

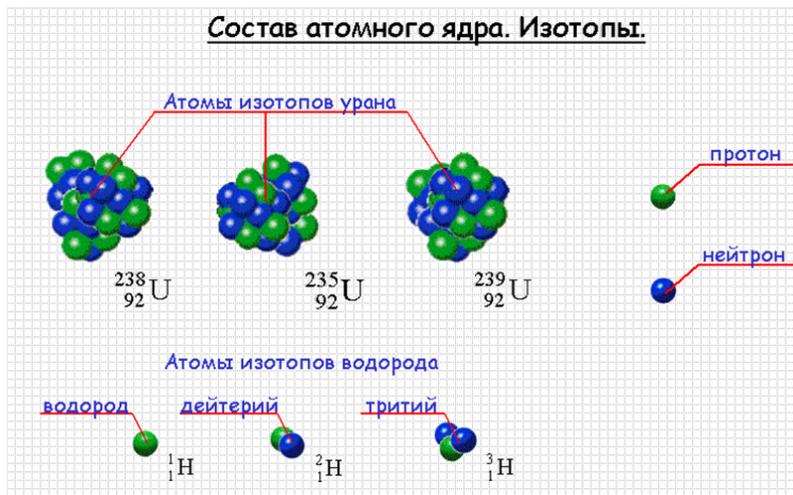
16. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

§ 16.1 Основные свойства и строение ядра

Ядром называется центральная часть атома, в которой сосредоточены практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.

Все атомные ядра состоят из элементарных частиц - **протонов** и **нейтронов**, которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы - **нуклона**.

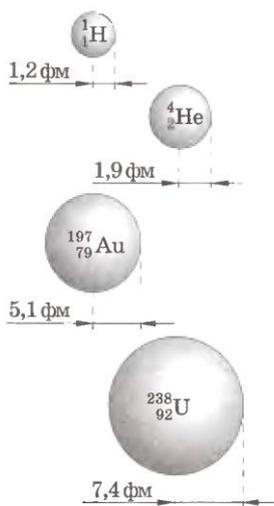
Масса протона практически равна массе нейтрона (нейтрон немного тяжелее) и главное их отличие заключается в электрическом заряде: протон имеет положительный элементарный заряд $+q_0$, равный по абсолютной величине заряду электрона, а нейтрон электрического заряда не имеет. Величина заряда ядра определяется количеством протонов в его составе. Зарядом ядра является величина Ze , где e - заряд протона, Z - порядковый номер химического элемента в периодической системе Менделеева, который равен числу протонов в ядре.



Число нуклонов в ядре $A=N+Z$ называется **массовым числом**. Нуклонам (протону и нейтрону) приписывается массовое число, равное единице, электрону - нулевое значение A .

Оказывается, ядро одного и того же химического элемента с числом протонов Z может иметь различное количество нейтронов. Такие разновидности одного и того же химического элемента называются **изотопами**. Ядра, которые при одинаковом A имеют различные Z , называются **изобарами**. Ядро химического элемента X

обозначается ${}^A_Z X$, где X - символ химического элемента.



Размер ядра характеризуется радиусом ядра, имеющим условный смысл ввиду размытости границы ядра. Эмпирическая формула для определения радиуса ядра $R = R_0 A^{1/3}$, где $R_0 = 1,3 \div 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ м}$, может быть истолкована как пропорциональность объема ядра числу нуклонов в нём. Действительно, если считать ядро сферой радиуса R , состоящей из A нуклонов - шариков радиуса R_0 , то, очевидно, $\frac{4}{3} \pi R^3 = A \cdot \frac{4}{3} \pi R_0^3$, откуда следует написанное равенство.

Плотность ядерного вещества составляет по порядку величины 10^{17} кг/м^3 и постоянна для всех ядер. Она значительно превосходит плотности самых плотных обычных веществ.

Нуклоны в атомных ядрах являются фермионами и имеют спин $\hbar/2$. Ядро атома имеет собственный момент импульса - **спин ядра**, равный

$$L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

где I - **внутреннее (полное) спиновое квантовое число**.

Число I принимает целочисленные или полу целые значения $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}$ и т.д. Ядра с четными A имеют целочисленный спин (в единицах \hbar) и подчиняются статистике Бозе - Эйнштейна. Ядра с нечетными A имеют полу целый спин (в единицах \hbar) и подчиняются статистике Ферми - Дирака.

Ядерные частицы имеют собственные магнитные моменты, которыми определяется магнитный момент ядра $P_{m\ я}$ в целом. Единицей магнитных моментов ядер служит **ядерный магнетон** $\mu_{\ я}$:

$$\mu_{\ я} = e\hbar / (2m_p), \quad (16.1)$$

где e - абсолютное значение заряда электрона, m_p — масса протона. Ядерный магнетон в $m_p/m_e = 1836,5$ раза меньше магнетона Бора, откуда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

Между спином ядра $L_{\ я}$, выраженным в \hbar , и его магнитным моментом имеется соотношение

$$P_{m\ я} = \gamma_{\ я} L_{\ я}, \quad (16.2)$$

где $\gamma_{\ я}$ — ядерное гиромагнитное отношение.

Распределение электрического заряда протонов по ядру в общем случае несимметрично. Мерой отклонения этого распределения от сферически-симметричного является квадрупольный электрический момент Q ядра. Если плотность заряда считается везде одинаковой, то Q определяется только формой ядра. Так для ядра, имеющего форму эллипсоида вращения, имеем формулу для квадрупольного момента в виде

$$Q = \frac{2}{5} Ze b^2 - a^2,$$

где b — полуось эллипсоида вдоль направления спина; a — полуось в перпендикулярном направлении. Для ядра, вытянутого вдоль направления спина, $b > a$ и $Q > 0$. Для ядра, сплюсненного в этом направлении, $b < a$ и $Q < 0$. Для сферического распределения заряда в ядре $b = a$ и $Q = 0$.

§ 16.2 Энергия связи атомного ядра

Нуклоны в ядрах находятся в состояниях, существенно отличающихся от их свободных состояний. За исключением ядра обычного водорода, во всех ядрах имеется не менее двух нуклонов, между которыми существует особое ядерное сильное взаимодействие - притяжение, обеспечивающее устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

Энергией связи нуклона в ядре называется физическая величина, равная минимальной работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра, не сообщая ему кинетической энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра должна выделяться такая же энергия, какую нужно затратить при расщеплении ядра на составляющие его нуклоны. Энергия связи ядра является разностью между энергией всех свободных нуклонов, составляющих ядро, и их энергией в ядре. При образовании ядра происходит уменьшение его массы: масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов. Уменьшение массы ядра при его образовании объясняется выделением энергии связи. Если $W_{св}$ - энергия, выделяющаяся при образовании ядра, то соответствующая ей масса

$$\Delta m = W_{св} / c^2 \quad (16.3)$$

называется **дефектом массы** и характеризует уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов.

Если ядро с массой $M_{\ я}$ образовано из Z протонов с массой m_p и из $(A-Z)$ нейтронов с массой m_n , то

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\ я} \quad (16.4)$$

Вместо массы $M_{\ я}$ ядра величину Δm можно выразить через атомную массу M_a :

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_a \quad (16.5)$$

где M_a - масса водородного атома. При практическом вычислении Δm массы всех частиц и атомов выражаются в атомных единицах массы.

Дефект массы служит мерой энергии связи ядра.

Одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии (а.е.э.).

Удельной энергией связи ядра $w_{св}$ называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$w_{св} = W_{св} / A. \quad (16.6)$$

Величина $w_{св}$ составляет в среднем 8 МэВ/нуклон.

