенностью?

5. Что такое активная среда? Какое явление описывает закон Бугера-Ламберта-Фабриканта?

6. В чем заключается оптическая накачка?

7. Что такое лазер? Какие типы лазеров Вам известны (по типу активной среды, методу накачки, режиму генерации).

8. Из каких элементов состоит лазер, и какие условия должны быть выполнены для возникновения лазерного излучения?
9. Для чего нужен оптический резонатор?
10. Каков принцип работы рубинового лазера?
11. Каков принцип работы газового лазера?
12. Каковы свойства лазерного излучения?
13. В каких областях науки и техники применяется лазер?

## ЛЕКЦИЯ 15. ОСНОВЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### 15.1. Энергия связи ядра. Дефект массы

Эксперименты Резерфорда показали, что в центре атома находится очень малое по размерам, но массивное ядро. Атомные ядра – это сложные устойчивые образования. Согласно протонно-нейтронной модели Д.Д. Иваненко, атомное ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов, называемых *нуклонами* (таблица 15.1).

Таблица 15.1

Характеристики нуклонов	Протон ( $p$ )	Нейтрон( $n$ )
Электрический заряд	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	0
Масса	$1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса в $m_e$	$\approx 1836$	$\approx 1839$

Общее число нуклонов в атомном ядре определяет *массовое число*  $A$ . Атомное ядро характеризуется зарядом  $Z_e$ , где  $Z$  – *зарядовое число ядра*, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

Большинство химических элементов имеют ядра, различающиеся массовыми числами, т.е. содержат разное число нейтронов. Такие ядра с одним и тем же зарядовым числом  $Z$  и различными массовыми числами  $A$  называются *изотопами* (водород имеет три изотопа: протий  ${}^1_1\text{H}$ , дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$ ). Ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  называют *изобарами* ( ${}^{10}_4\text{Be}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{10}_5\text{C}$ ). Атомные ядра различных элементов с одинаковым числом нейтронов, но разные числа  $A$  и  $Z$  называются *изотонами* ( ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{15}_8\text{O}$ ).

*Размеры ядер* очень малы. Очевидно, что о точных размерах ядер говорить нельзя из-за двойственной природы частиц вещества, поскольку границы ядра размыты. В первом приближении ядро можно считать сферой, радиус которой зависит от массового числа по формуле  $R \approx 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{\frac{1}{3}}$  (м). Следовательно, объем ядра пропорционален числу нуклонов в атоме. Размер ядра примерно в 100 тыс. раз меньше размера атома. Поскольку вся

масса атома сосредоточена в ядре, то большая часть объема атома фактически является пустым пространством.

*Ядерные силы.* Между нуклонами в ядре действуют силы притяжения, превосходящие силы электростатического отталкивания протонов. Их назвали *ядерными силами*. Эти силы обладают рядом особенностей: 1) они являются только силами притяжения и значительно сильнее электростатического отталкивания протонов; 2) эти силы короткодействующие. Расстояние, на котором еще действуют ядерные силы, называется *радиусом действия* этих сил. Он примерно равен  $1,5 \cdot 10^{-15}$  м; 3) ядерные силы являются зарядово независимыми; 4) эти силы не являются центральными силами, т.е. они зависят не только от расстояния между нуклонами, как это имеет место в случае кулоновской и гравитационной сил, но и от ориентации спинов; 5) для ядерных сил характерно насыщение, которое проявляется в том, что нуклон взаимодействует не со всеми остальными нуклонами, а лишь с некоторыми ближайшими соседями.

Для расщепления ядра на составляющие его нуклоны, необходимо затратить определенную энергию, называемую *энергией связи ядра*. Измерения показали, что масса ядра всегда меньше массы нуклонов, составляющих его, в их свободном состоянии. Разность этих масс называется *дефектом массы*. Таким образом, *дефект массы* – величина, на которую уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

При образовании ядра происходит выделение энергии

$$\Delta E = E_1 - E_2 = (m - M_{\text{я}})c^2 = \Delta mc^2, \quad (15.1)$$

где  $\Delta m$  – дефект массы;  $E_1$  – энергия нуклонов;  $E_2$  – энергия ядра.

Из законов сохранения энергии следует, что такая же энергия должна быть затрачена на расщепление ядра. Если ядро с массой  $M_{\text{я}}$  образовано из  $Z$  протонов с массой  $m_p$  и из  $N = A - Z$  нейтронов с массой  $m_n$ , то дефект массы равен

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}; \quad (15.2)$$

Энергия связи ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}] \cdot c^2, \quad (15.3)$$

где  $m_p$  – масса протона;  $m_n$  – масса нейтрона;  $M_{\text{я}}$  – масса ядра.

Обычно пользуются формулой

$$E_{\text{св}} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m] \cdot c^2, \quad (15.4)$$

где  $m_H = m_p + m_e$  – масса атома водорода;  $m$  – масса атома.

Действительно:

$$E_{\text{св}} = [Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - (M_{\text{я}} + Zm_e)] \cdot c^2;$$

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n - M_{\text{я}} - Zm_e] \cdot c^2.$$

Видим, что вычисления по формуле (15.4) приводят к такому же результату, как и в формуле (15.3).

Об устойчивости ядра судят по *удельной энергии связи* – средней энергии связи, приходящейся на один нуклон ядра. Она равна  $\omega_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$ .

Чем больше  $\omega_{\text{св}}$ , тем устойчивее ядро.

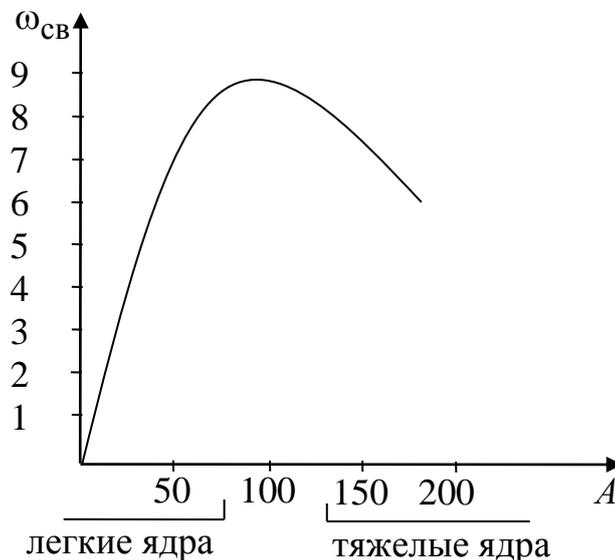


Рис. 15.1

На рис. 15.1 показана зависимость удельной энергии связи  $\omega_{\text{св}}$  от массового числа  $A$ . Самое большое значение удельной энергии связи имеют нуклоны химических элементов, занимающих середину таблицы Менделеева ( $30 < A < 140$ ). В них  $\omega_{\text{св}} \approx 8,7$  МэВ [ $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж]. Нуклоны самых

*легких* и самых *тяжелых* элементов имеют меньшее значение удельной энергии связи (например, для урана  $\omega_{\text{св}} \approx 7,6$  МэВ). Большинство атомных ядер в природе устойчиво. Но оказалось, что ядра с массовым числом  $A > 210$  все неустойчивы, т.е. предрасположены к распаду. Уменьшение удельной энергии связи в тяжелых элементах объясняется тем, что с возрастанием числа протонов в ядре увеличивается и энергия их *кулоновского отталкивания*. Поэтому связь между нуклонами становится менее сильной, а сами ядра менее прочными. Наибольшей стабильностью обладают ядра, в которых число протонов  $Z$  или число нейтронов  $N$  равно одному из следующих чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126, называемых *магическими*. Особенно стабильны *дважды магические ядра*, у которых магическими являются и число протонов, и число нейтронов. Таких ядер всего пять:  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ .

Энергия будет выделяться при таких ядерных реакциях, при которых удельная энергия связи продуктов реакции будет превышать удельную энергию исходных ядер. Это условие может быть выполнено двумя способами: 1) делением тяжелых ядер на более легкие, лежащие в средней части таблицы Менделеева; 2) синтезом легких ядер в более тяжелые ядра. При обоих процессах выделяется огромное количество энергии. Эти процессы в настоящее время осуществлены практически в реакциях деления и термоядерных реакциях.

## 15.2. Радиоактивность

*Радиоактивностью* называется процесс самопроизвольного распада неустойчивых атомных ядер (напомним, что ядра с  $A > 210$  все неустойчивые). Радиоактивный распад ядер сопровождается превращением одних ядер в другие и испусканием определенных частиц. Было установлено, что эти превращения ядер не зависят от внешних условий: освещения, давления, температуры и т.д. Существует два вида радиоактивности: *естественная* и *искусственная*. Естественная радиоактивность наблюдается у химических элементов, находящихся в природе (как правило, у ядер тяжелых элементов, располагающихся в конце таблицы элементов Менделеева за свинцом). Искусственная радиоактивность наблюдается у ядер, полученных в лаборатории с помощью ядерных реакций. Однако принципиального различия между ними нет. Известно, что *естественная радиоактивность* сопровождается излучением  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -лучей.  $\alpha$ -лучи – это поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ , которые обладают большой энергией, высокой

ионизирующей способностью, малой проникающей способностью и отклоняются магнитными и электрическими полями.  $\beta$ -лучи – поток летящих электронов, энергии которых принимают значения от нуля до 1,3 мэВ, обладают высокой проникающей способностью, но меньшей, чем у  $\alpha$ -лучей ионизирующей способностью, отклоняются электрическим и магнитным полями.  $\gamma$ -лучи (электромагнитные волны с очень малой длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м) – поток фотонов. Они обладают относительно слабой ионизирующей способностью, очень большой проникающей способностью, не отклоняются электрическими и магнитными полями.

Преобразования ядер, сопровождающиеся испусканием  $\alpha$  и  $\beta$ -лучей, называются соответственно  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадом. Распадающееся ядро  $X$  называют *материнским*, а ядро продуктов распада  $Y$  – *дочерним*.

*Правила смещения. Радиоактивные семейства.* При радиоактивном распаде ядер выполняются законы сохранения заряда ( $Z$ ) и массового числа ( $A$ ). На основании этих законов были установлены правила смещения, используя которые можно определить массовое число и заряд ядра нового элемента.

