

Министерство образования и науки Украины
Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет»

И.П.Гаркуша, В.П.Куриной

Физика

Ч. 7. Физика атомного ядра и элементарных частиц

Учебное пособие

Днепропетровск
НГУ
2017

УДК 53(075.4)
ББК 22.3я72
Г52

Рекомендовано редакційною радою Державного ВНЗ «НГУ» як «навчальний посібник для бакалаврів та магістрів спеціальностей 184 Гірництво і 192 Будівництво та цивільна інженерія» (протокол № 5 від 16 березня 2017 р.).

Гаркуша И.П., Куринной В.П.

Г 52 Физика. Ч. 7. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Текст]: Учебное пособие: – Д. Национальный горный университет, 2017. – 62 с. – (Библиотека иностранного студента).

Пособие составлено в соответствии с программой нормативной дисциплины «Физика» и является седьмой частью курса лекций тех же авторов, предназначенных для бакалавров и магистров специальностей 184 «Гірництво» и 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Изложение сопровождается примерами решения задач, облегчающих понимание теоретического материала. Пособие может быть полезным студентам дневных и заочных отделений других технических направлений подготовки, а также преподавателям высших технических учебных заведений.

Часть 7. Физика атомного ядра и элементарных частиц

Глава 1. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

§ 1. Строение атомного ядра. Свойства протонов и нейтронов. Параметры атомных ядер	4
§ 2. Дефект массы и энергия связи ядра. Удельная энергия связи	6
§ 3. Ядерные силы	9
Контрольные вопросы.....	13
§ 4. Радиоактивность.....	14
§ 5. Ядерные реакции	23
§ 6. Реакция деления тяжелых ядер	28
§ 7. Атомная энергетика.....	35
§ 8. Термоядерный синтез. Энергия Солнца и звезд.....	43
Контрольные вопросы.....	48

Глава 2. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

§ 9. Типы фундаментальных взаимодействий в природе	48
§ 10. Кварки и лептоны. Классификация элементарных частиц	52
Контрольные вопросы.....	59

§ 1. Строение атомного ядра. Свойства протонов и нейтронов. Параметры атомных ядер

Ядро атома было открыто английским физиком Э. Резерфордом в 1911 г. в опытах по рассеянию α -частиц при прохождении их через вещество.

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов (*нуклонов*).

Протон (p) обладает зарядом $+e$ (положительный элементарный заряд, по величине равный заряду электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл) и массой $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг.

Обычно массу ядер выражают в *атомных единицах массы* (1 а.е.м. = 1/12 массы изотопа углерода ^{12}C) или в единицах энергии, записывая вместо массы соответствующую энергию $E = mc^2$ в электронвольтах.

В этих единицах:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}; \quad (1.1)$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.} = 938,28 \text{ МэВ}. \quad (1.2)$$

Для сравнения укажем массу покоя электрона

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 0,511 \text{ МэВ}. \quad (1.3)$$

Т.е. $m_p = 1836 m_e$.

Протон имеет собственный момент импульса - спин, который равен половине ($s = 1/2$) в единицах \hbar ($\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка), и собственный магнитный момент

$$\mu_p = +2,79 \mu_j, \quad (1.4)$$

где

$$\mu_j = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл} \quad (1.5)$$

- единица магнитного момента, называемая *ядерным магнетонам*. Знак плюс указывает на то, что направления собственного механического и магнитного моментов совпадают.

Для электрона собственный магнитный момент

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}.$$

Следовательно, собственный магнитный момент протона примерно в 660 раз меньше, чем магнитный момент электрона.

Нейтрон (n) - электрически нейтральная частица. Ее масса покоя:

$$m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 939,57 \text{ МэВ}. \quad (1.6)$$

Спин нейтрона $s = 1/2$. Несмотря на отсутствие электрического заряда, нейтрон имеет собственный магнитный момент

$$\mu_n = -1,91 \mu_j. \quad (1.7)$$

Знак минус указывает на то, что направления собственных механического и магнитного моментов противоположны.

Нейтроны устойчивы только в составе стабильных атомных ядер. Свободный нейтрон - нестабильная частица, распадающаяся на протон (p), элек-

трон (e^-) и электронное антинейтрино ($\tilde{\nu}_e$, античастицы обозначают надстрочным знаком в виде волнистой черты - тильдой) по схеме



Электронное антинейтрино - элементарная частица с ничтожно малой массой и нулевым зарядом. Среднее время жизни нейтрона равно $\tau \approx 15,3$ мин.

Иногда протон и нейтрон рассматривают как одну частицу, имеющую два состояния.

Характеристики атомного ядра. Общее число нуклонов в атомном ядре называется массовым числом A , число протонов - зарядовое число Z - определяет заряд ядра, который равен $+Ze$.

Зарядовое число Z совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов. Известные в настоящее время 110 элементов периодической таблицы имеют зарядовые числа ядер от $Z = 1$ до $Z = 110$. Так как атом нейтрален, то заряд ядра определяет и число Z электронов в атоме. Число N нейтронов в ядре очевидно, равно разности $A - Z$.

Символически эти характеристики ядра обозначают так: ${}^A_Z X$. Например, ${}^2_1 H, {}^4_2 He, {}^{235}_{92} U$.

У ядер- *изотопов* одно и то же Z , но разные A и N . Например, ${}^{235}_{92} U, {}^{238}_{92} U$.

У ядер- *изобаров* одинаковые A и разные Z и N . Например, ${}^{40}_{18} Ar, {}^{40}_{20} Ca$.

Большинство химических элементов имеет по несколько стабильных изотопов. Так, например, у водорода три изотопа:

${}^1_1 H$ - обычный водород, или протий ($Z = 1, N = 0$);

${}^2_1 H$ - тяжелый водород, или дейтерий (D) ($Z = 1, N = 1$);

${}^3_1 H$ - тритий (T) ($Z = 1, N = 2$).

У кислорода имеется три изотопа ${}^{16}_8 O, {}^{17}_8 O, {}^{18}_8 O$, у олова - десять и т.д.

В настоящее время известно более 2500 ядер, отличающихся Z , либо A , либо и тем и другим. В природе встречаются элементы с атомным номером Z от 1 до 92, исключая технеций ($Tc, Z = 43$) и прометий ($Pm, Z = 61$). Остальные *трансурановые элементы* (с Z от 93 и выше) были получены при бомбардировке тяжелых ядер (урана и некоторых трансурановых элементов) нейтронами.

Размеры ядер. Размеры ядер зависят от числа содержащихся в них нуклонов. Средняя концентрация нуклонов в ядре для всех ядер с $A > 10$ практически одинакова. Это означает, что объем ядра примерно пропорционален числу нуклонов A .

В модели атомного ядра как жидкой капли ядро рассматривается как шар, следовательно его радиус пропорционален $A^{1/3}$:

$$r_{я} \approx 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ м.} \quad (1.9)$$

Радиус ядра имеет условный смысл, хотя бы потому, что, ядро, как любая квантовомеханическая система, не имеет определенной границы в силу соотношения неопределенностей, и границы ядра размыты.

Плотность ядерной материи очень велика по сравнению с плотностью обычных веществ и составляет около 10^{17} кг/м³. Такая плотность вещества характерна для некоторых космических объектов, например нейтронных звезд — пульсаров. Так, если бы Солнце, радиус которого $6,96 \cdot 10^8$ м, превратилось бы в нейтронную звезду, его радиус стал бы равен всего ≈ 14 км.

Пример. С помощью соотношения неопределенностей Гейзенберга: 1) покажем, что в состав ядра не могут входить электроны и 2) оценим скорость нуклонов в ядре.

1) Если электрон находится внутри ядра, т. е. локализован в области размером порядка $r_{\text{я}} \sim 10^{-15}$ м, то неопределенность Δp в значении его импульса составляет $\Delta p \sim \frac{\hbar}{r_{\text{я}}}$. Так как

само значение импульса p не может быть меньше этой неопределенности Δp , то $p \sim \frac{\hbar}{r_{\text{я}}}$.

В теории относительности выводится соотношение между импульсом и кинетической энергией частицы $p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k (E_k + 2mc^2)}$.

Полагаем, что энергия покоя электрона гораздо меньше его кинетической энергии $mc^2 \ll E_k$

Тогда электрон будет ультрарелятивистским с кинетической энергией $E_{\text{кин}} \approx pc \approx \frac{\hbar c}{r_{\text{я}}} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{10^{-15} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} \approx 0,2 \text{ ГэВ}$. Это значение значительно превосходит и энергию покоя электрона, равную 0,5 МэВ, и энергию связи ядра в расчете на одну частицу (7 – 8 МэВ).

Последнее несовместимо с предположением, что электрон находится внутри ядра.

2) Считаем, что размеры ядра известны, они имеют порядок $r_{\text{я}} \sim 10^{-15}$ м. Повторим рассуждения п.1) для нуклона в ядре. Пользуясь найденным выше выражением

для импульса, получим $\frac{\hbar}{r_{\text{я}}} = mv$.

Массу нуклона примем равной $m \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг. Тогда для скорости нуклона в ядре имеем

$$v \approx \frac{\hbar}{mr_{\text{я}}} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{-15}} \left(\frac{\text{М}}{\text{с}}\right) \approx 0,6 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 0,2c.$$

Таким образом, скорость нуклона в ядре составляет несколько десятых долей скорости света.

§ 2. Дефект массы и энергия связи атомного ядра. Удельная энергия связи

Дефект массы. Измерения показывают, что массы нуклонов не складываются аддитивно в массу образуемого ими ядра $m_{\text{я}}$. Масса ядра меньше суммы масс входящих в него частиц:

$$m_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + (A - Z) m_{\text{n}}. \quad (2.1)$$

Разность между суммой масс покоящихся протонов и нейтронов $Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}}$ и массой ядра $m_{\text{я}}$ называется *дефектом массы*.

$$\Delta m = Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{я}}, \quad (2.2)$$

В справочных таблицах обычно даются массы атомов, а не ядер, поэтому удобно пользоваться преобразованной формулой, в которую входит масса m_a атома: $m_a = m_{\text{я}} + Zm_e$, (здесь мы пренебрегаем энергией связи электронов с ядром вследствие ее малости), откуда

$m_{\text{я}} = m_a - Zm_e$. Заменяя в уравнении (2.2) массу ядра, получим

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_a + Zm_e,$$

Или

$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - m_a$$

Учитывая, что $m_p + m_e = m_H$, где m_H - масса атома водорода, окончательно имеем

$$\Delta m = Z m_H + (A - Z) m_n - m_a. \quad (2.3)$$

Энергия связи. Дефект массы связан с такой характеристикой ядра как *энергия связи ядра* $E_{\text{св}}$. Она определяется как энергия, необходимая для полного расщепления ядра на составляющие его Z протонов и $(A - Z)$ нейтронов,

Согласно теории относительности, между энергией покоя и массой существует соотношение $E = m c^2$, так что

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = (Z m_H + (A - Z) m_n - m_a) c^2 \quad (2.4)$$

Чтобы расщепить ядро на составные части, необходимо затратить энергию. При этом согласно формуле Эйнштейна масса системы увеличивается. Из закона сохранения энергии вытекает и обратное: при образовании ядра из свободных нуклонов должна выделиться энергия, равная энергии связи. Очевидно, что энергия связи характеризует взаимодействие между нуклонами в ядре.

Если выражать энергию связи во внесистемных единицах – МэВ, а массу в атомных единицах, то

$$c^2 = E_{\text{св}}/\Delta m = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.},$$

и формула (2.4) запишется в виде

$$E_{\text{св}} = (Zm_H + (A - Z)m_n - m_a)931,5 \text{ МэВ}. \quad (2.5)$$

Пример. Определить дефект массы Δm и энергию связи $E_{\text{св}}$ ядра ${}^7_3\text{Li}$.

Подставив из таблиц в формулы (2.3) и (2.5) числовые значения масс, получим

$$\Delta m = (3 \cdot 1,00783 + (7 - 3) \cdot 1,00867 - 7,01601) \text{ а.е.м.} = 0,04216 \text{ а.е.м.}$$

С учетом этого

$$E_{\text{св}} = \cdot 931,5 \Delta m \text{ (МэВ)}.$$

$$E_{\text{св}} = 931,5 \cdot 0,04216 \text{ МэВ} = 39,27 \text{ МэВ}.$$

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра ($E_{\text{св}}/A$) называется *удельной энергией связи*.

Пример. Вычислим удельную энергию связи нуклонов в ядре лития. Масса ядра лития ${}^7_3\text{Li}$ составляет 7,01601 а.е.м. В состав ядра лития входят три протона ($Z = 3$) и четыре нейтрона ($N = A - Z = 4$). Тогда:

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = 931,5(3 \cdot 1,00728 + 4 \cdot 1,00867 - 7,01601)/7 = 5,39 \text{ МэВ/нуклон}$$

Для сравнения отметим, что энергия связи валентных электронов в атомах имеет величину порядка десятка эВ (энергия связи электрона в невозбужденном атоме водорода равна 13,5 эВ), т.е. почти в миллион раз меньше.

$E_{\text{св}} / A$, МэВ/нуклон

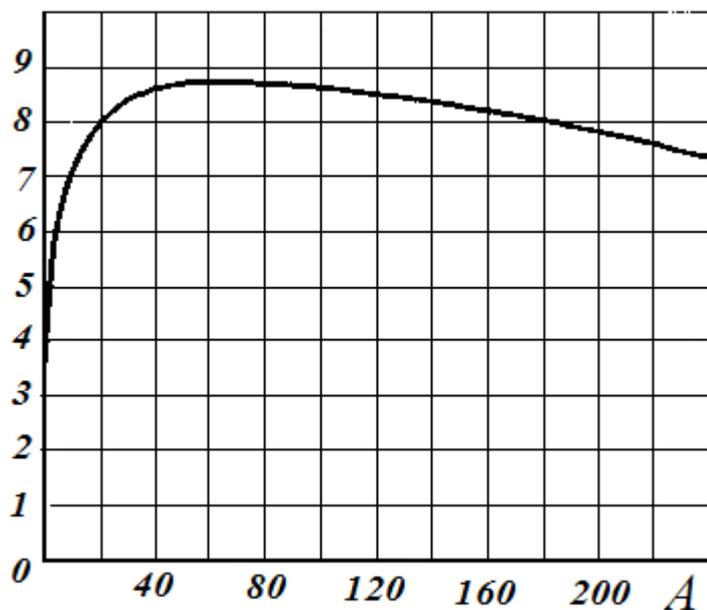


Рис. 2.1.

На рис. 2.1 изображена зависимость удельной энергии связи от массового числа.

Для легких ядер ($A < 12$) удельная энергия связи круто возрастает до $6 - 7$ МэВ /нуклон, затем более медленно возрастает до максимальной величины $8,7$ МэВ /нуклон в области ядер железа ($A = 56$) и никеля ($A=62$), а потом постепенно уменьшается у тяжелых элементов (например, для урана она составляет $7,5$ МэВ /нуклон).

Главные причины различия в энергии связи разных ядер

закключаются в следующем. Все нуклоны, из которых состоит ядро, можно условно разделить на две группы: внутренние и поверхностные. Внутренние нуклоны окружены соседними нуклонами со всех сторон, поверхностные же имеют соседей только с внутренней стороны. Поэтому внутренние нуклоны взаимодействуют с остальными нуклонами сильнее, чем поверхностные.

Но процент внутренних нуклонов особенно мал у легких ядер (у самых легких ядер все нуклоны можно считать поверхностными) и постепенно повышается по мере их утяжеления. Поэтому и энергия связи должна расти вместе с ростом числа нуклонов в ядре. Однако этот рост не может продолжаться очень долго, так как начиная с некоторого достаточно большого числа нуклонов ($A \sim 50-60$) количество протонов в ядре становится настолько большим, что делается заметным их взаимное электрическое (кулоновское) отталкивание даже на фоне сильного ядерного притяжения.

Связь между нуклонами становится менее сильной, а сами ядра менее прочными, у тяжелых ядер уменьшается энергия связи.

Повышенной устойчивостью обладают ядра в областях с числом нуклонов (протонов или нейтронов) 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Эти числа называют *магическими*, а их происхождение объясняется т.н. оболочечной моделью ядра. В этой модели дискретные энергетические уровни заполняются нуклонами с учетом принципа Паули. Уровни группируются в оболочки. Полностью заполненные оболочки, на которых число протонов или нейтронов равно 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, образуют устойчивую структуру. В атомах аналогичное свойство является следствием характера заполнения электронных оболочек.

Из рис. 2.1 следует, что наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра из середины периодической системы элементов. Ядра железа — наиболее устойчивая (наиболее сильно связанная) ядерная система.

Удельная энергия связи ядер атомов, которые занимают в периодической системе последние места ($A \sim 200$), приблизительно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, которые содержатся в середине периодической системы ($A \sim 100$).

Это делает возможным *выделение ядерной энергии при делении* тяжелого ядра на два легких. Убедимся в этом с помощью следующего мысленного опыта.

Рассмотрим атомное ядро урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, которое представляет собой систему из 238 сильно взаимодействующих тесно расположенных нуклонов.

Увеличим размеры ядра настолько, чтобы входящие в него нуклоны перестали взаимодействовать. Для этого нам придется произвести работу против ядерных сил притяжения.

Если теперь разрешить нуклонам вновь объединиться в ядро урана, то вся затраченная энергия освободится. Очевидно, никакого выигрыша или проигрыша в энергии при этом не будет.

Теперь позволим нуклонам объединиться не в одно ядро урана, а в два ядра меньших размеров, например с массовыми числами 119.

Удельная энергия связи ядра урана равна 7,5 МэВ, а удельная энергия связи каждого из новых ядер равна 8,6 МэВ.

Для разделения всех нуклонов, которые составляют ядро урана, необходимо затратить энергию, равную энергии связи ядра:

$$7,5 \cdot 238 \text{ МэВ} = 1785 \text{ МэВ.}$$

При объединении этих нуклонов в *два новых ядра* с массовыми числами $A = 119$ выделится энергия, которая равна сумме энергий связи новых ядер:

$$2 \cdot 8,6 \cdot 119 \text{ МэВ} = 2046,8 \text{ МэВ.}$$

Итак, в результате реакции деления ядра урана выделяемая энергия превышает затраченную. Выделится энергия, равная разности между энергией связи новых ядер и энергией связи ядра урана:

$$(2046,8 - 1785) \text{ МэВ} = 261,8 \text{ МэВ.}$$

Непосредственные измерения подтверждают, что при делении ядра урана ${}^{238}\text{U}$ выделяется энергия более 200 МэВ, причем большая часть ее приходится на кинетическую энергию новых ядер («осколков»).

Из анализа графика зависимости удельной энергии связи от массового числа (рис. 2.1) следует также, что выделение энергии должно иметь место *и при объединении (синтезе)* легких ядер в одно более тяжелое ядро (см. § 9).

§ 3. Ядерные силы

Фундаментальные взаимодействия. Силы, действующие между нуклонами в ядре, называются *ядерными*. Они являются проявлением самого интенсивного взаимодействия в природе — так называемого *сильного взаимодействия*.

