



## 5.2. Физика атома

### 5.2.1. Планетарная модель атома



Атом — это наименьшая частица химического элемента, способная к самостоятельному существованию и обладающая его свойствами.

Каждому элементу соответствует определенный род атомов, обозначаемый химическим символом этого элемента.

5

#### ► Модель атома Резерфорда

Атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого обращаются отрицательно заряженные электроны, каждый на своей орбите, подобно планетам Солнечной системы, обращающимся вокруг Солнца. Поэтому модель называют планетарной.

Расстояние от электронов до ядра очень велико по сравнению с размерами ядра.

Положительный заряд ядра связан с числом электронов в атоме соотношением:

$$q_{\text{ядра}} = +Z \cdot e,$$

где  $q_{\text{ядра}}$  — заряд ядра атома;

$Z$  — количество электронов в атоме (порядковый номер элемента в таблице Д. И. Менделеева);

$e$  — заряд электрона.

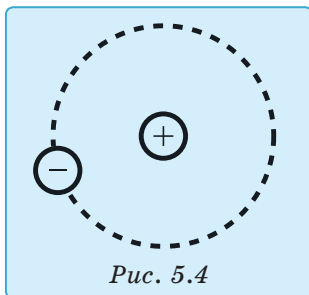


Рис. 5.4



Заряд ядра и число электронов в атоме, соответственно, совпадает с порядковым номером элемента в таблице Д. И. Менделеева.

В целом атом электронейтрален. При отрыве электрона от атома или при присоединении электрона к атому (например, в результате столкновений или при различных химических процессах) могут образоваться положительно или отрицательно заряженные ионы.

### 5.2.2. Постулаты Н. Бора

Согласно законам электродинамики Максвелла электрон, движущийся по орбите с немалым ускорением, должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной частоте его обращения вокруг ядра, в результате чего в скором времени, потеряв в результате излучения всю энергию, упасть на ядро. В действительности ничего подобного не происходит. Нейтральные невозбужденные атомы существуют неограниченно долго. Выход из создавшейся в теории атома ситуации был найден датским физиком Нильсом Бором.



#### ▶ Постулаты Бора:

1. Атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарном состоянии атом не излучает энергию. Этот постулат противоречит как классической механике, так и электродинамике Максвелла.

2. Излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей



энергией  $E_k$  в стационарное состояние с меньшей энергией  $E_n$ . Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n,$$

где  $E_k$  — энергия атома в  $k$ -том состоянии;

$E_n$  — энергия атома в  $n$ -том состоянии.

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

5

### ▶ Правило квантования орбит Бора

Стационарным состояниям атома соответствуют такие разрешенные дискретные значения энергии электрона, что при движении по стационарным круговым орбитам электрон должен иметь дискретные значения момента количества движения:

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $m_e$  — масса электрона;

$v$  — скорость электрона;

$r$  — радиус орбиты;

$h$  — постоянная Планка;

$n$  — главное квантовое число (номер орбиты в спектре атома).

Теория Бора описывает атом водорода, изотопы водорода и водородоподобные ионизированные атомы, т. е. атомы с одним электроном на орбите.

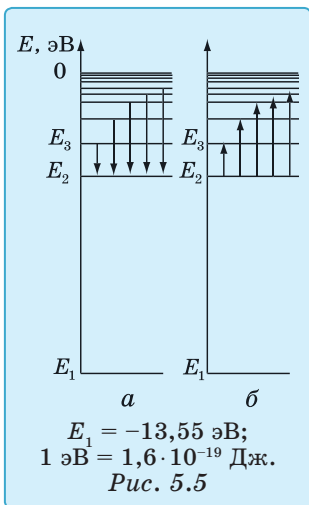
В нормальном (стационарном) состоянии атома водорода электрон находится на ближайшей к ядру

Минимальный радиус орбиты определяет размер атома, он равен  $0,53 \cdot 10^{-10}$  м.



орбите, а его энергетический уровень при этом равен  $E_1$ .

Все другие уровни называются возбужденными.



Поглощение света — процесс, обратный излучению, при котором атом с нижних энергетических уровней переходит на верхние уровни. При этом он поглощает излучение тех же частот, которые излучает при переходе с верхних энергетических уровней на нижние.