При  $\alpha$ -распаде:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$  массовое число дочернего ядра  $Y$  уменьшается на 4, а зарядовое число – на 2.

При  $\beta^-$ -распаде:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$  массовое число дочернего ядра не изменяется, а зарядовое число увеличивается на 1.

При  $\beta^+$ -распаде:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e$  массовое число дочернего ядра не изменяется, а зарядовое число уменьшается на 1. (Здесь  ${}^A_Z X$  – материнское ядро;  $Y$  – дочернее ядро;  ${}^0_{-1} e$  – электрон;  ${}^0_{+1} e$  – позитрон;  ${}^4_2 \text{He}$  –  $\alpha$ -частица)

*Законы сохранения зарядового и массового числа:*

1. Сумма зарядовых чисел возникающих ядер и частиц равна зарядовому числу исходного ядра;

2. Сумма массовых чисел возникающих ядер и частиц равна массовому числу исходного ядра;

3. Правила смещения – следствие законов сохранения зарядового и массового чисел.

Приведем примеры трех типов радиоактивного распада:



где  ${}^0_0\tilde{\nu}$  – *антинейтрино* (эта античастица образуется одновременно с электроном);



где  ${}^0_0\nu$  – *нейтрино* (образуется одновременно с позитроном).

*Радиоактивные семейства.* Получившееся в результате распада дочернее ядро, как правило, является радиоактивным, т.е. оно тоже распадается. Возникает цепочка радиоактивных превращений. Ядра, связанные этой цепочкой, образуют *радиоактивное семейство*.

*Радиоактивные семейства* – совокупность элементов, образующих цепочку или ряд радиоактивных превращений, заканчивающихся стабильным элементом. Семейства называются по наиболее «долгоживущему» (с наибольшим периодом полураспада) родоначальнику:

1. Семейство урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  заканчивается на ядре  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ ;

2. Семейство тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  заканчивается на ядре  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ;

3. Семейство актиния  ${}^{235}_{89}\text{Ac}$  заканчивается на ядре  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ ;

4. Семейство нептуния  ${}^{237}_{93}\text{Np}$  (получено искусственным путем) заканчивается на ядре  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ .

Переход от одного члена семейства к другому осуществляется за счет  $\alpha$  и  $\beta$ -распадов и заканчивается на устойчивых изотопах свинца и висмута.

### 15.3. Закон радиоактивного распада

*Радиоактивный распад* – естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Процесс распада ядра является *случайным*, так как невозможно точно предсказать момент распада данного ядра. Можно предсказать, какова вероятность его распада за рассматриваемый промежуток времени. Введем *постоянную радиоактивного распада*  $\lambda$  - вероятность распада ядра за единицу времени, равная доле ядер, распадающихся за 1 с (определяет скорость распада).

*Закон радиоактивного распада.* Можно считать, что число ядер  $dN$ , распавшихся в среднем за интервал времени от  $t$  до  $t + dt$ , пропорционально промежутку времени  $dt$  и числу  $N$  ядер, не распавшихся к моменту времени  $t$

$$dN = -\lambda N dt. \quad (15.5)$$

Знак « $-$ » показывает, что число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Разделим переменные и проинтегрируем это уравнение, учитывая, что в начальный момент времени  $t=0$  число атомов равнялось  $N_0$ :

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

Получим *закон радиоактивного распада* (его график приведен на рис. 15.2), согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (15.6)$$

где  $N$  – число материнских ядер, нераспавшихся к данному моменту времени;  $N_0$  – начальное число нераспавшихся ядер (в момент времени  $t=0$ );  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.

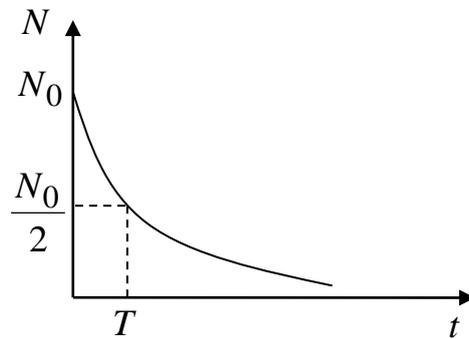


Рис. 15.2

Для количественной характеристики быстроты распада вводится физическая величина – *период полураспада* – промежуток времени, за который в *среднем* число нераспавшихся ядер уменьшится в 2 раза. Тогда, согласно (15.6):

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{1/2}}; \quad \ln 2 = \lambda T_{1/2},$$

откуда *период полураспада* равен

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (15.7)$$

Среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада  $\lambda$ :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (15.8)$$

Активностью нуклида называется число распадов, происходящее с ядрами образца в 1 с (нуклиды – общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов  $Z$  и числом нейтронов  $N$ ):

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (15.9)$$

Единица активности в СИ: беккерель (Бк). 1 Бк – активность нуклида, при которой за 1 с происходит 1 акт распада.

Периоды полураспада некоторых элементов приведены в таблице 15.1:

Таблица 15.1

Нуклид	$T_{1/2}$	Нуклид	$T_{1/2}$
${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ лет	${}^{234}_{90}\text{Th}$	24,1 сут.
${}^{230}_{90}\text{Th}$	$8 \cdot 10^4$ лет	${}^{218}_{84}\text{Po}$	3,05 мин.
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 лет	${}^{212}_{84}\text{Po}$	$3 \cdot 10^{-7}$ с

#### 15.4. Ядерные реакции

Превращения атомных ядер, обусловленные их взаимодействиями друг с другом или элементарными частицами, называются *ядерными реакциями*.

Все ядерные реакции подчиняются общим законам:

1. *Сохранение зарядовых чисел*: сумма зарядовых чисел частиц и ядер, вступающих в реакцию, равна сумме зарядовых чисел частиц и ядер, образующихся в этой реакции.

Пример: бомбардировка ядер азота ядрами гелия



2. *Сохранение полного числа нуклонов*: сумма массовых чисел частиц и ядер до и после реакции, должны равняться друг другу.

Пример:  $4 + 14 = 17 + 1 = 18$  – в приведенной выше реакции;

3. *Сохранение массы – энергии* ( $W = mc^2$ ). Для изолированной от внешних воздействий системы, полная масса – энергия остается неизменной;

4. *Сохранение импульса*;

5. *Сохранение момента импульса*.

Вероятность того, что при попадании пучка частиц на вещество данная реакция пройдет, измеряется ее *эффективным сечением* – площадью воображаемой площадки с центром в ядре-мишени, попадая в которую, частица-снаряд обязательно вызывает реакцию. *Эффективное сечение ядерной реакции*:

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx}, \quad (15.10)$$

где  $N$  – число частиц, попадающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объема  $n$  ядер;  $dN$  – число этих частиц, вступающих в ядерную реакцию в слое толщиной  $dx$ .

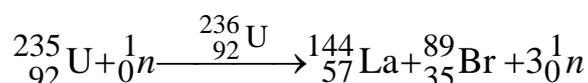
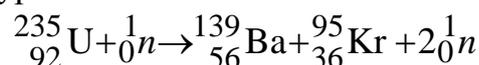
*Единица эффективного сечения ядерных процессов* в СИ – барн (1 барн =  $10^{-28} \text{ м}^2$ ).

### 15.5. Реакция деления ядра. Цепная ядерная реакция

*Реакция деления ядра* – деление тяжелых ядер под действием нейтронов на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе, с высвобождением двух или трех нейтронов деления и выделением большого количества энергии.

В 1938 году немецкие ученые Ганн и Штрассман обнаружили, что ядро урана при бомбардировке нейтронами делится на два более легких ядра, чем исходное ядро:

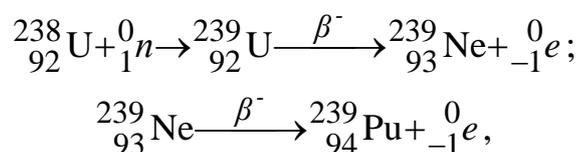
Пример: деление урана-235



Ядра изотопов бария  ${}_{56}^{139}\text{Ba}$ , криптона  ${}_{36}^{95}\text{Kr}$ , лантана  ${}_{57}^{144}\text{La}$ , брома  ${}_{35}^{89}\text{Br}$  обладают избытком нейтронов по сравнению со стабильными ядрами, поэтому они радиоактивны.

*Особенности реакций деления.*

1. Легко делится ядро изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , а не природный уран – изотоп  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Следовательно, необходимо: «обогащение» природного урана изотопом-235. Можно получить из  ${}_{92}^{238}\text{U}$  плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ , который легко делится под действием нейтронов:



где  ${}_{93}^{239}\text{Ne}$  – изотоп нептуния. Плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  имеет большой период полураспада (24 360 лет) и его можно отделить от урана. Таким образом, используются оба изотопа урана для цепной реакции деления:  ${}_{92}^{235}\text{U}$  – непосредственно;  ${}_{92}^{238}\text{U}$  – путем превращения его в плутоний.

2. В результате реакций деления высвобождается огромное количество энергии, в соответствии с формулой Эйнштейна:  $W = \Delta mc^2$ . Масса ядра урана значительно больше массы осколков деления. Образующийся дефект массы и приводит к выделению огромной энергии (~ 200 МэВ на 1 акт деления или  $1,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ).

3. При делении ядра урана выделяется 2 или 3 нейтрона. Испускаемые в каждом акте деления нейтроны, можно использовать для осуществления *цепной реакции*: один нейтрон делит одно ядро урана, а 2 или 3 образовавшихся нейтрона вызовут дополнительное деление и, таким образом, процесс будет лавинообразно нарастать (рис. 15.3).

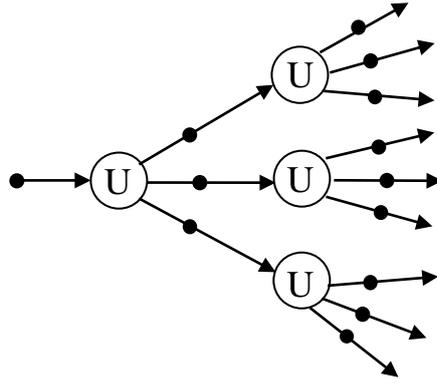


Рис.15.3

*Цепная реакция* – реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Но ядра урана делятся медленными нейтронами, а при реакции деления образуются быстрые нейтроны. Для решения этой проблемы создали замедлитель: тяжелая вода  $D_2O$ , графит (рис. 15.4).

