

# Глава 7

## Ядерная физика и элементарные частицы

Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны.  
И память сорока веков!

*В. Брюсов*

### § 35. Протонно-нейтронная модель строения ядра атома

- Вы уже знаете, что вещества состоят из мельчайших частиц — атомов, взаимодействующих между собой. Изучая строение и свойства атома, можно создавать новые источники энергии, вещества с заранее заданными свойствами, использовать новые возможности в медицине, технологии производства. В этой связи необходимо ответить на вопросы: как устроен атом? Каким закономерностям он подчиняется?



В физике за атомную единицу массы (1 а.е.м.) принимается величина, равная  $\frac{1}{12}$  массы изотопа углерода  $^{12}_6\text{C}$ :

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_{\text{OC}} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В экспериментах Резерфорда по изучению рассеяния  $\alpha$ -частиц веществом было установлено, что в центральной части атома, размеры которого  $\sim 10^{-10}$  м, находится положительно заряженное ядро, имеющее размер  $\sim (10^{-14} - 10^{-15})$  м, в котором сосредоточено 99,96 % от массы атома (рис. 208).

Для завершения построения модели атома необходимо было ответить на вопрос: обладает ли атомное ядро структурой, и если обладает, то какой?

Наличие в ядре положительно заряженных частиц — протонов было экспериментально доказано Резерфордом с его учениками в 1919 г.

Протон, обозначаемый латинской буквой  $p$ , представляет собой ядро атома водорода. Он обладает массой  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг и зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл.

В 1930 г. немецкие ученые Вальтер Боте и Ганс Беккер, изучая реакции, происходящие при облучении бериллия  $\alpha$ -частицами, обнаружили новое излучение, обладающее очень большой проникающей способностью, первоначально названное бериллиевыми лучами. В 1932 г. английский физик Джеймс Чедвик провел эксперименты по изучению свойств этого излучения и установил, что бериллиевые лучи состоят из электрически нейтральных частиц с массой, сравнимой с массой протона. Эти частицы он назвал *нейтронами* (от англ. *neutral* — нейтральный).

**Нейтрон** — еще одна частица наряду с электроном, протоном и фотоном. Эта частица обозначается латинской буквой  $n$ . Она имеет массу  $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$  кг, почти совпадающую с массой протона, электрически нейтральна. Из-за отсутствия электрического заряда у нейтрона взаимодействие с веществом очень слабо. Вследствие этого нейтрон движется в веществе прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с каким-либо атомным ядром. При столкновениях с тяжелыми атомами нейтрон почти не теряет энергию, как упругий мячик, отскакивающий от стены. При столкновении же с легкими атомами (водород, бериллий, углерод) нейтрон передает им часть своей энергии и начинает двигаться медленнее. Вещества, содержащие легкие атомы, называют *замедлителями нейтронов*. Наиболее эффективными замедлителями нейтронов являются вещества, содержащие водород (например, вода), вследствие того, что масса атома водорода близка к массе нейтрона. Со временем кинетическая энергия нейтрона становится такой же, как кинетическая энергия теплового движения частиц окружающей среды. Такие относительно медленно движущиеся нейтроны называются **тепловыми**.

Нейтроны устойчивы только в составе стабильных ядер. Нейтрон в свободном состоянии, т. е. находящийся вне ядра, является нестабильной частицей. Его среднее время жизни  $t = 886$  с.

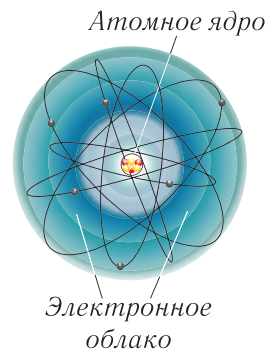


Рис. 208. Строение атома

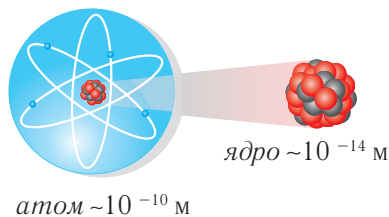


Рис. 209. Строение и размеры атома и ядра

После открытия нейтронов в 1932 г. физики — советский Дмитрий Дмитриевич Иваненко и немецкий Вернер Гейзенберг — предложили **протонно-нейтронную модель** строения ядра. Согласно этой модели ядро состоит из частиц двух типов — протонов и нейтронов (рис. 209).

В соответствии с современными физическими представлениями протон и нейтрон являются двумя разными зарядовыми состояниями одной и той же частицы — **нуклона** (от лат. *nucleus* — ядро). В состоянии без электрического заряда ( $q = 0$ ) нуклон является нейтроном, а в состоянии с положительным электрическим зарядом ( $q = e$ ) — протоном.