На рис. 5.5 стрелками изображены переходы атома из одних состояний в другие.

### 5.2.3. Линейчатые спектры

**Спектр** — это совокупность всех значений какой-либо физической величины, характеризующей систему или процесс.

Оптические спектры — спектры электромагнитных излучений в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах длин волн.

Оптические спектры получают от источников света при разложении их излучения по длинам волн (или частотам, или волновым числам) с помощью спектральных приборов.





Спектральная плотность излучения  $I(\nu)$  — это интенсивность излучения, приходящаяся на единичный интервал частот.

Интенсивность излучения ( $I$ ) — это плотность потока электромагнитного излучения, приходящегося на все частоты.

Непрерывные, или сплошные спектры дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы. Для получения непрерывного спектра тело нужно нагреть до высокой температуры.

▶ **Виды оптических спектров:**

1. Спектры испускания.
2. Спектры поглощения (абсорбционные спектры).
3. Спектры рассеяния.
4. Спектры отражения.

▶ **Типы спектров:**

1. Непрерывные.
2. Линейчатые.
3. Полосатые.

На рис. 5.6 приведена кривая зависимости спектральной плотности интенсивности теплового излучения от частоты (спектр) тела с очень черной поверхностью. Кривая имеет максимум при некоторой частоте  $\nu_m$ , зависящей

от температуры тела. При увеличении температуры максимум энергии излучения сдвигается

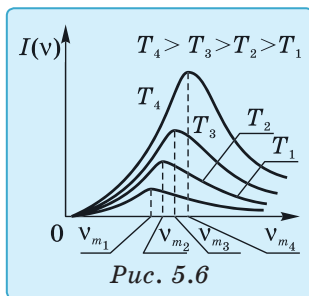


Рис. 5.6



к большим частотам. Энергия излучения, проходящая на очень малые и очень большие частоты, ничтожно мала. В сплошном спектре представлены все длины волн.

Линейчатые спектры состоят из отдельных спектральных линий (рис. 5.7). Это означает, что вещество излучает свет определенных длин волн в определенных, очень узких спектральных интервалах. Каждая линия имеет конечную ширину.

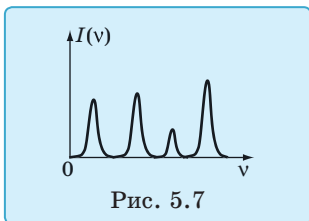


Рис. 5.7

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом

случае излучают атомы, не взаимодействующие друг с другом. Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн, характерные для данного типа атомов.

Классическим примером линейчатого спектра является спектр атома водорода. Все частоты излучений атома водорода составляют ряд серий, каждая из которых образуется при переходе атома в одно из энергетических состояний из всех верхних энергетических состояний, т. е. состояний с большей энергией, пользуясь терминологией спектроскопии — переходов электрона с верхних возбужденных уровней энергии на нижние уровни.

Частоты спектра водорода определяются соотношением:

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



где  $\nu$  — не частота, а волновое число, равное обратному значению длины волны и измеряемое в  $\text{м}^{-1}$ ;

$m$  — основной уровень серии (номер нижнего уровня);

$n$  — целое число, больше  $m$ ;

$R$  — постоянная Ридберга,  $R \approx 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ .

► **Серии частот, названные в честь открывших их ученых**

5

$m$	Название серии	Область спектра излучения
1	Лаймана	Ультрафиолетовая
2	Бальмера	Видимая
3	Пашена	Инфракрасная
4	Брекета	Инфракрасная
5	Пфунда	Инфракрасная

Полосатые спектры состоят из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса состоит из большого числа тесно расположенных линий. Полосатые спектры излучают молекулы, не связанные или слабо связанные друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров, как и для наблюдения линейчатых, используют свечение паров в пламени или свечение газового разряда.

Спектры поглощения делятся на те же три типа (сплошные, линейчатые и полосатые), что и спектры испускания.