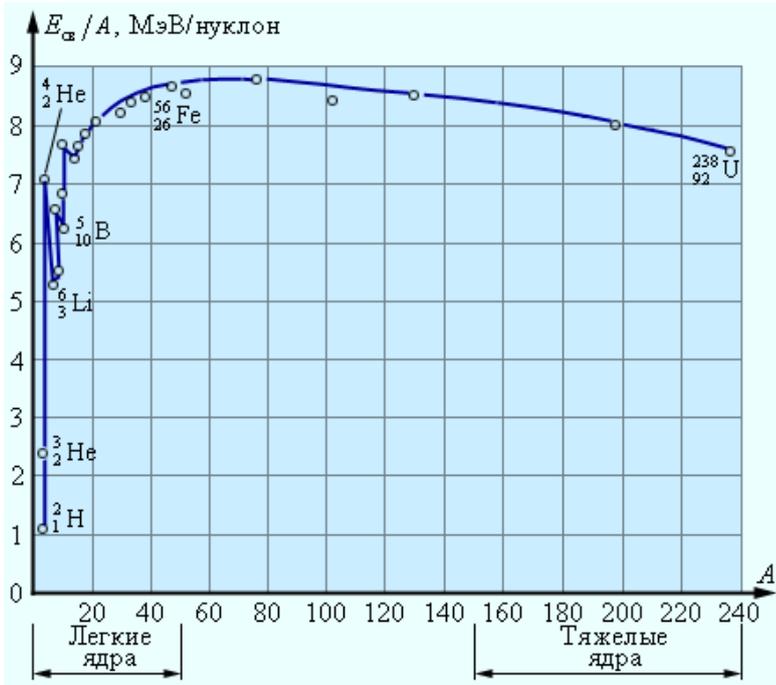


Рис. 16.3

По мере увеличения числа нуклонов в ядре удельная энергия связи убывает. Ядра атомов химических элементов, расположенных в конце периодической системы (например, ядро урана), имеют $w_{св} \approx 7,6$ МэВ/нуклон. Это объясняет возможность выделения энергии при делении тяжелых ядер. В области малых массовых чисел имеются острые «пики» удельной энергии связи. Максимумы характерны для ядер с четными числами протонов и нейтронов (^4_2He , $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$).

Минимумы характерны для ядер с нечетными количествами протонов и нейтронов (^6_3Li , $^{10}_5\text{B}$, $^{14}_7\text{N}$).

Критерием устойчивости атомных ядер является соотношение между числом протонов и нейтронов в устойчивом ядре для данных изобаров ($A = \text{const}$).

Условие минимума энергии ядра приводит к соотношению между $Z_{уст}$ и A :

$$Z_{уст} = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}} \quad (16.7)$$

Берется целое число $Z_{уст}$, ближайшее к тому, которое получается по этой формуле.

При малых и средних значениях A числа нейтронов и протонов в устойчивых ядрах примерно одинаковы.

С ростом Z силы кулоновского отталкивания протонов растут пропорционально $Z(Z-1) \sim Z^2$ (в результате парного взаимодействия протонов) и для компенсации этого отталкивания ядерным притяжением число нейтронов должно возрастать быстрее числа протонов.

§ 16.3 Ядерные силы

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются **ядерными силами**.

Ядерные силы намного превышают гравитационные, электрические и магнитные взаимодействия и не сводятся к ним. Ядерные силы относятся к классу, так называемых, **сильных взаимодействий**. Характерной особенностью этих сил, помимо их большой величины, является ограниченный радиус действия. Эти силы возникают лишь между нуклонами, практически находящимися вплотную друг к другу. Поэтому с увеличением количества нуклонов, а значит и размеров ядер, увеличивается разрушающее ядро действие сил электрического отталкивания протонов, так как эти силы не имеют ограничения по расстоянию. Следовательно, тяжелые ядра менее «прочны», чем легкие. «Прочность» ядра характеризуется его **энергией связи** — той минимальной работой, которую необходимо совершить, чтобы расщепить ядро на нуклоны, без сообщения им кинетической энергии. Энергия связи зависит не только от массового числа, но и от соотношения между количеством протонов и нейтронов.

Наибольшего значения она достигает при равенстве количеств нейтронов и протонов или при небольшом избытке нейтронов.

Основные свойства ядерных сил:

- 1) ядерные силы являются силами притяжения,
- 2) ядерные силы являются короткодействующими - их действие проявляется только на расстояниях примерно 10^{-15} м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях, меньших их радиуса действия, оказываются примерно в 100 раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии,
- 3) ядерным силам свойственна зарядовая независимость: ядерные силы, действующие между двумя протонами, или двумя нейтронами, или, наконец, между протоном и нейтроном, одинаковы по величине. Отсюда следует, что ядерные силы имеют незлектрическую природу,
- 4) ядерным силам свойственно насыщение, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре (если не учитывать легкие ядра) при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной,
- 5) ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов,
- 6) ядерные силы не являются центральными, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

§ 16.4 Модели атомного ядра

Из большого числа моделей, каждая из которых обязательно использует подобранные произвольные параметры, согласующиеся с экспериментом, рассмотрим две: капельную и оболочечную.

1. Капельная модель ядра (1936; И. Бор и Я. И. Френкель).

Капельная модель ядра является первой моделью. Она основана на аналогии между поведением нуклонов в ядре и поведением молекул в капле жидкости. Так в обоих случаях силы, действующие между составными частицами — молекулами в жидкости и нуклонами в ядре, — являются короткодействующими и им свойственно насыщение. Для капли жидкости при данных внешних условиях характерна постоянная плотность её вещества. Ядра же характеризуются практически постоянной удельной энергией связи и постоянной плотностью, не зависящей от числа нуклонов в ядре. Наконец, объём капли, так же как и объём ядра, пропорционален числу частиц. Существенное отличие ядра от капли жидкости в этой модели заключается в том, что она трактует ядро как каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости с плотностью, равной ядерной, подчиняющуюся законам квантовой механики.

Капельная модель ядра позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре, объяснила механизм ядерных реакций и особенно реакции деления ядер. Однако эта модель не смогла, например, объяснить повышенную устойчивость ядер, содержащих магические числа протонов и нейтронов.

2. Оболочечная модель ядра.

Эта модель ядра предполагает распределение нуклонов в ядре по дискретным энергетическим уровням (оболочкам), заполняемым нуклонами согласно принципу Паули, и связывает устойчивость ядер с заполнением этих уровней. Считается, что ядра с полностью заполненными оболочками являются наиболее устойчивыми. Такие особо устойчивые (магические) ядра действительно существуют.

Оболочечная модель ядра позволила объяснить спины и магнитные моменты ядер, различную устойчивость атомных ядер, а также периодичность изменений их свойств. Эта модель особенно хорошо применима для описания легких и средних ядер, а также для ядер, находящихся в основном (невозбуждённом) состоянии.

По мере дальнейшего накопления экспериментальных данных о свойствах атомных ядер появлялись все новые факты, не укладывающиеся в рамки описанных моделей. Так возникли обобщённая модель ядра (синтез капельной и оболочечной моделей), оптическая модель ядра (объясняет взаимодействие ядер с налетающими частицами) и другие модели.

§ 16.5 Радиоактивность

При больших значениях массового числа A или при значительном различии в числах протонов и нейтронов ядро становится неустойчивым. Неустойчивые ядра являются **радиоактивными**.

Под **радиоактивностью** понимается превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого химического элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц.

Различаются естественная и искусственная радиоактивности.

Естественной радиоактивностью называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.

Искусственной радиоактивностью называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

16.5.1 Виды радиоактивных излучений

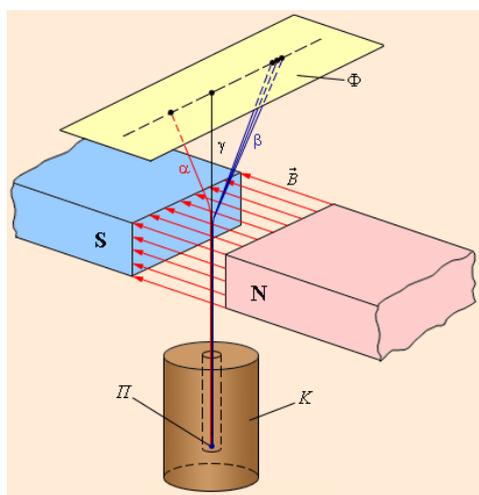


Рис. 16.4

Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β и γ -излучения. Подробное их исследование позволило выяснить природу и основные свойства:

- **α -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм).

- **β -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм), чем у α -частиц.

- **γ -излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью, но очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца

толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.

Дальнейшее исследование радиоактивных излучений позволило установить их природу. Все три вида излучений возникают в результате радиоактивных распадов атомных ядер. В связи с этим различают следующие виды распадов:

1. α -распад (альфа-распад).

α -распад состоит в испускании ядрами некоторых химических элементов **α -частицы**, которая представляет собой ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, ${}^4_2\text{He}$.

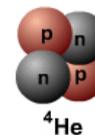


Схема этого распада выглядит следующим образом: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2\text{He}$,

где X — распадающееся ядро, а Y — ядро, образовавшееся в результате α -распада.

Альфа-распад является свойством тяжелых ядер с массовыми числами $A > 200$ и зарядами ядер $Z > 82$. Внутри таких ядер происходит образование обособленных α -частиц, состоящих из двух протонов и двух нейтронов. Этому способствует насыщение ядерных сил. Образовавшаяся α -частица подвержена большему действию кулоновских сил отталкивания от протонов ядра, чем изолированные протоны. Одновременно α -частица испытывает меньшее ядерное притяжение к нуклонам в ядре, чем отдельные нуклоны.