Число протонов в ядре называется **зарядовым числом** (атомным номером) и обозначается буквой  $Z$  (число протонов в ядре равно количеству электронов в нейтральном атоме). Зарядовое число совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов Менделеева. Общее число нуклонов называется **массовым числом** и обозначается буквой  $A$ . Массовое число совпадает с округленной до целого числа атомной массой элемента. Протон и нейтрон имеют массовое число  $A = 1$ , а электрон  $A = 0$ . Число нейтронов в ядре равно  $N = A - Z$ .

Для характеристики ядра достаточно знать зарядовое  $Z$  и массовое  $A$  числа. Для обозначения атомного ядра  ${}^A_Z X$  применяется такой же символ, как для соответствующего химического элемента. Слева внизу символа ставится зарядовое число ядра  $Z$ , а вверху — массовое число  $A$ . Например, символ  ${}^{12}_6 C$  обозначает ядро углерода, содержащего 12 нуклонов, 6 из которых протоны, а 6 других — нейтроны.

Атом с определенными значениями зарядового числа  $Z$  и массового числа  $A$  называется **нуклидом**.

В ядрах одного химического элемента всегда содержится одно и то же количество протонов, а число нейтронов может быть различным. Например, в ядрах углерода число протонов всегда 6, а число нейтронов может быть 5, 6, 7, 8, 9 или 10.

Атомы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются **изотопами** (от греч. *ἰσόζ* (изос) — одинаковый и *τόπος* (топос) — место) данного химического элемента. На-

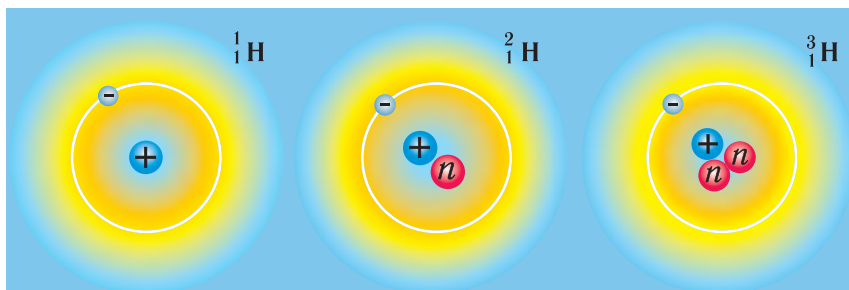


Рис. 210. Три изотопа водорода

пример, хорошо известны изотопы водорода — дейтерий  ${}^2_1\text{H}$  и тритий  ${}^3_1\text{H}$ , которые содержат, соответственно, один и два нейтрона в ядре (рис. 210).

Массы некоторых атомов приведены в таблице 10.



Таблица 10. Массы атомов химических элементов

Элемент	Изотоп	Масса атома, а.е.м.	Элемент	Изотоп	Масса атома, а.е.м.
Водород	${}^1_1\text{H}$	1,00783	Углерод	${}^{11}_6\text{C}$	11,01143
Водород	${}^2_1\text{H}$	2,01410	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
Водород	${}^3_1\text{H}$	3,01605	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
Гелий	${}^4_2\text{He}$	4,00260	Кислород	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491
Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01513	Фтор	${}^{19}_9\text{F}$	18,99840
Литий	${}^7_3\text{Li}$	7,01601	Алюминий	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98146
Бериллий	${}^8_4\text{Be}$	8,00531	Кремний	${}^{28}_{14}\text{Si}$	27,98154
Бериллий	${}^9_4\text{Be}$	9,01218	Уран	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,04393
Бор	${}^{10}_5\text{B}$	10,01294	Уран	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,05079
Бор	${}^{11}_5\text{B}$	11,00931	Плутоний	${}^{238}_{94}\text{Pu}$	239,05216

Химические свойства элементов определяются не атомной массой, а зарядовым числом ядра, т. е. числом электронов в электрически ней-

тральном атоме элемента и их распределением по энергетическим уровням. Действительно, атомные массы изотопов различаются, а их химические свойства одинаковы. Например, атомы нуклидов водорода  ${}^1_1\text{H}$  и гелия  ${}^3_2\text{He}$  имеют близкие по величине атомные массы, но принципиально разные химические свойства.

В рамках протонно-нейтронной модели ядра возникает вопрос о его устойчивости. Действительно, между протонами, находящимися в ядре, действуют силы электростатического отталкивания огромной величины. Если считать расстояние между протонами  $r \sim 10^{-14}$  м, то модуль силы отталкивания  $F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \approx 2,30$  Н, а гравитационная сила их притяжения составляет всего  $F = G \frac{m_p^2}{r^2} \approx 1,9 \cdot 10^{-36}$  Н.

Чем же объясняется устойчивость ядра, если внутри него действуют такие огромные силы кулоновского отталкивания между протонами?

Причина устойчивости ядра кроется в существовании, кроме сил электростатического отталкивания между протонами (нуклонами), *ядерных сил притяжения* между нуклонами. Ядерные силы отличаются по своей природе как от сил электромагнитных, так и сил гравитационных. Они представляют новый вид взаимодействия между нуклонами, который называют **сильным взаимодействием**.