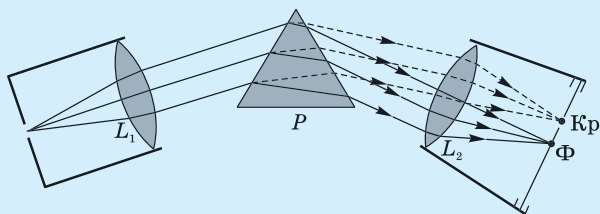


Спектральные приборы — это приборы для исследования спектрального состава электромагнитных излучений по длинам волн, определения спектральных характеристик излучателей и объектов, взаимодействовавших с излучением, а также для спектрального анализа.

Простейшим способом получения распределения интенсивности света по частотам является разложение его в спектр с помощью призмы с последующим сканированием полученного спектра чувствительным элементом. В качестве чувствительного элемента можно использовать чувствительную к нагреванию пластину термометра сопротивления, покрыв ее предварительно сажей для лучшего поглощения света.

Спектральные аппараты используют для точного исследования спектров. Схема устройства спектрографа представлена на рис. 5.8. Исследуемое излучение поступает в коллиматор, представляющий собой трубку, на одном конце которой расположена входная щель, а на другом — собирающая линза  $L_1$ . Щель находится в фокусе линзы. После линзы параллельный пучок света попадает на призму — диспергирующий элемент прибора (его главная часть). Выходящие из призмы параллельные пучки попадают на линзу  $L_2$ , в фокусе которой расположен экран — фотопластина или матовое стекло. Линза  $L_2$  фокусирует параллельные пучки лучей на экране, где вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждому узкому спектральному интервалу соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.





К — коллиматор;  $L_1, L_2$  — собирающие линзы;  
 $P$  — призма; Э — экран

Рис. 5.8

5

Вместо призмы в качестве диспергирующего элемента используется также дифракционная решетка.

### 5.2.4. Лазер

**Лазер (оптический квантовый генератор)** — это устройство, преобразующее различные виды энергии (электрическую, световую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного электромагнитного излучения оптического диапазона.

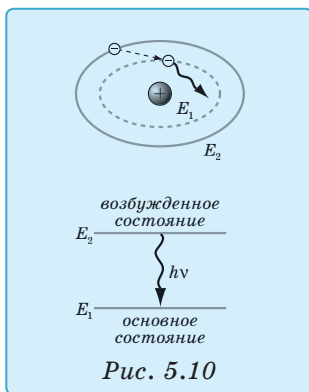
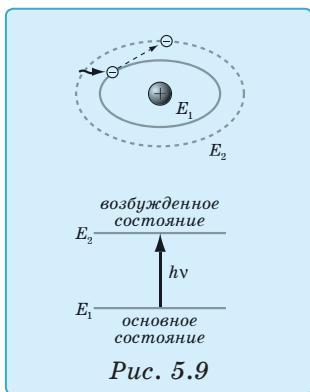


Возможными процессами взаимодействия атома с фотоном, энергия которого равна разности энергий основного  $E_1$  и возбужденного  $E_2$  состояний (уровней энергии) атома, являются следующие:

1. *Поглощение света.* Электрон атома, находящийся в основном состоянии с энергией  $E_1$ , может поглотить фотон, перейдя в возбужденное состояние с энергией  $E_2 > E_1$  (рис. 5.9).



2. *Спонтанное излучение.* В отсутствие внешних полей или столкновений с другими частицами электрон, находящийся в возбужденном состоянии, через время порядка  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  с спонтанно (самопроизвольно) возвращается в основное состояние, излучая фотон (рис. 5.10).



**Спонтанное излучение** — это излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое.

Спонтанное излучение различных атомов происходит некогерентно, т. к. каждый атом начинает и заканчивает излучать независимо от других.

3. *Индукированное (вынужденное) излучение* — излучение атома, возникающее при переходе на более низкий энергетический уровень под действием внешнего электромагнитного излучения (рис. 5.11). Возможность излучения возбужденного атома предсказано Эйнштейном в 1917 г.