Вплоть до расстояния $r \approx 0,7 \cdot 10^{-15}$ м ядерные силы проявляются как силы притяжения, несмотря на сильное кулоновское отталкивание между протонами, на меньших расстояниях — как силы отталкивания.

Сильное взаимодействие - одно из четырех фундаментальных взаимодействий элементарных частиц (четырёх видов сил в природе). Три остальных взаимодействия - электромагнитное, слабое и гравитационное - гораздо слабее сильного взаимодействия.

Электромагнитное взаимодействие характеризуется участием электромагнитного поля (в квантовой физике – фотонов). Оно обуславливает силы притяжения между ядрами и электронами. Благодаря этим силам существуют атомы и молекулы. Этими силами объясняются также силы упругости, трения, поверхностного натяжения и др. Ими определяются агрегатные и химические превращения, электрические, магнитные и оптические явления. Электромагнитные силы являются дальнедействующими. Они уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния между взаимодействующими частицами. В зависимости от знака электрического заряда это могут быть силы притяжения или отталкивания.

Слабые взаимодействия вызывают β -распад радиоактивных ядер.

Наконец, *гравитационное взаимодействие* (тяготение) сводится к притяжению между любыми материальными объектами (частицами или телами). В физике микромира вследствие его чрезвычайной малости оно не учитывается. Однако при рассмотрении движения больших масс (галактик, звезд, планет), а также движения небольших макроскопических тел в поле тяжести таких масс гравитационное взаимодействие становится определяющим. Гравитационные силы всегда являются силами притяжения.

Согласно квантовой теории переносчиком любого взаимодействия является квант соответствующего поля. Одна из взаимодействующих частиц испускает квант поля, другая его поглощает. В случае электромагнитных взаимодействий квантами поля являются *фотоны*.

В случае сильных взаимодействий переносчиками взаимодействия являются *глюоны*, которые связывают *кварки и пионы* (см. §10), которые в свою очередь связывают нуклоны в ядре.

В слабых взаимодействиях это т.н. *промежуточные векторные бозоны*, в гравитационных – гипотетические (т.е. пока не открытые экспериментально) *гравитоны*.

Интенсивность различных взаимодействий по отношению к сильному определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{сильное} &\sim 1; \\ \text{электромагнитное} &\sim 10^{-3}; \\ \text{слабое} &\sim 10^{-14}; \\ \text{гравитационное} &\sim 10^{-40}. \end{aligned}$$

Свойства ядерных сил.

- Ядерные силы являются короткодействующими, они быстро уменьшаются с ростом расстояния r между нуклонами. Радиус действия сильных

взаимодействий имеет порядок 10^{-15} м. При $r > (2 - 3) 10^{-15}$ м ядерные силы практически исчезают.

- На основании опытных данных установлено, что ядерные силы не зависят от зарядов нуклонов. Ядерные силы между двумя протонами, двумя нейтронами или протоном и нейтроном неразличимы. Поэтому протоны и нейтроны в ядре рассматривают как два различных зарядовых состояния одной и той же частицы - нуклона.
- Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Например, ядро тяжелого водорода - *дейтрон* - образуется, только в том случае, если нейтрон и протон имеют спины, параллельные друг другу.
- Ядерные силы не являются центральными: взаимодействие между нуклонами не направлено вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.
- Ядерные силы имеют свойство *насыщения* : каждый нуклон в ядре взаимодействует с определенным числом нуклонов. Насыщение проявляется в том, что плотность ядерного вещества является постоянной.

Физическая природа ядерных сил. Согласно квантовой теории поля ядерные силы обусловлены обменом квантами поля ядерных сил - *π -мезонами* (другое название - пионами) между нуклонами ядра.

Носители ядерных сил (π – мезоны) были открыты в космических лучах. Существуют заряженные π – мезоны (π^+ и π^-) с зарядом, равным заряду электрона $\pm e$ и массой $m_{\pi^\pm} = 139,57$ МэВ и нейтральный π^0 – мезон с массой $m_{\pi^0} = 134,97$ МэВ. Масса заряженного пиона равна 273 электронным массам m_e , а нейтрального - 264 m_e .

По современным представлениям нуклон ядра на короткое время испускает пион, который поглощается соседним нуклоном. В свою очередь, этот второй нуклон испускает пион, который поглощается первым. Такой «обмен» пионами и приводит к возникновению взаимодействия между нуклонами — к ядерным силам. Впервые идея подобного происхождения ядерных сил была выдвинута в 1935 г. японским физиком Х. Юкавой.

Такое описание взаимодействия нельзя понимать буквально. Пионы, посредством которых осуществляется взаимодействие, являются не обычными реальными пионами, а *виртуальными*. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования, принципиально не могут наблюдаться. Виртуальные частицы нельзя себе представлять существующими вне области ядерного взаимодействия, отдельно от нуклонов.

С точки зрения классической физики свободная частица не может ни испустить, ни поглотить другую частицу, т.к. в таких процессах нарушался бы либо закон сохранения энергии, либо закон сохранения импульса.

Например, покоившийся свободный нейтрон не может самопроизвольно превратиться в нейтрон + π^0 - мезон, суммарная масса которых больше массы нейтрона.

Однако в квантовой теории ситуация иная. В соответствии с *соотношением неопределенностей для энергии и времени*

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar \quad (3.1)$$

на короткое время Δt энергия системы может измениться на величину ΔE . Энергия частицы непрерывно флуктуирует (претерпевает отклонение), и в течение малых промежутков времени закон сохранения энергии может «временно нарушаться» (в классическом смысле).

Таким образом, нуклон может испустить виртуальный пион на короткое время

$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}, \quad (3.2)$$

где ΔE — неопределенность в энергии, примерно равная в данном случае энергии покоя пиона:

$$\Delta E = m_{\pi} c^2, \quad (3.3)$$

где m_{π} — масса пиона.

Определим промежуток времени Δt , в течение которого неопределенность энергии будет равна значению энергии, необходимой для образования пиона, т.е.

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{m_{\pi} c^2} \approx 4,7 \cdot 10^{-24} \text{ с}. \quad (3.4)$$

За это время, двигаясь со скоростью порядка скорости света c , пион пройдет расстояние

$$r \approx \Delta t \cdot c \sim \frac{\hbar}{m_{\pi} c}, \quad (3.5)$$

после чего поглотится вторым нуклоном. Следовательно, радиус действия ядерных сил должен иметь порядок

$$r \sim \frac{\hbar}{m_{\pi} c} \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}. \quad (3.6)$$

Это выражение совпадает с так называемой комптоновской длиной волны пиона

$$\lambda_c = \frac{h}{m_{\pi} c}, \quad (3.7)$$

Оказывается всегда, когда взаимодействие между частицами осуществляется за счет обмена виртуальными частицами, радиус взаимодействия определяется их комптоновской длиной волны.

Аналогично *электромагнитное взаимодействие* между заряженными частицами осуществляется с точки зрения квантовой электродинамики через электромагнитное поле, которое может быть представлено как совокупность фотонов. Процесс взаимодействия между двумя заряженными частицами, например электронами, заключается в обмене виртуальными фотонами. Каждая частица создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Действие поля на другую частицу проявляется в результате поглощения ею одного из фотонов, испущенных первой частицей. Так как масса фотона равна нулю, то согласно (3.5) радиус действия электромагнитных сил равен бесконечности.

Процессы виртуального рождения и поглощения (уничтожения) мезонов нуклонами происходят непрерывно.

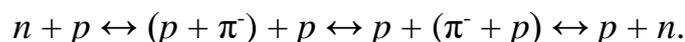
В результате виртуальных процессов



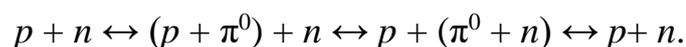
нуклоны оказываются окруженными облаком виртуальных π -мезонов, образующих поле ядерных сил. Облако π -мезонов иногда называют «мезонной шубой». Когда два таких «облака» оказываются друг от друга на расстоянии порядка (3.6), между ними происходит обмен пионами, т.е. испускание и поглощение виртуальных π -мезонов нуклонами приводит к сильному взаимодействию между ними.

Обмен пионами обуславливает ядерные силы на расстояниях порядка 10^{-15} м. На меньших расстояниях наряду с обменом пионами заметную роль начинает играть обмен более тяжелыми частицами. В результате на малых расстояниях ядерные силы становятся силами отталкивания.

Пусть нейтрон и протон обмениваются π^- -мезоном, нейтрон может испустить π^- -мезон, превратившись в протон. Начальный же протон, поглощая этот π^- -мезон, превратится в нейтрон. В конечном состоянии остаются те же самые частицы:



Можно записать и другие подобные виртуальные реакции взаимного превращения нуклонов с участием π^+ и π^0 -мезонов:



Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой порядковый номер элемента в периодической системе с зарядом его ядра? Чем определяется массовое число ядра?
2. Из каких составляющих построено атомное ядро? Перечислите их свойства
3. Что такое изотопы и изобары? Приведите примеры.
4. Сравните магнитные моменты нуклона и электрона. Какой вывод можно сделать? Как можно объяснить наличие магнитного момента у нейтрона?
5. Какую (по порядку) скорость имеют нуклоны в ядре? Каково примерно среднее расстояние между ними? Какова примерно средняя плотность ядерного вещества?
6. Почему в состав ядра не могут входить электроны?
7. Почему масса ядра не равна сумме масс образующих его протонов и нейтронов?
8. Что такое дефект массы и энергия связи ядра? Чему равна энергия связи нуклонов в ядре?
9. Почему атомные массы для большинства элементов в таблице Менделеева не целочисленны?

10. Почему относительное число нейтронов в ядре больше у тяжелых ядер?
11. Какие атомные ядра отличаются наибольшей устойчивостью?
12. Чем объясняется уменьшение устойчивости тяжелых ядер - снижение кривой удельной энергии связи - с увеличением массового числа A ?
13. Из анализа зависимости удельной энергии связи от атомного номера элемента объясните принципиальную возможность получения полезного выхода энергии при превращении элементов
14. Полагая ядро жидкой каплей, оцените коэффициент поверхностного натяжения ядерного вещества.
15. Охарактеризуйте свойства ядерных сил. Как можно объяснить свойство насыщения ядерных сил?
16. Какие частицы называются виртуальными?
17. Какие виртуальные частицы являются переносчиками сильного взаимодействия?
18. Каков механизм возникновения ядерных сил между нуклонами?

§ 4. Радиоактивность

Радиоактивностью называется самопроизвольное (спонтанное) превращение некоторых атомных ядер в другие атомные ядра с испусканием элементарных частиц.

Среди процессов радиоактивных превращений различают:

- α -распад – испускание атомным ядром α -частицы;
- β -распад – испускание атомным ядром электрона и антинейтрино, позитрона и нейтрино, поглощение ядром атомного электрона с испусканием нейтрино;
- γ -излучение ядер;
- спонтанное деление тяжелых ядер – распад атомного ядра на два осколка сравнимой массы;
- протонную радиоактивность – испускание атомным ядром протона (а также двух протонов).

Во всех видах радиоактивности (кроме γ -излучения) изменяется состав ядра – число протонов Z , массовое число A или и то и другое одновременно.

Все химические элементы с атомным номером, большим 83 – радиоактивны.

Радиоактивность, которую имеют нестабильные ядра, существующие в природе, называется *естественной*. Ядра стабильных изотопов могут стать радиоактивными после облучения их определенным образом. Такая радиоактивность называется *искусственной*. В обоих случаях радиоактивность подчиняется одним и тем же законам.

Из общего числа (~ 2000) известных радиоактивных нуклидов лишь около 300 – природные, а остальные получены в результате ядерных реакций.

Закон радиоактивного распада. Радиоактивный распад – явление вероятностное. Нельзя точно предсказать, когда именно распадется данное нестабильное ядро. Для описания статистических закономерностей используют вероятности тех или иных событий. Статистической величиной, описывающей радиоактивный распад, является вероятность λ распада ядра за единицу времени.

Выведем закон радиоактивного распада. Если к моменту времени t имеется N радиоактивных ядер, то среднее количество ядер dN , испытывающих распад за время dt , пропорционально полному количеству ядер N и величине λ , то есть

$$dN = -\lambda N dt. \quad (4.1)$$

Знак минус указывает на то, что количество радиоактивных ядер со временем уменьшается. Константу λ , называют также *постоянной распада*.

Из формулы (4.1) получаем

$$\int \frac{dN}{N} = -\int \lambda dt, \quad (4.2)$$

после интегрирования

$$\ln N = -\lambda t + C, \quad (4.3)$$

где C - постоянная интегрирования. При $t = 0$ имеем $C = \ln N_0$ (здесь N_0 - количество ядер в начальный момент времени). Тогда

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4.4)$$

Формула (4.4) выражает закон радиоактивного распада. Из нее следует, что число *нераспавшихся* ядер N радиоактивного изотопа со временем уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 4.1).

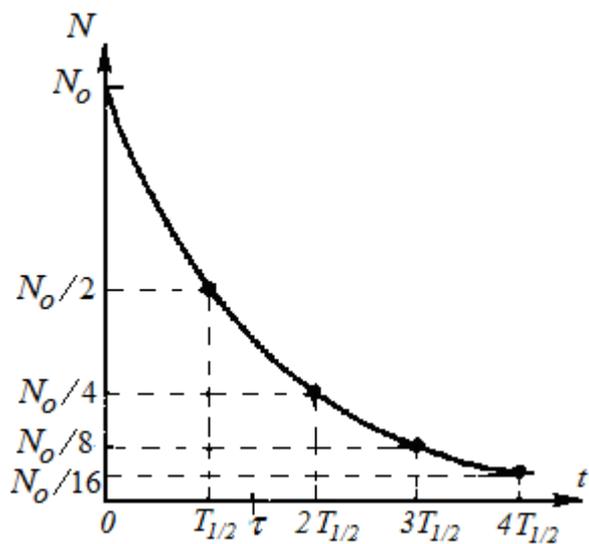


Рис. 4.1

Соответственно, количество *распавшихся* за время t ядер определяется выражением

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t}). \quad (4.5)$$

Продолжительность жизни радиоактивных ядер характеризуется периодом полураспада. *Периодом полураспада* $T_{1/2}$ называется промежуток времени, за который распадается половина первоначального количества ядер. Из закона радиоактивного распада получим уравнение:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (4.6)$$

откуда получаем связь периода полураспада $T_{1/2}$ с постоянной распада λ :

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (4.7)$$

Период полураспада для известных в настоящее время радиоактивных ядер варьируются в очень широких пределах от 10^{-10} с до 10^{18} лет.

Например:

Уран ${}_{92}^{238}U$ - $4,5 \cdot 10^9$ лет;

Радий ${}_{88}^{226}Ra$ - 1590 лет;

Радон ${}_{86}^{222}Rn$ - 3,82 суток;

Радий С ${}_{88}^{214}Ra$ - 10^{-6} секунды.

Пример. Определить период полураспада $T_{1/2}$ радона, если известно, что число ядер радона уменьшается за одни сутки на 16,6 %.

Количество распавшихся ядер $N_0 - N$ составляет 0,166 часть от начального количества ядер N_0 , т.е.

$$N_0 - N = 0,166 N_0.$$

Используя закон радиоактивного распада (4.4), запишем

$$N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = 0,166 N_0,$$

откуда

$$e^{-\lambda t} = 0,834.$$

Логарифмируя, получим для постоянной распада ($t = 1$ сутки = 86 400 с):

$$\lambda = -\frac{\ln 0,834}{86400} = 2,1 \cdot 10^{-6} (\text{с}^{-1}).$$

Период полураспада связан с постоянной распада соотношением $T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$, откуда

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{2,1 \cdot 10^{-6}} \text{с} = \frac{0,693}{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 86400} \text{сут} = 3,8 \text{сут}.$$

Активность. Число радиоактивных распадов в единицу времени называют *активностью* A данного препарата:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N. \quad (4.8)$$

Как видим, активность радиоактивного источника пропорциональна количеству радиоактивных ядер и обратно пропорциональна периоду полураспада. Она характеризует интенсивность излучения препарата в целом, а не отдельного ядра.

Активность изменяется со временем по тому же закону, что и число нераспавшихся ядер (4.4):

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (4.9)$$

где A_0 - активность изотопа в начальный момент времени ($t = 0$). Единица активности в СИ - *беккерель* (Бк): 1 Бк - активность препарата, при которой за 1 с происходит 1 распад. Используется внесистемная единица активности - *кюри* (Ки). 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Пример. Начальная масса радиоактивного изотопа радона ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (период полураспада $T_{1/2} = 3,82$ суток) равна 1,5 г. Определить: 1) начальную активность изотопа; 2) его активность через 5 суток.

Начальная активность изотопа

$$A_0 = \lambda N_0,$$

где $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2}$ - постоянная распада, N_0 - количество ядер изотопа в начальный момент времени: $N_0 = m_0 N_A / M$, M - молярная масса радона ($M = 222 \cdot 10^{-3}$ кг/моль), $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ - постоянная Авогадро.

С учетом этих выражений начальная активность изотопа

$$A_0 = \frac{m_0 N_A \ln 2}{M T_{1/2}}.$$

Активность изотопа в любое время $A = \lambda N$, где, согласно закону радиоактивного распада, $N = N_0 e^{-\lambda t}$ – количество имеющихся ядер, которые еще не распались к моменту времени t . Поэтому активность изотопа уменьшается по закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}.$$

Вычисляя, получим: 1) $A_0 = 8,54 \cdot 10^{15}$ Бк; 2) $A = 3,45 \cdot 10^{15}$ Бк.

При экспоненциальном законе радиоактивного распада в любой момент времени t имеется отличная от нуля вероятность найти еще не распавшиеся ядра. Время жизни таких ядер превышает t . Вместе с тем, другие, распавшиеся к этому времени ядра, прожили разное время, меньшее t .

Число ядер $dN(t)$, испытавших распад за промежуток времени $(t, t + dt)$, определяется модулем выражения (4.1):

$$dN(t) = \lambda N dt.$$

Это ядра, «дожившие» до момента t , но не «пережившие» момента $t + dt$. Можно сказать, что это есть число ядер возраста $\sim t$.

Следовательно, сумма времен жизни всех N_0 имевшихся первоначально ядер получается путем интегрирования выражения $t dN(t)$. Разделив эту сумму на число ядер N_0 , получим *среднее время жизни* τ всех первоначально существовавших ядер:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda t N dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt. \quad (4.10)$$

Выполняя интегрирование по частям, получим

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.11)$$

Используя соотношение (4.7), находим

$$T_{1/2} = 0,693 \tau, \quad (4.12)$$

т.е. период полураспада только численным множителем отличается от среднего времени жизни ядра. Соответственно, среднее время жизни равно $\tau \approx 1,44 T_{1/2}$, что и отмечено на рис. 4.1.