**Ядерные силы** обладают рядом отличительных свойств:

- 1) являются силами притяжения и отталкивания;
- 2) на расстояниях порядка размера ядра примерно в 100 раз превосходят по величине кулоновские силы отталкивания в ядре;
- 3) проявляются только на расстояниях между частицами порядка размера ядра ( $10^{-14} - 10^{-15}$ ) м, т. е. являются короткодействующими силами. На расстояниях, больших  $(2 - 7) \cdot 10^{-15}$  м, они не проявляются;
- 4) не зависят от электрического заряда взаимодействующих нуклонов (ядерные силы между двумя протонами, нейтронами или протоном и нейтроном одинаковы). Это свойство называется *зарядовой независимостью*;
- 5) обладают свойством насыщения. Это означает, что находящиеся внутри ядра нуклоны могут взаимодействовать только со своими ближайшими соседями;
- 6) не являются центральными, т. е. они не направлены по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Все ядра имеют плотность  $\rho \sim 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , а один кубический сантиметр



ядерного вещества имеет массу 180 млн тонн.



Так как массы и энергии ядерных величин в единицах СИ имеют очень малые значения, для удобства вычислений все массы в ядерной физике выражают в атомных единицах массы (а.е.м.), а энергии — в электронвольтах (эВ). Используя формулу Эйнштейна  $E = mc^2$ , массу также можно выразить в единицах энергии — **электронвольтах**:  $m = \frac{E}{c^2}$ . Например, в атомных единицах массы масса электрона  $m_e = 0,00054858$  а.е.м, масса протона  $m_p = 1,007276$  а.е.м, масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  а.е.м, масса атома водорода  $m_p = 1,007825$  а.е.м, а в энергетических единицах  $m_e = 0,511$  МэВ,  $m_p = 938,281$  МэВ,  $m_n = 939,567$  МэВ ( $1 \text{ МэВ} = 1 \cdot 10^6 \text{ В}$ ).

Связь между различными единицами массы определяется следующими соотношениями:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,492 \cdot 10^{-10} \frac{\text{Дж}}{c^2} = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{c^2},$$

$$1,000 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

► Изотопы применяются в биологии для изучения процесса фотосинтеза, для исследования использования растениями фосфора, азота, калия и микроэлементов, при исследовании процессов обмена веществ и биосинтеза; в медицине — при диагностике заболеваний, для радиоиммунного анализа и томографии; в экологии — для исследования переноса, накопления и распада различных загрязнителей в воздухе, воде и почве.



Дж. Чедвик за открытие нейтрона получил Нобелевскую премию по физике в 1935 г.



1. Когда и кем были открыты протон и нейтрон?
2. В чем сущность протонно-нейтронной модели атомного ядра?
3. Чему равен заряд и масса протона?
4. Что определяет атомный номер химического элемента в периодической системе элементов Менделеева?
5. Что определяет массовое число атомного ядра? Зарядовое число?
6. Как в ядерной физике обозначается любой химический элемент?
7. Какие нуклиды обозначены символами X:  
а)  ${}_{7}^{18}\text{X}$ ; б)  ${}_{38}^{82}\text{X}$ ; в)  ${}_{97}^{247}\text{X}$ ?
8. Что называют изотопами химического элемента? Что общего у различных изотопов одного и того же химического элемента? Чем они различаются?
9. Как называется число нуклонов в ядре?
10. Какие силы действуют между нуклонами в атомных ядрах?
11. Какими свойствами обладают ядерные силы?

### Упражнение 21

1. Определите количество нуклонов в изотопах:  
а) актиния  ${}_{89}^{225}\text{Ac}$ ; б) ксенона  ${}_{54}^{131}\text{Xe}$ ; в) циркония  ${}_{40}^{91}\text{Zr}$ .
2. Определите состав ядер атомов бора, кремния, брома.
3. Сколько нуклонов, нейтронов, протонов содержат нейтральные атомы:  
а)  ${}_{6}^{11}\text{C}$ ; б)  ${}_{9}^{19}\text{F}$ ; в)  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ ; г)  ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ ; д)  ${}_{25}^{55}\text{Mn}$ ?
4. Определите элемент, в ядре которого содержится: а) 20 протонов и 20 нейтронов; б) 12 протонов и 14 нейтронов; в) 10 протонов и 12 нейтронов; г) 104 протона и 156 нейтронов.
5. Ядра каких элементов получатся, если заменить нейтроны протонами, а протоны нейтронами в ядрах:  
а)  ${}_{8}^{15}\text{O}$ ; б)  ${}_{12}^{25}\text{Mg}$ ; в)  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ ?