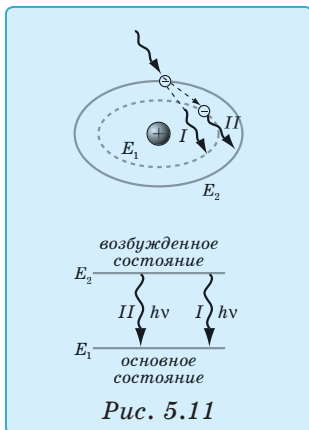
Интенсивность индуцированного излучения пропорциональна концентрации атомов, находящихся в возбужденном состоянии. При этом световая волна, возникающая при индуцированном излучении, имеет ту же частоту, поляризацию, фазу и направление распространения, что и падающая на атом волна. Это означает, что интенсивность падающего излучения увеличивается, т. е. возникает оптическое усиление.

Усиление излучения, падающего на среду, будет происходить тогда, когда число частиц на возбужденном уровне превысит число частиц на основном уровне энергии. Такое состояние системы называется инверсной населенностью.

Инверсная населенность энергетических уровней — неравновесное состояние среды, при котором концентрация атомов в возбужденном состоянии больше, чем концентрация атомов в основном состоянии.

Однако спонтанные переходы препятствуют накоплению атомов в возбужденном состоянии. Этим можно пренебречь, если возбужденное состояние метастабильно.

Метастабильным называется возбужденное состояние электрона в атоме, в котором он

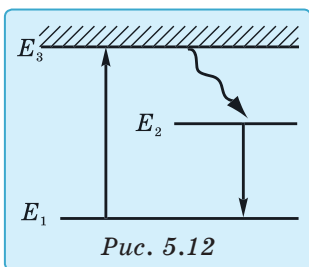




может находиться гораздо дольше, чем в обычном возбужденном состоянии.

На этом основан принцип действия рубинового лазера. Рубин, используемый в качестве активного элемента в лазере, представляет собой монокристалл  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в котором часть ионов алюминия замещена ионами  $\text{Cr}_3$ .

С помощью лампы-вспышки (оптической накачки) ионы хрома переводятся из основного состояния  $E_1$  в возбужденное —  $E_3$  (рис. 5.12). Через



$10^{-8}$  с ионы, передавая часть энергии кристаллической решетке, переходят из возбужденного состояния  $E_3$  в метастабильное состояние  $E_2 < E_3$ , в котором начинают накапливаться. Малая вероятность перехода с этого уровня

на основной уровень приводит к его инверсной населенности. Случайный фотон с энергией  $h\nu = E_2 - E_1$  может вызвать лавину индуцированных когерентных фотонов. Индуцированное излучение, распространяющееся вдоль оси цилиндрического монокристалла рубина, многократно отражается от его торцов и быстро усиливается.

### ► Особенности лазерного излучения:

1. Исключительная монохроматичность и когерентность.
2. Пучок света лазера имеет очень малый угол расхождения.
3. Лазер — наиболее мощный искусственный источник света.



Один из торцов рубинового стержня делают зеркальным, а другой — частично прозрачным. Через него выходит мощный импульс когерентного монохроматического излучения красного цвета с длиной волны 694,3 нм.

В настоящее время существует много различных типов и конструкций лазеров.

## 5.3. Физика атомного ядра

### 5.3.1. Радиоактивность. Альфа-распад. Бета-распад. Гамма-излучение

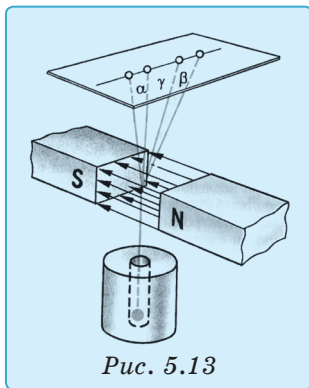
**Радиоактивность** — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав путем испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов.



#### ▶ Виды радиоактивного излучения:

1.  $\alpha$ -лучи (поток  $\alpha$ -частиц — ядер гелия).
2.  $\beta$ -лучи (поток  $\beta$ -частиц — быстрых электронов).
3.  $\gamma$ -лучи (поток  $\gamma$ -квантов — жесткого электромагнитного излучения).

Состав радиоактивного излучения можно установить, поместив луч в сильное магнит-





ное поле. По отклонению луча определяется заряд составляющих его частиц.