2. β -распад (бета-распад).

Первоначально β -распадом назывался процесс испускания неустойчивым ядром β - *частицы*, которая, как оказалось при дальнейших исследованиях, является электроном. Такой вид распада называется β^- - *распадом* (*бета минус распадом*).

Одновременно с электроном e^- из ядра вылетает также и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Электронов в ядре нет. Они образуются в результате превращения одного из нейтронов ядра в протон, электрон и электронное антинейтрино:



Здесь 1_0n и 1_1p — символические обозначения нейтрона и протона; ${}^0_{-1}e$ и ${}^0_0\bar{\nu}_e$ обозначения электрона и электронного антинейтрино.

Схема β^- - распада ядра естественного элемента имеет следующий вид:



Позже выяснилось, что существуют такие неустойчивые ядра, получаемые искусственным путём, которые распадаются с испусканием *позитрона*. Позитрон является *античастицей* электрона. Он обладает всеми свойствами электрона, но имеет положительный элементарный заряд. Такой распад называют *позитронным распадом* или β^+ -*распадом* (*бета плюс распадом*).

Позитронов в ядре нет, они образуются в результате превращения одного из протонов ядра в нейтрон, позитрон и электронное нейтрино:



Здесь 1_1p и 1_0n — символические обозначения протона и нейтрона; ${}^0_{+1}e$ и ${}^0_0\nu_e$ — обозначения позитрона и электронного нейтрино.

Наблюдения показывают, что существует ещё и третий вид β -распада, который называется *K-захватом* (или электронным захватом).

K-захват представляет собой захват одним из протонов ядра собственного электрона из ближайшей к ядру электронной K – оболочки с превращением протона ядра в нейтрон и вылетом из ядра электронного нейтрино:



Особенностью K-захвата является вылет из ядра только одной частицы - электронного нейтрино ${}^0_0\nu_e$. Примером K-захвата является превращение радиоактивного ядра бериллия 7_4Be в устойчивое ядро лития 7_3Li . Электронный захват в отличие от двух других β -распадов сопровождается характеристическим рентгеновским излучением, принадлежащим K-линии соответствующего элемента.

Антинейтрино является античастицей для нейтрино, элементарной частицы, не имеющей электрического заряда и обладающей практически нулевой массой. Электрон и нейтрино не «состоят» из нуклонов, поэтому массовые числа для них указаны равными нулю.

Зарядовое число электрона обозначает не количество протонов в нем, а величину и знак его электрического заряда в единицах элементарного заряда. С помощью этих обозначений легко проверить правильность записи схемы радиоактивных распадов: *сумма массовых чисел в конце распада должна быть равна их сумме до распада. Это же относится и к зарядовым числам.*

β^- - *распад* происходит у естественно-радиоактивных, а также искусственно-радиоактивных ядер; β^+ -*распад* характерен только для явления искусственной радиоактивности — возникновения собственных радиоактивных излучений ядер под действием α -частиц, нейтронов и других частиц. При этом нарушается условие устойчивости атомного ядра. Например, искусственно-радиоактивный изотоп углерода ${}^{11}_6C$ возникает из стабильного ядра азота под действием нейтронов с выделением протонов:



и, испытывая бета-распад, вновь превращается в устойчивый изотоп ${}^{14}_7\text{N}$:



где 0_1e — позитрон; ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ — электронное нейтрино.

Все виды β -распадов является примером так называемого **слабого взаимодействия**.

3. γ - излучение (гамма – излучение).

γ - излучение не является самостоятельным видом радиоактивного распада, а лишь сопровождает α - и β - распады.

γ - излучение испускается образовавшимся в результате радиоактивного распада дочерним (а не материнским) ядром, при переходе его из возбуждённого в основное энергетическое состояние. Дочернее ядро в момент своего образования, оказываясь возбужденным, за время примерно 10^{-13} - 10^{-14} с, значительно меньшее времени жизни возбужденного атома (примерно 10^{-8} с), переходит в основное состояние с испусканием γ -излучения. Возвращаясь в основное состояние, возбужденное ядро может пройти через ряд промежуточных состояний, поэтому γ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп γ -квантов, отличающихся одна от другой своей энергией. Этот процесс аналогичен испусканию фотона возбужденными атомами. Ядро при этом теряет часть энергии.

При радиоактивных распадах различных ядер γ -кванты имеют энергии от 10 кэВ до 5 МэВ. Энергетический спектр вылетающих γ - квантов является линейчатым. Дискретность γ -спектра имеет принципиальное значение, так как является доказательством дискретности энергетических состояний атомных ядер.

Поскольку гамма-квант не имеет заряда, то при γ -излучении массовое число A и зарядовое число Z ядра не изменяются.

γ -излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м, вследствие этого волновые свойства проявляются весьма слабо, зато ярко выражены корпускулярные свойства, то есть γ -излучение ведёт себя как поток частиц — **γ -квантов (фотонов)**.

Ядро, находящееся в возбужденном состоянии, может перейти в основное состояние не только при испускании γ -кванта, но и при непосредственной передаче энергии возбуждения (без предварительного испускания γ -кванта) одному из электронов того же атома. При этом испускается так называемый электрон конверсии. Само явление называется — **внутренней конверсией**. Внутренняя конверсия — процесс, конкурирующий с γ -излучением.

Таблица 16.1

Основные свойства радиоактивных распадов

Тип радиоактивности	Изменение заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
α -распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
β -распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона (0_0n) и протона (1_0p)
β_- -распад	$Z + 1$	A	${}^0_0n \rightarrow {}^1_0p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
β_+ -распад	$Z - 1$	A	${}^1_0p \rightarrow {}^0_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$
Электронный захват (e^- -или К-захват)	$Z - 1$	A	${}^1_0p \rightarrow {}^0_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$ ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное нейтрино и антинейтрино
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющих приблизительно равные массы и заряды

16.5.2 Взаимодействие γ -излучения с веществом

Воздействие γ -излучения (а также других видов ионизирующего излучения) на вещество характеризуют *дозой ионизирующего излучения*. Различаются:

- **поглощенная доза излучения** — физическая величина, равная отношению энергии излучения к массе облучаемого вещества.

Единица поглощённой дозы излучения — **грей (Гр)**: $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ — доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж.

- **экспозиционная доза излучения** — физическая величина, равная отношению суммы электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных электронами, освобожденными в облучённом воздухе (при условии полного использования ионизирующей способности электронов), к массе этого воздуха.

Единица экспозиционной дозы излучения — кулон на килограмм (Кл/кг), внесистемной единицей является рентген (Р): $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

- **биологическая доза** — величина, определяющая воздействие излучения на организм. Единица биологической дозы — биологический эквивалент рентгена (бэр): **1 бэр** — доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновского или γ -излучения в 1 Р ($1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$).

Мощность дозы излучения — величина, равная отношению дозы излучения ко времени облучения.

Различают: 1) мощность поглощённой дозы (единица — грей на секунду (Гр/с));

2) мощность экспозиционной дозы (единица — ампер на килограмм (А/кг)).

16.5.3 Основные законы радиоактивного распада

Распад радиоактивных ядер — случайное явление. Невозможно точно предсказать момент распада данного ядра, однако можно говорить о *среднем времени жизни радиоактивных ядер*. Это промежуток времени, в течение которого распадается приблизительно 63,2% радиоактивных ядер (точнее, количество ядер уменьшается в e раз, где $e = 2,71828...$ — основание натуральных логарифмов).

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется *законам радиоактивного распада*:

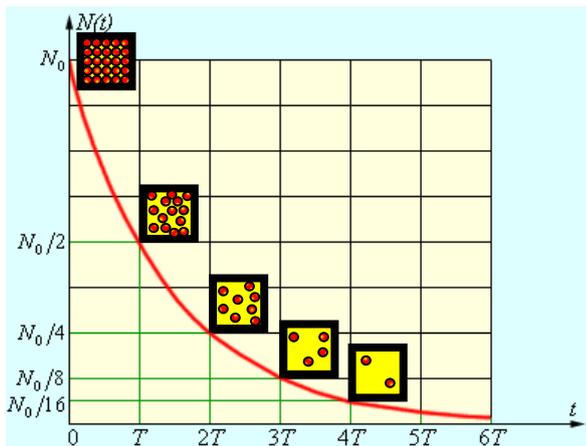


Рис. 16.5

$$\left\{ \begin{array}{l} N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = N_0 2^{-\frac{t}{T_1/2}} \\ m = m_0 e^{-\lambda t} = m_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = m_0 2^{-\frac{t}{T_1/2}} \\ A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = A_0 2^{-\frac{t}{T_1/2}} \end{array} \right. \quad (16.14)$$

где N_0 и N — начальное количество радиоактивных ядер и их количество в произвольный момент времени t ,

m_0 и m — начальная масса радиоактивного вещества и его масса в произвольный момент времени t ,

A_0 и A — начальная активность радиоактивного вещества и его активность в произвольный момент времени t ,

A — **активность радиоактивного вещества** — это число радиоактивных распадов за одну секунду, $A = \text{Бк}$, Беккерель.