## § 36. Ядерные реакции.

### Законы сохранения в ядерных реакциях

- Подобно тому, как в химических реакциях получаются новые вещества, так и при взаимодействиях различных ядер могут образовываться новые ядра. Таким образом, можно синтезировать новые химические элементы, получать энергию, исследовать мельчайшие объекты микромира. Каким закономерностям подчиняются ядерные реакции? При всем разнообразии подобных реакций есть ли в них общие закономерности? Как их можно использовать на благо цивилизации?



Из курса химии: *Закон сохранения массы — масса веществ, вступающих в химическую реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции.*

**Ядерная реакция** — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, который может сопровождаться изменением состава и строения ядра. Для осуществления ядерных реакций необходимо сближение частиц на расстояние действия ядерных сил.

Символически (двухчастичные) ядерные реакции записываются в следующем виде:



Здесь  $A$  — исходное ядро,  $a$  — бомбардирующая частица,  $B$  — конечное ядро,  $b$  — испускаемая частица,  $Q$  — энергия реакции.

Ядерные реакции могут происходить как при столкновениях различных частиц с атомными ядрами, так и при столкновениях ядер друг с другом. В качестве частиц, вызывающих ядерные реакции, обычно

используют протоны, нейтроны, фотоны,  $\alpha$ -частицы, дейтроны. Незаряженные частицы (нейтроны) могут проникать в атомные ядра и вызывать разнообразные ядерные превращения, обладая сколько угодно малой кинетической энергией. Ядерные реакции с участием нейтронов происходят при энергиях  $\sim 1$  эВ. Так как заряженным частицам для проникновения в ядра необходимо преодолеть действие сил электрического отталкивания, то ядерные реакции с участием протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц возможны при энергиях несколько МэВ. Более тяжелые ядра используются значительно реже, потому что с увеличением заряда ядра возрастают силы электростатического отталкивания. Для проникновения заряженных частиц в любое ядро созданы ускорители заряженных частиц, в которых ядра атомов и электроны разгоняются до энергий от 10 МэВ до 100 ГэВ.

В любых ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, заряда. Именно действие законов сохранения ограничивает возможные варианты ядерных реакций и позволяет предсказать возможные пути (механизмы) ядерных превращений.

Сумма зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядовых и массовых чисел ядер и частиц, получающихся в результате реакции.

Рассмотрим энергетический баланс на примере двухчастичной ядерной реакции (1). Поскольку как в начальном, так и в конечном состоянии частицы считаются невзаимодействующими друг с другом, то их полная энергия складывается из кинетической энергии и энергии покоя.

С учетом закона сохранения энергии можно записать:

$$E_a + E_A = E_b + E_B + Q, \quad (2)$$

где  $E_A, E_a, E_B, E_b$ , — полные энергии частиц до и после реакции.

Так как полная энергия частицы  $E = E_k + mc^2$  равна кинетической энергии  $E_k$  и энергии покоя  $mc^2$ , то соотношение (2) можно записать в виде:

$$m_a c^2 + E_{ka} + m_A c^2 + E_{KA} = m_b c^2 + E_{kb} + m_B c^2 + E_{KB} + Q,$$

где  $m_a, m_A, m_b, m_B$  — массы частиц, а  $E_{ka}, E_{KA}, E_{kb}, E_{KB}$  — их кинетические энергии в начальном и конечном состояниях.

Тогда из соотношения (1) получаем выражение для энергии реакции:

$$Q = E_k^0 - E_k + (m_A + m_a - (m_B + m_b))c^2, \quad (3)$$

где  $E_k^0 = E_{ka} + E_{KA}$ ,  $E_k = E_{kb} + E_{KB}$  — кинетические энергии системы в начальном и конечном состояниях.

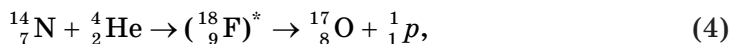
Следовательно, энергией реакции  $Q$  (при малых скоростях частиц) называется разность энергий покоя начального и конечного состояний частиц, участвующих в реакции.

Так как энергия реакции может быть как положительной, так и отрицательной, то ядерные реакции могут происходить как с выделением энергии, так и с поглощением энергии. Ядерные реакции, происходящие с выделением энергии ( $Q > 0$ ), называются *экзоэнергетическими*, а поглощением энергии ( $Q < 0$ ), — *эндоэнергетическими*. Чтобы произошла эндоэнергетическая реакция, частицам, участвующим в ней, необходимо предварительно сообщить добавочную кинетическую энергию.

Энергия, высвобождающаяся при ядерной реакции, называется **энергетическим выходом** ядерной реакции. Подчеркнем, что энергетический выход различных ядерных реакций может достигать сотен мегаэлектронвольт, что в миллионы раз превышает энергетический выход при химических реакциях.

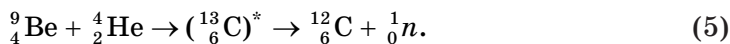


Исторически первой ядерной реакцией под действием  $\alpha$ -частиц считается реакция, в результате которой в 1919 г. Резерфордом был открыт протон  ${}^1_1p$ :



где \* означает составное ядро в возбужденном состоянии.