*Гамма-лучи* — это электромагнитная волна длиной от  $10^{-8}$  до  $10^{-11}$  см. Их проникающая способность гораздо выше, чем у рентгеновских лучей. На шкале электромагнитных волн  $\gamma$ -лучи следуют непосредственно за рентгеновскими.

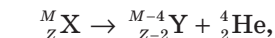
Радиоактивные элементы в результате испускания радиоактивного излучения превращаются в другие элементы. При радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов.

### Правила смещения:

1. При  $\alpha$ -распаде ядро теряет положительный заряд  $2e$ , и масса его убывает приблизительно на четыре атомные единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу Периодической системы:

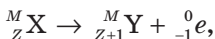
*$\beta$ -лучи* — это электроны, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света.

*$\alpha$ -частицы* — это ядра атома гелия.



где  $X$  — ядро начального элемента;  $Y$  — ядро конечного элемента;  ${}^4_2 \text{He}$  —  $\alpha$ -частица;  $M$  — атомная масса;  $Z$  — заряд ядра.

2. При  $\beta$ -распаде атом теряет электрон, т. е. заряд ядра увеличивается на единицу, масса остается почти неизменной. В результате элемент смещается на одну клетку ближе к концу Периодической системы:



где  ${}^0_{-1} e$  — электрон.



Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется суммарный электрический заряд и приблизительно сохраняется относительная атомная масса ядер. Возникшие при радиоактивном распаде ядра обычно тоже радиоактивны.

Счетчик Гейгера — детектор частиц, действие которого основано на возникновении самостоятельного электрического разряда в газе при попадании частицы в его объем.

Счетчик Гейгера состоит из металлического цилиндра — катода — и тонкой проволоочки, натянутой вдоль его оси — анода, заключенных в герметический объем, заполненный разреженным газом (обычно аргоном) (рис. 5.14). Между катодом и анодом прикладывается напряжение порядка 200—1000 В. Заряженная частица, попав в объем счетчика, вызывает электронную лавину, и ток в цепи возрастает. С нагрузочного сопротивления импульс напряжения подается на регистрирующее устройство. Резкое увеличение падения напряжения на нагрузочном сопротивлении приводит к резкому уменьшению напряжения между анодом и катодом, разряд прекращается, и трубка готова к регистрации следующей частицы.

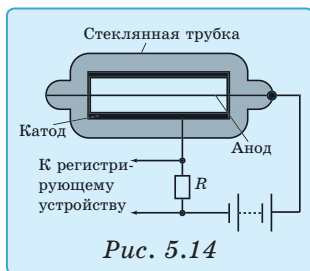


Рис. 5.14



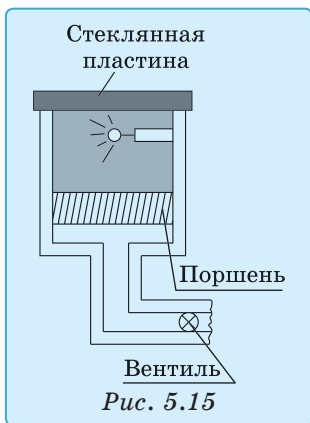
Счетчиком Гейгера регистрируют в основном электроны и  $\gamma$ -кванты.

Камера Вильсона — трековый детектор частиц, основанный на конденсации перенасыщенного пара на ионах, образованных пролетевшей частицей.

Трек — это след, оставляемый в среде движущейся заряженной частицей.

Камера Вильсона представляет собой сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 5.15). Действие ее основано на конденсации перенасыщенного пара (воды или спирта) на ионах, образованных пролетевшей частицей. Перенасыщенный пар создается резким опусканием поршня (пар в камере при этом адиабатически расширяется, вследствие чего температура его резко падает).

Капельки жидкости, осевшие на ионах, делают видимым трек, что дает возможность его сфотографировать. Длина трека позволяет определить энергию частицы, а число капелек на единицу длины трека — оценить ее скорость. Помещение камеры Вильсона в магнитное поле позволяет определить по кривизне трека отношение заряда частицы к ее массе.







Камера Вильсона была вытеснена пузырьковой камерой как более быстродействующей.