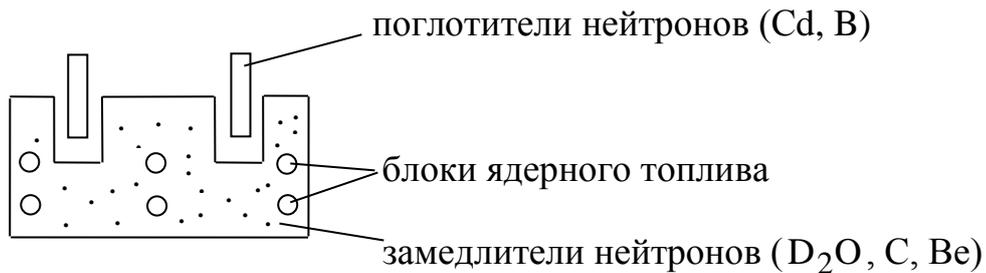


Рис.15.4

Впервые ядерная реакция была получена в виде *взрыва*. Действие *атомной бомбы* основано на использовании неуправляемой *цепной ядерной реакции*. Такая реакция носит взрывной характер, если масса урана или плутония превышает некоторую массу, называемой *критической массой*. *Критическая масса* – минимальная масса делящегося вещества, необходимая для осуществления цепной реакции.

В атомной бомбе с помощью обычного взрыва соединяются 2 или 3 части урана (или плутония) в один кусок с массой, большей критической массы. Возникает неуправляемая цепная реакция, т.е. происходит *взрыв*. Помимо разрушений, возникающих при взрыве атомной бомбы, происходит и радиоактивное заражение местности, поскольку ядра, образовавшиеся после цепной ядерной реакции, радиоактивны.

Управляемая цепная реакция осуществляется на атомных электростанциях (АЭС). В отличие от ядерной бомбы в ядерных реакторах *цепная* реакция деления носит управляемый характер.

Суть управляемой реакции заключается в том, что создаются условия, когда на каждый процесс деления ядра урана-235 или плутония приходится в среднем только один нейтрон, вызывающий новый акт деления. Другие образовавшиеся нейтроны поглощаются атомными ядрами других веществ. Таким образом, скорость выделения энергии будет поддерживаться одинаковой. На рис. 15.5 показана схема атомного реактора.

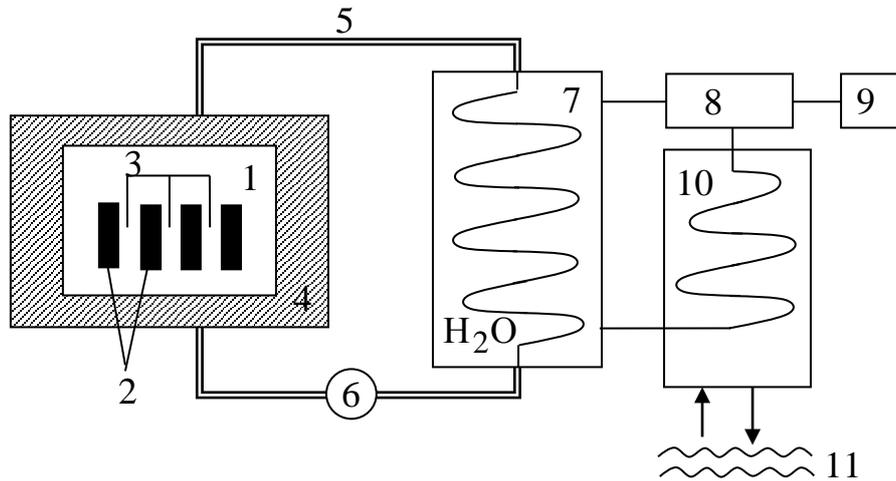


Рис.15.5

1 – ядерный реактор; 2 – горючее с замедлителем (C, D<sub>2</sub>O) +  $^{235}_{92}\text{U}$ ,  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ; 3 - управляющие стержни (Cd, В); 4 – защитная оболочка; 5 – замкнутый контур (вода, жидкий Na) с теплоносителем; 6 – насос; 7 – теплообменник (вода → пар); 8 – паровая турбина; 9 – электрогенератор; 10 – конденсатор; 11 – искусственный водоем.

Сердцем АЭС является ядерный реактор (1). В качестве горючего используются U-235 и Pu-239. Для управления потока нейтронов в атомных реакторах используют управляющие стержни (3), содержащие кадмий или бор, которые хорошо поглощают нейтроны. Эти стержни вводят в активную зону реактора (2) (топливо-замедлитель). Когда стержни полностью погружены в реактор, они поглощают столько нейтронов, что цепная реакция в реакторе не идет. В качестве замедлителя нейтронов используют графит или тяжелую воду. В целях безопасности реактор помещен в защитную оболочку (4). Для получения самоподдерживающейся цепной реакции, как и в атомной бомбе, масса топлива должна быть не меньше критической (примерно несколько килограмм). Энергия, выделяемая реактором (1) снимается теплоносителем (вода, жидкий Na), циркулирующим в замкнутом контуре. Циркуляция обеспечивается насосом (6). В теплообменнике (7) теплоноситель отдает тепло воде, превращая ее в пар, который вращает

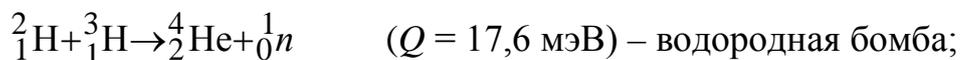
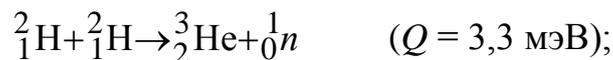
паровую турбину (8), а та в свою очередь соединена с электрогенератором (9), вырабатывающим электроэнергию. Из паровой турбины пар попадает в конденсатор (10). Происходит охлаждение пара, конденсация его в воду, которая поступает в теплообменник. Охлаждение пара в конденсаторе осуществляется водой из искусственного водоема. Для выработки электроэнергии АЭС используют только 40 % тепла реактора. Остальное тепло можно использовать для обогрева домов, опреснения морской воды и в других целях. Количественные оценки показывают, что при делении 1 г урана выделяется в 3 млн. раз больше энергии, чем при сгорании 1 кг угля, а стоимость энергии, полученной с помощью угля в 400 раз больше, чем для уранового горючего.

Атомные реакторы используют как источники энергии на ледоколах и подводных лодках.

*Термоядерные реакции.* Источником огромной энергии может служить реакция *синтеза* атомных ядер – образование из легких ядер более тяжелых.

*Особенностью реакции синтеза* является то, что она сопровождается выделением большого количества энергии, поскольку удельная энергия связи у легких ядер меньше, чем у промежуточных. Кроме того, удельная энергия связи резко увеличивается при переходе от ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$  к литию  ${}^6_3\text{Li}$  и особенно к гелию  ${}^4_2\text{He}$ .

Примеры реакций синтеза ( Q - энергосвободное):



*Необходимые условия для осуществления реакции синтеза.* Чтобы произошла термоядерная реакция, ядра должны преодолеть кулоновский барьер, высота которого составляет ~ 0,1 МэВ. Необходимо сблизить положительно заряженные ядра на столь малое расстояние (~  $1,5 \cdot 10^{-15}$  м), чтобы между ними начали действовать *ядерные силы*. Реально в этих реакциях могут участвовать ядра с очень большими кинетическими

энергиями (скоростями). Этого можно достичь путем нагрева вещества до температуры порядка  $10^7$  К. В водородной бомбе такая температура возникает за счет взрыва в ней ядерной бомбы. Управляемую реакцию пока осуществить не удалось. В качестве горючего берется соединение LiD (изотоп  ${}^6_3\text{Li}$  и дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  (D)). При достижении высокой температуры вначале протекает реакция:  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_0n$ . Образующиеся нейтроны поглощаются изотопом  ${}^6_3\text{Li}$ , в результате чего образуется тритий  ${}^3_1\text{H}$  и  ${}^4_2\text{He}$ :  ${}^1_0n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$ . Ядра трития  ${}^3_1\text{H}$  и дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  вступают в реакцию  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$ , которая и сопровождается большим выделением энергии.

Взрыв водородной бомбы – неуправляемая термоядерная реакция: энергия выделяется в огромном количестве в одно мгновение, и ее можно использовать только для разрушения. Человечеству необходим управляемый термоядерный синтез. Реакция синтеза очень выгодна по трем причинам:

1. Запасов дейтерия и трития хватит на неограниченное время, поскольку они содержатся в воде (В 60 л воды содержится 1 г дейтерия);
2. При ядерном синтезе не столь остра проблема захоронения радиоактивных отходов, которые образуются в ходе деления ядер в атомных реакторах;
3. Энергия, выделяющаяся при ядерном синтезе, в расчете на единицу массы горючего больше, чем при делении тяжелых ядер.

Условие необходимое для протекания термоядерной реакции, было сформулировано Лоусоном (критерий Лоусона):

$$n\tau \sim 10^{16} \text{ для реакции } {}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He};$$

$$n\tau \sim 10^{14} \text{ для реакции } {}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n,$$

где  $n$  – концентрация частиц в  $1 \text{ см}^3$ ;  $\tau$  – время (в секундах) их удерживания вместе.

Эти соотношения отражают необходимость сохранения высокой плотности частиц при высокой температуре ( $T \sim 10^7$  К) в течение определенного времени. Из этого соотношения видно, что реакция синтеза ядра гелия из  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$  более выгодна, чем из двух ядер дейтерия, поскольку накладываемые требования в первом случае менее жесткие. Этим объясняется то, что реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$  в водородной бомбе нет.