Нейтрон  ${}^1_0n$  был открыт Чедвиком в 1932 г. в реакции радиоактивного превращения ядер бериллия в изотоп углерода при бомбардировке  $\alpha$ -частицами:

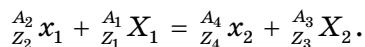


Ядерные реакции можно *классифицировать* по следующим признакам:

- по роду участвующих в них частиц (нейтронов, заряженных частиц);
- по признаку выделения или поглощения энергии (экзоэнергетические ( $Q > 0$ ), эндоэнергетические ( $Q < 0$ ));
- по энергии вызывающих их частиц (малых энергиях ( $< 1$  МэВ), средних энергиях (1 МэВ — 10 МэВ), высоких энергиях ( $> 10$  МэВ));
- по массе бомбардируемых ядер (легких ( $A < 50$ ), средних ( $50 < A < 100$ ), тяжелых ( $A > 100$ ));
- по виду бомбардирующих частиц (на заряженных частицах, на нейтронах);

• по характеру происходящих ядерных превращений (с испусканием нейтронов, заряженных частиц,  $\gamma$ -квантов (излучения)).

Вид записи ядерных реакций (см. уравнения (4)—(5)) аналогичен записи формул химических реакций — слева записывается сумма исходных частиц, справа — получившихся:



При любых ядерных реакциях выполняются законы сохранения электрического заряда (зарядового числа), массы (числа нуклонов (массового числа)), энергии и импульса.

Рассмотрим законы сохранения массовых и зарядовых чисел на примере ядерной реакции (4). Суммы массовых чисел частиц, вступивших в реакцию и образовавшихся в ней, равны:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \Rightarrow 14 + 4 = 17 + 1.$$

Суммы зарядовых чисел вступивших в реакцию и образовавшихся частиц также равны:

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \Rightarrow 7 + 2 = 8 + 1.$$

Таким образом, действие законов сохранения с одной стороны ограничивает возможные варианты ядерных реакций, а с другой позволяет предсказывать возможные ядерные превращения.

Величина, равная разности масс частиц после и до реакции:

$$\Delta m = m_b + m_B - (m_a + m_A),$$

называется **дефектом масс** ядерной реакции.

Если  $\Delta m < 0$ , то  $Q = -\Delta mc^2 = (m_a + m_A - (m_b + m_B))c^2 > 0$ , то энергия в ходе реакции выделяется, если  $\Delta m > 0$ , то  $Q = -\Delta mc^2 < 0$ , то энергия поглощается.



1. Что называют ядерными реакциями?
2. В каком виде записываются ядерные реакции?
3. В чем основное отличие ядерных реакций на заряженных частицах от ядерных реакций на нейтронах?
4. Что называют энергией ядерной реакции?
5. При каком условии реакция идет с поглощением энергии, а при каком — с выделением?
6. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции?
7. По каким признакам производится классификация ядерных реакций?
8. Что называется дефектом масс ядерной реакции?

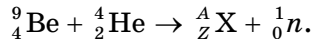


### Примеры решения задач

1. Запишите уравнение ядерной реакции, происходящей при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами и сопровождающейся испусканием нейтронов.

Решение

Для записи ядерных реакций необходимо знать законы сохранения массового  $A$  и зарядового  $Z$  чисел:



Сумма массовых чисел частиц, вступивших в реакцию, равна сумме массовых чисел образовавшихся частиц:

$$9 + 4 = A + 1.$$

Отсюда  $A = 12$ .

Сумма зарядовых чисел частиц, вступивших в реакцию, равна сумме зарядовых чисел образовавшихся частиц:

$$4 + 2 = Z + 0.$$

Откуда  $Z = 6$ .

Из периодической системы химических элементов Менделеева находим, что искомым элементом является углерод  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Ответ:  ${}^{12}_6\text{C}$ .

2. Вычислите энергию ядерной реакции:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$ . Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

Решение

Массы частиц (в атомных единицах массы (а.е.м.)), вступивших в реакцию и после нее:  ${}^7_3\text{Li} - 7,01601$  а.е.м.,  ${}^1_1\text{H} - 1,00783$  а.е.м.,  ${}^4_2\text{He} - 4,00260$  а.е.м.

Масса частиц, вступивших в реакцию:

$$m_1 = 7,01601 \text{ а.е.м.} + 1,00783 \text{ а.е.м.} = 8,02384 \text{ а.е.м.}$$

Масса частиц после реакции:

$$m_2 = 2 \cdot 4,00260 \text{ а.е.м.} = 8,00520 \text{ а.е.м.}$$

Дефект масс реакции:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = -0,01864 \text{ а.е.м.}$$

Так как  $\Delta m < 0$ , то энергия реакции  $Q = -\Delta mc^2 > 0$ . Следовательно, ядерная реакция происходит с выделением энергии, т. е. энергетический выход реакции:

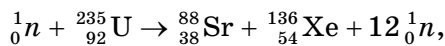
$$Q = -\Delta mc^2,$$

$$\Delta E = 0,01864 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \left(3,0 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 2,8 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

Ответ: выделяется энергия  $\Delta E = 2,8 \cdot 10^{-12}$  Дж.