Пузырьковая камера — прибор для регистрации следов (треков) заряженных частиц, действие которого основано на вскипании перегретой жидкости вдоль траектории частицы.

Пузырьковая камера представляет собой металлическую камеру со стеклянными окнами для освещения и фотографирования, заполненную рабочей жидкостью. В качестве рабочей жидкости используют жидкий водород, дейтерий, гелий и др.

Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры составляет 0,1 с. Преимущество ее перед камерой Вильсона — большая плотность рабочего вещества, позволяющая регистрировать частицы больших энергий.

### 5.3.2. Закон радиоактивного распада

**Период полураспада** — это время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}},$$

где  $T$  — период полураспада;

$N_0$  — число радиоактивных атомов в начальный момент времени;

$N$  — число радиоактивных атомов через время  $t$ .

Радиоактивный распад — это статистический процесс. Радиоактивные атомы не «стареют». Нельзя сказать, какой именно атом распадется в данный момент времени. Можно определить





лишь среднее время жизни большого числа молекул:

$$\tau = \frac{T}{\ln 2},$$

где  $\tau$  — среднее время жизни радиоактивного атома.

Закон радиоактивного распада справедлив в среднем для большого количества частиц.

### 5.3.3. Нуклонная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра



**Атомное ядро** — это центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов, которые вместе называются нуклонами.

Почти вся масса атома (99,95 %) сосредоточена в ядре. Размер атомного ядра имеет порядок величины  $10^{-13}$ — $10^{-12}$  см, что в 10 000 раз меньше размера электронной оболочки.

**Протон** — стабильная положительно заряженная элементарная частица, заряд которой по абсолютной величине равен заряду электрона, ядро атома водорода.

**Нейтрон** — это элементарная частица, не имеющая заряда, т. е. нейтральная.

${}^1_1\text{H}$  — протон.

Масса покоя протона:

$$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276470 \text{ а. е. м.}$$

${}^1_0\text{n}$  — нейтрон.

Масса покоя нейтрона:

$$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,0008664902 \text{ а. е. м.}$$



Нейтрон — нестабильная частица: свободный нейтрон за время  $\sim 15$  мин. распадается на протон, электрон и нейтрино — частицу, лишенную массы покоя.

Число протонов совпадает с порядковым номером элемента в таблице Д. И. Менделеева. Заряд ядра определяется числом протонов, входящих в состав ядра, и кратен абсолютной величине заряда электрона:

$$Q = +Ze.$$

Массовое число равно:

$$A = Z + N,$$

где  $Z$  — зарядовое число (число протонов в ядре атома);  $Q$  — заряд ядра атома;  $A$  — массовое число (число нуклонов в ядре);  $N$  — число нейтронов в ядре.

Нуклонам (протону и нейтрону) приписывается массовое число, равное единице, электрону — нулевое значение.

*Изотопы* — это разновидности атомов одного и того же химического элемента, атомные ядра которых имеют одинаковое число протонов и различное число нейтронов.

### ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА

Протий

Дейтерий

Тритий

Изотопы занимают одно и то же место в Периодической системе элементов, откуда и произошло их название. По своим ядерным свойствам (например, по способности вступать в ядерные реакции) изотопы, как правило, существенно отличаются. Химические (и почти в той же мере физические) свойства изотопов одинаковы.



Это объясняется тем, что химические свойства элемента определяются зарядом ядра, поскольку именно он влияет на структуру электронной оболочки атома. Исключением являются изотопы легких элементов.

У всех химических элементов имеются изотопы. У некоторых элементов имеются только нестабильные (радиоактивные) изотопы. Для всех элементов искусственно получены радиоактивные изотопы.

### 5.3.4. Энергия связи нуклонов в ядре. Ядерные силы



Поскольку протоны в ядре имеют положительный одинаковый заряд, они отталкиваются. Для того чтобы удержать их вместе, должны существовать силы, намного превышающие силы электрического и гравитационного взаимодействия. Эти силы называются *ядерными*. Они в 100 раз превосходят электрические (кулоновские) силы. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействие ядерных частиц относят к сильным взаимодействиям — особому типу взаимодействия, присущему большинству элементарных частиц наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Взаимодействие	Радиус действия, м
Гравитационное	$\infty$
Слабое	$10^{-17}$
Электромагнитное	$\infty$
Сильное	$10^{-15}$



Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях порядка  $10^{-13}$ — $10^{-12}$  см, равных по порядку величины размерам ядра.