Реакция термоядерного синтеза *невзрывного* характера осуществляется в природе на Солнце и звездах, где достигается температура в миллионы градусов. При таких температурах возникает особое состояние вещества – плазма. Плазма – это сильно ионизированный газ, в котором ядра и электроны существуют независимо друг от друга. Таким образом, для осуществления управляемой термоядерной реакции нужно создать высокотемпературную плазму, которую надо удержать. Физиками предложено два способа удержания плазмы: магнитным полем в специальном устройстве Токомак (тороидальная камера с магнитными катушками) и с помощью лазерного излучения. Для осуществления реакции управляемого синтеза нужно преодолеть много технических трудностей, но нет сомнения, что термоядерные реакторы будут созданы и у термоядерной энергетики – большое будущее.

### Контрольные вопросы

1. Какова структура атомного ядра?
2. Дайте понятие ядерных сил. Каковы их особенности?
3. Что такое энергия связи и удельная энергия связи ядра? Что называется дефектом массы?
4. Что называется радиоактивностью? Каков закон радиоактивного распада? Каков смысл постоянной распада  $\lambda$ ? Что такое период полураспада?
5. Какие виды радиоактивного излучения Вам известны? Охарактеризуйте их.
6. Что называется ядерной реакцией? Какие законы сохранения выполняются в ядерной реакции?
7. Что такое цепная реакция? Где она используется?
8. Каково принципиальное устройство атомной электростанции?
9. Какие реакции называются термоядерными?

### Задачи.

1. Определите число протонов и нейтронов, входящих в состав трех изотопов бора 1)  ${}^9_5B$ ; 2)  ${}^{10}_5B$ ; 3)  ${}^{11}_5B$ .
2. Энергия связи  $E_{св}$  ядра, состоящего из трех протонов и четырех нейтронов, равна 39,9 МэВ. Определите массу нейтрального атома, обладающего этим ядром.

3. Определите, что продолжительнее – три периода полураспада или два средних времени жизни радиоактивного ядра?

4. Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определите, в какой элемент превращается  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после трех  $\alpha$ -распадов и двух  $\beta^{-1}$ -распадов.

## ЛЕКЦИЯ 16. ЭЛЕМЕНТЫ ЗОННОЙ ТЕОРИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Квантовая механика оказалась действенным инструментом изучения структуры твердых тел. Как известно, все твердые тела по типу проводимости разделяются на три класса: *проводники*, *диэлектрики* и *полупроводники* (плохие проводники). Квантовая теория позволила рассмотреть с единой точки зрения поведение всех твердых тел в электрическом поле. На основе этой теории создана теория *полупроводников* – веществ, которые определили развитие электроники, ЭВМ, радио и телевизионной техники.

### 16.1. Полупроводники

Полупроводниками называют группу веществ, электропроводность которых занимает промежуточное положение между металлами и диэлектриками. Исследования полупроводников показали, что их электрические свойства в большей степени зависят от чистоты полупроводника и от примесей, которые в них находятся. Абсолютно чистых веществ не бывает. Искусственно создаваемые вещества всегда содержат примеси, которые попадают из окружающей среды, со стенок приборов и т.д. С точки зрения химии чистым считается вещество, в котором содержится один посторонний атом на 1000 собственных атомов (концентрация 0,1 %). Остановимся сначала на электропроводности чистых полупроводников.

1. *Чистые полупроводники.* Полупроводниками являются химические элементы четвертой группы таблицы Менделеева и некоторые другие соединения. Типичными представителями полупроводников являются кристаллы кремния и германия, в которых атомы объединены ковалентной связью. Вследствие теплового колебательного движения атомов может произойти разрыв некоторых химических связей, в результате чего возникает свободный электрон, который будет хаотически двигаться по кристаллу. На рис. 16.1 показана часть кристалла кремния и одна разорванная связь. Удаление электрона приводит к нарушению химической связи, поскольку она осуществляется лишь одним валентным электроном. Эту неполноценную связь называют *дыркой*. Дырку можно рассматривать как положительный заряд, равный заряду электрона по абсолютной величине. На место дырки может попасть электрон от соседней химической связи. Дырка будет хаотически перемещаться по кристаллу. Происходит и обратный процесс: электрон и дырка, встречаясь друг с другом, соединяются. Это приводит к

*рекомбинации* – исчезновению и восстановлению химической связи. Таким образом, в полупроводнике при любой температуре имеется определенная концентрация свободных электронов и дырок, которыми и обуславливается собственная электропроводность полупроводников.

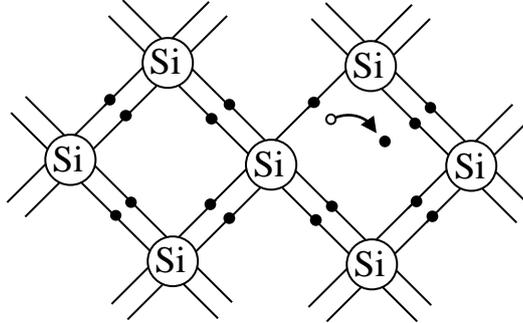


Рис. 16.1

Сила тока  $I$  в проводнике связана со скоростью  $v$  упорядоченного движения электронов соотношением  $I = envS$ , где  $e$  – заряд электрона по абсолютной величине;  $n$  – концентрация свободных электронов (электронов проводимости), т.е. число электронов в единице объема;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника. Собственная проводимость полупроводника обусловлена электронами и дырками. Поэтому сила тока будет зависеть от концентрации  $n_e$  электронов и  $n_p$  дырок, а также от их скоростей  $v_e$  и  $v_p$  упорядоченного движения, т.е.

$$I = en_e v_e S + en_p v_p S. \quad (16.1)$$

Установлено, что концентрация носителей тока зависит от температуры полупроводника. Если энергия теплового движения атомов достаточна для разрыва химической связи, то появляется электронно-дырочная пара. Число таких пар  $N_1$ , возникающих в единице объема в течение одной секунды, зависит от энергии  $W_g$  и определяется законом

Больцмана:  $N_1 = a \cdot e^{-\frac{W_g}{kT}}$ , где  $a$  – коэффициент пропорциональности;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура проводника. С другой стороны, в полупроводнике непрерывно идет процесс рекомбинации электронов и дырок. Число рекомбинированных пар  $N_2$  в единице объема за одну секунду пропорционально числу электронов и дырок, т.е.  $N_2 = bn_e n_p$ , где  $b$  – коэффициент пропорциональности. Число электронов и дырок в полупроводнике одинаково, так как они появляются парами. Поэтому

$n_e = n_p$  и  $N_2 = bn_e^2 = bn_p^2$ . Поскольку концентрация носителей тока при неизменной температуре постоянна, то число рождающихся пар должно равняться числу рекомбинирующих пар, т.е.  $N_2 = N_1$ , и, следовательно,

$$bn_e^2 = bn_p^2 = a \cdot e^{-\frac{W_g}{kT}}. \text{ Отсюда } n_e^2 = n_p^2 = \frac{a}{b} \cdot e^{-\frac{W_g}{kT}} \text{ и}$$

$$n_e = n_p = A \cdot e^{-\frac{W_g}{2kT}}. \quad (16.2)$$

где коэффициент  $A = \sqrt{\frac{a}{b}}$  оценивается методами квантовой механики и находится в пределах  $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Подставляя значения  $n_e$  и  $n_p$  в формулу (16.1), получаем

$$I = Ae(v_e + v_p)S \cdot e^{-\frac{W_g}{2kT}}. \quad (16.3)$$

Из этой формулы следует, что с повышением температуры полупроводника увеличивается сила тока, протекающего по проводнику, при неизменном напряжении на нем. Из этого следует, что с повышением температуры сопротивление полупроводника и его удельное сопротивление уменьшаются. В этом заключается отличие полупроводников от металлов, у которых с ростом температуры удельное сопротивление  $\rho$  увеличивается ( $\rho = \alpha \rho_0 T$ , где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника при  $0^\circ \text{C}$ ). Из соотношения (16.3) следует также, что при  $T \rightarrow 0$  сила тока стремится к нулю. Следовательно, сопротивление полупроводника становится очень большим и при низкой температуре он является диэлектриком, что подтверждается и опытом. Физически это объясняется тем, что энергии теплового движения не хватает на образование электронно-дырочной пары. При комнатной температуре концентрация электронно-дырочных пар равна  $n_e = n_p \approx 2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Увеличение температуры на 223 К приводит к изменению концентрации электронно-дырочных пар в  $10^{36}$  раз. Поскольку концентрация носителей тока при температуре порядка 77 К очень мала, то полупроводник при этой температуре ведет себя как диэлектрик. При комнатной же температуре число носителей тока в единице объема значительно меньше, чем у металлов

( $n_e \sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ), но больше, чем у диэлектриков. Поэтому проводимость полупроводников занимает промежуточное значение между металлами и диэлектриками.

2. *Примесные полупроводники.* Чистые полупроводники не представляют практического интереса. Для электроники весьма полезными оказались так называемые *легированные полупроводники*, в которые введены примеси. Они подразделяются на полупроводники *n*- и *p*-типа.

а) *Полупроводники n-типа.* Если в кристаллическую решетку четырехвалентного полупроводника кремния, внедрить пятивалентный атом мышьяка, то для образования ковалентных связей с соседями ему надо четыре электрона. Пятый же электрон, вследствие теплового движения, может оторваться от атома. В результате этого атомы примеси превращаются в положительные ионы и появляются свободные электроны, обуславливающие проводимость полупроводника (16.2). Такие примеси называются *донорными*, а сам полупроводник называют *полупроводником n-типа* (от слова negative – отрицательный).