1 Бк - это один распад в секунду, **100 Бк** - это сто распадов в секунду и т.п.

Интенсивность воздействия радиоактивных излучений на человека определяется активностью радиоактивного вещества.

λ - *постоянная радиоактивного распада*, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 с и равная доле ядер, распадающихся в единицу времени, $\lambda = \frac{1}{\tau}$,

τ - среднее время жизни радиоактивного ядра, $\tau = \frac{1}{\lambda}$,

$T_{\frac{1}{2}}$ - *период полураспада* (это время, за которое распадается половина имеющихся радиоактивных ядер), $\left[T_{\frac{1}{2}} \right] = \tau$.

Причём:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{1}{\tau}; \quad A = \lambda N = \frac{N}{\tau}.$$

Закон самопроизвольного радиоактивного распада основывается на двух предположениях:

- 1) постоянная радиоактивного распада λ не зависит от внешних условий,
- 2) число ядер, распадающихся за время dt , пропорционально числу радиоактивных ядер.

Эти предположения означают, что радиоактивный распад — статистический процесс, а распад данного ядра — случайное событие, имеющее определенную вероятность.

Поскольку количество радиоактивных ядер убывает с течением времени по закону радиоактивного распада (16.14), активность определенного количества вещества с течением времени снижается. Из формулы (16.14) следует, что одинаковую активность может иметь большое количество долгоживущих ядер или малое количество короткоживущих.

Наибольшую опасность для здоровья человека представляет сильное загрязнение окружающей среды радиоактивными изотопами с большим значением среднего времени жизни, поскольку их активность убывает медленнее, чем активность короткоживущих изотопов.

Радиоактивный распад ядер является естественной (природной) ядерной реакцией. В настоящее время имеются установки, с помощью которых можно исследовать искусственные ядерные реакции, заставляя ядра взаимодействовать с другими ядрами и элементарными частицами. Как и в обычных химических реакциях, одни ядерные реакции сопровождаются выделением энергии (*экзотермические реакции*), другие протекают с поглощением энергии (*эндотермические реакции*). В отличие от химических реакций, где энергия реакции составляла величину порядка единиц или десятков электрон-вольт, энергия ядерных реакций в миллионы раз больше. Величину энергии реакции Q можно определить с помощью соотношения между энергией и массой, установленного в теории относительности:

$$Q = \Delta mc^2 \quad (16.15)$$

где Δm — разность между массами покоя исходных частиц (ядер), вступающих в реакцию, и массами покоя продуктов реакции. Если $Q > 0$, реакция протекает с выделением энергии Q . Если $Q < 0$, то для протекания реакции требуется затратить энергию, равную $|Q|$ (например, использовать часть кинетической энергии частиц, вступающих в реакцию). С помощью соотношения (16.15) можно вычислить и энергию связи ядер, рассматривая энергию связи определенного ядра как величину энергии реакции расщепления этого ядра на свободные неподвижные нуклоны. Чтобы получить энергию реакции с точностью 0,1 МэВ, разность масс Δm в формуле (16.15) необходимо вычислять с точностью не менее одной тысячной доли массы нуклона. Массы ядер принято выражать, используя внесистемную единицу — **атомную единицу массы** (а.е.м.). Одна а.е.м. равна одной двенадцатой части массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605710 \cdot 10^{-27} \text{ кг.} \quad (16.16)$$

Удобной для практических расчетов является величина **энергии**, соответствующей массе покоя, равной 1 а.е.м.:

$$E_{\text{а.е.м.}} = 1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ} \quad (16.17)$$

В справочниках приводятся массы нейтральных атомов, а не их ядер. Для получения массы ядра необходимо из массы нейтрального атома вычесть суммарную массу всех его электронов (в нейтральном атоме находятся Z электронов, где Z — зарядовое число ядра).

Большая величина энергии ядерных реакций стимулировала развитие исследований, посвященных использованию ядерной энергии в практических целях. Сейчас в этих целях используется два типа ядерных реакций:

- реакции деления тяжелых ядер,
- реакции объединения легких ядер (реакции синтеза).

Некоторые тяжелые ядра, например ядро изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, становятся неустойчивыми при добавлении в их состав одного нейтрона. Неустойчивое тяжелое ядро распадается («делится») на два более легких «осколка» и несколько нейтронов. Поскольку энергия связи, приходящаяся на один нуклон тяжелого ядра, меньше аналогичной величины для более легких ядер, в такой реакции происходит выделение энергии. Так, при делении одного ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$ энергия реакции в среднем равна 200 МэВ. Нейтроны, образующиеся в этой реакции, захватываются другими ядрами, и реакция может стать **цепной**, т.е. прогрессивно развивающейся. Скорость протекания цепной реакции регулируется с помощью поглощения части нейтронов, возникающих при делении ядер. Такие управляемые реакции происходят в реакторах деления, например, на атомных электростанциях и атомных кораблях. Примером неуправляемой реакции деления может служить взрыв «атомной» бомбы.

Синтез ядер (термоядерный синтез)— это реакция слияния двух легких ядер в одно ядро. Если в результате синтеза образуется ядро с большой энергией связи, реакция происходит с выделением значительного количества энергии. В настоящее время еще не удается управлять скоростью протекания таких реакций. Они протекают практически мгновенно и приводят к взрыву («водородная» бомба).

§ 16.6 Ядерные реакции

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер, вызванные взаимодействием их друг с другом или с элементарными частицами.

Как правило, в ядерных реакциях участвуют два ядра и две частицы. Одна пара ядро - частица является исходной, другая пара - конечной.

Символическая запись ядерной реакции: $A + a = B + b$, (16.18)

где A и B - исходное и конечное ядра, a и b - исходная и конечная частицы в реакции.

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1) по роду участвующих в них частиц:

- реакции под действием нейтронов,
- реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц),
- реакции под действием γ -квантов,

2) по энергии вызывающих их частиц:

- реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов,
- реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы),
- реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения,

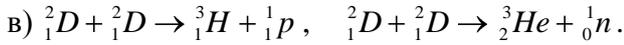
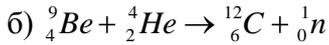
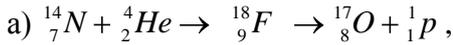
3) по роду участвующих в них ядер:

- реакции на легких ядрах ($A < 50$),
- реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$),
- реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$),

4) по характеру происходящих ядерных превращений:

- реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц,
- реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая одни или несколько γ -квантов).

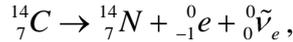
Примеры ядерных реакций под действием α -частиц и дейтронов 2_1D :



Под действием нейтронов 1_0n образуются искусственно-радиоактивные изотопы, например радиоуглерод ${}^{14}_6C$ с периодом полураспада свыше 5000 лет:



Последующий распад:



где ${}^0_{-1}e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ — обозначения электрона и электронного антинейтрино. Большой период полураспада ${}^{14}_7C$ лежит в основе радиоуглеродного метода датировки в археологии.

16.6.1 Реакция деления ядер

Реакция деления ядра, заключается в том, что тяжелое ядро под действием нейтронов, а как впоследствии оказалось и других частиц делится на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе.

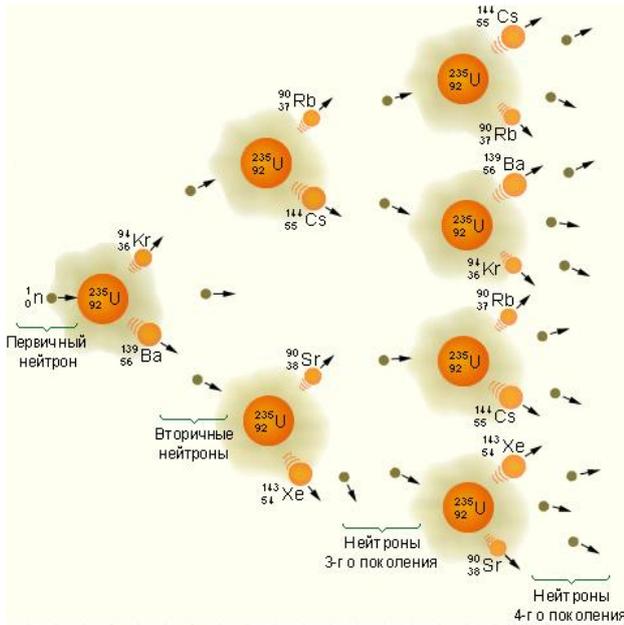


Рис. 16.6

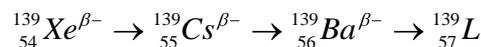
Замечательной особенностью деления ядер является то, что оно сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов, называемых нейтронами деления. Так как для средних ядер число нейтронов примерно равно числу протонов ($N/Z \approx 1$), а для тяжелых ядер число нейтронов значительно превышает число протонов ($N/Z \approx 1.6$), то образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они и выделяют нейтроны деления. Однако испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку ядер-осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными.