Энергия связи — это энергия, которую надо затратить, чтобы полностью расщепить ядро на отдельные нуклоны.

На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Точнейшие измерения показывают, что масса покоя ядра всегда меньше суммы масс покоя составляющих ее протонов и нейтронов:

$$M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}}.$$

Дефект масс:

$$\Delta M = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}.$$

Тогда согласно соотношению Эйнштейна между массой и энергией:

$$E_{\text{св}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}})c^2,$$

где  $M_{\text{я}}$  — масса покоя ядра;

$\Delta M$  — дефект масс;

$E_{\text{св}}$  — энергия связи;  $[E_{\text{св}}] = 1$  МэВ.

Удельная энергия связи — это энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра;

$E_{\text{уд}}$  — удельная энергия связи;  $[E_{\text{уд}}] = 1$  МэВ/нуклон;  $1$  МэВ =  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Дж.

Энергия связи примерно постоянна (не считая самых легких ядер) и равна 8 МэВ/нуклон (рис. 5.16). Слабый максимум (8,6 МэВ) приходится на элементы с массовыми числами от 50 до 60, т. е. на железо и близкие к нему по порядковому номеру элементы. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

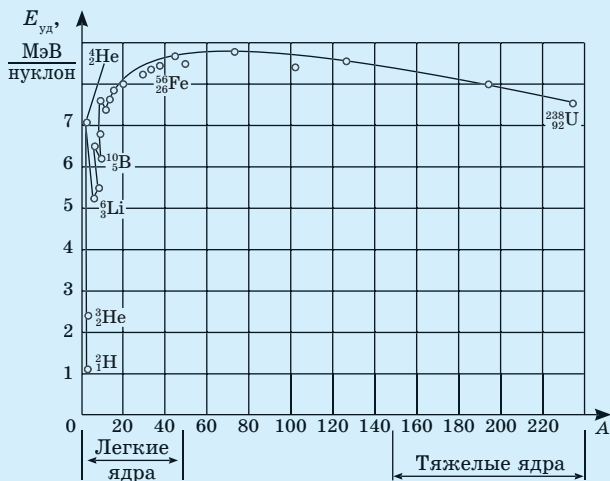


Рис. 5.16

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением  $Z$  кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

### 5.3.5. Ядерные реакции. Деление и синтез ядер

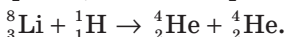
**Ядерные реакции** — это процессы, идущие при столкновении ядер или элементарных частиц с другими ядрами, в результате которых изменяются квантовое состояние и нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции.



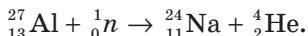
**▶ Виды ядерных реакций:**

1. Реакции деления.
2. Реакции синтеза.

Например, реакция на быстрых протонах:



Например, реакция на медленных нейтронах:



Для осуществления ядерной реакции необходимо приближение частиц вплотную к ядру, что возможно для частиц с очень большой энергией (особенно для положительно заряженных частиц, которые отталкиваются от ядра). Такая энергия (до 105 МэВ) сообщается в ускорителях заряженных частиц протонам, дейтронам и другим частицам.

В отличие от протонов, лишённые заряда нейтроны беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их изменения.

**▶ Закон сохранения заряда**

Суммарный электрический заряд частиц, вступающих в ядерную реакцию, равен суммарному электрическому заряду продуктов реакции.

**▶ Закон сохранения массового числа**

В ядерных реакциях обычного типа (без образования античастиц) наблюдается сохранение массового ядерного числа (т. е. полного числа нуклонов).

**▶ Закон сохранения энергии**

Изменение кинетической энергии в процессе ядерной реакции равно изменению энергии покоя участвующих в реакции ядер и частиц.

Энергетический выход реакции — это разность энергий покоя ядер и частиц до реакции и после реакции:



$$\Delta E = \left( \sum m_i - \sum m_k \right) c^2;$$

где  $\Delta E$  — энергетический выход ядерной реакции;

$\sum m_i$  — сумма масс частиц, которые вступают в реакцию;

$\sum m_k$  — сумма масс частиц, которые образовались после реакции.