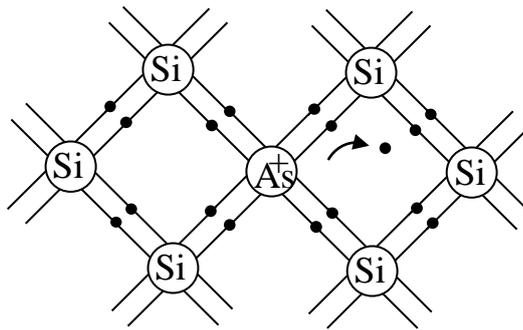


Рис 16.2

б) *Полупроводники p-типа.* Если внедрить в кристаллическую решетку четырехвалентного полупроводника кремния трехвалентный атом бора, то для образования ковалентной связи с соседями ему надо четыре электрона, а у него их только три. Поэтому одна связь оказывается неупакованной. Атом бора захватывает один электрон от соседнего атома кремния, так как это энергетически выгодно. В результате этого атомы примеси превращаются в отрицательные ионы, а в полупроводнике возникают дырки, обуславливающие его электропроводность (рис. 16.3). Проводимость этого типа называется *дырочной*, примесь – *акцепторной*, а полупроводник – *p-типа* (от слова positive – положительный).

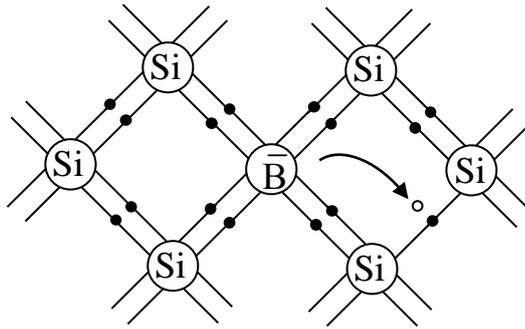


Рис.16.3

Оценим равновесную концентрацию примесных электронов в полупроводнике  $n$ -типа или примесных дырок в полупроводнике  $p$ -типа. В настоящее время разработаны методы тщательной очистки полупроводников от примесей. Так, в  $1 \text{ см}^3$  кремния, в котором содержится  $\sim 10^{23}$  атомов кремния, уровень «неконтролируемых» примесей порядка  $\sim 10^{11}$  атомов. Предположим, что в кремний ввели еще 10000 атомов примеси, например, мышьяка, и всего их стало  $N = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Оценка концентрации примесных электронов или дырок проводится по формуле, аналогичной соотношению (15.2), полученному для чистого полупроводника:

$$n = (AN)^{1/2} \cdot e^{-\frac{W_i}{2kT}}, \quad (16.4)$$

где  $n$  – концентрация электронов или дырок;  $N$  – число атомов донора или акцептора, введенного в единицу объема полупроводника, и  $W_i$  – энергия ионизации, т.е. энергия отрыва электрона от атома примеси или энергия, необходимая для присоединения электрона к атому акцепторной примеси. Значение энергии ионизации мышьяка, введенного в кремний, составляет 0,05 эВ, что в 20 раз меньше энергии, необходимой для создания электронно-дырочной пары в чистом кремнии. Тогда при  $T = 77 \text{ К}$   $n \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что в  $10^{30}$  раз больше, чем в чистом кремнии. При  $T = 300 \text{ К}$   $n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , т.е.  $10^4$  раз больше, чем в чистом кремнии. В действительности разница еще больше. Таким образом, численные оценки показывают, что концентрация носителей тока (электронов, дырок), а следовательно, и электропроводимость очень сильно зависят от температуры и наличия примесей, вводимых в полупроводник.

## 16.2. Образование энергетических зон в кристаллах

Известно, что энергии, которыми обладают электроны в атоме, квантованы, т.е. имеют дискретные значения. Их удобно изображать в виде уровней энергии. Что произойдет, когда  $N$  атомов объединяются в кристалл? С точки зрения квантовой теории, образуется единая квантовая система и к ней применим принцип Паули, гласящий в данном случае, что в кристалле не может быть двух одинаковых энергетических уровней. Поэтому каждый энергетический уровень изолированного атома при образовании кристалла расщепляется на  $N$  подуровней, уровень как бы размывается и образуется так называемая энергетическая зона. Схематически процесс образования энергетических зон кристалла из атомов лития показан на рис. 16.4.

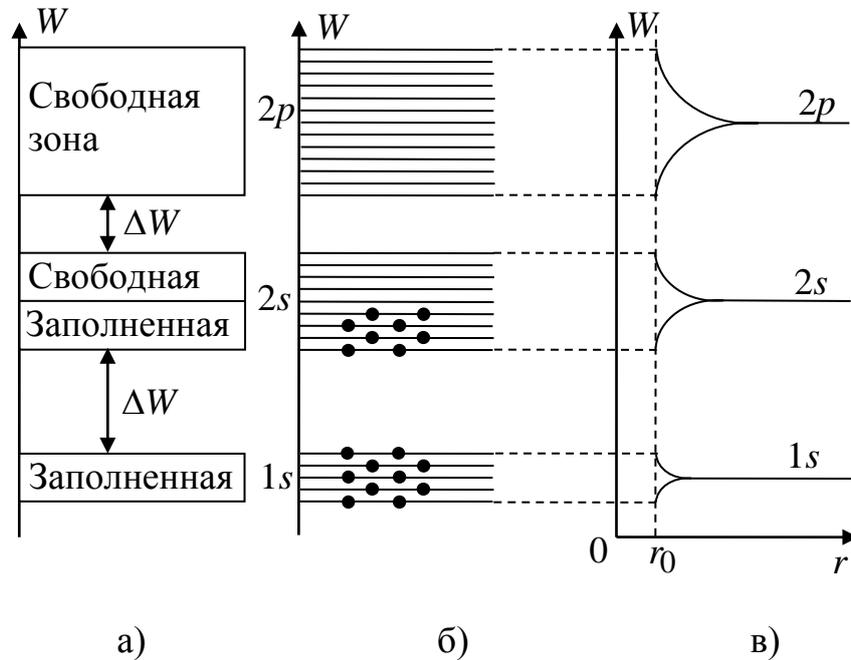


Рис. 16.4

Атом лития имеет три электрона: два электрона с разными направлениями спина находятся на уровне  $1s$  и третий – на уровне  $2s$ . При уменьшении расстояния между атомами уровни энергии размываются. Степень размывости определяется межатомным расстоянием  $r_0$ , различным для каждого кристалла (рис. 16.4 в). Два ближайших к ядру электрона (в состояниях  $1s$ ) слабо взаимодействуют с электронами других атомов и поэтому их размывость при расстоянии  $r_0$  небольшая. В этом случае все  $N$  подуровней энергии заняты электронами и поэтому образовавшаяся энергетическая зона называется *заполненной*. На уровне  $2s$  в атоме находится один электрон, но, согласно принципу Паули, на нем может быть и второй электрон с противоположным направлением спина. Это приводит к тому, что

половина нижних энергетических уровней занята электронами, а половина – свободна. Можно сказать, что она состоит из двух зон: *свободной* и *заполненной*. Электронов в состоянии  $2p$  в атоме лития нет, но в принципе они там могут быть. Поэтому этот уровень, не занятый электронами, также размывается в зону свободных подуровней – в свободную зону. Из рис. 16.4 видно, что между зонами  $1s$ ,  $2s$  и  $2p$  располагаются области энергий  $\Delta W$ , которые электроны иметь не могут. Это так называемые *запрещенные зоны*. Другие упомянутые зоны называют *разрешенными*. Разница в энергиях между соседними подуровнями в разрешенных зонах очень мала и лежит в пределах  $10^{-22} - 10^{-24}$  эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). Поэтому зоны можно рассматривать как непрерывные. Однако всегда следует помнить о дискретности подуровней и о том, что число подуровней в кристалле конечно. В зависимости от степени зон все твердые тела делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики.

### 16.3. Деление на проводники, диэлектрики и полупроводники

Известно, что электрический ток – это упорядоченное движение электронов. Под действием электрического поля электроны приобретают дополнительную энергию, обусловленную кинетической энергией их упорядоченного движения. С точки зрения квантовой механики это означает, что электрон переходит с некоторого нижнего уровня энергии на более высокий уровень. Исходя из этого, легко понять различие между диэлектриками и проводниками.

*Проводники* – это тела, у которых свободная зона следует сразу за заполненной зоной (рис. 16.4 а), как это имеет место в случае кристалла лития для состояния  $2s$ . Электроны под действием электрического поля легко переходят с нижних энергетических уровней на верхние. Это означает, что ток течет (действительно кристалл лития – хороший проводник). В *диэлектрике* свободная зона отделена от заполненной запрещенной зоной, ширина  $\Delta W$  которой значительно больше энергии  $kT$  теплового движения атомов (рис. 16.5 а). Поэтому электронов в ней нет. При этом энергии электрического поля не хватает на то, чтобы электрон перешел из заполненной зоны в более свободную зону. (Если приложить очень высокое напряжение, то электроны преодолют этот барьер и произойдет пробой диэлектрика).

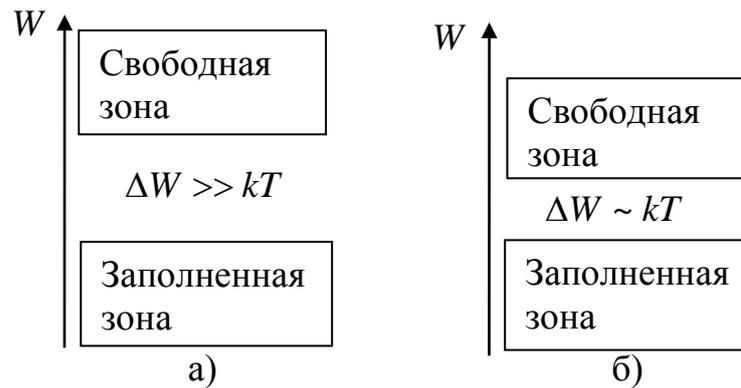


Рис.16.5

В полупроводниках запрещенная зона есть, но она невелика (рис. 16.5 б) и ее энергия соизмерима с энергией теплового движения атомов ( $\Delta W \sim kT$ ). Тогда за счет энергии теплового движения часть электронов из заполненной зоны переходит в свободную зону и при наличии электрического поля потечет ток, который значительно слабее тока в металлах.

Рассмотрим электрические свойства полупроводников, исходя из *зонной теории*.