Они могут претерпеть ряд β^- -превращений, сопровождаемых испусканием γ -квантов. Так как β^- -распад сопровождается превращением нейтрона в протон, то после цепочки β^- -превращений соотношение между

нейтронами и протонами в осколке достигнет величины, соответствующей стабильному изотопу. Например, при делении ядра урана ${}^{235}_{92}U$:



осколок деления ${}^{139}_{54}Xe$ в результате трех актов β^- -распада превращается в стабильный изотоп лантана ${}^{139}_{57}La$:



Осколки деления могут быть разнообразными, поэтому реакция (16.20) не единственная приводящая к делению ${}^{235}_{92}U$.

Возможна, например, такая:



В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 испущенных нейтронов. Они имеют сравнительно широкий энергетический спектр в пределах от 0 до 7 МэВ, причем на один нейтрон в среднем приходится энергия около 2 МэВ.

Расчеты показывают, что деление ядер должно сопровождаться также выделением большого количества энергии. В самом деле, удельная энергия связи для ядер средней массы составляет примерно 8,7 МэВ, в то время как для тяжелых ядер она равна 7,6 МэВ. Следовательно, при делении тяжелого ядра на два осколка должна освобождаться энергия, равная примерно 1,1 МэВ на один нуклон.

Эксперименты подтверждают, что при каждом акте деления действительно выделяется огромная энергия, которая распределяется между осколками (основная доля), нейтронами деления, а также между продуктами последующего распада осколков деления.

Вероятность деления ядер определяется энергией нейтронов. Например, если высокоэнергетичные нейтроны вызывают деление практически всех ядер, то нейтроны с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт — только тяжелых ядер ($A > 210$). Нейтроны, обладающие энергией активации (минимальной энергией, необходимой для осуществления реакции деления ядра) порядка 1 МэВ, вызывают деление ядер урана $^{238}_{92}\text{U}$, тория $^{232}_{90}\text{Th}$, протактиния $^{231}_{91}\text{Pa}$ и плутония $^{234}_{94}\text{Pu}$. Тепловыми нейтронами делятся ядра $^{235}_{92}\text{U}$, $^{234}_{94}\text{Pu}$, $^{232}_{92}\text{U}$, $^{230}_{90}\text{Th}$ (два последних изотопа в природе не встречаются, они получают искусственным путем).

16.6.2 Цепная реакция деления ядер

Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление цепной реакции деления — ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции.

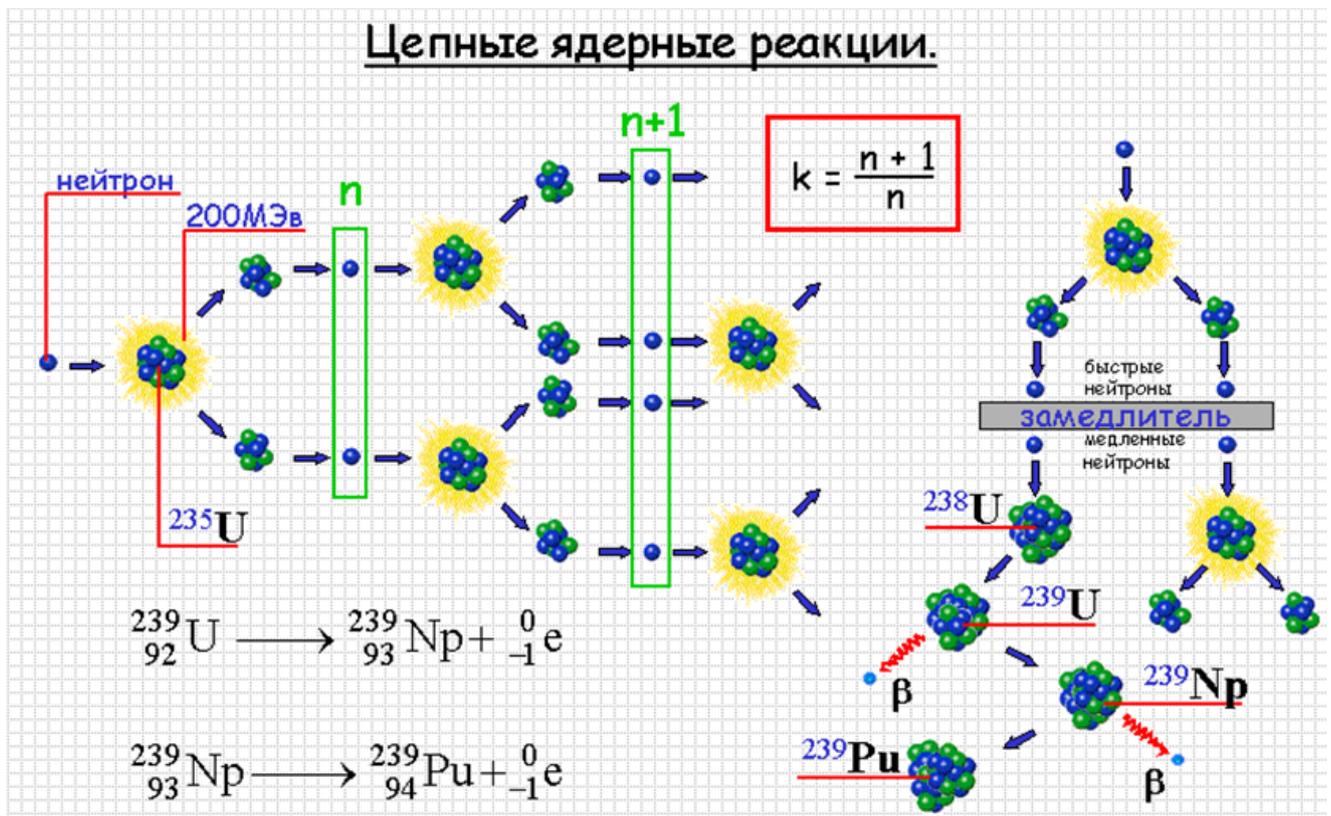


Рис. 16.7

Цепная реакция деления характеризуется коэффициентом размножения нейтронов k , который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. Необходимым условием для развития цепной реакции деления является требование $k > 1$.

Оказывается, что не все образующиеся вторичные нейтроны вызывают последующее деление ядер, что приводит к уменьшению коэффициента размножения. Во-первых, из-за конечных размеров активной зоны (пространство, где происходит цепная реакция) и большой проникающей способности нейтронов часть из них покинет активную зону раньше, чем будет захвачена каким-либо ядром. Во-вторых, часть нейтронов захватывается ядрами неделящихся примесей, всегда присутствующих в активной зоне. Кроме того, наряду с делением могут иметь место конкурирующие процессы радиационного захвата и неупругого рассеяния.

Коэффициент размножения зависит от природы делящегося вещества, а для данного изотопа — от его количества, а также размеров и формы активной зоны.

Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции, называются критическими размерами.

Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции, называется критической массой.

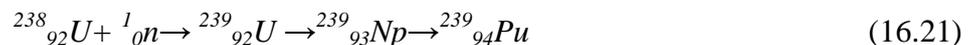
Скорость развития цепных реакций различна. Пусть T — среднее время жизни одного поколения, а N — число нейтронов в данном поколении. В следующем поколении их число равно kN , т. е. прирост числа нейтронов за одно поколение $dN = kN - N = N(k - 1)$. Прирост же числа нейтронов за единицу времени, т. е. скорость нарастания цепной реакции

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T}$$

где N_0 — число нейтронов в начальный момент времени, а N — их число в момент времени t . N определяется знаком $(k - 1)$. При $k > 1$ идет развивающаяся реакция, число делений непрерывно растет и реакция может стать взрывной. При $k = 1$ идет самоподдерживающаяся реакция, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется. При $k < 1$ идет затухающая реакция.