## Упражнение 22

1. Определите, какая частица образуется в результате ядерной реакции  ${}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{14}^{27}\text{Si} + \dots$ .
2. Запишите уравнения ядерных реакций, в результате которых при облучении протонами ядра лития  ${}^7_3\text{Li}$  образуются: а) ядро и нейтрон; б) два одинаковых ядра; в) два ядра с числами нуклонов, отличающимися на две единицы и протон; г) ядро и  $\gamma$ -квант.
3. Вычислите энергию, выделяющуюся в реакции деления



предполагая, что кинетическая энергия налетающего нейтрона очень мала. Массы соответствующих частиц и ядер равны:

$$m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}, m_{\text{U}} = 235,04393 \text{ а.е.м.},$$

$$m_{\text{Xe}} = 135,9072 \text{ а.е.м.}, m_{\text{Sr}} = 87,9056 \text{ а.е.м.}$$

4. При каких условиях возможна ядерная реакция  ${}^8_8\text{O} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^9_9\text{F} + {}^1_0n$ ?
5. Ядро изотопа магния  ${}^{25}_{12}\text{Mg}$  подвергается бомбардировке протонами. Запишите уравнение реакции, если она сопровождается испусканием  $\alpha$ -частицы.
6. Определите дефект масс ядерной реакции, в которой два дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  объединятся в один нуклид гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Какая энергия выделяется в этой реакции?
7. Определите дефект масс ядерной реакции, в которой четыре атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  объединятся в один атом кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$ . Какая энергия выделяется (поглощается) в этой реакции? Какая энергия необходима, чтобы разделить один атом кислорода  ${}^{16}_8\text{O}$  на четыре атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ?



## § 37. Энергия связи ядра атома

- До сих пор мы рассматривали двухчастичные ядерные реакции, когда частица налетала на ядро. А возможна ли реакция распада самого ядра? Какие условия для этого необходимы? Как это явление можно использовать на практике?

Рассмотрим реакцию разделения ядра на нуклоны. Так как ядра состоят из протонов и нейтронов, то энергия рассматриваемой реакции:

$$Q = (m_{\text{я}} - (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n)) \cdot c^2.$$

Найдем суммарную (полную) массу свободных частиц, содержащихся, например, внутри ядра углерода  ${}^{12}_6\text{C}$ , и сравним ее с массой ядра. Так как ядро содержит  $Z = 6$  протонов и  $N = A - Z = 6$  нейтронов, то их суммарная масса:

$$m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n = 6m_p + 6m_n = 12,095646 \text{ а.е.м.}$$

Поскольку масса ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  —  $m_{\text{C}} = 12,00000$  а.е.м, то их разность равна:

$$\Delta m = m - m_{\text{C}} = 0,095646 \text{ а.е.м.} > 0.$$

Таким образом, суммарная масса отдельных частиц больше, чем масса образованного ими ядра.

Разность

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}$$

называют **дефектом массы ядра**.

Заметим, что относительное изменение массы при образовании ядра  ${}^{12}_6\text{C}$  составляет:

$$\frac{\Delta m}{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n} \cdot 100 \% = \frac{0,095646}{12,095646} \cdot 100 \% = 0,79 \%$$

Масса тела меняется всегда, когда меняется его внутренняя энергия. Отметим, что в процессах, происходящих на атомно-молекулярном уровне, изменения массы очень малы. Так, при полном превращении льда массой  $m$  в воду относительное изменение массы  $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$ , при химических реакциях, например сгорания метана в кислороде  $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-10}$ , в ядерных реакциях  $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}$ , т. е. в  $\sim 10^7$  раз больше, чем в химических реакциях.



Точные измерения масс ядер показали, что масса любого ядра (за исключением ядра водорода, в ядре которого всего один протон и ни одного нейтрона) меньше суммы масс составляющих его протонов и нейтронов. И чем больше нуклонов в ядре элемента, тем больше дефект массы для него.

Куда же исчезла эта масса  $\Delta m$ ?

Согласно закону взаимосвязи массы и энергии  $\Delta E = \Delta mc^2$  избыточная масса превращается в энергию, выделяемую при соединении нуклонов в ядро. Таким образом, при образовании ядра углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  менее 1 % суммарной массы нуклонов переходит в энергию. Следовательно, для разделения ядра углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  на отдельные нуклоны требуется энергия. Именно поэтому ядро углерода не распадается.