а) *Чистые полупроводники*. Поскольку ширина запретной зоны  $\Delta W$  в полупроводнике соизмерима с энергией теплового движения электронов, то возможны переходы некоторых электронов из заполненной зоны в свободную. Вследствие этого в заполненной зоне появляются вакантные места, которые и являются *дырками*. Они обозначаются кружочками (рис. 16.6). Если к полупроводнику приложить разность потенциалов, т.е. создать в нем электрическое поле, то электроны переходят с нижнего энергетического уровня на более высокий уровень, что означает возникновение электрического тока. Перемещение электронов в заполненной зоне приводит к движению дырок по энергетическим уровням, которое эквивалентно движению положительного заряда  $+e$ , равного по абсолютной величине заряду электрона. Таким образом, проводимость чистого полупроводника, называемая *собственной проводимостью*, обусловлена электронами и дырками. Собственная проводимость полупроводников мала.

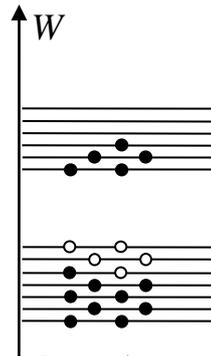


Рис. 16.6

Если полупроводник нагреть, то проводимость его возрастет, так как с повышением температуры увеличивается энергия теплового движения электронов, что приводит к увеличению числа электронов, переходящих из заполненной зоны в свободную зону, растет число носителей тока, что и влечет за собой увеличение электропроводности полупроводника.

б) *Примесные полупроводники.* В легированных полупроводниках примеси создают дополнительные энергетические уровни между свободной и заполненной зонами. Это позволяет электронам легко преодолевать энергетические барьеры. В зависимости от того, как расположены энергетические зоны примеси, полупроводники разделяются на два вида: *n*-типа и *p*-типа.

*Полупроводники n-типа.* В полупроводнике *n*-типа примесные энергетические уровни лежат чуть ниже свободной зоны (рис. 16.7). Электроны с этих уровней, вследствие теплового движения, могут легко переходить в свободную зону и, таким образом, создавать условия для появления тока. Так как дополнительные уровни примеси поставляют электроны в свободную зону, то их называют *донорными*. Проводимость этого полупроводника обусловлена электронами и называется *электронной*, а сам полупроводник – *полупроводником n-типа*.

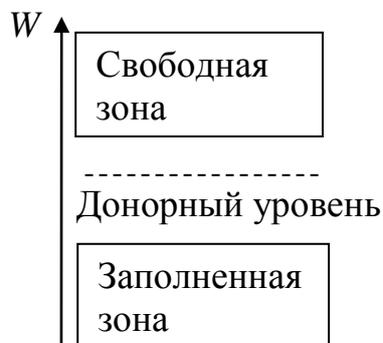


Рис. 16.7

*Полупроводники p-типа.* В полупроводниках этого типа энергетические уровни примеси расположены чуть выше заполненной зоны (рис. 16.8). Электроны из заполненной зоны переходят на уровни примеси и в ней появляется дырка. При заполнении дырки другими электронами, под действием электрического поля она перемещается и поведение дырки аналогично поведению положительного заряда. Проводимость этого типа называется *дырочной*, примесь называют – акцепторной (принимает на себя электроны), а полупроводник – полупроводником *p*-типа.



Рис. 16.8

#### 16.4. Полупроводниковые элементы электроники

На основе примесных полупроводников созданы устройства, являющиеся важными компонентами современных электронных приборов – диоды, транзисторы и т.д. Их важным преимуществом являются высокая надежность, большой срок службы и миниатюрность. Рассмотрим принцип работы двух основных элементов – диодов и транзисторов.

1. *Полупроводниковый диод.* При соединении полупроводников *n*- и *p*-типа получается диод с так называемым *p-n – переходом*. В результате такого соединения небольшое количество электронов около контакта перейдет из полупроводника *n*-типа в полупроводник *p*-типа, где произойдет их рекомбинация с дырками. Вследствие этого полупроводник *n*-типа заряжается положительно, а *p*-типа – отрицательно. Возникает некоторая разность потенциалов, которая препятствует дальнейшему переходу электронов. Если к диоду подключить источник тока, чтобы минус был соединен с полупроводником *n*-типа, а плюс – с полупроводником *p*-типа (рис. 16.9), то под действием внешнего электрического поля электроны и дырки проходят границу раздела полупроводников и рекомбинируют. В то же время источник тока поставляет все новые электроны и дырки. Поэтому через диод протекает достаточно сильный ток.

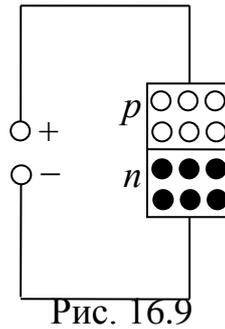


Рис. 16.9

Если изменить полярность на диоде, то под действием поля электроны и дырки отходят от границы раздела полупроводников и ток через диод не течет (рис. 16.10). Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью. Это используется для выпрямления тока, т.е. для преобразования переменного в постоянный по направлению ток.

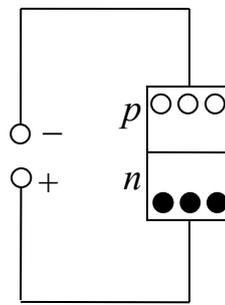


Рис. 16.10

Простая схема выпрямителя тока показана на рис. 16.11 а. Стрелка указывает направление, в котором диод проводит ток. В схему включен источник, дающий переменное синусоидальное напряжение (рис. 16.11 б). Ток в течение одного полупериода протекает через диод, а в течение другого – отсутствует. Поэтому через резистор  $R$  ток течет также только в одном направлении (рис. 16.11 б). Электрическая цепь, изображенная на рис. 16.11 а, дает ток постоянного направления, но не постоянный по величине. Для того, чтобы получить ток, постоянный по величине, используют диоды, включенные в несколько более сложные цепи. Выпрямительные схемы играют важную роль, так как электростанции вырабатывают ток переменный, а для работы большинства электронных устройств (радио, телевизоры, ЭВМ) требуется постоянное напряжение.

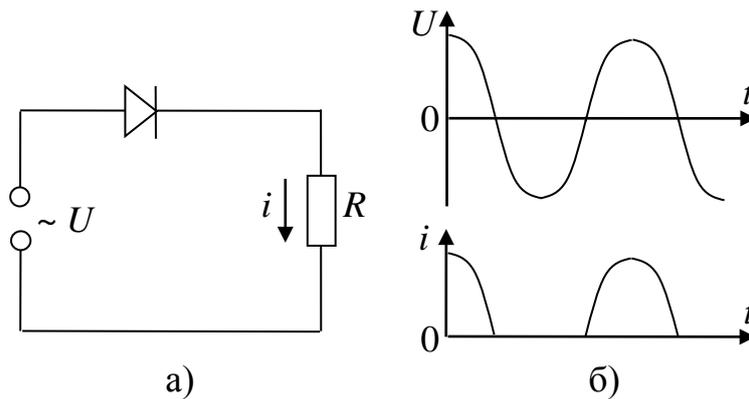


Рис. 16.11

2. *Транзистор*. Транзисторы или полупроводниковые триоды являются основой современной радиоэлектроники. Они применяются для усиления тока и напряжения. Транзистор представляет собой соединение из двух  $p-n$  – переходов. В зависимости от компоновки  $p$ - и  $n$ -областей, различают транзисторы  $p-n-p$  и  $n-p-n$  типов (рис. 16.12). Центральная область транзистора называется базой ( $B$ ) и имеет обычно небольшую толщину (несколько мкм). Она является управляющим электродом. Кроме того, в транзисторе различают эмиттер ( $\mathcal{E}$ ) и коллектор ( $K$ ). Условные изображения транзисторов также приведены на рис. 16.12, причем стрелка всегда обозначает эмиттер, а ее направлением совпадает с направлением тока.

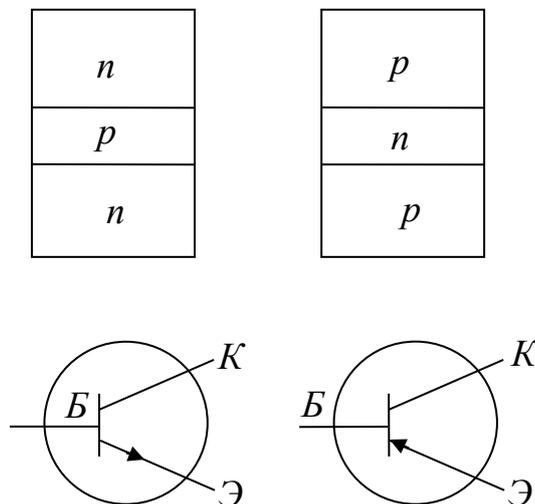


Рис. 16.12

Рассмотрим работу  $n-p-n$  транзистора, включенного в цепь, приведенную на рис. 16.13. Это принципиальная схема усилителя напряжения. Рассмотрим принцип ее действия. Напряжение между коллектором и эмиттером  $U_{KЭ}$  поддерживается источником  $\varepsilon_1$ . Если на базу относительно эмиттера приложить положительное напряжение от источника

$\varepsilon_2$ , то электроны эмиттера притягиваются к базе и в цепи база – эмиттер потечет постоянный электрический ток. Так как толщина базы очень мала, большинство электронов свободно проходит на коллектор, находящийся под положительным напряжением. В результате этого между коллектором и эмиттером протекает более сильный постоянный ток, чем в цепи база – эмиттер. Подадим теперь еще и переменное напряжение между эмиттером и базой. Тогда сила тока  $I_B$  в этой цепи будет изменяться по тому же закону, что и поданное переменное напряжение. Небольшие изменения напряжения на базе, обусловленные входным сигналом, вызывают сильные изменения силы тока  $I_K$  в цепи коллектора и, следовательно, большие изменения напряжения на выходном резисторе  $R_K$ . Таким образом, транзистор усиливает слабые сигналы. Транзисторы являются основными элементами современных электронных усилителей всех типов.