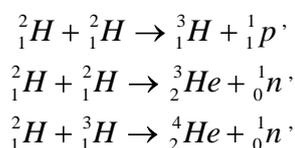
Цепные реакции делятся на управляемые и неуправляемые. Взрыв атомной бомбы, например, является неуправляемой реакцией. Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней $^{235}_{92}\text{U}$ или $^{234}_{94}\text{Pu}$ делятся на две удаленные друг от друга части с массами ниже критических. Затем с помощью обычного взрыва эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция, сопровождающаяся мгновенным выделением огромного количества энергии и большими разрушениями. Взрывная реакция начинается за счет имеющихся нейтронов спонтанного деления или нейтронов космического излучения. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах.

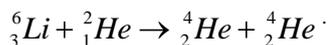
В природе имеется три изотопа, которые могут служить ядерным топливом ($^{235}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 0,7%) или сырьем для его получения ($^{232}_{90}\text{Th}$ и $^{238}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 99,3%). $^{232}_{90}\text{Th}$ служит исходным продуктом для получения искусственного ядерного топлива $^{233}_{92}\text{U}$, а $^{238}_{92}\text{U}$, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных β^- -распадов — для превращения в ядро $^{239}_{94}\text{Pu}$:



16.6.3 Реакция синтеза атомных ядер

Источником огромной энергии может служить реакция синтеза атомных ядер - образование из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи ядер резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия ^2_1H и трития ^3_1H) к литию ^6_3Li и особенно к гелию ^4_2He , т. е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые сопровождаются выделением большого количества энергии. В качестве примеров рассмотрим следующие реакции синтеза:





Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше, чем в реакциях деления тяжелых ядер.

Реакции синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах (примерно 10^7 К и выше), называются **термоядерными реакциями**.

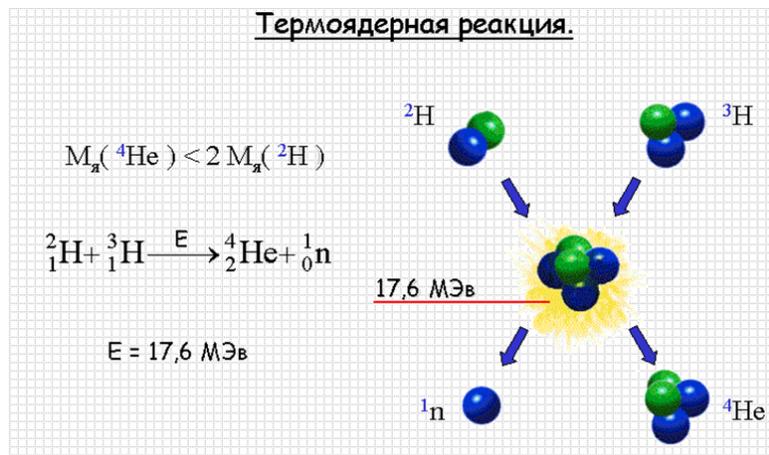
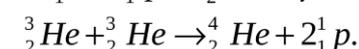
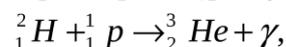
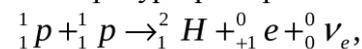


Рис. 16.8

Термоядерные реакции являются, по-видимому, одним из источников энергии Солнца и звезд. В принципе высказаны два предположения о возможных способах протекания термоядерных реакций на Солнце:

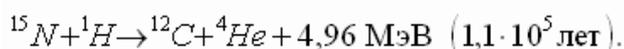
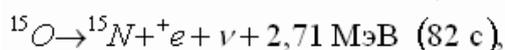
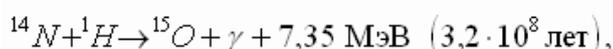
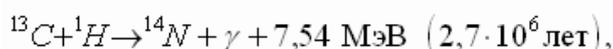
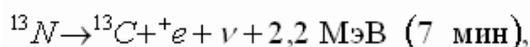
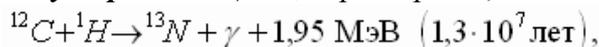
1) **протонно-протонный** или **водородный цикл**, характерный для температур примерно 10^7 К:



В результате этого цикла четыре протона превращаются в ядро гелия и

выделяется энергия, равная 17,6 МэВ.

2) **углеродно-азотный** или **углеродный цикл**, характерный, для более высоких температур.



Ядра же углерода, число которых остается неизменным, участвуют в реакции в роли катализатора.

Вопросы для самопроверки

1. Основные свойства и строение атомного ядра.
2. Энергия связи атомного ядра. Ядерные силы
3. Явление радиоактивности. Виды радиоактивности атомных ядер, их природа и свойства.
4. Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений и частиц
5. Ядерные реакции: реакция деления и реакция синтеза атомных ядер.

§ 16.7 Примеры решения задач

Пример 16.1 Описать состав ядра изотопа алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$

Решение:

Следуя правилам обозначения состава ядер, находим, что массовое число ядра $A = 27$, следовательно, в составе ядра данного изотопа находится 27 нуклонов. Так как зарядовое число $Z = 13$, то из общего числа нуклонов 13 являются протонами. Количество нейтронов N в ядре равно разности между полным числом нуклонов и количеством протонов: $N = A - Z = 27 - 13 = 14$. Ядро содержит 14 нейтронов.

Ответ: $P=13$, $N=14$

Пример 16.2 Определить удельную энергию связи ядра ${}^7_3\text{Li}$.

Решение:

Удельная энергия связи есть энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон:

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A},$$

или

$$E_{\text{уд}} = \left[Zm_H + A - Z m_n - m_a \right] \frac{c^2}{A}$$

Подставим в эту формулу значения величин и произведем вычисления:

$$E_{\text{уд}} = \left[3 \cdot 1,00783 + 7 - 3 \cdot 1,00867 - 7,01601 \right] \frac{931,4}{7} = 5,61 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}.$$

Ответ: $E_{\text{уд}} = 5,61 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

Пример 16.3 Ядро нептуния ${}^{234}_{93}\text{Np}$ захватило электрон из *K*-оболочки атома (*K*-захват) и испустило α -частицу. Ядро какого элемента получилось в результате этих превращений?

Решение:

При *K*-захвате из ближайшей к ядру электронной оболочки (*K*-оболочки) атома электрон захватывается одним из протонов ядра. В результате этого протон в ядре превращается в нейтрон. Общее число нуклонов в ядре не изменяется, а зарядовое число уменьшается на единицу. Поэтому промежуточное ядро будет иметь зарядовое число $93 - 1 = 92$, а массовое число останется прежним - 234. По таблице Д. И. Менделеева определяем, что промежуточным ядром является изотоп урана ${}^{234}_{92}\text{U}$.

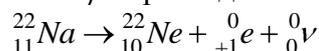
Промежуточное ядро испустило α -частицу. Так как α -частица (ядро атома изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$) содержит два протона и два нейтрона, то промежуточное ядро при акте испускания α -частицы уменьшит зарядовое число на две единицы и массовое число на четыре единицы. Таким образом, конечное ядро будет иметь $Z = 90$ и $A = 230$, что соответствует изотопу тория ${}^{230}_{90}\text{Th}$.

Ответ: ${}^{230}_{90}\text{Th}$

Пример 16.4 Написать реакцию радиоактивного распада, в результате которого ядро изотопа натрия ${}^{22}_{11}\text{Na}$ превращается в ядро изотопа неона ${}^{22}_{10}\text{Ne}$.

Решение:

В результате этого распада возникает ядро с тем же массовым числом, которое было у исходного ядра ($A = 22$), следовательно, среди других продуктов реакции не должно быть частиц, содержащих нуклоны. (Это вытекает из закона сохранения числа нуклонов.) Такому требованию удовлетворяют реакции β -распада. Зарядовое число ядра-продукта реакции 23 на единицу меньше зарядового числа исходного ядра 22. Следовательно, для сохранения полного электрического заряда среди других продуктов реакции должна быть частица, имеющая один положительный элементарный заряд. Такой частицей при β -распаде является позитрон, и распад носит название позитронного или β^+ -распада. Запишем его схему:



Ответ: ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu$

Пример 16.5 При определении периода полураспада $T_{1/2}$ короткоживущего радиоактивного изотопа использован счетчик импульсов. За время $\Delta t = 1$ мин в начале наблюдения ($t = 0$) было насчитано $\Delta n_1 = 250$ импульсов, а по истечении времени $t = 1$ ч - $\Delta n_2 = 92$ импульса. Определить постоянную радиоактивного распада λ и период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

Решение:

Число импульсов Δn , регистрируемых счетчиком за время Δt , пропорционально числу распавшихся атомов ΔN .