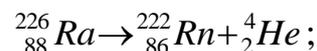
Альфа-распад. *Альфа – распад* – распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием α -частицы. α -Частица – ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, содержащее 2 протона и 2 нейтрона. Масса α -частицы

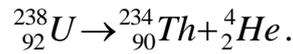
$$m_\alpha = 4,00150 \text{ а.е.м.} = 6,644 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

При α -распаде зарядовое число Z ядра в соответствии с законом сохранения электрического заряда уменьшается на 2 единицы, а массовое число A – на 4 единицы, и образуется ядро нового химического элемента, который сдвинут влево относительно исходного на две клетки периодической системы. Альфа – распад происходит по схеме



Например:





Кинетическая энергия α -частиц возникает за счет избытка энергии покоя материнского ядра над суммарной энергией покоя дочернего ядра и α -частицы. Эта энергия обычно заключена в интервале 2 – 9 МэВ. Скорости, с которыми α -частицы (т. е. ядра ${}^4_2\text{He}$) вылетают из распавшегося ядра, очень велики (порядка 10^7 м/с).

Проходя через вещество, α -частицы тормозятся за счет ионизации и возбуждения атомов и молекул, а также диссоциации молекул. Длина пробега α -частиц в воздухе $\approx 3 - 7$ см, в плотных веществах $\approx 10^{-2}$ мм (α -частицы полностью задерживаются обычным листом бумаги).

Дочернее ядро, как правило, оказывается возбужденным. Переходя в нормальное или более низкое возбужденное состояние, дочернее ядро испускает квант электромагнитного излучения высокой частоты - γ -фотон.

Возбужденное атомное ядро может перейти в состояние с меньшей энергией и по-другому, передавая избыток энергии непосредственно одному из электронов того же атома. При этом из различных оболочек атома (K-, L- или M) могут быть выбиты т.н. *конверсионные электроны*.

Возникшее в результате вылета электрона вакантное место будет заполняться электронами с вышележащих энергетических уровней. Поэтому внутренняя конверсия сопровождается испусканием характеристических рентгеновских лучей.

В теории α -распада предполагается, что α -частица не существует в готовом виде в ядре, а возникает лишь в момент радиоактивного распада ядра. Ядро является для α -частицы своего рода потенциальной ямой.

На рис. 4.2 представлен график потенциальной энергии α -частицы в ядре и его окрестности. Вне ядра короткодействующие ядерные силы быстро обращаются в нуль, и на α -частицу действует только электростатическое кулоновское отталкивание, которое обуславливает внешнюю, спадающую асимптотически к нулю сторону барьера.

На границе ядра (на расстояниях $r \leq r_{\text{я}}$) α -частица притягивается к ядру огромными, но короткодействующими ядерными силами притяжения и потенциальная кривая резко уходит вниз.

Внутри ядра потенциал можно считать примерно постоянным.

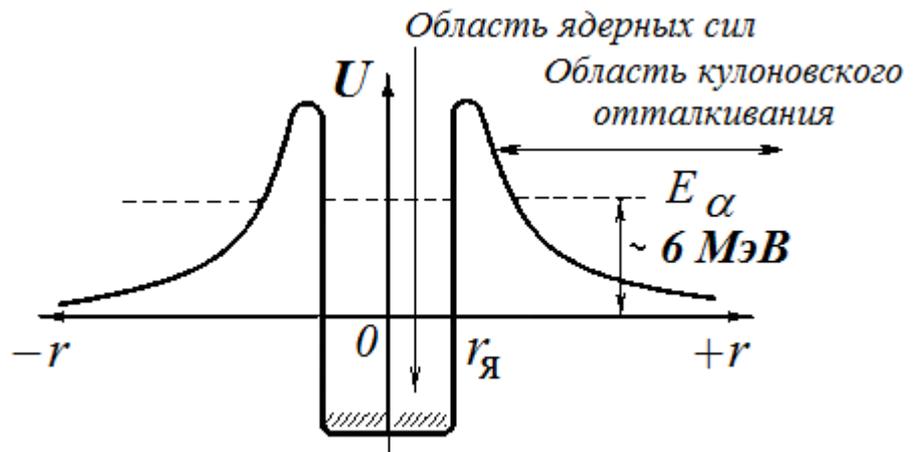


Рис. 4.2.

Область под кулоновским потенциалом вне ядра является потенциальным барьером. Высота барьера (≈ 30 МэВ) намного больше энергии E_α вылетающих при распаде α -частиц, равной в среднем 6 МэВ.

По представлениям классической физики вылет α -частицы из ядра без сообщения ей дополнительной энергии оказывается невозможным.

Однако квантовая механика разрешает прохождение или, точнее, *просачивание квантовой частицы через потенциальный барьер*. Говорят, что может происходить туннелирование α -частицы сквозь барьер (см. например, И.П.Гаркуша, В.П.Куриной. Физика. ч.6, «Квантовая физика», § 10).

Это явление просачивания α -частиц через кулоновский барьер является основным фактором, определяющим свойства α -распада.

Пример.

Оценим коэффициент прохождения α -частицы через потенциальный барьер. Считаем для простоты, что барьер имеет прямоугольную форму. Энергия α -частицы $E = 5$ МэВ, высота барьера $U_0 = 10$ МэВ, ширина барьера $l = 2 \cdot 10^{-12}$ см. Тогда согласно формулам, приведенным в разделе квантовая физика, например, формула (10.1) ч.6 «Физика»:

$$D \approx \exp(-l/\hbar)\sqrt{8m(U_0 - E)}$$

$U_0 - E = 5$ МэВ, масса α - частицы $m_\alpha = 6,644 \cdot 10^{-27}$ кг. Для коэффициента прохождения получим

$$D = e^{-39} \approx 10^{-17}.$$

Бета-распад. *Бета-распадом* называется процесс самопроизвольного превращения нестабильного ядра в ядро - изобар с зарядом, отличным на $\Delta Z = \pm 1$, за счет испускания электрона (позитрона) или захвата электрона.

Известны три вида β -распада:

- 1) β^- -распад - самопроизвольное испускание ядром электрона e^- и легчайшей электрически нейтральной частицы – антинейтрино;
- 2) β^+ -распад - самопроизвольное испускание ядром античастицы электрона - позитрона e^+ и легчайшей электрически нейтральной частицы - нейтрино;
- 3) K -захват - процесс поглощения ядром одного из электронов собственной атомной оболочки и испускания нейтрино.

1. Первый вид β -распада (β^- -распад) протекает по схеме



Чтобы подчеркнуть сохранение заряда и числа нуклонов в процессе β -распада электрону приписывают зарядовое число $Z = -1$ и массовое число $A = 0$.

Из схемы (4.14) видно, что дочернее ядро имеет атомный номер на единицу больший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы.

Образуется новый химический элемент, который сдвинут в периодической системе вправо на одну клетку. Наряду с электроном испускается также антинейтрино $\bar{\nu}_e$.

Процесс радиоактивного распада всегда сопровождается выделением энергии. Баланс энергий радиоактивного распада имеет следующий вид

$$M_X c^2 = M_Y c^2 + \Sigma M_p c^2 + E, \quad (4.15)$$

где M_X , M_Y , M_p – соответственно массы покоя исходного ядра X , конечного ядра Y и вылетающих частиц. Энергия E выделяется в форме кинетической

энергии продуктов распада. Энергия отдачи ядра Y сравнительно мала и ею пренебрегают. Следовательно, E – это кинетическая энергия, которая делится между электроном и антинейтрино.

Если бы в реакции β^- -распада не участвовало антинейтрино, у всех электронов была бы одинаковая энергия E_{\max} , соответствующая разности между массой материнского ядра и массами электрона и дочернего ядра.

Однако опыт показывает, что в отличие от альфа-частиц, вылетающих из данного ядра с вполне определенной энергией, вылетающие электроны могут иметь разную кинетическую энергию от бесконечно малой до энергии E_{\max} .

На рис. 4.3 изображено распределение $N(E)$ вылетающих электронов по энергиям (энергетический спектр электронов β^- -распада). Характерная особенность этого спектра – во-первых, его непрерывность, отсутствие острых пиков, во-вторых, наличие максимальной энергии E_{\max} , на которой спектр обрывается.

Следовательно, распады, при которых энергия электрона E меньше E_{\max} , протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии.

Гениальной догадкой швейцарского физика В.Паули явилось предположение о том, что недостающая часть энергии уносится неизвестной электрически нейтральной частицей с массой покоя близкой к нулю, которая излучается одновременно с β^- -частицей. Участие в β^- -распаде еще одной частицы диктовалось также законом сохранения момента импульса (спина).

Благодаря существованию этой гипотетической частицы закон сохранения энергии при β^- -распаде выполняется, поскольку энергия переносится и этой частицей, и электроном. Распределение энергии между ними имеет случайный характер, т. е. энергия электрона может принимать любые значения от бесконечно малой до максимальной возможной энергии, чем и объясняется форма β^- -спектра.

Только через четверть столетия эту частицу (поток нейтрино от атомного реактора) удалось экспериментально наблюдать.

При β^- -распаде вылетающий электрон не существует внутри ядра, а образуется там при превращении нейтрона в протон. В этом смысле говорят, что β^- -распад — это не внутриядерный, а внутринуклонный процесс. Теория β^- -распада была разработана итальянским физиком Э.Ферми на основе предположения о так называемом *слабом взаимодействии*, описывающем превращение нейтрона в протон:



Такой процесс происходит не только внутри ядра, но и со свободным нейтроном, среднее время жизни которого составляет около 15 минут.

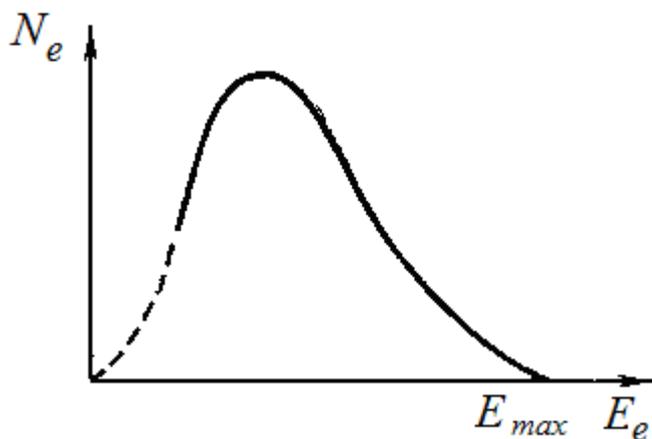
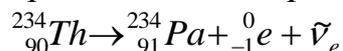


Рис. 4.3.

Бета-распад может сопровождаться испусканием γ -лучей. Механизм их возникновения тот же, что и в случае α -распада, — дочернее ядро возникает не только в нормальном, но и в возбужденных состояниях. Переходя затем в состояние с меньшей энергией, ядро испускает γ -квант.

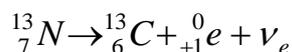
Примером β^- -распада может служить превращение тория ^{234}Th в протактиний ^{234}Pa с испусканием электрона и антинейтрино:



2. Вторым видом β -распада (β^+ -распад, или позитронный распад), при котором из ядра вылетает позитрон и электронное нейтрино, протекает по схеме



При этом возможно также возникновение γ -лучей. В качестве примера можно привести превращение азота ^{13}N в углерод ^{13}C :



В периодической системе происходит сдвиг влево на одну клетку без изменения массового числа.

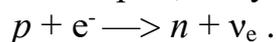
Позитрон является античастицей для электрона. Следовательно, обе частицы, испускаемые при распаде (4.17), представляют собой античастицы по отношению к частицам, испускаемым при распаде (4.14).

При позитронной радиоактивности один из протонов ядра превращается в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино



Для свободного протона в обычных условиях такой распад невозможен, так как его масса меньше массы нейтрона. Однако в ядре протон может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра.

3. *K-захват*. К β^- -распаду относят также процесс поглощения ядром электрона внутренней (*K*) оболочки, в результате чего, как и в позитронном распаде, один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:

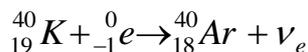


Возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии. Переходя затем в более низкие энергетические состояния, оно испускает γ -фотоны. Схема процесса выглядит следующим образом:



Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоев, в результате чего возникает рентгеновское характеристическое излучение.

Примером электронного захвата может служить превращение калия ^{40}K в аргон ^{40}Ar :



Главной особенностью β -распада является то, что он обусловлен не ядерными и не электромагнитными силами, а третьим из четырех типов фундаментальных взаимодействий в природе — слабым взаимодействием. За счет того, что интенсивность слабых взаимодействий на 24 порядка меньше ядерных,

периоды полураспада β -активных ядер в среднем имеют порядок минут и часов.

Гамма – излучение – коротковолновое электромагнитное излучение.

γ -Излучение ядер не является самостоятельным видом радиоактивности, а сопровождает процессы α - и β - распадов. Гамма-излучение обладает очень малой длиной волны ($\lambda \leq 10^{-8}$ см, порядка размеров атомов) и вследствие этого - ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц

– гамма - квантов (фотонов) с энергией $\varepsilon = \frac{2\pi c \hbar}{\lambda}$.

В отличие от α - и β -радиоактивных распадов γ -радиоактивность ядер не связана с изменением внутренней структуры ядра и не сопровождается изменением зарядового или массового чисел. Вылет из ядра γ -кванта (фотона высокой энергии) происходит в тех случаях, когда образующиеся ядра находятся в возбужденных состояниях.

Механизм испускания γ -квантов ядром такой же, как и механизм излучения фотонов атомом. Однако энергии γ -фотонов оказываются гораздо большими, чем энергии оптических фотонов. Это связано с гораздо большими разностями в энергетических уровнях ядра по сравнению с разностью уровней электронных оболочек атома. Электронные энергетические уровни в атоме раздвинуты на энергии порядка электронвольта. Измерения энергии γ -фотонов показали, что энергии ядерных уровней раздвинуты примерно на 0,1 МэВ.

При радиоактивном распаде ядер обычно наблюдаются γ -кванты с энергией от 10 кэВ до 5 МэВ. Γ - кванты больших энергий возникают при распаде элементарных частиц. Например, при распаде покоящегося π_0 - мезона возникает γ -излучение с энергией ~ 70 МэВ.

γ - Излучение обладает большой проникающей способностью. При взаимодействии γ - излучения с веществом в основном происходят процессы фотоэффекта, Комптон-эффекта и рождения пар электрон-позитрон.

Радиоактивные ряды. Подавляющее большинство вновь образованных элементов в радиоактивных распадах также являются радиоактивными. Применяя правила смещения, можно установить начальный радиоактивный элемент и конечный продукт его распада - стабильный элемент.

Такая последовательность элементов называется *радиоактивным рядом*. Известно четыре радиоактивных ряда.

1. *Ряд урана* (иногда называют рядом *радия*) начинается с урана ${}_{92}^{238}\text{U}$ ($T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет) и заканчивается стабильным изотопом свинца ${}_{82}^{208}\text{Pb}$. Этот ряд содержит 14 радиоактивных превращений, 8 из которых α -распады и 6 - β -распады.

2. *Ряд тория*, начинается с тория ${}_{90}^{232}\text{Th}$ ($T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет) и заканчивается изотопом свинца ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

3. *Ряд актиния*, начинающийся с урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ ($T_{1/2} = 7,3 \cdot 10^8$ лет) и заканчивается изотопом свинца ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

4. Ряд нептуния, который начинается с трансуранового элемента нептуния ${}_{93}^{237}\text{Np}$ ($T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$ лет) и заканчивается устойчивым изотопом висмута ${}_{83}^{209}\text{Bi}$. Хотя период полураспада нептуния достаточно большой, его в естественном состоянии на Земле уже нет, он полностью распался. Теперь нептуний добывают в результате искусственных ядерных реакций.

§ 5. Ядерные реакции

Ядерные реакции. При сближении ядра с какой-либо частицей (нуклоном, γ -квантом или другим ядром) до расстояний порядка 10^{-13} см они вступают во взаимодействие, которое может привести к изменению состава и структуры обоих столкнувшихся объектов. Этот процесс называется *ядерной реакцией*.

Во время ядерной реакции происходит перераспределение энергии и импульса обеих частиц, в результате чего образуются две или более другие частицы, вылетающие из места взаимодействия. При ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда, числа нуклонов (барионного заряда), лептонного заряда.

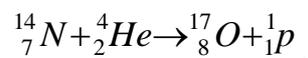
Это означает, в частности, что *сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции*.

Наиболее распространенным видом реакции является взаимодействие легкой частицы a с ядром A , в результате которого также образуются легкая частица b и ядро B :



или сокращенная запись $A(a,b)B$.

Первая искусственная ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 г. При облучении азота α -частицами некоторые ядра азота превращались в ядра кислорода, испуская при этом протон. Уравнение этой реакции имеет вид



Интенсивность взаимодействия различных частиц с ядрами характеризуют так называемым *эффективным сечением* σ . Эффективное сечение ядерной реакции σ входит в формулу:

$$dN = \sigma N n dx, \quad (5.2)$$

которая имеет следующий смысл: число частиц dN , вступающих в реакцию, пропорционально числу падающих частиц N за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, числу ядер в единице объема n и толщине слоя dx .

Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдет реакция.

Эффективному сечению σ ядра для данной реакции придают такой наглядный вид. Подберем условную площадку, мысленно поместим ее в центр

ядра и будем считать, что всякий раз, когда первоначальная траектория первичной частицы пересекает эту площадку, реакция происходит, а когда не пересекает, реакция не происходит. В качестве единицы измерения сечения обычно выбирается *барн*: $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$, примерно равный квадрату радиуса ядра.

Пример Для реакций α -частиц с ядрами азота в опытах Резерфорда из $N = 10^6$ падающих α -частиц лишь $dN = 20$ вызывали реакцию; длина их пробега составляла $dx = 6,87 \text{ см}$; в 1 см^3 азота при нормальных условиях содержится число Лошмидта молекул $n_0 \approx 2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и, соответственно, $n = 2n_0 = 2 \cdot 2,7 \cdot 10^{19}$ ядер. Подставив эти данные в уравнение (2), получим: $\sigma = 0,055 \cdot \text{барн}$.

Энергия ядерных реакций. Ядерные реакции могут быть как *экзотермическими* (с выделением энергии), так и *эндотермическими* (с поглощением энергии).

Энергетический выход ядерных реакций можно рассчитать на основе закона сохранения энергии. Выделяющаяся энергия ядерной реакции имеет вид $Q = c^2 ((m_A + m_a) - (m_B + m_b)) = 931,5 \text{ (МэВ/а.е.м.)} ((m_A + m_a) - (m_B + m_b))$ (5.3) где m_A и m_a - массы покоя ядра мишени и бомбардирующей частицы; $(m_B + m_b)$ - сумма масс покоя ядер продуктов реакции.

Если $(m_A + m_a) > (m_B + m_b)$, то энергия освобождается, энергетический эффект положителен, реакция *экзотермическая*.

Если $(m_A + m_a) < (m_B + m_b)$, то энергия поглощается, энергетический эффект отрицателен, реакция *эндотермическая*.

Энергия ядерной реакции может быть записана также в другом виде

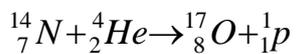
$$Q = (E_{kA} + E_{ka}) - (E_{kB} + E_{kb}), \quad (5.4)$$

где E_{kA} и E_{ka} - кинетические энергии соответственно ядра-мишени и бомбардирующей частицы, E_{kB} и E_{kb} - кинетические энергии вылетающей частицы и ядра-продукта реакции.