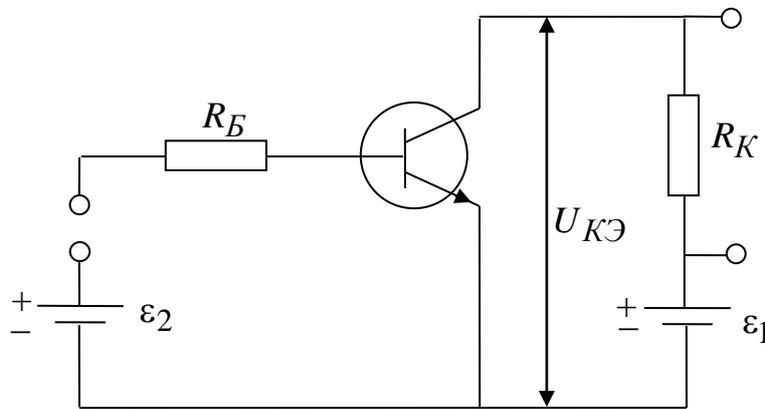


Рис. 16.13

### Контрольные вопросы

1. Как объясняется собственная и примесная электропроводность полупроводников с точки зрения классической физики?
2. Как происходит образование энергетических зон в кристаллах?
3. Как объясняется собственная и примесная электропроводность полупроводников с точки зрения зонной теории?
4. Каков принцип действия диода и транзистора?

## ЛЕКЦИЯ 17. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

### 17.1 Виды взаимодействий

Элементарными частицами принято называть мельчайшие частицы материи. К ним относят все микрочастицы за исключением атомных ядер с массовым числом  $A > 2$ .

Существует четыре вида взаимодействий между элементарными частицами: сильное (ядерное) взаимодействие, электромагнитное, слабое и гравитационное, которые перечислены в порядке убывания их силы. С точки зрения классической физики, взаимодействие между телами осуществляется полями. При этом оно передается с конечной скоростью. Так, например, электрический заряд создаёт вокруг себя электрическое поле, которое в месте расположения другого заряда воздействует на него с некоторой силой. Аналогично, но уже посредством других полей, осуществляются взаимодействия в природе. Квантовая физика дополнила такое представление тем, что поля состоят из квантов поля (определённых частиц), которые и являются переносчиками взаимодействия. Одна из взаимодействующих частиц испускает квант поля, а другая его поглощает. В этом и состоит механизм взаимодействия частиц. В случае электромагнитных взаимодействий квантами поля переносчиками взаимодействия являются *фотоны*. Сильные взаимодействия осуществляются  *$\pi$ -мезонами* (пи-мезонами), а по последним данным – *глюонами*, слабые –  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -*промежуточными бозонами* и гравитационное взаимодействие – гипотетическими частицами, называемыми *гравитонами*. Все взаимодействия имеют определённый радиус действия  $R$ , который оценивается по формуле:

$$R \approx \frac{h}{2\pi mc}, \quad (17.1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $m$  – масса покоя частицы переносчика взаимодействия;  $c$  – скорость света в вакууме. Оценим радиус действия различных взаимодействий. Квантами поля ядерного взаимодействия являются  $\pi$ -мезоны, масса которых в энергетических единицах  $\sim 140$  МэВ. Тогда из формулы (17.1) получаем:

$$R \approx \frac{h}{2\pi mc} = \frac{phc}{2\pi mc^2} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 3,14 \cdot 140 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} \approx 1,5 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$$

Слабые взаимодействия, как указывалось, переносятся  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -промежуточными бозонами, массы которых  $\sim 80$  ГэВ ( $1 \text{ ГэВ} = 1,6 \cdot 10^{-10}$  Дж). Тогда, проведя аналогичные вычисления, находим  $R \approx 2,5 \cdot 10^{-18}$  м. Из приведённых расчётов видно, что сильное и слабое взаимодействия являются коротко действующими, что и подтверждается на опыте. Переносчиками электромагнитного и гравитационного взаимодействий, соответственно, являются фотоны и гравитоны, не обладающие массой покоя ( $m = 0$ ). В силу этого из соотношения (14.1) следует, что радиус действия этих взаимодействий не ограничен ( $R = \infty$ ).

Кроме того, взаимодействия характеризуют *интенсивностью* и *временем взаимодействия*. Интенсивность взаимодействия характеризуется константой взаимодействия, которую обозначают через  $G^2$ . Для сильных взаимодействий она равна  $G_s^2 \sim 10$ , для электромагнитных –  $G_e^2 \sim 10^{-2}$ , для слабых –  $G_w^2 \sim 10^{-13}$  и для гравитационного взаимодействия –  $G_g^2 \sim 10^{-38}$ . Оценим теперь время взаимодействия, которое обратно пропорционально константе взаимодействия. Поскольку константа взаимодействия имеет наибольшее значение для сильно взаимодействия, то время этого взаимодействия – наименьшее. Найдём его. Пусть какая-нибудь частица приближается к другой частице, между которыми может возникнуть сильное взаимодействие. Это взаимодействие начинается тогда, когда расстояние между ними станет равным радиусу действия данного взаимодействия. Так как частица движется с большой скоростью, то ее можно принять примерно равной скорости света  $c$ . Поэтому частицы взаимодействуют в течение времени  $\tau_s$ , равного

$$\tau_s \approx \frac{R}{c} = \frac{1,5 \cdot 10^{-15}}{3 \cdot 10^8} \sim 10^{-23} \text{ с, пока не достигнут друг- друга. Следовательно,}$$

время сильного взаимодействия или время процесса, обусловленного этим взаимодействием,  $\sim 10^{-23}$  с. Для нахождения времён других взаимодействий воспользуемся соотношением

$$\tau = \tau_s \frac{G_s^2}{G^2}, \quad (17.2)$$

поскольку время взаимодействия обратно пропорционально константе

взаимодействия. Время  $\tau_e$  электромагнитного взаимодействия находится с использованием соотношения (14.2):  $\tau_e = \tau_s \frac{G_s^2}{G^2} \sim 10^{-23} \frac{10}{10^{-2}} \sim 10^{-20}$  с, время  $\tau_w$  слабого взаимодействия порядка  $10^{-9}$  с и гравитационного –  $\tau_g \sim 10^{16}$  с  $\approx 10^9$  лет. Сравнительная характеристика взаимодействий приведена в табл. 17.1.

Таблица 17.1

Вид взаимодействия	Относительная интенсивность (приближенно)	Время взаимодействия, с (приближенно)
Сильное (ядерное)	1	$10^{-23}$
Электромагнитное	$10^{-3}$	$10^{-20}$
Слабое	$10^{-14}$	$10^{-9}$
Гравитационное	$10^{-39}$	$10^{16}$

## 17.2 Классификация элементарных частиц

В настоящее время известно более 400 элементарных частиц. Они распределены по группам в соответствии с их свойствами. Один из способов классификации основан на взаимодействиях частиц (табл. 17.2). В табл. 17.2 приведены лишь стабильные или долгоживущие ( $> 10^{-19}$  с) частицы. Первую группу составляет один фотон, который участвует только в электромагнитных взаимодействиях. Во вторую группу входят частицы, называемые *лептонами*, не участвующие в сильном взаимодействии, но участвующие в слабом взаимодействии. Если элементарные частицы обладают зарядом, то они участвуют также и в электромагнитных взаимодействиях. В эту группу входят электрон  $e^-$ , позитрон  $e^+$ , мюон  $\mu^-$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ , *мюонное нейтрино*  $\nu_\mu$ , *тау-лептон*  $\tau^-$  и *тау-нейтрино*  $\nu_\tau$ . У каждого лептона существует античастица, которая обозначается тем же символом, но над ним ставится значок  $\sim$ . Для объяснения распадов, обусловленных слабым взаимодействием, им приписывается так называемое *лептонное число* (лептонный заряд)  $L$ . Например, распад нейтрона ( $n$ ) происходит так:  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ , но никогда не бывает распада  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_e$ . Это легко понять, если электрону и электронному нейтрино приписать *электронный лептонный заряд*  $L_e = +1$ , а у остальных частиц  $L_e = 0$ . Для

античастиц они имеют противоположный знак. Показано, что, наряду с другими законами сохранения (законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда), выполняется также закон сохранения лептонного заряда. Действительно, в распаде  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$  до распада  $L_e = 0$ , а после распада  $L_e = 0 + 1 + (-1) = 0$ , т.е. электронный лептонный заряд сохраняется. В другом же приведённом распаде этот заряд не сохраняется ( $0 \neq 0 + 1 + (-1) + 1$ ). Поэтому такой распад невозможен.

В распадах с участием мюонов, например  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  сохраняется ещё одно квантовое число – *мюонный лептонный заряд*  $L_\mu$ . У мюона  $\mu^-$  и мюонного нейтрино  $\nu_\mu$   $L_\mu = +1$ , у их античастиц –  $L_\mu = -1$ , а у остальных частиц  $L_\mu = 0$ .

Третью группу составляют частицы, называемые *адронами*, которые участвуют в сильном взаимодействии. Адроны участвуют и в электромагнитном, и в слабом взаимодействиях, но на малых расстояниях преобладает сильное взаимодействие. Адроны подразделяются на две подгруппы: *мезоны* (положительно и отрицательно заряженные пионы  $\pi^+$  и  $\pi^-$ , нейтральный пион  $\pi^0$ , каоны  $K^+$ ,  $K^-$  и  $K^0$ ), эта-мезон ( $\eta$ -мезон)) и *барионы* (протон ( $p$ ), нейтрон ( $n$ ), лямда-барион ( $\Lambda^0$ ) и т.д. (см. табл. 14.2)). Для объяснения распадов, связанных с сильным взаимодействием, им приписывается квантовое число  $B$ , называемое *барионным зарядом*. Для частиц  $B = +1$ , для античастиц –  $B = -1$ . При распадах барионный заряд сохраняется. В этом можно убедиться в следующей реакции  $p + n \rightarrow p + n + p + \tilde{p}$ . До реакции  $B = (+1) + (+1) = 2$ , после реакции  $B = +1 + 1 + 1 - 1 = 2$ . Необходимо отметить, что эта реакция возможна лишь в случае, когда бомбардирующий протон обладает достаточно большой кинетической энергией.