Таким образом, при первом измерении

$$\Delta n_1 = k \Delta N_1 = k N_1 (1 - e^{-\lambda \Delta t}), \quad (1)$$

где N_1 - количество радиоактивных атомов к моменту начала отсчета; k - коэффициент пропорциональности (постоянный для данного прибора и данного расположения прибора относительно радиоактивного изотопа).

При повторном измерении (предполагается, что расположение приборов осталось прежним)

$$\Delta n_2 = k \Delta N_2 = k N_2 (1 - e^{-\lambda \Delta t}), \quad (2)$$

где N_2 - количество радиоактивных атомов к моменту начала второго измерения.

Разделив соотношение (1) на выражение (2) и приняв во внимание, что по условию задачи Δt одинаково в обоих случаях, а также что N_1 и N_2 связаны между собой соотношением

$$N_2 = N_1 e^{-\lambda t}, \text{ получим}$$

$$\Delta n_1 / \Delta n_2 = e^{\lambda t} \quad (3)$$

где t — время, прошедшее от первого до второго измерения. Для вычисления λ выражение (3) следует прологарифмировать: $\ln(\Delta n_1 / \Delta n_2) = \lambda t$, откуда

$$\lambda = (1/t) \cdot \ln(\Delta n_1 / \Delta n_2).$$

Подставив числовые данные, получим постоянную радиоактивного распада, а затем и период полураспада:

$$\lambda = 1/1 \cdot \ln 250/92 \text{ ч}^{-1} = 1 \text{ ч}^{-1};$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693/1 = 0,693 \text{ ч} = 41,5 \text{ мин}.$$

Ответ: $\lambda = 1 \text{ ч}^{-1}$, $T_{1/2} = 41,5 \text{ мин}$.

Пример 16.6 Определить энергию E , которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра ${}_{11}^{23}\text{Na}$.

Решение:

После отрыва нейтрона число нуклонов A в ядре уменьшится на единицу, а число протонов Z останется неизменным, получится ядро ${}_{11}^{22}\text{Na}$. Ядро ${}_{11}^{23}\text{Na}$ можно рассматривать как устойчивую систему, образовавшуюся в результате захвата свободного нейтрона ядром ${}_{11}^{22}\text{Na}$. Энергия отрыва нейтрона от ядра ${}_{11}^{23}\text{Na}$ равна энергии связи нейтрона с ядром ${}_{11}^{22}\text{Na}$ ($E = E_{св}$).

Выразив энергию связи нейтрона через дефект массы системы, получим

$$E = E_{св} = c^2 \Delta m = c^2 (m_{22\text{Na}} + m_n - M_{23\text{Na}}).$$

При подстановке числовых значений заменяем массы ядер массами нейтральных атомов. Так как число электронов в оболочках атомов ${}_{11}^{23}\text{Na}$ и ${}_{11}^{22}\text{Na}$ одинаково, то разность масс атомов ${}_{11}^{23}\text{Na}$ и ${}_{11}^{22}\text{Na}$ от такой замены не изменится:

$$E = 931,4 \frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}} \cdot 0,01334 \text{ а. е. м.} = 12,42 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $E = 12,42 \text{ МэВ}$.

Пример 16.7 Определить энергию связи ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$. Выразить ответ в единицах МэВ.

Решение:

Определяем энергию связи ядра как минимальную энергию Q , которую необходимо затратить для протекания реакции расщепления этого ядра на свободные нуклоны ${}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n} + {}^1_0\text{n}$. Пользуясь формулой (16.15), находим

$$Q = \Delta mc^2 = (2m_{\text{H}} + 2m_{\text{n}}) - m_{\text{He}},$$

где m_{H} - масса ядра изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$ (протона), m_{n} - масса нейтрона, а m_{He} - масса ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$.

Для нахождения масс ядер необходимо из массы нейтральных атомов (которые приводятся в справочниках) вычесть массу всех электронов атома. Обозначим массу атома гелия m_{He}^a , массу атома водорода m_{H}^a и массу электрона m_e . Тогда

$$Q = [2(m_{\text{H}}^a - m_e) + 2m_{\text{n}} - (m_{\text{He}}^a - 2m_e)]c^2.$$

После выполнения действий в круглых скобках массы электронов исчезают, и мы получаем расчетную формулу, в которой энергия Q выражена через массы нейтральных атомов:

$$Q = (2m_{\text{H}}^a + 2m_{\text{n}} - m_{\text{He}}^a)c^2$$

Если в эту формулу подставлять все величины в системе СИ, ответ будет выражен в джоулях. Чтобы получить ответ в единицах МэВ, не выполняя перевода масс из единиц а.е.м. в систему СИ, воспользуемся соотношением (16.17). Тогда расчетная формула принимает окончательный вид:

$$Q = (2m_{\text{H}}^a + 2m_{\text{n}} - m_{\text{He}}^a)E_{\text{а.е.м.}}$$

Представляем значение физических величин:

$$Q = (2 \cdot 1.00783 + 2 \cdot 1.00866) \cdot 931.5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx 15.2 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $Q = 15.2 \text{ МэВ}$

Пример 16.8 Вычислить дефект массы Δm и энергию связи $E_{\text{св}}$ ядра ${}^{11}_5\text{B}$.

Решение:

Дефект массы ядра определим по формуле

$$\Delta m = Zm_{{}^1_1\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}}, \quad (1)$$

Вычисление дефекта массы выполним во внесистемных единицах (а. е. м.). Для ядра ${}^{11}_5\text{B}$: $Z=5$, $A=11$. Массы нейтральных атомов водорода (${}^1_1\text{H}$) и бора (${}^{11}_5\text{B}$), а также нейтрона (n) найдем из таблицы 16.2.

Подставим найденные массы в выражение (1) и произведем вычисления:

$$\Delta m = [5 \cdot 1,00783 + 11 - 5 \cdot 1,00867 - 11,00931] \text{ а. е. м. или } \Delta m = 0,08186 \text{ а. е. м.}$$

Энергия связи ядра определяется соотношением

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2. \quad (2)$$

Энергию связи ядра также найдем во внесистемных единицах (МэВ).

Для этого дефект массы подставим в выражение (2) в а.е.м., а коэффициент пропорциональности (c^2) — в МэВ/ (а. е. м.), т. е.

$$E_{\text{св}} = 931 \cdot 4 \cdot 0,08186 \text{ МэВ} = 76,24 \text{ МэВ},$$

и округлим полученный результат до трех значащих цифр: $E_{\text{св}} = 76,24 \text{ МэВ}$.

Ответ: $E_{\text{св}} = 76,24 \text{ МэВ}$.

Пример 16.9 Определить массу кремния m_2 , который возникает за время $t = 40$ с при β^- -распаде ядра изотопа алюминия ${}_{13}^{29}\text{Al}$, если первоначальная масса m_1 алюминия равнялась 1,5 г. Период полураспада данного изотопа алюминия $T = 6,7$ мин.

Решение:

Изобразим схему реакции: ${}_{13}^{29}\text{Al} \rightarrow {}_{14}^{29}\text{Si} + {}_{-1}^0e + {}_0^0\tilde{\nu}$. Из этой схемы следует то, что при распаде одного ядра изотопа алюминия возникает одно ядро изотопа кремния. Следовательно, количество возникших ядер кремния равно количеству распавшихся ядер алюминия. Массовое число исходного ядра совпадает с массовым числом ядра-продукта реакции. Поскольку массы атомов практически равны массам ядер, масса кремния будет равно массе распавшихся за время t ядер алюминия. Из этих положений вытекает следующий способ решения поставленной задачи:

- с помощью закона радиоактивного распада определить долю k ядер алюминия, распавшихся за время t , то есть найти соотношение

$$k = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)},$$

где $N(0)$ - количество ядер алюминия в начальный момент времени, $N(t)$ - количество ядер алюминия, ещё не распавшихся к моменту времени t ;

- вычислить массу кремния, считая, что она равна убыли массы алюминия в процессе распада:

$$m_2 = k m_1$$

Выполним вычисления (в системе СИ!):

$$k = \frac{N(0) - N(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - N(0) \cdot 2^{-\frac{t}{T}}}{N(0)} = 1 - 2^{-\frac{t}{T}} = 1 - 2^{-\frac{40}{6,7 \cdot 60}} = 0,067$$

Ответ: $k = 0,067$.