При экзотермической реакции $E_{kB} + E_{kb} > E_{kA} + E_{ka}$, при эндотермической реакции

$$E_{kB} + E_{kb} < E_{kA} + E_{ka}.$$

Пример. Определим, выделяется или поглощается энергия при ядерной реакции, осуществленной Резерфордом:



Массы ядер:

$$m_N = 14,00307 \text{ а.е.м.}, m_{He} = 4,0038671 \text{ а.е.м.}, m_p = 1,0081451 \text{ а.е.м.}, m_O = 16,99913 \text{ а.е.м.}$$

Применим закон сохранения релятивистской полной энергии, состоящей из энергии покоя mc^2 и кинетической энергии E_k частиц:

$$m_N c^2 + m_{He} c^2 + E_{kHe} = m_O c^2 + m_p c^2 + E_{kO} + E_{kp}. \quad (\text{П.5.1})$$

Здесь E_{kHe} , E_{kO} и E_{kp} означают кинетические энергии ядер гелия, кислорода и протона соответственно.

Энергия реакции Q равна разности между суммой кинетических энергий ядер-продуктов реакции и кинетической энергией налетающего ядра (полагаем, что ядро-мишень неподвижно):

$$Q = E_{kO} + E_{kp} - E_{kHe}.$$

Из формулы (П. 5.1) следует, что

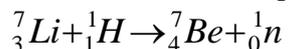
$$Q = c^2 ((m_N + m_{He}) - (m_O + m_p)). \quad (\text{П.5.2})$$

Подставив массы покоя частиц, данные в условии, и воспользовавшись значением энергетического эквивалента $c^2 = 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.}$, получим

$$Q = -0,315 \text{ МэВ.}$$

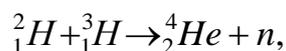
Таким образом, $Q < 0$ и реакция сопровождается поглощением энергии и является эндотермической. Происходит возрастание энергии покоя частиц за счет уменьшения кинетической энергии.

Другой пример реакции, идущей с поглощением энергии:



Здесь $Q = -1,64 \text{ МэВ}$.

Примером экзотермической реакции является реакция синтеза легких элементов:



для которой $Q = 17,6 \text{ МэВ}$.

Согласно предположению Н.Бора ядерные реакции $A(a,b)B$ протекают в *две стадии*. **Первая стадия** – это захват ядром A частицы a , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил, и образование промежуточного ядра C , называемого составным (или компаунд-ядром). Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в возбужденном состоянии. При столкновении нуклонов составного ядра, один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон) или α -частица могут получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате наступает **вторая стадия** ядерной реакции – распад составного ядра на ядро B и частицу b .

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

В настоящее время осуществлено большое количество ядерных реакций: ядерные реакции под действием нейтронов, протонов, α -частиц, дейтронов и других ядер, γ -квантов и электронов.

Ядерные реакции под действием нейтронов. Эти реакции самые многочисленны и имеют большое практическое применение. Для нейтронов кулоновский барьер отсутствует и ядерная реакция может протекать даже при тепловых энергиях налетающих нейтронов.

Так, ряд самых тяжелых ядер (${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$) делится при захвате медленных нейтронов. Эти реакции лежат в основе работы ядерных реакторов на медленных нейтронах.

В отличие от этих ядер, которые делятся под действием медленных нейтронов, ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{232}_{90}\text{Th}$ испытывают деление только под действием быстрых нейтронов, энергия которых достигает нескольких МэВ. На таких реакциях основана работа реакторов на быстрых нейтронах.

Ядерные реакции под действием протонов. В то время, как эффективное сечение σ ядерной реакции под действием медленных нейтронов достаточ-

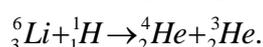
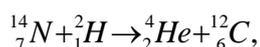
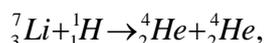
но большое и в несколько раз превышает геометрическое сечение ядра, величина σ для ядерных реакций под действием протонов малых энергий очень мала.

Это объясняется тем, что для протонов существует потенциальный барьер ядра и частица должна преодолеть кулоновское отталкивание. Для осуществления ядерной реакции энергия налетающих протонов должна быть порядка или больше высоты кулоновского потенциального барьера ядер (~ 10 МэВ). Поэтому только при наличии большой собственной энергии протон в состоянии подойти близко к ядру и вызвать ядерную реакцию.

Пример. Реакция под действием протонов, которую используют для получения γ -лучей высоких энергий (17 МэВ) имеет вид: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^8_3\text{Be} + \gamma$.

С помощью ускорения заряженных частиц в ускорителях получают разогнанные до высокой энергии протоны, дейтроны и электроны.

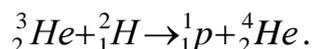
Использование ускоренных протонов привело к преобразованию ядер лития в ядра гелия, ядер азота - в ядра углерода и т.д. Эти реакции происходили по таким схемам



Ядерные реакции под действием дейтронов. При бомбардировке ядер частицами, которые сами являются ядрами, наиболее эффективными являются *дейтроны* (ионы дейтерия), Они представляют собой систему из двух нуклонов (протон и нейтрон), энергия связи которых очень мала (около 2 МэВ).

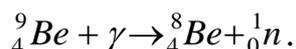
Поэтому при бомбардировке ядер дейтронами с большой вероятностью происходит захват ядром только одного из нуклонов, а второй пролетает дальше.

Пример такой реакции:

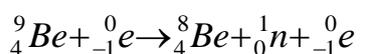


Ядерные реакции под действием γ -квантов. Ядерные реакции могут происходить также и под действием гамма-квантов достаточно больших энергий — так называемые *фотоядерные реакции*. Они становятся возможными, когда энергия гамма-кванта превышает энергию отделения нуклонов от ядра.

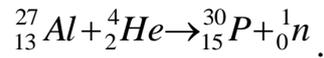
Например, вырывание нейтрона из ядра бериллия (т.н. ядерный фотоэффект):



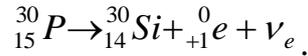
Ядерные реакции под действием ускоренных электронов. Как пример приведем вырывание нейтрона из ядра бериллия под действием электронов с энергией 1,8 МэВ:



Искусственная радиоактивность. При ядерных реакциях могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественном состоянии. Радиоактивность ядра, возникающая в результате ядерной реакции, называется *искусственной*. Она была открыта на ядерной реакции

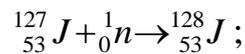


Радиоактивный изотоп фосфора ${}_{15}^{30}\text{P}$ представляет собой источник β^+ -излучения. Его ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:

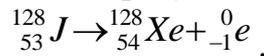


Большинство радиоактивных нуклидов из примерно 1200 известных в природе не встречается, а могут быть получены искусственно в результате ядерных реакций в лабораторных условиях. Активность этих ядер удовлетворяет основному закону радиоактивного распада, т.е. экспоненциально зависит от времени.

Например, при облучении нейтронами йода образуется бета-радиоактивный изотоп йода с периодом полураспада $T_{1/2} = 24,98$ мин,

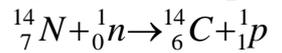


после радиоактивного распада йода образуется стабильный изотоп ксенона:



С помощью искусственной радиоактивности получен ряд трансурановых элементов, т.е. элементов с порядковым номером $Z > 92$. - нептуний, плутоний, америций, кюрий и др. Радиоактивные изотопы различных химических элементов, полученные искусственным путем, широко используются в различных отраслях науки и техники.

Радиоуглеродный метод определения возраста археологических образцов. Остановимся на одной практически важной ядерной реакции, которая происходит в верхних слоях атмосферы под действием нейтронов космического излучения. Азот воздуха при облучении нейтронами превращается в углерод:



При этом возникает радиоуглерод ${}_{6}^{14}\text{C}$ — бета-радиоактивный изотоп с периодом полураспада $T_{1/2} \approx 5730$ лет. По химическим свойствам радиоуглерод ничем не отличается от обычного углерода, соединяясь с кислородом, он тоже образует углекислый газ CO_2 . Таким образом, часть молекул углекислого газа в воздухе оказывается радиоактивной.

Как известно, в процессе фотосинтеза живое растение усваивает из воздуха углекислый газ CO_2 . Основная часть углерода, входящего в состав углекислоты, является стабильными изотопами ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{13}\text{C}$. Однако вместе с ними растениями усваивается и радиоуглерод ${}^{14}\text{C}$, откладываясь в их листьях, ветвях и стволах. Затем в результате круговорота веществ в природе радиоуглерод усваивается животными и человеком, в состав костей которых входят углеродосодержащие как органические, так и неорганические (CaCO_3) вещества.

Поскольку средняя интенсивность космического излучения в атмосфере мало меняется со временем, то и соотношение радиоактивного и стабильных изотопов углерода в живых организмах также является неизменным, не зависящим от исторической эпохи. Равновесная концентрация радиоуглерода ${}^{14}\text{C}$ одинакова в разных местах земного шара и активность приблизительно равна $A_0 = 14$ распадов в минуту на каждый грамм углерода.

Пока организм живет, убыль радиоуглерода из-за его радиоактивного распада пополняется за счет участия в круговороте веществ в природе. С гибелью организма (срубленное дерево, умершее животное) процесс усвоения углерода из внешней среды прекращается, радиоактивный углерод $^{14}_6\text{C}$ постепенно распадается, в результате его содержание в останках постепенно уменьшается по закону радиоактивного распада: По такому же закону меняется активность $A(t)$ радиоуглерода. Следовательно, измерив активность радиоуглерода в останках растений и животных (в древесине, костях и т. п.) методами дозиметрии или масс-спектрометрическим методом, можно определить время, прошедшее с момента прекращения жизни организма, то есть установить возраст данных объектов. Радиоуглеродный метод определения возраста останков растений и живых организмов прошел сверку с данными древних рукописей и считается надежным методом.

Пример. Рассмотрим некую воображаемую ситуацию. Предположим, что в реке Днепр вблизи острова Хортица были обнаружены остатки деревянного корпуса лодки «Чайка» запорожских казаков. В лаборатории сожжем кусочек древесины из корпуса лодки, измерим активность золы (минеральных остатков, в т.ч. углерода) и получим значение активности - например, $A(t) = 13,42$ распадов в минуту на грамм вещества.

Активность изотопа изменяется со временем по закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \text{ где } A_0 = N_0 \ln 2 - \text{начальная активность.}$$

С учетом того, что $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ можно записать:

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

откуда выразим время, прошедшее с начала распада

$$t = \frac{T_{1/2} \ln \frac{A_0}{A(t)}}{\ln 2}. \quad (\text{П.5.3})$$

Здесь $A_0 = 14$ расп/мин – равновесная активность.

Зная период полураспада радиоуглерода $T_{1/2} = 5730$ лет, по формуле (П.5.3) находим

$$t = 5730 \frac{\ln(14/13,42)}{\ln 2} = 5730 \frac{0,042}{0,693} \approx 350(\text{лет})$$

Таким образом определяем, что лодка пролежала в воде 350 лет.

§ 6. Реакция деления тяжелых ядер

В 1938 г работами немецких физиков О.Гана, Ф. Штрассмана, Л. Мейтнер и английского физика О.Фриша было установлено, что в случае захвата нейтрона ядром урана оно делится на две примерно равные части. Это явление получило название *деления ядер*, а образующиеся ядра — *осколков деления*.

Дальнейшие исследования показали, что при делении ядра урана могут возникать около 100 различных изотопов с массовыми числами примерно от 90 до 145.

Наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых относятся как 2:3 (массовые числа 95 и 141).

Реакцию деления атомного ядра удалось объяснить, основываясь на капельной модели ядра (датский физик Н. Бор, американский физик Дж. А. Ун-лер, русский физик Я. И. Френкель)

В этой модели ядро рассматривается как капля электрически заряженной несжимаемой жидкости. Кроме ядерных сил, действующих между всеми нуклонами ядра, протоны испытывают дополнительное электростатическое отталкивание, вследствие которого они располагаются на периферии ядра. В невозбужденном состоянии силы электростатического отталкивания скомпенсированы, поэтому ядро имеет форму шара (рис. 6.1).

После захвата ядром ${}^{238}_{92}\text{U}$ нейтрона его энергия равномерно распределяется между всеми нуклонами, а само ядро деформируется и начинает колебаться. Если энергия возбуждения достаточно велика, то деформация ядра при колебаниях может быть настолько большой, что в нем образуется перетяжка, аналогичная перетяжке между двумя частями раздваивающейся капли жидкости. Ядерные силы, действующие в узкой перетяжке, уже не могут противостоять

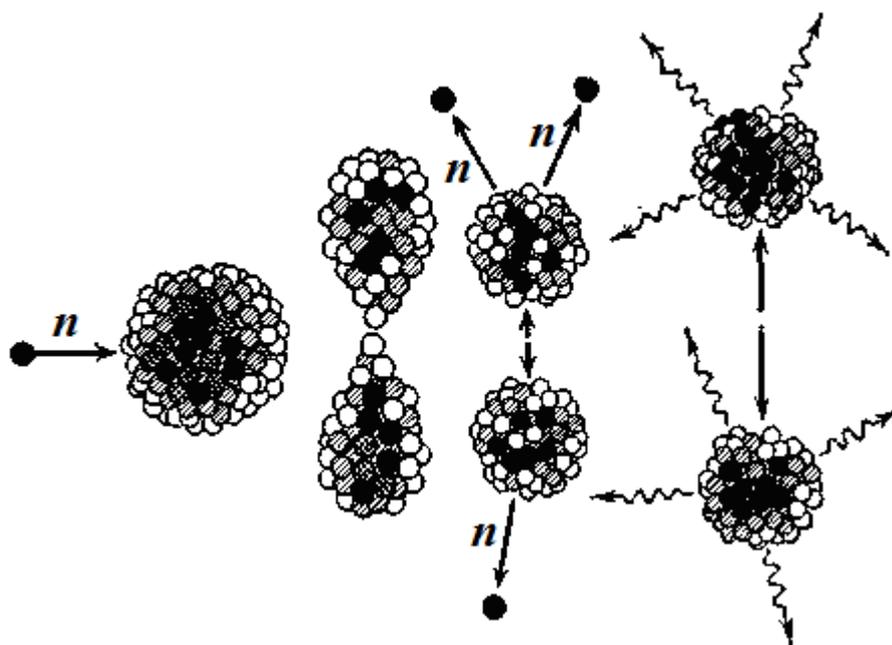


Рис. 6.1.

значительной кулоновской силе отталкивания частей ядра. Перетяжка разрывается, и ядро распадается на два "осколка", которые разлетаются в противоположные стороны со скоростью, примерно равной $1/30$ скорости света.

Чтобы ядру разделиться, оно должно преодолеть энергетический барьер, наз. *барьером деления* (рис. 6.2).

Эту энергию в слу-

чае вынужденного деления ядро получает извне, например, при захвате нейтро-

на. На рис 6.2 изображена потенциальная энергия ядра в зависимости от величины деформации и изменение формы ядра в процессе деления.

Возможно также спонтанное деление тяжелых ядер. В случае спонтанного деления происходит известное из квантовой механики туннельное просачивание ядра сквозь барьер.

Оценку выделяющей при делении ядра энергии можно сделать с помощью удельной энергии связи

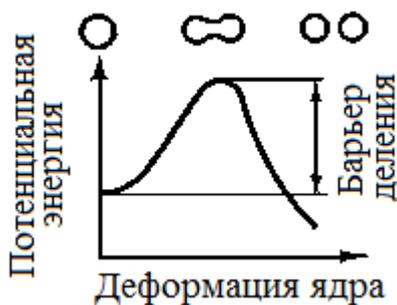


Рис. 6.2.

нуклонов в ядре (см. §2. Рис. 2.1). Удельная энергия связи нуклонов в ядрах с массовым числом $A \approx 240$ порядка 7,6 МэВ/нуклон, в то время как в ядрах с массовыми числами $A = 90 - 145$ удельная энергия примерно равна 8,5 МэВ/нуклон. Следовательно, при делении ядра урана освобождается энергия порядка 0,9 МэВ/нуклон или $0,9 \cdot 238 \approx 210$ МэВ на одно ядро урана.

Пример. Иногда приводят такие образные сравнения:

1). 1 г угля при сгорании дает тепло, достаточное для того, чтобы нагреть до кипения ≈ 10 г воды. При ядерном расщеплении 1 г урана выделяется тепло, достаточное для того, чтобы довести до кипения 30 т воды. т. е. ядерное горючее примерно в миллион раз более эффективно.

2) При полном делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется такая же энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти. Она составляет $\approx 8 \cdot 10^{10}$ Дж = 22 МВт-ч.

Основная часть энергии деления должна освобождаться в форме кинетической энергии осколков деления. Если в результате акта деления осколки находятся друг от друга на расстоянии r , при котором ядерные силы притяжения уже не действуют, то проявляется электростатическая кулоновская энергия отталкивания заряженных ядер — осколков деления. Потенциальная энергия взаимодействия зарядов Z_1e и Z_2e равна

$$E_p = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (6.1)$$

где Z_1 Z_2 - заряды осколков.

Расстояние r между осколками в момент завершения деления, очевидно, будет $r = R_1 + R_2$, где R_1 и R_2 - радиусы ядер-осколков, которые можно вычислить по формуле (1.9) $R = r_0 A^{1/3}$. Здесь r_0 - постоянная, найденная из экспериментов,

$r_0 = (1,2 - 1,5)10^{-15}$ м. Тогда $R = 1,4 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$ м.

Если полагать, что деление ядра урана ${}_{92}^{238}U$ произошло на два одинаковых осколка ($Z_1 = Z_2 = 92/2 = 46$ и $R_1 = R_2$, $A_1 = A_2 = 238/2 = 119$),

то получим, что

$$E_p \approx 200 \text{ МэВ.}$$

Очевидно, что потенциальная энергия E_p отталкивания ядер-осколков должна перейти в их кинетическую энергию E_k и осколки деления должны разлетаться с большими скоростями.

Имеющие огромную скорость разлетающиеся осколки тормозятся окружающей средой. Кинетическая энергия осколков превращается во внутреннюю энергию среды, которая нагревается. Таким образом, деление ядер урана сопровождается выделением большого количества теплоты.

Испускание нейтронов в процессе деления. Очень важная особенность ядерного деления — испускание в процессе деления двух-трех вторичных нейтронов, называемых *нейтронами деления*.

Именно благодаря этому оказалось возможным создать при определённых условиях цепную реакцию деления.

Установлено, что отношение числа нейтронов к числу протонов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков относительное число нейтронов оказывается большим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева.

Говорят, что осколки деления сильно перегружены нейтронами.

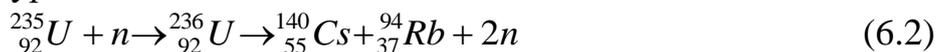
В результате при делении каждого ядра высвобождается несколько нейтронов.

Их энергия имеет различные значения — от нескольких МэВ до совсем малых, близких к нулю.