Для удаления нуклона (протона или нейтрона) из ядра необходимо совершить работу против ядерных сил притяжения между нуклонами. Вследствие этого энергия системы «удаленный нуклон — оставшееся ядро» возрастет на величину, равную работе внешних сил против действия ядерных сил притяжения между нуклонами.

Минимальная энергия, необходимая для разделения ядра на отдельные нуклоны, называется **энергией связи ядра**:

$$E_{\text{св}} = (Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2 = \Delta mc^2 > 0. \quad (1)$$

Если массу выражать в а.е.м., а энергию связи — в мегаэлектрон-вольтах (МэВ), то выражение (1) записывают в виде:

$$|E_{\text{св}}| = 931,5(Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{я}}) \text{ (МэВ)}.$$

Состояние атомного ядра с минимальной энергией, равной (по модулю) энергии связи, называется *основным*, состояние с избытком энергии (по сравнению с основным) называется *возбужденным*.

Например, энергия связи нуклонов в ядре атома углерода:

$$|E_{\text{св}}| = 931,50 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \cdot 0,095646 \text{ а.е.м.} = 89,1 \text{ МэВ}.$$

Эта энергия гораздо больше энергии, «удерживающей» электроны внутри атома. Так, энергия электрона в атоме водорода в основном состоянии равна  $E_1 = -13,6$  эВ. Это означает, что для ионизации атома водорода требуется совершить работу, равную  $A = 13,6$  эВ. Поэтому процессы плавления твердого вещества, разложения химического соединения и ионизации атома требуют значительно меньших энергетических затрат по сравнению с процессом разделения (расщепления) ядра.

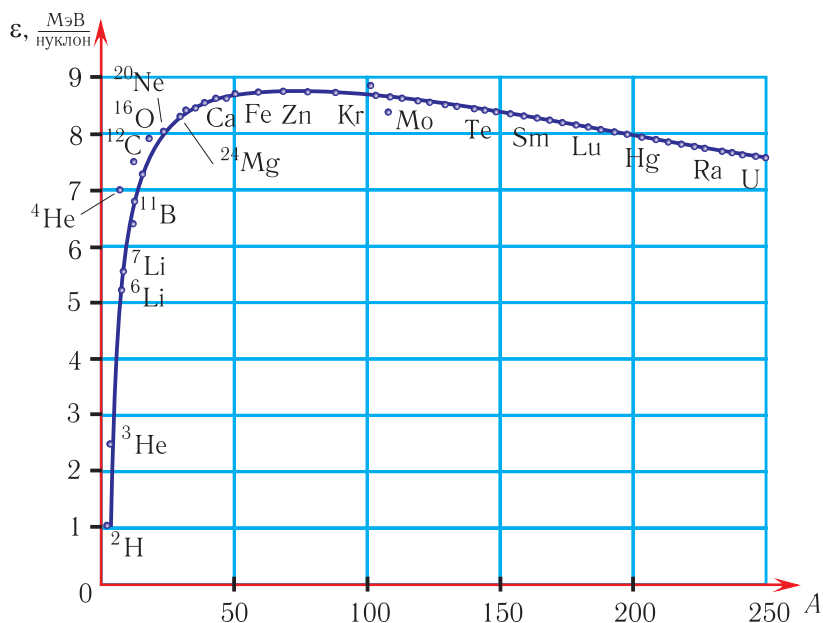


Рис. 211. Зависимость удельной энергии связи ядер от массового числа  $A$

Более важной характеристикой является не энергия связи, а **удельная энергия связи  $\varepsilon$  ядра**, т. е. *энергия связи, приходящаяся на один нуклон*. Она является характеристикой прочности (связанности) ядер и равна отношению энергии связи к массовому числу:  $\varepsilon = \frac{|E_{\text{св}}|}{A}$ .

Соответственно, чем больше значение  $\varepsilon$ , тем сильнее связан каждый нуклон в ядре со своими соседями, следовательно, тем прочнее ядро. График зависимости удельной энергии связи от массовых чисел ядер  $\varepsilon(A)$  приведен на рисунке 211. Из него видно, что кривая имеет заметный максимум, расположенный ближе к началу координат. Причем этот максимум с одной стороны крутой, а с другой — пологий. Соответственно,  $\varepsilon(A)$  быстро возрастает при малых значениях от  $\varepsilon = 1$  МэВ при  $A = 1$  до  $\varepsilon = 8,8$  МэВ при  $A = 16$ . Максимум удельной энергии связи ядра  $\varepsilon_{\text{max}} = 8,8$  МэВ достигается при  $A \approx 56$  ( ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ). Затем удельная энергия связи ядра постепенно уменьшается до значения  $\varepsilon = 7,6$  МэВ для урана. Поэтому наиболее прочны ядра со средними значениями массовых чисел  $A(12 - 60)$ .