Пример 16.10 Написать реакцию α -распада ядра изотопа урана ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Решение:

При α -распаде образуется α -частица, т.е. ядро изотопа гелия ${}_{2}^4\text{He}$. Полное число нуклонов всех частиц, образовавшихся в результате реакции, сохраняется. Поэтому число нуклонов в ядре, возникшем в результате α -распада, будет на 4 (число нуклонов α -частицы) меньше, чем у исходного ядра. Таким образом, массовое число ядра-продукта реакции $A = 238 - 4 = 234$. Для нахождения зарядового числа учтем закон сохранения электрического заряда. Исходное ядро имеет электрический заряд, образованный его протонами, равный $92q$. В процессе реакции этот заряд перераспределится между зарядом α -частицы $2q$ и зарядом ядра-продукта Zq . Из закона сохранения заряда получаем $92q = 2q + Zq$, откуда следует $Z = 92 - 2 = 90$. Зарядовое число ядра совпадает с номером химического элемента в периодической системе. Элемент с номером 90 – это торий. Следовательно, при α -распаде в нашем случае возникает ядро ${}_{90}^{234}\text{Th}$ и реакция протекает по схеме ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{2}^4\text{He} + {}_{90}^{234}\text{Th}$.

Ответ: ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{2}^4\text{He} + {}_{90}^{234}\text{Th}$

Пример 16.11 Найти энергию реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$ если известно, что кинетические энергии протона $T_{\text{H}} = 5,45$ МэВ, ядра гелия $T_{\text{He}} = 4$ МэВ и что ядро гелия вылетело под углом 90° к направлению движения протона. Ядро-мишень ${}^9_4\text{Be}$ неподвижно.

Решение:

Энергия реакции Q есть разность между суммой кинетических энергий ядер-продуктов реакции и кинетической энергией налетающего ядра:

$$Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} - T_{\text{H}} \quad (1)$$

В этом выражении неизвестна кинетическая энергия T_{Li} лития. Для ее определения воспользуемся законом сохранения импульса

$$p_{\text{H}} = p_{\text{He}} + p_{\text{Li}} \quad (2)$$

Векторы p_{H} и p_{He} , по условию задачи, взаимно перпендикулярны и, следовательно, вместе с вектором p_{Li} образуют прямоугольный треугольник. Поэтому

$$(p_{\text{H}})^2 = (p_{\text{He}})^2 + (p_{\text{Li}})^2 \quad (3)$$

Выразим в этом равенстве импульсы ядер через их кинетические энергии. Так как кинетические энергии ядер, по условию задачи, много меньше энергий покоя этих ядер, то можно воспользоваться классической формулой

$$p^2 = 2mT. \quad (4)$$

Заменив в уравнении (3) квадраты импульсов ядер их выражениями (4), после упрощения получим

$$m_{\text{Li}}T_{\text{Li}} = m_{\text{He}}T_{\text{He}} + m_{\text{H}}T_{\text{H}}$$

откуда

$$T_{\text{Li}} = (m_{\text{He}}T_{\text{He}} + m_{\text{H}}T_{\text{H}}) / m_{\text{Li}} = 3,58 \text{ МэВ}$$

Подставив числовые значения в формулу (1), найдем $Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} - T_{\text{H}} = 2,13 \text{ МэВ}$.

Ответ: $Q = 2,13 \text{ МэВ}$.

Пример 16.12 Период полураспада ядра радиоактивного изотопа натрия $T = 2,6$ года. Был изготовлен препарат, содержащий $m = 2,2$ мг этого изотопа. Какое число позитронов за одну секунду n будет испускать этот препарат через время $t = 5,2$ года его использования?

Решение:

Схема β^+ -распада ${}^{22}_{11}\text{Na}$ имеет вид ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_1\text{e}^+ \nu_{\text{e}}^+$. При распаде каждого ядра испускается один позитрон. Следовательно, число позитронов, испускаемых за одну секунду, будет равно числу распадающихся за одну секунду ядер. По определению, эта величина называется активностью препарата. Активность A можно рассчитать по формуле: $A = \lambda N$, где N - количество ещё не распавшихся ядер, λ - постоянная радиоактивного распада. В задаче нас интересует активность препарата через время t , прошедшее после его изготовления. Следовательно, при вычислении активности необходимо использовать закон радиоактивного распада, чтобы с его помощью определить N . Поскольку в условии задачи приводится период

полураспада, удобнее применить закон радиоактивного распада в форме: $A = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$,

где $A_0 = \lambda N_0$ - начальная активность ядер в препарате. Величину N_0 можно определить, зная массу препарата m и молярную массу μ изотопа ${}^{22}_{11}\text{Na}$. По определению, молярная масса химического элемента, выраженная в граммах, численно равна относительно атомной массе этого элемента. Относительная атомная масса изотопа ${}^{22}_{11}\text{Na}$ равна массовому числу.

Следовательно, в системе СИ молярная масса изотопа $\mu = 22 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$. В одном моле содержится N_A (число Авогадро) атомов ${}^{22}_{11}\text{Na}$. Следовательно, $N_0 = \frac{m}{\mu} N_A$.

Используя все вышеописанное, выведем расчетную формулу для нахождения n :

$$n = A = \lambda N = \lambda N_0 2^{-\frac{t}{T}} = \lambda \frac{m}{\mu} N_A 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Выражая постоянная радиоактивного распада λ через период полураспада T по формуле

$$\lambda = \frac{0,693}{T},$$

окончательно получаем

$$n = \frac{0,693}{T} \frac{m}{\mu} N_A 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Подставляем в полученную расчетную формулу значения физических величин (в системе СИ!) и выполняем вычисления:

$$n = \frac{0,693}{2,6 \cdot 365 \cdot 84000} \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 2^{-\frac{5,2}{2,6}} = 1,28 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{с}}.$$

Ответ: $n = 1,28 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{с}}$.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 16.1 Определить порядковый номер Z и массовое число A частицы, обозначенной буквой X , в символической записи ядерной реакции: ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^Z_A X$

Ответ: $A = 1$; $Z = 0$, это нейтрон ${}_0^1 n$.

Задача 16.2 Определить энергию Q ядерной реакции ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0 n$.

Ответ: $Q = 4,36 \text{ МэВ}$.

Задача 16.3 За какое время t распадается $\frac{1}{4}$ начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада $T_{1/2} = 24 \text{ ч}$? **Ответ:** $t = 10,5 \text{ ч}$.

Задача 16.4 Определить энергию E , которая выделится при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ массой $m = 1 \text{ мг}$. Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, а масса нейтрона $m_n = 1,68 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. **Ответ:** $E = 682 \cdot 10^9 \text{ Дж}$.

Задача 16.5 Определить активность A фосфора ${}^{32}\text{P}$ массой $m=1 \text{ мг}$. **Ответ:** $A = 10,5 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$.

Задача 16.6 Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержит ядро атома железа ${}^{54}_{26}\text{Fe}$. **Ответ:** $A = 54$; $Z = 26$; $N = 28$.

Задача 16.7 Определить диаметры следующих ядер: 1) ${}^{83}\text{Li}$; 2) ${}^{27}_{13}\text{Al}$.

Ответ: $d_1 = 5,6 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 5,6 \text{ фм}$; $d_2 = 8,4 \cdot 10^{-15} \text{ м} = 8,4 \text{ фм}$.

Задача 16.8 Какую наименьшую энергию E нужно затратить, чтобы разделить на отдельные нуклоны ядро ${}^7_3\text{Li}$? **Ответ:** $E_{\min} = 39,2 \text{ МэВ}$.

Задача 16.9 При распаде радиоактивного полония ${}^{210}\text{Po}$ в течение времени $t = 1 \text{ ч}$ образовался гелий ${}^4\text{He}$, который при нормальных условиях занял объем $89,5 \text{ см}^3$. Определить период полураспада $T_{1/2}$ полония. **Ответ:** $T_{1/2} = 138 \text{ суток}$.

Задача 16.10 Определить энергию $E_{\text{св}}$, которая освободится при соединении одного протона и двух нейтронов в атомное ядро. **Ответ:** $E = 8,49 \text{ МэВ}$.

17. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ АТОМНАЯ МАССА НЕКОТОРЫХ ИЗОТОПОВ, а.е.м.
 (для определения массы ядра необходимо вычесть от массы атома суммарную массу электронов)

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$	1,00783	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
${}^2_1\text{H}$	2,01410	${}^{15}_7\text{N}$	15,00011
${}^3_1\text{H}$	3,01605	${}^{17}_8\text{O}$	16,99913
${}^3_2\text{He}$	3,01602	${}^{17}_9\text{F}$	17,00210
${}^4_2\text{He}$	4,00260	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98146
${}^6_3\text{Li}$	6,01513	${}^{30}_{14}\text{Si}$	29,97376
${}^7_3\text{Li}$	7,01601	${}^{40}_{20}\text{Ca}$	39,96259
${}^8_4\text{Be}$	8,00531	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	55,93494
${}^{12}_6\text{C}$	12,00000	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	222,01922
${}^{13}_6\text{C}$	13,00335	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	226,02435