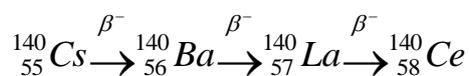
Большинство нейтронов испускается мгновенно (за время, меньшее 10^{-14} с). Часть (около 0,75%) нейтронов, получившая название *запаздывающих нейтронов*, испускается не мгновенно, а с запаздыванием от нескольких миллисекунд до нескольких минут.

Несмотря на малое количество, запаздывающие нейтроны играют существенную роль в ядерных реакторах. Благодаря большому запаздыванию, эти нейтроны примерно на два порядка и более, увеличивают время жизни нейтронов одного поколения в ядерном реакторе и тем самым создают возможность управления самоподдерживающейся цепной реакцией деления.

Испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными и 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



осколок деления ${}_{55}^{140}\text{Cs}$ в результате трех актов β^- -распада превращается в стабильный изотоп церия:



При делении ядра урана освобождается два-три нейтрона. При благоприятных условиях эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. На этом этапе появятся уже от 4 до 9 нейтронов, способных вызвать новые распады ядер урана и т. д.

Поскольку в каждом акте испускается нейтронов больше, чем поглощается, то при делении ядер урана может возникнуть самоподдерживающаяся *цепная реакция*, т. е. процесс, в котором определенная ядерная реакция вызывает последующие реакции такого же типа.

Вероятность деления ядер определяется энергией нейтронов.

В зависимости от энергии нейтроны деления классифицируют как медленные и быстрые. Нейтроны с энергией до 0,1 МэВ называют *медленными*, с энергией (0,1 – 200) МэВ - *быстрыми*.

В том числе медленными или *тепловыми* называют нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с атомами вещества. Их энергия равна $\sim 0,025$ эв.

Природный уран содержит практически 2 изотопа: ^{238}U (99,27%) и ^{235}U (0,72%). Третий изотоп - ^{234}U присутствует в исчезающе малых количествах (около 0,006 %), его можно не учитывать.

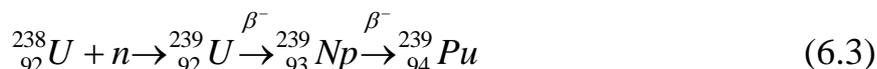
Ядра ^{235}U делятся под влиянием как быстрых, так и медленных нейтронов, причем реакция деления наиболее интенсивно идет на медленных (тепловых) нейтронах.

Для тепловых нейтронов эффективное сечение деления ^{235}U составляет 580 барн.

Ядра же ^{238}U могут делиться только под влиянием нейтронов с энергией более 1 МэВ.

Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление ^{238}U . Остальные нейтроны захватываются этим изотопом без последующего его деления. В результате вначале образуется составное ядро ^{239}U , энергия возбуждения которого выделяется в виде γ -фотона. Поэтому такой процесс называется *радиационным захватом*.

Образовавшееся в результате захвата нейтрона ядро ^{239}U нестабильно. Испытывая β^- распад (период полураспада 23 мин), оно превращается в ядро трансуранового элемента нептуния ^{239}Np , который также претерпевает β^- -- распад (период полураспада около 2 дней), превращаясь в плутоний ^{239}Pu :



Плутоний α -радиоактивен, однако его период полураспада так велик (24 400 лет), что его можно считать практически стабильным.

Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием нейтронов так же, как ^{235}U . Поэтому с помощью ^{239}Pu может быть осуществлена цепная реакция.

При делении ^{238}U или ^{235}U быстрым нейтроном вылетает ГИП в среднем 2,5 нейтрона с энергией от 0,1 МэВ до 14 МэВ. Можно ожидать, что при отсутствии потерь нейтронов в природном уране могла бы развиваться ядерная цепная реакция.

Однако потери нейтронов существуют. Во-первых, захватывать нейтроны без деления могут ядра ^{238}U . Состав природного урана таков, что на каждое делящееся медленными нейтронами ядро ^{235}U приходится 140 ядер неделящегося ^{238}U .

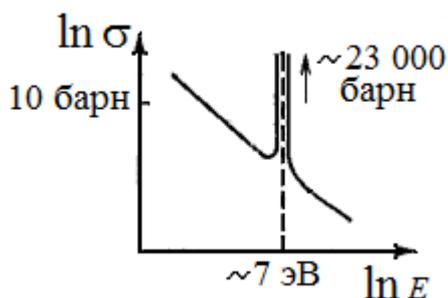


Рис. 6.3.

На рис. 6.3 схематически изображена энергетическая зависимость сечения σ реакции радиационного захвата нейтрона ядром ^{238}U (масштаб логарифмический). Эффективное сечение захвата резко возрастает при энергии нейтронов, равной ~ 7 эВ, достигая 23 000 барн.

Резонанс поглощения объясняется тем, что энергия, добавляемая нейтроном в составное яд-

ро, при этом строго равна той энергии, которая необходима для перевода нового ядра на возбужденный энергетический уровень.

Во-вторых, при столкновении нейтронов с ядром происходит неупругое рассеяние, при котором энергия нейтронов становится ниже 1 МэВ, и они уже не могут вызвать деление ^{238}U . Большая часть таких нейтронов испытывает радиационный захват или вылетает наружу.

В результате обоих процессов **ядерная цепная реакция в природном уране не может развиваться.**

Приведенные данные показывают, что цепную ядерную реакцию в уране можно осуществить двумя способами: либо используя чистый уран-235, либо используя природный уран, но с обеспечением определенных условий.

Первый способ был использован для изготовления атомной бомбы, второй – для построения ядерных реакторов.

Коэффициент размножения нейтронов. Развитие цепной реакции характеризуется так называемым коэффициентом размножения нейтронов k , который измеряется отношением числа N_i нейтронов, вызывающих деление ядер вещества на одном из этапов реакции, к числу N_{i-1} нейтронов, вызвавших деление на предыдущем этапе реакции:

$$k = N_i/N_{i-1}. \quad (6.4)$$

Коэффициент размножения определяется не только числом образующихся в каждом элементарном акте нейтронов, но и условиями, в которых протекает реакция: часть образующихся нейтронов поглощается посторонними ядрами или уходит за пределы зоны реакции.

k максимально, если вещество имеет шарообразную форму, поскольку в этом случае потеря нейтронов через поверхность будет наименьшей.

Масса делящегося вещества, в котором цепная реакция идет с коэффициентом размножения $k = 1$, называется *критической массой*.

Значение критической массы определяется геометрией системы и внешним окружением. Так, для урана ^{235}U критическая масса равна $m_{\text{кр}} = 47$ кг (шар диаметром 17 см), для плутония ^{239}Pu $m_{\text{кр}} = 11$ кг, для урана ^{233}U $m_{\text{кр}} = 16$ кг. В небольших кусках урана большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу.

Найдем зависимость от времени числа нейтронов, которые рождаются в результате деления ядер.

Пусть в какой-либо момент времени число нейтронов в данном поколении равно N . Пусть также через τ обозначено среднее время жизни одного поколения нейтронов. Тогда через время τ количество нейтронов будет равно kN (k – коэффициент размножения нейтронов), а разница, т.е. прирост числа нейтронов за одно поколение составит

$$kN - N = (k - 1) N. \quad (6.5)$$

Разделив эту величину на τ , определим прирост числа нейтронов за единицу времени, т.е. скорость нарастания цепной реакции:

$$dN/dt = N(k - 1)/\tau \quad (6.6)$$

Решение уравнения (6.62) дает зависимость числа нейтронов от времени

$$N = N_0 \exp((k - 1)t/\tau), \quad (6.7)$$

где N_0 — число нейтронов в момент времени $t = 0$, а N — их число в момент времени t .

Как следует из формулы (6.7), число N определяется знаком $(k - 1)$.

При коэффициенте размножения $k = 1$ идет стационарная *самоподдерживающаяся* цепная реакция деления, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется, и цепная реакция будет управляемой. Такой режим обеспечивается в ядерных реакторах.

Если масса ядерного топлива меньше критической массы, то коэффициент размножения $k < 1$; каждое новое поколение вызывает все меньшее и меньшее число делений, цепная реакция деления затухает, поток нейтронов и мощность реактора уменьшаются.

Если же масса ядерного топлива больше критической, то коэффициент размножения $k > 1$. При этом идет *развивающаяся* реакция, каждое новое поколение нейтронов вызывает все большее число делений или, как говорят, происходит «разгон» цепной реакции деления. Число делений, поток нейтронов и мощность реактора растут с течением времени по экспоненте. При некоторых условиях может произойти ядерный взрыв, сопровождающийся огромным выделением энергии и повышением температуры окружающей среды до нескольких миллионов градусов. Взрыв сопровождается также интенсивным радиоактивным излучением.

Цепная реакция такого рода происходит при взрыве атомной бомбы. Принцип устройства атомной бомбы хорошо известен. Ядерный заряд (поз.1 на рис. 6.4) такой бомбы представляет собой два куска чистого ^{235}U или ^{239}Pu . Масса каждого куска меньше критической, вследствие чего реакция не возникает.

Чтобы вызвать взрыв, части ядерного заряда соединяют в один кусок с массой, большей критической. Для соединения используют обычное взрывчатое вещество (поз.2 на рис. 6.4). Все устройство заключено в массивную металлическую оболочку (поз. 3 на рис. 6.4), которая служит отражателем нейтронов, а также удерживает ядерный заряд от распыления до тех пор, пока не прореагирует максимальное число ядер. Начальный нейтрон для развития цепной реакции всегда найдется в земной атмосфере, в которой нейтроны рождаются космическими лучами. Для надежности в качестве источника нейтронов используют также микроскопическое количество смеси радия с бериллием.

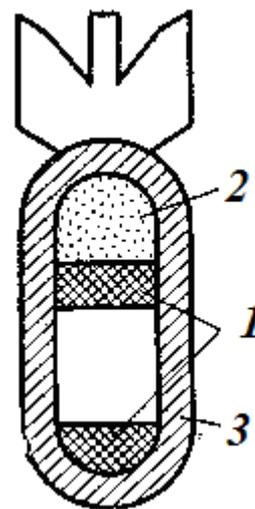


Рис. 6.4.

Пример. Принимая коэффициент размножения нейтронов в реакторе на тепловых нейтронах $k = 1,005$, а среднее время жизни одного поколения нейтронов $\tau = 10^{-3}$ с, определить, во сколько раз увеличивается число нейтронов ядерной реакции за время $t = 1$ с.

Как следует из формулы (6.7):

$$N/N_0 = \exp((k - 1)t/\tau) = \exp(0,005/0,001) = \exp 5 \approx 150 \text{ (раз)}.$$

§ 7. Атомная энергетика

Как уже отмечалось в § 6, на быстрых нейтронах цепная реакция в природном уране идти не может.

Если же нейтроны замедлить до тепловых скоростей (с энергией около 0,025 эВ) и облучать ими природный уран, то вероятность реакций деления урана-235 тепловыми нейтронами будет почти в 200 раз больше вероятности захвата тепловых нейтронов ядрами урана-238.

Хотя столкновения тепловых нейтронов с ядрами ^{238}U в природном уране будут происходить в 140 раз чаще, чем с ядрами ^{235}U (делящейся компоненты ^{235}U содержится всего около 0,7 %), все же радиационный захват будет происходить реже, чем деление ядер.

Поэтому, если поместить небольшие блоки урана в вещество - *замедлитель*, способное превращать быстрые нейтроны деления в тепловые, то цепная реакция может начаться и в естественном уране.

Замедление нейтронов. Сталкиваясь с тяжелыми ядрами урана, нейтрон при каждом столкновении теряет незначительную часть своей энергии. Теряя энергию от первоначальной 1 МэВ «мелкими» шагами, после многих столкновений замедляющийся нейтрон наверняка будет иметь энергию ~ 7 эВ, при этом попадет в резонансную область (см. рис. 6.3) и обязательно поглотится.

Для того, чтобы избежать резонансного захвата нейтрона, надо использовать для замедления очень легкие ядра, на которых замедление идет «крупными шагами», что резко увеличивает вероятность благополучного «проскакивания» нейтрона через резонансную область энергий.

Как известно из теории упругого удара, хорошими замедлителями нейтронов могут быть частицы с массами, близкими к массе нейтрона. Максимальное количество энергии теряется в случае, когда обе частицы имеют одинаковую массу. Следовательно, максимальная передача энергии нейтроном будет при его столкновении с ядром водорода - протоном (массы протона и нейтрона примерно одинаковы).

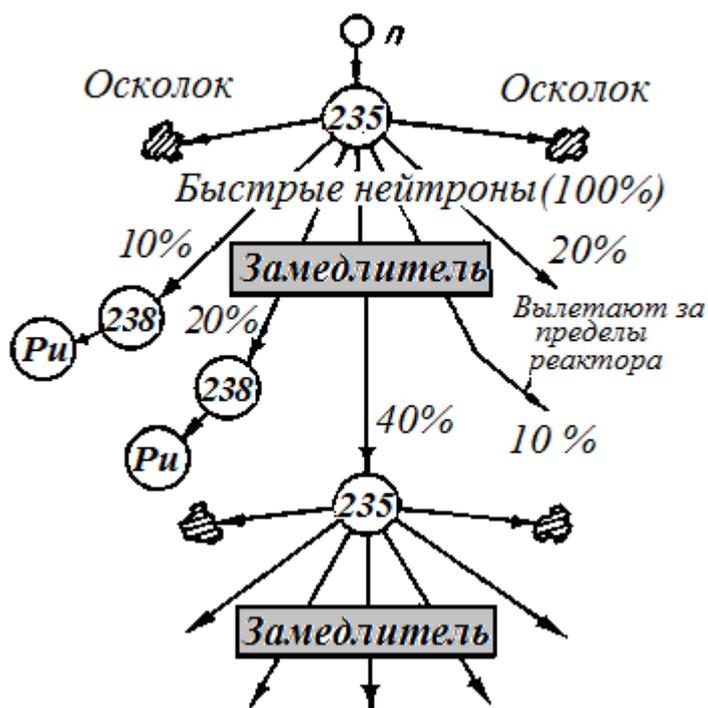


Рис. 7.1.

Пример. Замедление нейтронов.

Будем считать, что нейтрон и ядро атома замедлителя представляют собой два упругих шара, которые испытывают центральное абсолютно упругое соударение.

Если массы нейтрона и ядра равны соответственно m и M , шар-нейтрон движется со скоростью v , а шар-ядро, для простоты задачи, покоится, то скорость ядра после удара равна (см., например, учебное пособие И.П.Гаркуша, В.П.Куриной, Физика, ч.1, Механика, § 22)

$$u = \frac{2m}{m + M}v \quad (\text{П.7.1})$$

Кинетическая энергия, потерянная нейтроном ΔE_k , равна энергии, которую получило ядро замедлителя:

$$\Delta E_k = \frac{Mu^2}{2}.$$

Обозначим через r отношение потерянной нейтроном энергии к его первоначальной энергии:

$$r = \frac{\Delta E_k}{E_k} = \frac{Mu^2}{2} \cdot \frac{2}{mv^2} = \frac{4mM}{(m + M)^2} \quad (\text{П.7.2})$$

После одного соударения кинетическая энергия нейтрона станет равной, как следует из формулы (П.2)

$$E_{k1} = E_k - \Delta E_k = E_k(1 - r).$$

После второго соударения

$$E_{k2} = E_{k1} - \Delta E_{k1} = E_{k1}(1 - r) = E_k(1 - r)^2.$$

Очевидно, после n -го столкновения у нейтрона будет кинетическая энергия

$$E_{kn} = E_k(1 - r)^n. \quad (\text{П.7.3})$$

Пусть первоначальная энергия нейтрона была $E_k = 1,75$ МэВ и нейтрон замедлился до тепловых энергий $E_{kn} = 0,025$ эВ. Пусть замедлителем служит тяжелая вода. Тогда ядрами мишени будут служить ядра дейтерия ${}^2_1\text{H}$, т.е. масса ядра замедлителя $M = 2m$.

$$\text{Получим } r = \frac{4m(2m)}{(m + 2m)^2} = \frac{8}{9}, \quad \text{соответственно } 1 - r = \frac{1}{9}.$$

Определим, сколько потребуется столкновений до полного замедления нейтрона. Из формулы (П.7.3) имеем: $0,025 = \frac{1,75 \cdot 10^6}{9^n}$. Откуда $n \approx 8$. Т.е. всего за 8 соударений кинетическая энергия нейтрона уменьшается с 1,75 МэВ до 0,025 эВ.

Вот почему в качестве замедлителя используются вещества с малым атомным весом - тяжёлая вода, бериллий, графит. В этом случае быстрые нейтроны при соударениях с атомными ядрами теряют энергию крупными порциями.

Таким образом, наиболее эффективными являются водородсодержащие замедлители. Хотя водород является наиболее эффективным замедлителем, однако про тоны не только замедляют нейтроны, но и поглощают их, превращаясь в дейтроны. Таким образом, водород не всегда пригоден в качестве замедляющей среды в ядерном реакторе. Хорошо замедляют и почти не поглощают

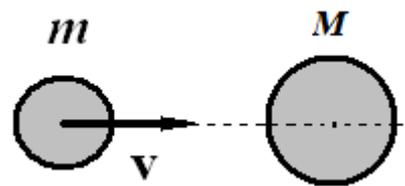


Рис. П.7.1

нейтроны ядра дейтерия. Ядра кислорода также плохо поглощают нейтроны, и в этом смысле наличие их в воде не мешает процессу размножения.

Поэтому отличным замедлителем является *тяжелая вода* D_2O , состоящая из двух атомов дейтерия и одного атома кислорода. Тяжелая вода в свободном виде не встречается, а входит в состав обычной воды и составляет 0,016 % всей воды мирового океана. Выделение тяжелой воды из обычной требует больших затрат энергии.

Хорошим замедлителем является очень *чистый графит*. Его легче очистить от примесей, поглощающих нейтроны, чем выделить тяжелую воду из обычной. Именно графит использовался в первом ядерном реакторе, построенном под руководством Э. Ферми в Чикагском университете в 1942 г.

Если использовать в реакторе не естественный уран, а обогащенный изотопом ^{235}U , что и делается в современных реакторах, то в этом случае в качестве замедлителя может быть использована *дистиллированная*, хорошо очищенная от примесей *вода*. Обычная вода замедляет нейтроны не хуже тяжелой воды, но поглощает их в гораздо большем количестве. Это устраняет задачу выделения тяжелой воды, хотя, с другой стороны, обогащение урана изотопом ^{235}U технически тоже достаточно трудоемкая задача.

Запаздывающие нейтроны и управление реактором. Если бы все нейтроны выделялись мгновенно, то при k несколько большим единицы цепная реакция развивалась бы так быстро, что регулировать мощность реактора было бы невозможно.

Управление реактором становится возможным благодаря наличию при делении небольшого числа *запаздывающих нейтронов* (на время от десятых долей секунды до десятков секунд, среднее время запаздывания составляет примерно 12 с).

Всего выделяется до 1% запаздывающих нейтронов, реактор работает с коэффициентом размножения в пределах от 1 до 1,01 и в этом интервале хорошо регулируется.