Таким образом, при смещении ядер к центральной части графика удельная энергия связи увеличивается, следовательно, любые ядерные

реакции, приводящие к такому смещению, являются энергетически выгодными (сопровождаются выделением энергии). Из зависимости, приведенной на рисунке 211, следует, что подобное смещение возможно при реакциях синтеза (объединения) легких ядер в области изменения  $A$  примерно  $0 \rightarrow 50$  и при реакциях деления тяжелых ядер в области изменения  $A$  примерно  $250 \rightarrow 50$ . При этом реакции синтеза должны проходить с большим выделением энергии, поскольку подъем графика происходит круче, чем последующее уменьшение удельной энергии связи.

Из графика (см. рис. 211) следует, что при реакции синтеза (объединения) легких ядер и реакции деления тяжелых ядер удельная энергия связи увеличивается, т. е. такие реакции являются энергетически выгодными, так как сопровождаются выделением энергии.



1. Почему атомная масса химических элементов не выражается целым числом?
2. Что называется дефектом масс ядра? Объясните причину его возникновения.
3. Что такое энергия связи ядра? Как она определяется?
4. Что определяет удельная энергия связи ядра?
5. У каких элементов ядра обладают максимальной удельной энергией связи?
6. Какие ядерные реакции являются энергетически выгодными? Почему?
7. Почему реакции синтеза ядер являются энергетически более выгодными по сравнению с реакциями деления тяжелых ядер?

### Пример решения задачи

Определите энергию связи нуклонов в ядре бериллия  ${}^8_4\text{Be}$ .

#### Решение

Ядро бериллия состоит из  $Z = 4$  протонов и  $N = A - Z = 8 - 4 = 4$  нейтронов. Масса протона  $m_p = 938,281$  МэВ, нейтрона —  $m_n = 939,567$  МэВ.

Суммарная масса всех частиц, входящих в состав ядра:

$$E_0 = 4 \cdot 938,281 \text{ МэВ} + 4 \cdot 939,567 \text{ МэВ} = 7511,4 \text{ МэВ}.$$

Масса ядра  ${}^8_4\text{Be}$  —  $m_{\text{Be}} = 7454,7$  МэВ.

Откуда модуль энергии связи ядра бериллия:

$$E_{\text{св}} = E_0 - E_{\text{я}} = 7511,4 \text{ МэВ} - 7454,7 \text{ МэВ} = 56,7 \text{ МэВ}.$$

Эта энергия распределена между 8 нуклонами ядра бериллия.

Следовательно, на каждый нуклон приходится удельная энергия связи ядра бериллия  $\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{N} = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ , что подтверждается экспериментальными данными.

Ответ:  $E_{\text{св}} = 56,7 \text{ МэВ}$ ;  $\varepsilon = 7,1 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .

### Упражнение 23

1. Определите дефект массы ядра алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ . Масса ядра алюминия равна  $m_{\text{Al}} = 26,97431$  а.е.м., масса нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м. и масса протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м.
2. Определите массу ядра атома лития  ${}_{3}^7\text{Li}$ , если дефект массы ядра атома лития  $\Delta m = 7,030 \cdot 10^{-30}$  кг, масса протона  $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  кг, масса нейтрона  $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$  кг.
3. Определите удельную энергию связи  $\varepsilon$  ядра атома ртути  ${}_{80}^{200}\text{Hg}$ , если массы нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м., протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м., ядра ртути  $m_{\text{Hg}} = 200,028$  а.е.м.
4. Вычислите удельную энергию связи  $\varepsilon$  для ядра гелия  ${}_{2}^4\text{He}$ .
5. Определите дефект массы  $\Delta m$  изотопа азота  ${}_{7}^{14}\text{N}$ , масса ядра которого  $m_{\text{N}} = 14,00307$  а.е.м. Найдите удельную энергию связи  $\varepsilon$  ядра данного изотопа, если масса нейтрона  $m_n = 1,00866$  а.е.м. и масса протона  $m_p = 1,00728$  а.е.м.
6. Дана ядерная реакция  ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^4\text{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^1\text{p}$ . Определите энергию связи  $E_{\text{св}}$  данных ядер, если их удельные энергии связи  $\varepsilon_{\text{N}} = 7,48 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ,  $\varepsilon_{\text{He}} = 7,075 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ ,  $\varepsilon_{\text{O}} = 7,751 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ .



## § 38. Радиоактивность

- Некоторые ядра обладают способностью к самопроизвольному распаду, сопровождающемуся изменением физической структуры ядра, а следовательно, и химических свойств атома. Каковы же основные закономерности самопроизвольного распада атомов? Почему он происходит? Представляет ли он опасность для здоровья человека?

Историю ядерной физики принято отсчитывать с 1896 г. Именно в этом году французский физик Антуан Анри Беккерель обнаружил, что соли урана обладают способностью засвечивать фотопластинку, испуская самопроизвольно какое-то неизвестное излучение. Это новое явление получило название *радиоактивности* (от лат. *radio* — испускаю лучи, *action* — действенный).