Энергетический выход ядерной реакции равен изменению кинетической энергии частиц, участвующих в реакции.

Если кинетическая энергия ядер и частиц после реакции больше, чем до реакции, то говорят о выделении энергии, в противном случае — о ее поглощении.

*Деление ядер* — процесс, при котором из одного атомного ядра возникают два (реже три) ядра-осколка, близких по массе.

Основой современной ядерной энергетики служит деление ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  под действием нейтронов.

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении.

Механизм деления ядра объясняется на основе капельной модели, согласно которой сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 5.17, а). Ядро удерживают от распада ядерные силы притяжения, большие, чем силы кулоновского отталкивания, действующие между протонами и стремящиеся разрывать ядро.

Ядро имеет форму шара. После поглощения нейтрона оно возбуждается и деформируется,





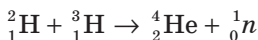
приобретая вытянутую форму (рис. 5.17, б), и растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между половинками вытянутого ядра не станут больше сил притяжения, действующих в перешейке (рис. 5.17, в). После этого ядро разрывается на две части (рис. 5.17, г). Осколки под действием кулоновских сил отталкивания разлетаются со скоростью, равной  $1/30$  скорости света. В процессе деления происходит испускание нейтронов, которые участвуют в дальнейших реакциях.

Синтез ядер осуществляется в термоядерных реакциях.

*Термоядерные реакции* — это реакции слияния легких ядер при очень высокой температуре.

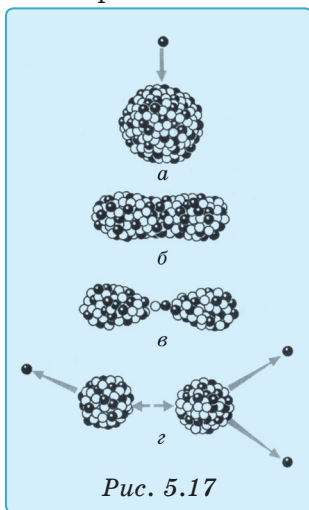
Выделяющаяся при слиянии (синтезе) энергия оказывается наибольшей при синтезе легких элементов, обладающих минимальной энергией связи. При таком процессе ядерного синтеза выделяется значительная энергия.

Например:



Реакция синтеза легких ядер энергетически более выгодна, чем реакция деления тяжелых.

*Термоядерный синтез* — реакция, в ко-





торой при высокой температуре, большей  $10^7$  К, из легких ядер синтезируются более тяжелые.

Термоядерный синтез — источник энергии всех звезд, в том числе и Солнца.

Осуществление управляемого термоядерного синтеза предоставило бы человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии.

Ядерные цепные реакции — это ядерные реакции, в которых частицы, вызывающие их, образуются и как продукты этих реакций.

Для течения цепной реакции необходимо, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось со временем или чтобы коэффициент размножения нейтронов  $k$  был больше или равен единице.

Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо поколении к числу нейтронов предшествующего поколения.

$k$  — коэффициент размножения нейтронов;  
 $k \geq 1$  — цепная реакция поддерживается;  
 $k < 1$  — цепная реакция невозможна.

Ядерный реактор — это установка, содержащая ядерное топливо, в которой осуществляется управляемая цепная реакция деления.

Критической массой называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

Управление реактором осуществляется введением в активную зону стержней, позволяющих в любой момент приостановить развитие цепной реакции.

Реакторы на быстрых нейтронах работают без замедлителя на обогащенной смеси урана,



содержащего не менее 15% изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Их преимуществом является образование в процессе работы значительного количества плутония, который сам может быть использован в дальнейшем в качестве ядерного топлива. Такие реакторы называются реакторами-размножителями, поскольку они воспроизводят делящийся материал.

► **Основные элементы ядерного реактора:**

1. Ядерное горючее ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{239}_{92}\text{Pu}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и др.).
2. Теплоноситель для вывода энергии, образующейся при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.).
3. Устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые хорошо поглощают нейтроны).