Управление ходом цепной реакции осуществляется с помощью *управляющих стержней* (из кадмия или бористой стали), которые могут автоматически погружаться на разную глубину в активную зону. Погружение таких стержней, которые сильно поглощают нейтроны, уменьшает размножение нейтронов и приводит к затуханию цепной реакции, а их выведение из зоны, наоборот, содействует развитию реакции. На каждом реакторе есть запасная система таких же стержней для введения их в зону при аварийной ситуации.

Ядерный реактор. *Реактором называется устройство, в котором поддерживается управляемая цепная реакция деления.* Составными частями любого реактора являются: а) активная зона (ядерное топливо и замедлитель), окруженная отражателем; б) теплоноситель; в) система регулирования хода цепной реакции; г) радиационная защита персонала от излучений и др.

Существует несколько различных конструкций действующих реакторов. Во многих из них используется обычная (легкая) вода. Эта вода может кипеть в самом реакторе, а образующийся пар поступает непосредственно в турбину

электрического генератора. Достоинством конструкции такого *реактора с кипящей водой* является низкое давление в системе.

Тепловой КПД можно увеличить, повышая давление воды, что позволяет достичь более высоких температур без кипения. Такой тип *реактора*, охлаждаемый водой под давлением,

называется *водо-водяным энергетическим реактором* (сокращенно, ВВЭР). Его конструкция должна быть более прочной, чтобы надежно выдерживать высокое давление.

Активная зона водо-водяного реактора набрана из тепловыделяющих сборок, заполненных пластинчатыми или цилиндрическими тепловыделяющими элементами.

Поскольку легкая вода (H_2O) поглощает нейтроны, в реакторах на воде приходится использовать горючее, обогащенное изотопом ^{235}U .

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) водо-водяных реакторов изготавливаются в виде трубок (или пластин), которые содержат уран ^{238}U , обогащенный ураном ^{235}U . Такие трубки трех размеров вставляют одна в другую (по 3 штуки в блоке), а сами блоки размещают в бериллиево-стальном корпусе активной зоны (около сотни) (рис. 7.2).

Вода, проходя снизу вверх через зазоры между ТВЭЛами, охлаждает их. Таким образом, она выполняет функцию теплоносителя, замедлителя и отражателя.

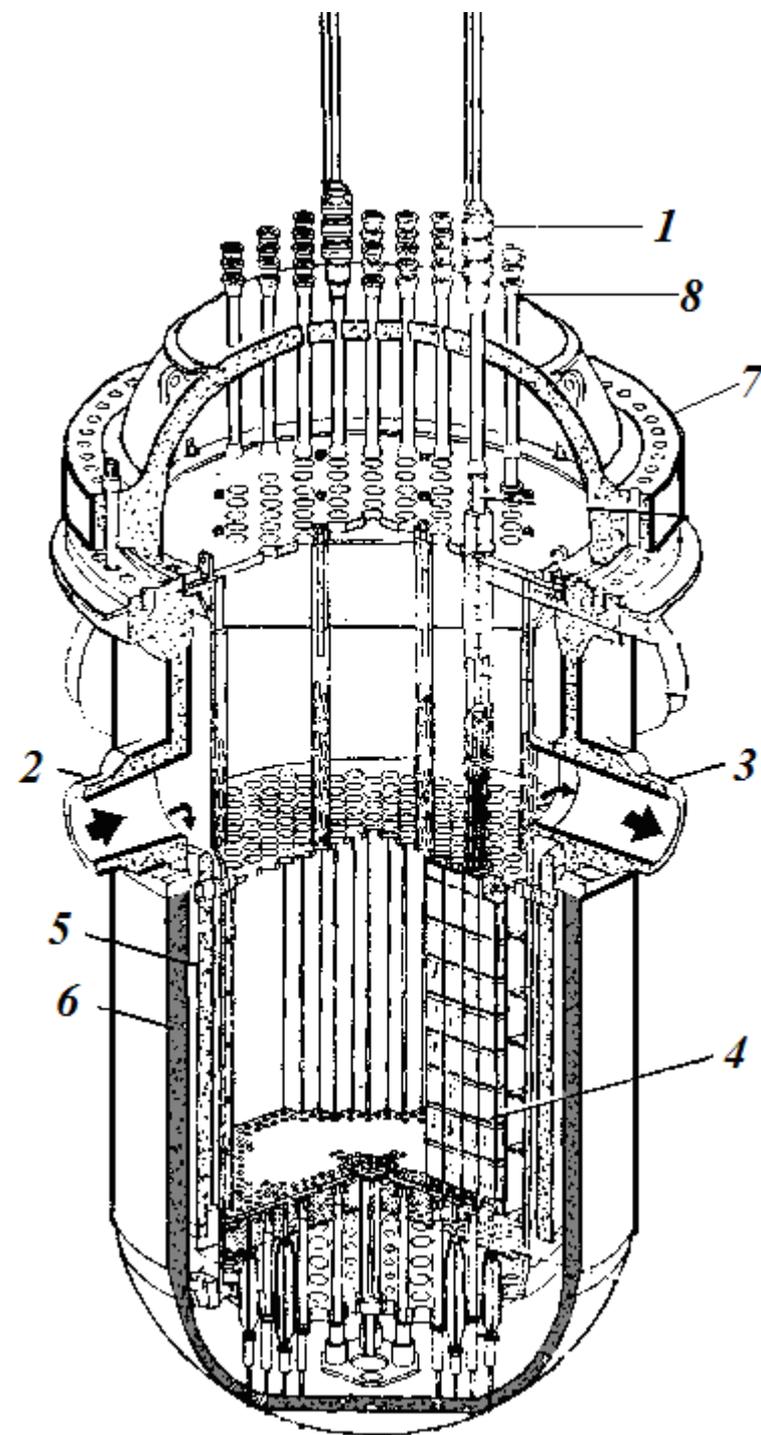


Рис. 7.2.

На рис 7.2 показана схема устройство ядерного реактора на воде под давлением фирмы Westinghouse Electric Corp.

Здесь использованы такие обозначения: 1 - регулирующий стержень, 2 - входное сопло для воды, 3 - выходное сопло, 4 - ядерное горючее (пластинчатые

тые топливные сборки), 5 - тепловой экран, 6 - корпус реактора, 7 - крышка реактора, 8 - отверстия для контрольно-измерительной аппаратуры.

Система защиты от ионизирующих излучений на ядерном реакторе состоит из бериллиевых и свинцовых листов и толстых бетонных плит или многометровых слоев воды, которые окружают активную зону.

Для уменьшения потерь нейтронов и уменьшения критических параметров делящегося вещества его окружают *отражателем* — слоем неделящегося вещества, который возвращает в активную зону большую часть вылетевших из нее нейтронов.

Регулирующие и аварийные стержни изготавливают из бористой стали или кадмия, то есть из веществ, которые хорошо поглощают нейтроны. Полное введение их в активную зону полностью прекращает работу реактора.

Отвод тепла из активной зоны реактора к паровой турбине электростанции обеспечивается, как правило, двумя замкнутыми контурами циркуляции воды (рис. 7.3). Каналы всех ТВЭЛов реактора, соединительные трубопроводы, змеевик и насос образуют *первый контур*. В нем вода циркулирует под давлением 100 атм ($\approx 10^7$ Па), при входе в тепловыделяющие элементы температура воды

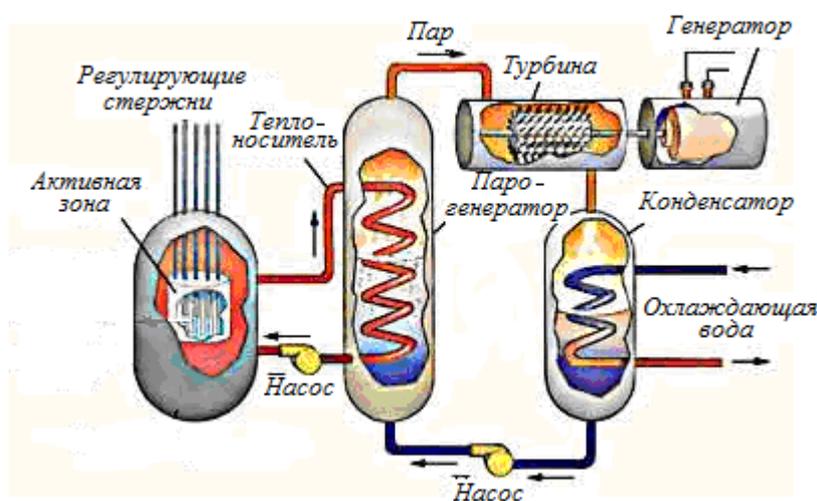


Рис. 7.3.

120 °С, на выходе 270 °С. Парогенератор, в котором другая вода кипит и дает пар, паропровод, турбина, конденсатор и насос, который подает конденсат в теплообменник, составляют *второй контур*. Турбина приводит в движение генератор электрического тока.

Чтобы повысить эффективность деления нейтронами водород в замедлителе необходимо заменить дейтерием, т.е. использовать тяжелую воду. В *тяжеловодных реакторах* в качестве

горючего можно использовать необогащенный уран. Применение более дешевого горючего компенсируется более высокой стоимостью замедлителя, для которого необходимо почти 99%-ное содержание тяжелой воды.

Для более полного использования выделяющегося в реакторе тепла были разработаны *газовые реакторы*. В них замедлителем является графит, а в качестве теплоносителя используются различные газы (CO_2 , He).

Воспроизводство ядерного горючего. Если все реакторы будут работать на обогащенном уране, т. е. на тепловых нейтронах, то при нынешнем уровне использования ядерной энергии существующие запасы урана будут израсходованы в течение нескольких десятилетий. Проблему ядерного горючего можно преодолеть, если построить *реакторы-размножители*.

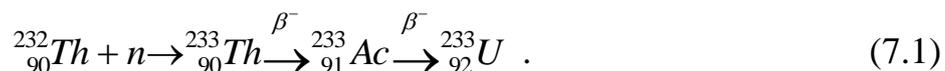
Это *реакторы на быстрых нейтронах*, в которых нет замедлителя нейтронов. Поэтому в качестве теплоносителя здесь используется жидкий натрий. Основное преимущество такого реактора состоит в том, что в нем может одновременно не только сжигаться, но и производиться ядерное топливо.

Рассмотрим, например, активную зону реактора, у которого изотоп ^{239}Pu является топливом, а кроме того в зоне имеется изотоп урана ^{238}U . При делении ^{239}Pu возникает в среднем 2,9 нейтронов. Один из этих быстрых нейтронов может вызвать деление другого ядра ^{239}Pu , а один — захватиться ядром ^{238}U и привести к реакции (6.3) с образованием плутония.

Таким образом, расход ^{238}U сопровождается образованием нового ядерного горючего, причем для дальнейшего использования плутоний может быть отделен от урана чисто химическим способом, что очень важно (напомним, что разделение изотопов ^{235}U и ^{238}U химическим путем невозможно!).

Такие реакторы называются *реакторами-размножителями* или *бридерами*. Вырабатывая энергию, реактор-размножитель может производить больше ядерного горючего, чем потребляет. Оценки показывают, что количество ядерного топлива в бридерах может удваиваться за 7-10 лет.

Другой вид ядерного топлива, которое можно получить искусственным путем в реакторе, — это уран-233, образующийся при облучении нейтронами тория-232:



Конечный продукт этого процесса — делящийся материал уран-233. Он α — радиоактивен с периодом полураспада $T_{1/2} = 162$ тыс. лет., т.е. является практически стабильным изотопом.

В земной коре тория в несколько раз больше, чем урана. Природный торий, практически состоящий только из одного изотопа ${}_{90}^{232}\text{Th}$, может служить хорошим сырьем для получения ядерного топлива.

Создание реакторов на быстрых нейтронах связано со значительными техническими трудностями, несмотря на это, строительство дорогостоящих реакторов на быстрых нейтронах экономически выгодно.

Пример. Мощный реактор-размножитель (бридер) во Франции носит название «Суперфеникс». Вот некоторые параметры этого реактора. Электрическая мощность 1,24 ГВт. В качестве топлива используется смесь плутония-239 и урана-238. Коэффициент воспроизводства равен 1,24. Реактор работает на быстрых нейтронах, что приводит к большой компактности: объем активной зоны реактора порядка 10 м^3 . Размеры «Суперфеникса»: внутренний диаметр — 64 м, высота — около 80 м. Активная зона реактора представляет собой гексагональную призму, собранную на тонких стержнях длиной 5,4 м. Замена сгоревших элементов на новые производится один раз в год. Теплоноситель — жидкий натрий. Натрий плавится при температуре $98 \text{ }^\circ\text{C}$ и кипит при $882 \text{ }^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Температура жидкого натрия в первом контуре «Суперфеникса» не превышает $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Первичный трубопровод — натриевый, он забирает тепло из реактора и отдает его в котел, откуда тепло забирается вторым, также натриевым, трубопроводом. Во втором теплообменнике тепло забирает третий трубопровод, по которому циркулирует водопаровая смесь. Выходящий перегретый пар выпускается под давлением 180 атм. и при температуре $490 \text{ }^\circ\text{C}$.

Проблемы охлаждения. АЭС потребляют огромное количество технической воды, прежде всего, для охлаждения узлов и агрегатов. Поэтому АЭС строятся на берегах больших рек или озер. Поскольку вода движется по замкнутому контуру (т. е. не сливается в реку, а снова идет для охлаждения агрегатов), то ее необходимо охлаждать.

Рядом с энергоблоками на АЭС, а также на ТЭС, можно видеть огромные башни гиперболоидной формы, из которых поднимаются облака пара. Это *градирни* (рис. 7.4).

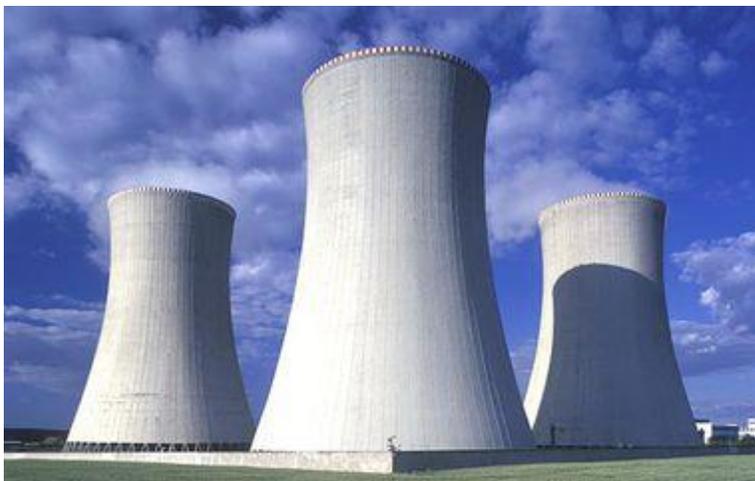


Рис.7.4.

Градирня или охлаждающая башня - устройство для охлаждения большого количества воды направленным потоком атмосферного воздуха (снизу вверх), противоположном движению воды (сверху вниз). Вода распыляется форсунками, стекает тонкой пленкой или каплями часть ее испаряется, оставшаяся часть воды

при этом охлаждается.

При испарении 1% воды температура оставшейся массы понижается на $5,48^{\circ}\text{C}$,

Высокая башня (высота 150 - 200 м) создает тягу воздуха, которая необходима для эффективного охлаждения циркулирующей воды. Естественная тяга создается благодаря разности плотностей воздуха, поступающего снизу в градирню, и нагретого воздуха, выходящего из градирни.

Благодаря высокой башне одна часть испарений успевает возвратиться в систему, а другая – уносится ветром.

В мире и в Украине. В 2000 году во всем мире эксплуатировалось около 500 энергетических реакторов. В отдельных странах обеспеченность электроэнергией за счет АЭС достигла больших масштабов. Мировыми лидерами в производстве ядерной электроэнергии на 2015 год являлись: США (798 млрд. кВт·ч/год), работает 99 атомных реакторов (~20 % от вырабатываемой электроэнергии), Франция (419 млрд. кВт·ч/год), 58 реакторов (76 % от вырабатываемой электроэнергии). В Бельгии на АЭС вырабатывалось 56 % всей электроэнергии, в Швеции — 51 %, в Южной Корее — 56 %, в Японии — более 30 %.

В Украине действуют 4 АЭС с 15 энергоблоками: Запорожская, Ровенская, Хмельницкая, Южно-Украинская. По количеству энергетических реакторов (все типа ВВЭР) Украина занимает 10-е место в мире и пятое в Европе.

В 2016 году вклад атомной энергетики составлял более 60 % от общего производства электричества в Украине, общая мощность АЭС равнялась 13 107 МВт.

Запорожская АЭС (г. Энергодар, Запорожская обл.) с 6 энергоблоками ВВЭР общей мощностью 6 ГВт, является крупнейшей в Европе. Из них 5 энергоблоков работают на медленных нейтронах, 1 – на быстрых.

Некоторые аспекты экологии при эксплуатации АЭС. При выборе источника энергии для развития энергетики приходится решать задачи оптимизации экологического воздействия на окружающую среду и стоимости произведенной электроэнергии.

Если развивать энергетику, использующую только органическое топливо (уголь, газ, нефть), т.е. строить только тепловые электростанции (ТЭС), то возникает проблема *расходования кислорода* земной атмосферы. В мире ежегодно сжигается примерно 10 млрд т условного топлива и потребляется около 35 млрд т кислорода. Если сжигание топлива будет ежегодно увеличиваться на 4-5%, то через 100 лет содержание кислорода в земной атмосфере понизится до критического для человека значения. Источниками кислорода на Земле являются леса и Мировой океан. Однако площади лесов постоянно сокращаются, а океан интенсивно загрязняется. Поэтому существует реальное опасение относительно исчерпания запасов кислорода в атмосфере.

Углекислый газ, выбрасываемый в атмосферу ТЭС, а также автомобильным транспортом при сжигании органического топлива, представляет большую опасность вследствие т.н. «парникового эффекта», вызывающего потепление климата и подъем уровня Мирового океана.

Серьезный экологический недостаток ТЭС заключается в наличии в их выбросах в окружающую среду кроме большого количества CO_2 еще и различных *вредных веществ*.

Это зола, скапливающаяся около ТЭС в громадных отвалах, выбросы в атмосферу оксида серы и азота (источников кислотных дождей), тяжелых металлов и даже радиоактивных веществ. В 1т угля может содержаться 1-2,5 г урана и 2-5 г тория.

АЭС не потребляет кислорода и не выбрасывает в атмосферу углекислый газ, что является существенным их достоинством.

В то же время ядерная энергетика по-другому воздействует на среду. Для охлаждения реактора, лопаток и конденсаторов турбин у АЭС очень *большая потребность в воде*. Недаром АЭС строят у больших водоемов. Для типовой АЭС нужен пруд-охладитель площадью не менее 25 км². Озера не выдерживают тепловой нагрузки, поэтому на АЭС строятся градирни. Это приводит, с одной стороны, к возрастанию стоимости электроэнергии, с другой стороны, к повышению влажности атмосферы окружающего района.