Группа	Название частицы	Обозначение	Античастица	Масса покоя, в ВМэ	$B$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
Фотон	Фотон	$\gamma$	$\gamma$	0	0	0	0	0
Лептоны	Электрон	$e^-$	$e^+$	0	0	+1	0	0
	Электронное нейтрино	$\nu_e$	$\tilde{\nu}_e$	0	0	+1	0	0
	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	106	0	0	+1	0
	Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	$\tilde{\nu}_\mu$	0	0	0	+1	0
	$\tau$ -лептон	$\tau^-$	$\tau^+$	1784	0	0	0	1
	$\tau$ -нейтрино	$\nu_\tau$	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	0	0	1
Адроны Мезоны	Пион	$\pi^+$	$\pi^-$	140	0	0	0	0
		$\pi^0$	$\pi^0$	135	0	0	0	0
	Каон	$K^+$	$K^-$	494	0	0	0	0
		$K^0$	$\tilde{K}^0$	498	0	0	0	0
	$\eta$ -мезон	$\eta^0$	$\eta^0$	549	0	0	0	0
Барионы	Протон	$p$	$\tilde{p}$	938	+1	0	0	0
	Нейтрон	$n$	$\tilde{n}$	940	+1	0	0	0
	Лямбда	$\Lambda^0$	$\tilde{\Lambda}^0$	1116	+1	0	0	0
	Сигма	$\Sigma^+$	$\tilde{\Sigma}^-$	1189	+1	0	0	0
		$\Sigma^0$	$\tilde{\Sigma}^0$	1193	+1	0	0	0
		$\Sigma^-$	$\tilde{\Sigma}^+$	1197	+1	0	0	0
	Кси	$\Xi^0$	$\tilde{\Xi}^0$	1315	+1	0	0	0
		$\Xi^-$	$\tilde{\Xi}^+$	1321	+1	0	0	0
Омега	$\Omega^-$	$\Omega^+$	1672	+1	0	0	0	

### 17.3. Элементарные частицы и античастицы

В 1932 году в излучении, приходящем на Землю из космоса, была обнаружена положительно заряженная частица с массой, равной массе электрона, и зарядом, равным заряду электрона по абсолютной величине. Её назвали *позитроном*. Позитрон называют также *античастицей* электрона. Затем были открыты античастицы протона, нейтрона и других элементарных

частиц. Частицы и античастицы имеют одинаковые по абсолютной величине, но противоположные по знаку электрические заряды, равные заряду электрона, одинаковые спины (собственные моменты импульса), одинаковые времена жизни, одинаковые по абсолютной величине, но противоположные по знаку квантовые числа, характеризующие взаимодействия (например, лептонный и барионный заряды). Существуют, однако, несколько частиц, которые не имеют античастиц: фотон,  $\pi^0$ -мезон и  $\eta$ -мезон. Можно сказать, что они тождественны своим античастицам. Античастицы возникают в ядерных реакциях при достаточно больших кинетических энергиях бомбардирующих частиц, но в веществе живут очень недолго, так как сталкиваются с аналогичными частицами. Это приводит к их аннигиляции (исчезновению), в результате которой образуются фотоны или другие элементарные частицы, что зависит от энергии этих частиц. Например, при столкновении электрона и позитрона возникает два фотона ( ${}_{-1}^0e + {}_{+1}^0e \rightarrow 2\gamma$ ).

*Нейтрино.* Доказано, что нейтрино, возникающее одновременно с электроном или позитроном, отличаются от нейтрино, рождающегося одновременно с мюонами. Поэтому их различают и называют электронное и мюонное нейтрино (табл. 17.2). Отличие этих частиц состоит в том, что их спины ориентированы по-разному относительно направления их распространения. У нейтрино спин  $\vec{s}$  противоположен направлению движения, т.е. импульсу  $\vec{p}$  частицы, а у антинейтрино они совпадают (рис. 17.1).

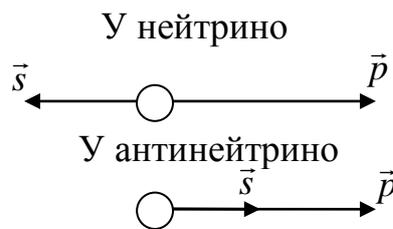


Рис. 17.1

#### 17.4. Кварки. Глюоны

Все наблюдаемые элементарные частицы, кроме фотона, принадлежат одной из групп: *лептонам* или *адронам*. Лептоны считаются истинно элементарными частицами, так как они не распадаются на составные части и не имеют внутренней структуры. Адроны же, как показывают эксперименты, обладают внутренней структурой. Их обилие приводит к мысли о том, что все они не элементарны. В 1963 году была высказана идея, что все адроны построены из трёх и более элементарных частиц и их античастиц, которые

получили название *кварков*. Эти кварки обозначаются буквами *u*, *d* и *s*. Предполагается, что они имеют дробные заряды, равные  $\frac{1}{3}e$  и  $\frac{2}{3}e$ , где  $e$  – заряд электрона. Другие характеристики этих частиц приведены в табл. 17.3

Все известные в то время адроны теоретически можно было построить из этих кварков. Так, мезоны состоят из пар кварк – антикварк. Например,  $\pi^-$ -мезон представляет собой пару  $\bar{u}d$  ( $u$  неё заряд  $q = -\frac{2}{3}e + \left(-\frac{1}{3}e\right) = -e$  и  $B = -\frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$ , как и должно быть у  $\pi^-$ -мезона); каон  $K^+ = u\bar{s}$  с  $q = \frac{2}{3}e + \frac{1}{3}e = e$ ;  $B = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ . Барионы состоят трех кварков. Например, протон  $p = uud$  ( $q = \frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = e$ ;  $B = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1$ ), нейтрон  $n = ddu$  и т.д. В дальнейшем были введены ещё три кварка и антикварка. Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц. К настоящему времени имеются экспериментальные данные их существования, но в свободном состоянии они не обнаружены. Ненаблюдаемость кварков в свободном состоянии объясняется особым характером сил, удерживающих кварки внутри частиц. Эти силы на расстоянии  $10^{-15}$  м исключительно велики и возрастают с увеличением расстояния. Это самые большие силы, превосходящие даже ядерные. Особенностью сил, действующих между кварками, является и то, что они на расстояниях меньших  $10^{-15}$  м становятся достаточно малыми. Источником этих сил являются особые частицы, называемые *глюонами*. Размеры кварков не превышают  $10^{-18}$  м, т.е. они в 1000 раз меньше размеров протона или нейтрона.

### Контрольные вопросы

1. Какие частицы называются элементарными?
2. Какие виды фундаментальных взаимодействий существуют? Как осуществляются эти взаимодействия? Каков радиус их действия?
3. Какова классификация элементарных частиц? По какому признаку она осуществляется?
4. Что такое частицы и античастицы?
5. Что вам известно о кварках?

### Заключение

Окружающий нас мир многообразен в своих проявлениях и изучается многими науками. Физика изучает только самые общие явления и закономерности и стремится объяснить всё многообразие физических явлений с единой точки зрения, т.е. создать единую физическую картину мира.

1. *Механическая картина мира.* Первая попытка создания единой физической картины мира была связана с успехами классической механики. Согласно этим представлениям, мир состоит из твёрдых непроницаемых частиц, которые отличаются массами и скоростями движений. Эти частицы движутся в пустом пространстве, не связанном с материей. Считается, что пространство абсолютно, непрерывно и одинаково во всех точках и направлениях. Время также не зависит от материи. Оно абсолютно, одномерно, непрерывно и одинаково во всей Вселенной. При этом пространство и время не зависят друг от друга. Движение в классической физике рассматривается как простое перемещение тел.

Применение законов механики к изучению газов привело к созданию молекулярно-кинетической теории, с помощью которой удалось объяснить многие тепловые явления. Даже электромагнитные волны рассматривались как механические колебания, происходящие в так называемом мировом эфире. Однако механический взгляд на мир столкнулся с рядом явлений (необратимость многих явлений, тепловое излучение и т.д.), которые нельзя объяснить с позиций механики. Таким образом, с позиций механического мировоззрения не удалось построить единой физической картины мира. На смену ему пришли новые, электромагнитные представления.

2. *Электромагнитная картина мира.* Решающую роль в переходе к электромагнитной картине мира сыграла теория Максвелла. Однако, несмотря на отличие от механической картины мира, она была очень похожа на неё. Если в механической картине мира перемещались материальные точки, то в электромагнитной двигались точечные электрические заряды. Электромагнитная картина мира была неполной и незаконченной. Так удалось объяснить законы теплового излучения, устойчивость и спектры атомов и ряд других явлений. Поэтому на смену этой картине мира пришла квантово-релятивистская картина мира.

3. *Квантово-релятивистская физическая картина мира.* Революционный пересмотр принципов построения физической картины мира был проведен Эйнштейном, создавшим теорию относительности. Эта теория возникла в результате преодоления противоречий между классической механикой и электродинамикой. Для этого ему пришлось изменить взгляд на такие общепринятые понятия, как пространство, время и одновременность. Он

показал, что длина тел, промежутки времени и т.д. являются относительными, т.е. зависят от выбора системы отсчета. Эйнштейн показал также, что понятия массы и энергии, которые считались обособленными и не связанными между собой, в действительности взаимосвязаны. В теории относительности была показана единая природа электрических и магнитных полей и их относительный характер, а также то, что материя – это и вещество, и поле. Причём, при определённых условиях, они могут переходить друг в друга, т.е. поле и вещество оказались двумя взаимно превращаемыми видами материи. Таким образом, прежнее представление о мире было изменено. На его месте возникла картина мира, в которой были объединены материя, движение, пространство и время, которые считались ранее не связанными друг с другом. Однако теория относительности не сумела объяснить многие явления: строение атома и атомного ядра, излучение атомов и т.д. Для этого понадобилась квантовая физика. Современная картина мира основывается на теории относительности и квантовой физике, которые, оставаясь обособленными, взаимно дополняют друг друга. Единая же всеобъемлющая теория, пригодная для описания всех физических явлений, до сих пор не создана.

Отсутствие единой теории свидетельствует о том, что человек пока ещё не полностью и не столь глубоко познал окружающий мир. По мере накопления знаний будет создана новая теория. Однако в неё в качестве составной части войдут все теории, имеющиеся в настоящее время.