Однако главное возражение против ядерной энергетики основано на том, что при работе реакторов АЭС в ядерном топливе образуется значительное количество радиоактивных *продуктов деления урана*. Существуют короткоживущие и долгоживущие продукты деления. Короткоживущие (период полураспада $T_{1/2}$ от нескольких секунд до десятков часов) примерно через 10 значений $T_{1/2}$ практически полностью распадаются. Долгоживущие радионуклиды, среди которых можно назвать стронций-89 ($T_{1/2} = 53$ дня), стронций -90 (29 лет),

цирконий -95 (6 дней), йод-131 (8 дней), цезий-134 (2,3 года), цезий -137 (26, 6 года) и многие другие представляют значительную радиационную опасность.

Из одного реактора типа ВВЭР-1000 ежегодно выгружается вместе с отработавшим топливом около 900 кг высокоактивных продуктов деления. На АЭС отработавшее топливо (тепловыделяющие сборки, ТВС) передают в бассейн выдержки, где их устанавливают в специальные герметизированные пены, которые хранятся под слоем воды в течение нескольких лет для снижения активности ядерного топлива. После этого их перевозят на радиохимический завод, где извлекают уран и плутоний и отделяют продукты деления.

Заметим, что вредные выбросы в атмосферу одного только нефтеперерабатывающего завода составляют около 80 тыс. т в год. Они по своему влиянию на здоровье человека не уступают воздействию радиоактивности. Другими словами, объемы радиоактивных продуктов деления сотни АЭС в тысячи раз меньше, чем объем опасных отходов одного нефтеперерабатывающего завода.

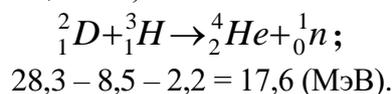
Второй путь освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза. Задача осуществления управляемого термоядерного синтеза еще не решена. Тем не менее, осуществление управляемой реакции синтеза очень заманчиво благодаря экологической чистоте процессов и практически неисчерпаемым запасам термоядерного топлива (подробнее см. § 8).

§ 8. Термоядерный синтез. Энергия Солнца и звезд

Как уже отмечалось при анализе кривой удельной энергии связи (§ 2), выделение энергии возможно как при делении тяжелых ядер, так и при слиянии легких.

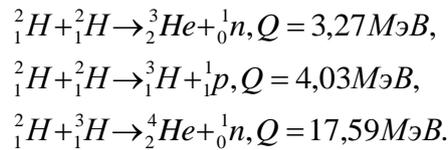
Удельная энергия связи ядер (см. рис. 2.1) резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия 2_1H и трития 3_1H) к литию 6_3Li и к гелию 4_2He , т. е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые должны сопровождаться выделением большого количества энергии, что подтверждается расчетами.

Пример. Рассмотрим слияние ядра дейтерия (энергия связи $E_{св} = 2,2$ МэВ) и трития ($E_{св} = 8,5$ МэВ) в ядро гелия ($E_{св} = 28,3$ МэВ):

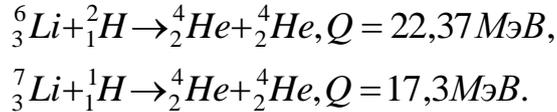


Т.о. реакция синтеза сопровождается выделением энергии, равной $Q = 17,6$ МэВ.

Наиболее благоприятные условия создаются для реакций синтеза изотопов водорода дейтерия 2_1H и трития 3_1H . Они могут давать, кроме реакции, приведенной выше, такие типы реакций:



С большой вероятностью происходит также синтез лития с водородом



Энергия синтеза, выделяемая на один нуклон, может в несколько раз превосходить энергию деления, рассчитанную на один нуклон.

Так, если при делении ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции синтеза дейтерия с тритием эта величина равна $17,6/5 \text{ МэВ} \approx 3,5 \text{ МэВ}$.

В отличие от процессов деления, в которых реакция может происходить под действием не имеющих заряда нейтронов, для синтеза ядер реакция должна происходить между заряженными частицами. Это означает, что заряженным частицам, прежде чем произойдет их слияние, нужно сообщить кинетическую энергию, достаточную для преодоления кулоновского барьера.

Для слияния двух ядер с порядковыми номерами Z_1 и Z_2 их надо сблизить на расстояние ядерных взаимодействий $r_{\text{я}} \sim 2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$. Для этого нужно выполнить работу против сил электростатического отталкивания, равную потенциальной энергии отталкивания

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{я}}}.$$

Даже для самых легких ядер, которыми являются ядра изотопов водорода ${}^1_1\text{H}, {}^2_1\text{H}, {}^3_1\text{H}$ с $Z_1 = Z_2 = 1$, эта энергия составляет

$$E = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-15}} = 1,15 \cdot 10^{-13} \text{ (Дж)} = 0,72 \text{ МэВ}.$$

Для осуществления реакций синтеза каждое из двух ядер должно иметь кинетическую энергию, равную половине указанной величины, т.е. 0,36 МэВ. Чтобы сообщить такую энергию, смесь реагентов необходимо нагреть до очень высокой температуры. Средняя кинетическая энергия теплового движения равна $\frac{3}{2}kT$. Из равенства $\frac{3}{2}kT = \frac{1,15 \cdot 10^{-13}}{2} \text{ Дж}$ определяем температуру, при которой может происходить слияние ядер:

$$T \sim 2 \cdot 10^9 \text{ К},$$

что на два порядка превышает температуру центральных областей Солнца (примерно $1,3 \cdot 10^7 \text{ К}$). Поэтому реакции синтеза ядер называют *реакциями термоядерного синтеза*.

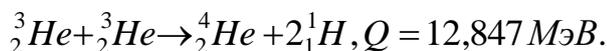
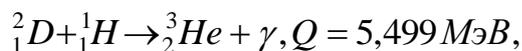
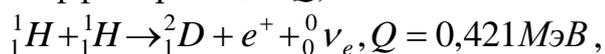
В действительности реакции синтеза легких ядер происходят при значительно более низких температурах, порядка 10^7 К. Причина этого - наличие в тепловом движении частиц со скоростями, значительно превышающих среднее значение (т.н. «хвост» распределения Максвелла). Кроме того, существенную роль играет так называемый туннельный эффект. Согласно квантовой механике существует определенная вероятность того, что микрочастица проникнет сквозь потенциальный барьер с энергией, меньшей его высоты, проходя как через «туннель» в барьере.

Согласно современным астрофизическим представлениям, основным источником энергии Солнца и других звезд является происходящий в их недрах термоядерный синтез.

Спектральный анализ светового излучения, испускаемого Солнцем, показывает, что солнечная хромосфера в основном состоит из водорода и гелия. Это дает основание предположить, что источником энергии Солнца служит превращение водорода в гелий.

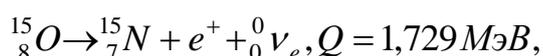
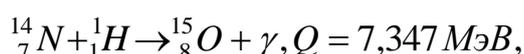
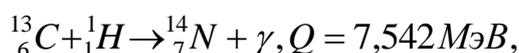
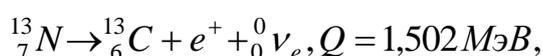
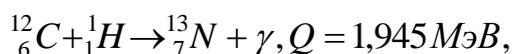
Этот синтез может осуществляться двумя путями. При более низких температурах (примерно 10^7 К) имеет место *протонно-протонный (водородный) цикл*.

Протонно-протонный цикл состоит из таких реакций (в каждой реакции обозначен энергетический эффект реакций Q):

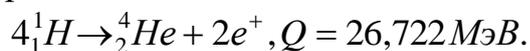


В результате цикла из четырех протонов образуется ядро гелия и 2 позитрона; энергетический эффект цикла $Q = 26,721$ МэВ

Второй цикл, который называют *углеродным*, характерен для более высоких температур (примерно $2 \cdot 10^7$ К). Протекание углеродного цикла возможно в звездах, которые уже содержат достаточное количество ядер атомов углерода и кислорода, служащих катализаторами. Он состоит из последовательности реакций:



В результате этого цикла также четыре протона превращаются в ядро гелия и выделяется энергия, равная $\approx 26,7$ МэВ:



Ядра же углерода, число которых до и после цикла остается неизменным, участвуют в реакции в роли катализатора.

На Солнце, по-видимому, главную роль играет водородный цикл. Вследствие реакций как водородного, так и углеродного циклов количество водорода в недрах Солнца непрерывно уменьшается, а количество гелия увеличивается. Каждую секунду в нем около $8 \cdot 10^8$ т водорода превращается в гелий, а вследствие излучения масса Солнца уменьшается каждую секунду на 4,3 млн т (при общей массе $\approx 2 \cdot 10^{27}$ т), то есть приблизительно на $2 \cdot 10^{-19}$ %.

Однако запасы водорода настолько велики, что, по современным астрофизическим оценкам, его хватит еще на многие миллиарды лет. После этого состоится гравитационное сжатие Солнца, благодаря чему, по прогнозам, температура недр повысится, и будут созданы условия для протекания реакции синтеза гелия в более тяжелые ядра.

Первая реакция синтеза дейтерия и трития была осуществлена в виде взрыва водородной бомбы. Высокая температура, необходимая для реакции синтеза, было достигнута благодаря взрыву обычной атомной бомбы; дальнейший рост температуры обуславливался ходом реакции синтеза.

В водородной бомбе термоядерная реакция носит неконтролируемый характер. Для осуществления *управляемых термоядерных реакций* необходимо создать и поддерживать в некотором объеме температуру выше сотни миллионов кельвинов. При такой температуре каждый атом утрачивает все свои электроны, и вещество представляет собой полностью ионизированную *плазму*.

Поскольку в плазме присутствуют свободные электроны, плазма очень хорошо проводит электрический ток. Чтобы удержать плазму, например, при температуре 10^8 К, ее нужно надежно термоизолировать. Ведь соприкосновение плазмы со стенками сосуда приведет к тому, что стенка моментально испарится, а сама плазма остынет, что прекращает термоядерную реакцию.

Для нагревания плазмы используют мощные импульсные электрические разряды в газах. В этих разрядах максимальная сила тока достигает величины $2 \cdot 10^6$ А. В момент разряда температура плазмы достигает нескольких десятков миллионов градусов.

Основной вопрос состоит в том, каким способом удерживать горячую плазму в зоне реакции. Изолировать плазму от стенок камеры можно, поместив ее в сильное магнитное поле.

Силы, действующие в этом поле на движущиеся заряженные частицы, заставляют их двигаться по траектории

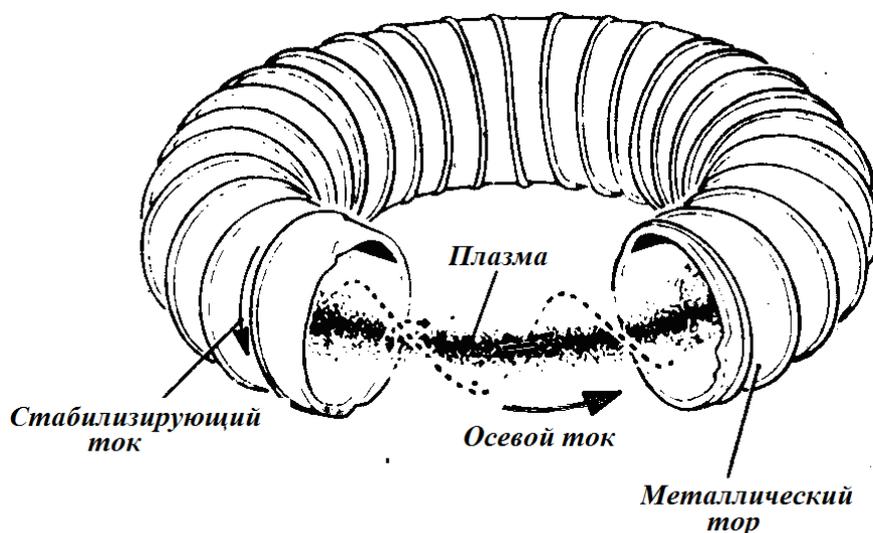


Рис. 8.1.

ям, расположенным в ограниченной части пространства.

Наиболее эффективной оказалась тороидальная система показанная на рис. 8.1. В этой системе создается такое магнитное поле, что действующая на заряды магнитная сила $F = q[v, B]$ отталкивает плазму от стенок сосуда и заставляет заряды двигаться по кольцевой траектории в центре тора.

Если ток зарядов на этой траектории оказывается очень большим, то создаваемое им собственное магнитное поле будет еще сильнее сжимать плазму относительно оси тора. (Это явление носит название пинч-эффекта). Наилучшие результаты получены на установках типа «Токамак» (тороидальная камера с магнитными катушками).

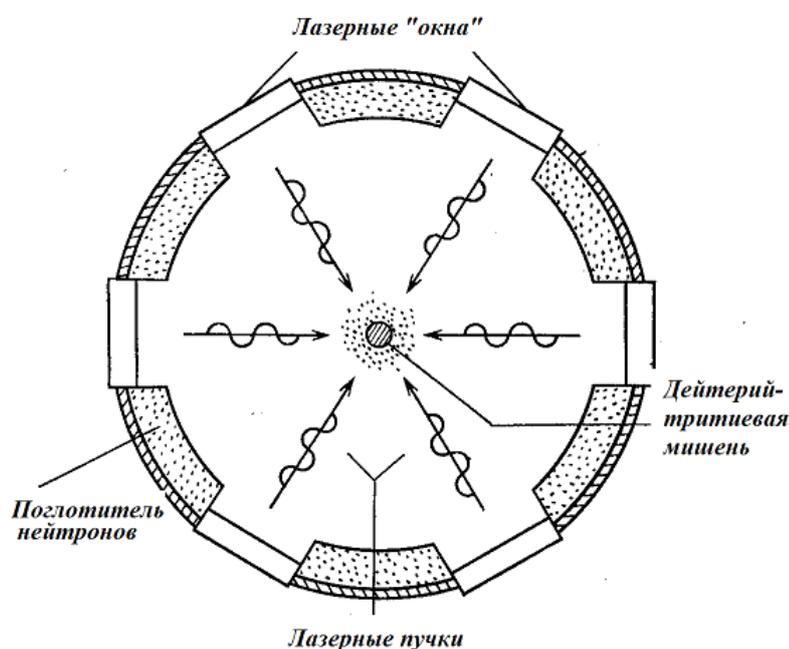


Рис. 8.2.

Более поздние по сравнению с магнитным удержанием плазмы методы возникли с появлением очень мощных лазеров.

Сконцентрировав очень мощный лазерный импульс на твердой мишени из смеси дейтерия и трития, можно инициировать реакцию синтеза.

По сравнению с магнитным удержанием плазмы в данном методе реализуются значительно более высокие плотности частиц и, следовательно, большая вероятность столкновений ядер

дейтерия и трития.

На рис. 8.2 представлена схематически возможная конструкция установки, в которой происходит взрывной лазерный разогрев дейтерий-тритиевой мишени.

Ни один из предложенных до сих пор методов не обеспечивает одновременно достижения высокой плотности частиц и большого времени удержания плазмы, что необходимо для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Можно только надеяться, что решение проблемы управляемого термоядерного синтеза в 21 веке откроет человечеству доступ к неисчерпаемому источнику энергии, заключенной в легких элементах.

Наиболее перспективной в этом смысле является возможность извлечения энергии из дейтерия, содержащегося в обычной воде. В обычной воде содержится 0,015 % атомов дейтерия. Количество дейтерия в океанской воде составляет примерно $4 \cdot 10^{13}$ т, чему соответствует энергетический запас 10^{17} МВт·ч. Таким образом, дейтерий океанов является практически неисчерпаемым источником энергии, которого хватило бы на многие миллионы лет.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон радиоактивного распада. Что такое постоянная распада и период полураспада?
2. Возраст Земли — несколько миллиардов лет, а период полураспада радия — 1600 лет. Почему же на Земле еще сохранилось какое-то количество радия?
3. Как найти кинетическую энергию вылетающей из радиоактивного ядра α -частицы?
4. Почему скорость α -распада сильно меняется от ядра к ядру, в то время как энергия вылетающих α -частиц близки друг к другу?
5. Во время β^- -распада ядро излучает электроны. Но электроны в ядре отсутствуют. Как объяснить этот факт?
6. Почему энергии α -частиц при распаде данного ядра имеют фиксированные значения, в то время, как электроны, излучаемые в процессе β^- -распада имеют широкий спектр энергий от нуля до некоторого максимального значения E_{\max} ?
7. Почему β -распад следует считать внутринуклонным, а не внутриядерным процессом, как α -распад?
8. Энергии α -частиц, излучаемых при α -распадах, колеблются в пределах от 4 до 10 МэВ. В то же время осуществлению α -распада препятствует кулоновский потенциальный барьер (25–30 МэВ) на «границе» ядра, возникший при образовании ядра. Каким образом α -частица преодолевает запрещенную область, где ее полная энергия значительно меньше потенциальной?
9. Является ли гамма-излучение самостоятельным видом распада? В чем заключается механизм образования γ -излучения?
10. Какие процессы происходят при взаимодействии γ -излучения с веществом?
11. Объясните идею радиоуглеродного метода датировки ископаемых образцов органического происхождения.
12. Почему деление тяжелых ядер сопровождается выделением большого количества энергии?
13. Почему при замедлении быстрых нейтронов используют вещество, содержащее легкие элементы?
14. В чем суть экологических проблем, возникающих в связи с развитием ядерной энергетики?
15. Почему выделение внутриядерной энергии возможно как при реакциях деления тяжелых ядер, так и при синтезе легких ядер?
16. Почему реакцию синтеза ядер называют термоядерной?
17. С чем связаны трудности на пути осуществления управляемой реакции термоядерного синтеза?
18. Объясните сравнительные достоинства и недостатки (в том числе возможность загрязнения окружающей среды и степень безопасности) различных способов получения энергии: сжигание ископаемого горючего, деление ядер, ядерный синтез.

Глава 2. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

§ 9. Типы фундаментальных взаимодействий в природе

Точный смысл термина «элементарная частица» связан с ранними этапами развития естествознания. Считалось, что материю невозможно дробить бесконечно, что существуют микроскопические порции материи, которые не имеют внутренней структуры. Эти первичные, далее неразложимые на более

простые частицы, из которых состоит вся материя, были названы элементарными.

Однако, с развитием физики было установлено, что большинство элементарных частиц имеет сложную структуру, а все элементарные частицы превращаются друг в друга. Таким образом, понятие элементарности является относительным. С углублением научных данных о строении вещества и полей один уровень знания сменяется другим. По выражению Э.Ферми элементарные частицы – это простейшие составные частицы материи, строение которых неизвестно.

Поэтому в современной физике термин «элементарные частицы» употребляется в менее строгом смысле слова - для наименования большой группы мельчайших частиц материи, подчиняющихся условию, что они не являются атомами или атомными ядрами (исключение составляет простейшее ядро атома водорода – протон).

Эта группа частиц очень велика. В нее входят протон (p), нейтрон (n), электрон (e^-), фотон (γ), пи-мезоны (π), мюоны (μ), тяжелые лептоны (τ), нейтрино трех типов (электронное ν_e , мюонное ν_μ , и τ -нейтрино ν_τ), т.н. странные частицы (K -мезоны и гипероны), разнообразные резонансы, очарованные частицы, промежуточные векторные бозоны и т. д. — всего к настоящему времени известно около 400 частиц, в основном нестабильных.

Большинство перечисленных частиц не удовлетворяют обычному определению элементарности, поскольку по современным представлениям они сами являются составными системами. Их объединяет то, что они представляют форму материи, не соединенной в ядра и атомы.

Типы взаимодействий элементарных частиц. С точки зрения классификации элементарных частиц дополним характеристику четырех фундаментальных взаимодействий, которая уже приводилась в § 4.

Сильное, или ядерное, взаимодействие обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов, кварков в нуклонах и приводит к наиболее прочной связи элементарных частиц. В сильное взаимодействие вступают также пионы, каоны, гипероны и некоторые другие частицы. Эти взаимодействия вызывают интенсивное рождение новых частиц при столкновениях частиц с высокими энергиями.

Все частицы, подверженные сильным взаимодействиям, называются *адронами*. К адронам относится подавляющее большинство всех известных элементарных частиц. В сильные взаимодействия не вступают фотон и электрон.

Электромагнитное взаимодействие осуществляется через электромагнитное поле. Оно характерно для всех элементарных частиц, за исключением нейтрино, антинейтрино и фотона, и выступает как отталкивание между зарядами одного знака и притяжение между зарядами противоположных знаков. Электромагнитное взаимодействие ответственно за связь положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов и связь атомов в молекулах и конденсированных средах. Им обусловлены собственно электрические и магнитные явления, а также все оптические, тепловые, механические (не свя-

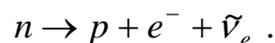
занные с гравитацией) и химические явления. Электромагнитное взаимодействие в 100 - 1000 раз слабее сильного взаимодействия.

Отличие *слабого взаимодействия* от сильного проявляется в скоростях реакций с участием этих взаимодействий. Слабое взаимодействие проявляется в сравнительно медленно протекающих процессах распада некоторых элементарных частиц и атомных ядер.

Примером сильного взаимодействия может служить образование Λ^0 -частицы и K^0 -мезона в процессе столкновения протона и π^- -мезона: $p + \pi^- \rightarrow \Lambda^0 + K^0$. Время взаимодействия быстрого (релятивистского) протона с π -мезоном составляет $\approx 10^{-23}$ с.

Λ^0 -частица затем распадается: $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ в среднем за $3 \cdot 10^{-10}$ с, такой распад обусловлен слабым взаимодействием. В мире элементарных частиц такая длительность процессов относит их к очень медленным. Кроме того, видно, что интенсивность слабых взаимодействий составляет примерно 10^{-14} от интенсивности сильных.

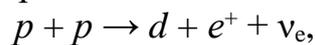
Например, благодаря слабому взаимодействию распадается свободный нейтрон:



Слабое взаимодействие описывает процессы, происходящие с участием нейтрино или антинейтрино (например, β -распад), а также за безнейтринные процессы распада, характеризующиеся довольно большим временем жизни распадающейся частицы ($\tau > 10^{-10}$ с). В слабых взаимодействиях участвуют все частицы, кроме фотона.

Иллюстрацией малой интенсивности слабых взаимодействий может служить и тот факт, что поток нейтрино, которые участвуют только в слабых взаимодействиях, беспрепятственно пронизывает толщу как Земли, так и Солнца.

Несмотря на сравнительно малую интенсивность и короткодействие, слабое взаимодействие играет очень важную роль в устройстве Вселенной. Проиллюстрируем это таким примером. Солнце и звезды излучают энергию за счет термоядерной реакции синтеза гелия из водорода. Чтобы такая реакция протекала, необходимо предварительное превращение половины протонов в нейтроны. Иначе ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, в котором кроме двух протонов есть еще два нейтрона, возникнуть не сможет. Необходимые нейтроны образуются в составе дейтронов в результате превращения



которое вызывается только слабыми взаимодействиями.

Таким образом, если бы удалось «выключить» слабое взаимодействие, то погасло бы Солнце и звезды не могли бы существовать.

Гравитационное взаимодействие присуще всем без исключения частицам, однако на субатомных расстояниях порядка 10^{-13} см и меньше оно не играет практически никакой роли.

Некоторые элементарные частицы принимают участие только в отдельных взаимодействиях: фотон - только в электромагнитном, нейтрино - только в слабом.

Радиус фундаментальных взаимодействий. В квантовой теории поля взаимодействие частиц рассматривается как рождение или поглощение одной свободной частицей других (виртуальных) частиц, иначе говоря, каждая частица окружена облаком виртуальных частиц.

Как уже отмечалось в § 4, радиус взаимодействия определяется комптоновской длиной волны виртуальных частиц, которыми обмениваются взаимодействующие частицы, и следовательно, массой частицы, переносящей взаимодействие:

$$R \approx \lambda_c = \frac{h}{mc} \quad (9.1)$$

Четыре типа взаимодействий переносятся своим типом бозонов.

Переносчиком сильного взаимодействия является **π -мезон**, сильно взаимодействующая частица наименьшей массы, и радиус действия ядерных сил составляет примерно 10^{-15} м.

Переносчиком электромагнитного взаимодействия является **фотон**. Электромагнитное взаимодействие характеризуется бесконечным радиусом действия сил, и поэтому согласно формуле (9.1) масса фотона равна нулю.

Эксперименты показывают, что радиус действия слабого взаимодействия не превышает 10^{-19} м, т. е. как следует из формулы (9.1), масса ответственных за него виртуальных частиц должна быть порядка 100 ГэВ. Из теории следовало, что у слабого взаимодействия должно существовать три переносчика: нейтральный Z^0 - и заряженные W^+ - и W^- **промежуточные бозоны**. Эти частицы были открыты в экспериментах на встречных пучках, т. е. на пучках ускоренных частиц, направленных навстречу друг другу.

Переносчиком гравитационного взаимодействия, согласно существующим представлениям, является **гравитон**, частица с нулевой массой, однако экспериментально он до сих пор не обнаружен.

Пример. Покажем, как с помощью соотношения неопределенностей можно оценить массу мезона, переносящего сильное взаимодействие.

Неопределенность ΔE значения энергии ядра при испускании мезона массы m порядка энергии этой частицы: $\Delta E = mc^2$. Эта неопределенность в значении энергии существует в течение времени Δt пролета мезона внутри ядра, которое равно отношению размера ядра R к скорости частицы $v = p/m$:

$$\Delta t \approx Rm/p.$$

Входящее сюда значение импульса p оценим из соотношения неопределенностей, учитывая, что мезон локализован внутри ядра: $p \approx h/R$. Отсюда следует, что $\Delta t \approx mR^2/h$. Подставляя ΔE и Δt в соотношение $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$, получим оценку для массы мезона m :

$$m \approx \frac{h}{Rc} \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \approx 300m_e \approx 150 \text{ МэВ} \quad (\text{П.9.1})$$

Частицы с такой массой были впоследствии открыты на опыте и получили название π -мезонов (пионов). Существуют три вида пионов: π^+ , π^- и π^0 , массы которых составляют $m_{\pi^+} = m_{\pi^-} \approx 140 \text{ МэВ}$, $m_{\pi^0} \approx 135 \text{ МэВ}$.

Выше описано четыре достоверно известных сегодня фундаментальных взаимодействия.

Полагается, что электромагнитное и слабое взаимодействия являются проявлениями единого электрослабого взаимодействия. При низких энергиях обусловленные слабым взаимодействием процессы протекают очень медленно из-за большой массы промежуточных векторных бозонов и связанного с этим очень малого радиуса слабого взаимодействия.

При высоких энергиях, достижимых на современных ускорителях со встречными протон-антипротонными пучками, происходит как обмен фотонами, так и обмен промежуточными векторными бозонами. При очень высоких энергиях слабое взаимодействие может стать даже сильнее электромагнитного.

После открытия в 2012 году на Большом адронном коллайдере бозона Хиггса поле Хиггса стали называть пятым фундаментальным взаимодействием.

§ 10. Кварки и лептоны. Классификация элементарных частиц

Кварки. В последние годы в теории сильного взаимодействия установлено, что все адроны (а их известно более 300) можно представить как составные частицы, образованные из более фундаментальных частиц, так называемых *кварков*. По современным представлениям кварки существуют реально, но принципиально не могут существовать сами по себе вне адронов. Взаимодействие между кварками настолько велико, что вырвать кварк из адрона невозможно. Это обстоятельство получило название «тюремного заключения» или конфайнмента (англ) кварков.

Кварки являются точечными частицами вплоть до масштаба примерно $0,5 \cdot 10^{-19}$ м, что примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона. Из кварков состоят адроны, в частности, протон и нейтрон.

Кварки бывают шести сортов (или «ароматов»). Состояние кварков характеризуют рядом квантовых чисел, получивших экзотические названия. Буквенные обозначения кварков u, d, s, c, b, t образованы первыми буквами, с которых начинаются английские слова: «up» — вверх, «down» — вниз, «strange» — странный, «charm» — очарованный, «beauty» - красивый и «true» - правдивый. Кварки обладают дробным электрическим зарядом, кратным одной трети элементарного заряда $e/3$. Заряд u -кварка составляет $(2/3)e$, заряд d -кварка — $(1/3)e$.

В строении окружающего нас мира наиболее важны u - и d -кварки, из которых построены протоны и нейтроны. Протон состоит из двух u - и одного d -кварка. Нейтрон состоит из одного u - и двух d -кварков. Когда d -кварк внутри нейтрона превращается в u -кварк, заряд нуклона изменяется на $(+2/3)e - (-1/3)e = e$, что воспринимается наблюдателем как превращение нейтрона в протон.

Каждому кварку соответствует антикварк с противоположными квантовыми числами.

Для того, чтобы объяснить, каким образом в нуклонах могут сосуществовать кварки с одинаковыми квантовыми числами, не нарушая принципа Паули (две одинаковые частицы со спином $1/2$ не могут находиться в одном и том же

состоянии), для кварков ввели еще одну дополнительную степень свободы. Эта дискретная переменная получила название *цвета* и приписывается всем кваркам.

Кварки взаимодействуют между собой подобно тому, как взаимодействуют между собой электрические заряды, однако, в отличие от электрических зарядов, у которых два знака (± 1), цветов три. Их условно называют «красным», «зелёным» и «синим».

Для каждого цвета существует также антицвет. Это дополнительные цвета, дающие в сумме с цветом нулевой цвет: «антикрасный» - зеленый, «антижелтый» - фиолетовый - и «антисиний» - оранжевый. Квантовые числа кварков приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики кварков.

Аромат кварка	Электрический заряд, Q	Барионный заряд, B	Спин, s	Очарование, C	Цвет
u	+ 2/3	+ 1/3	1/2	0	Желтый, синий, красный
d	- 1/3	+ 1/3	1/2	0	То же
s	- 1/3	+ 1/3	1/2	0	»
c	+ 2/3	+ 1/3	1/2	+ 1	»
b	- 1/3	+ 1/3	1/2	0	»
t	+ 2/3	+ 1/3	1/2	0	»
<i>антикварки</i>					
\bar{u}	- 2/3	-1/3	1/2	0	Фиолетовый, оранжевый, зеленый
\bar{d}	+ 1/3	-1/3	1/2	0	То же
\bar{s}	+ 1/3	-1/3	1/2	0	»
\bar{c}	- 2/3	-1/3	1/2	-1	»
\bar{b}	+ 1/3	-1/3	1/2	0	»
\bar{t}	- 2/3	-1/3	1/2	0	»

Барионы состоят из трёх кварков разных цветов, наложение которых образует «бесцветную», или «белую» частицу. Например, протон состоит из красного кварка *u*, синего кварка *u* и желтого кварка *d*, так что в целом он «бесцветен».

Мезоны состоят из кварка и антикварка цвета и антицвета, что в сумме тоже образует бесцветные частицы. Например, пи-плюс-мезон π^+ состоит из красного кварка *u* и антикрасного (зеленого) антикварка \bar{d} и тоже «бесцветен».

Пример. Какие комбинации кварков воспроизводят свойства: 1) нейтрона; 2) Σ^0 - гиперона?

Пользуясь таблицами 1 и 2, определим: 1) нейтрон (*udd*); 2) Σ^0 -гиперон (*uds*).

По аналогии с фотонами в электромагнитных взаимодействиях и π -мезонами в сильных взаимодействиях полагается, что взаимодействие между кварками в адроне осуществляется посредством обмена так называемыми *глюонами* — гипотетическими электрически нейтральными частицами с нулевой массой покоя. Основной вклад в массы протонов и нейтронов дают не кварки, из которых они состоят, а сильное взаимодействие между кварками, обусловленное глюонами. В этом смысле говорят, что глюоны переносят массу, хотя сами ею не обладают. Глюоны переносят цвет от одного кварка к другому, в результате чего кварки удерживаются вместе.

Концепция «цветов» дала название науке, описывающей взаимодействие кварков с глюонами, — *квантовая хромодинамика*. Гипотеза кварковой структуры оказалась необходимой для понимания динамики различных процессов с участием адронов. Кроме того, эта гипотеза позволила объяснить эмпирически установленную классификацию адронов.

Предсказания квантовой хромодинамики были подтверждены во многих опытах, проведенных на ускорителях со встречными пучками - коллайдерах. Эти опыты полностью согласуются с тем, что кварки существуют в трех цветовых состояниях и имеют дробный электрический заряд. Они доказали что источником сильных взаимодействий является цветовой заряд кварков, который создает глюонные поля.

Установлено, что с уменьшением расстояний, на которых происходит взаимодействие, цветовой заряд уменьшается в отличие от электрического заряда, который при этом растет. Это свойство цветового заряда указывает на возможность того, что электрический и цветовой заряды на очень малых расстояниях (порядка 10^{-31} м) сравниваются между собой.

Возможно, что сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия имеют общую природу и представляют собой различные проявления одного фундаментального взаимодействия. В этом состоит идея *большого объединения* всех калибровочных полей (то есть всех сил природы, включая гравитацию).

Классификация элементарных частиц. Индивидуальность элементарных частиц определяется набором дискретных значений физических величин. Это масса m , электрический заряд Q , спин s , изоспин T , четность C , барионный заряд B , три лептонных числа L_e, L_μ, L_τ , странность S , привлекательность (шарм) C' , истинность T' , зарядовая четность, гиперзаряд, цветной заряд и т.д.

Размер элементарной частицы. Размеры адронов (как барионов, так и мезонов) составляют около 10^{-15} м, что близко к среднему расстоянию между входящими в них кварками. Размеры фундаментальных, бесструктурных частиц — калибровочных бозонов, кварков и лептонов — в пределах погрешности эксперимента согласуются с их точечностью (верхний предел диаметра составляет около 10^{-18} м).

Спины s элементарных частиц определяют целым или полуцелым кратным постоянной Планка. Спины π - и K -мезонов равны нулю; спины электрона, протона и нейтрона $s = \frac{1}{2}\hbar$, фотона $s = \hbar$ и т.д. По величине спина все элементарные частицы делятся на два класса:

- бозоны — частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса);
- фермионы — частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино).

Одни элементарные частицы - так называемые *составные частицы*, имеют сложную внутреннюю структуру, но, тем не менее, по современным представлениям, разделить их на части невозможно (например, протоны и нейтроны).

Другие частицы (электрон, нейтрино, кварки и т. д.) на данный момент считаются бесструктурными и рассматриваются как первичные *фундаментальные частицы*.

В зависимости от способности к участию в тех или иных *видах взаимодействий* все элементарные частицы, за исключением фотона, разбиваются на две основные группы: **адроны и лептоны**.

Адроны (от греч. «адрос» — крупный, сильный), участвуют в сильном взаимодействии наряду с электромагнитным и слабым. Адроны состоят из кварков и подразделяются, в свою очередь, на:

- мезоны — адроны с целым спином, то есть являющиеся бозонами;
- барионы — адроны с полуцелым спином, то есть фермионы. К ним, в частности, относятся протон и нейтрон.

Лептоны (от греч. «лептос» — легкий), участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействиях. К лептонам относятся электронное, мюонное и таонное нейтрино, электрон, мюон и тяжелый лептон — τ -лептон, или таон, с массой примерно $3487 m_e$, а также соответствующие им античастицы. Лептоны — фермионы, которые имеют вид точечных частиц (то есть не состоящих ни из чего) вплоть до масштабов порядка 10^{-18} м.

Другие *фундаментальные (бесструктурные) частицы*:

Кварки — дробнозаряженные частицы, входящие в состав адронов.

Калибровочные бозоны — частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия:

- фотон — частица, переносящая электромагнитное взаимодействие;
- восемь глюонов — частиц, переносящих сильное взаимодействие;
- три промежуточных векторных бозона W^+ , W^- и Z^0 , переносящие слабое взаимодействие;
- гравитон — гипотетическая частица, переносящая гравитационное взаимодействие. Существование гравитонов пока не доказано экспериментально

Адроны и лептоны образуют вещество. Калибровочные бозоны — это кванты разных типов взаимодействий.

По **времени жизни τ** все элементарные частицы делятся на:

- **Стабильные** элементарные частицы - частицы, имеющие бесконечно большое время жизни в свободном состоянии; электрон имеет время жизни $\tau > 5 \cdot 10^{21}$ лет, протон $\tau > 10^{30}$ лет, сюда же относятся фотон, электронное и мюонное нейтрино, и их античастицы.

- *Квазистабильные* элементарные частицы, их времена жизни $> 10^{-20}$ с (свободный нейтрон $\tau = 1000$ с, мюон, пионы, каоны, «странные» гипероны $\tau = 10^{-6} \dots 10^{-16}$ с)
- *Нестабильные* элементарные частицы (резонансы) - самопроизвольно распадаются в результате сильных взаимодействий по экспоненциальному закону, их время жизни $\tau = 10^{-24} \dots 10^{-22}$ с.

По *массе* все элементарные частицы делятся на два класса:

- частицы с нулевой массой (фотон, глюон, гравитон и их античастицы);
- частицы с ненулевой массой (все остальные частицы).

Законы сохранения. Наиболее важное свойство всех элементарных частиц — способность к взаимным превращениям, т. е. способность рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Все процессы с элементарными частицами происходят в соответствии с законами сохранения энергии, импульса, момента импульса, барионных и лептонных чисел, электрического заряда, четности, странности и т.д. Одни из этих законов являются точными (например, сохранения энергии или электрического заряда), другие – приближенными, т.е. имеют место в одних взаимодействиях и нарушаются в других (например, изоспин сохраняется в сильном и нарушается в электромагнитном и т.д.).

Пример. Процесс распада электрона

$$e^- \rightarrow \gamma + \gamma + \nu \quad (П.2)$$

является запрещенным, т.к. в нем нарушается закон сохранения электрического заряда. Это обеспечивает стабильность электрона.

Элементарные частицы дополнительно наделяются рядом квантовых величин, которые разрешают процессы их преобразований. Например, процесс преобразования протона

$$p \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \quad (10.2)$$

не противоречит законам сохранения энергии, импульса, момента, а также закону сохранения электрического заряда. Однако если бы он был возможен, то привел бы к аннигиляции атомов вещества. Если же барионам (нуклонам и более тяжелым частицам - гиперонам) приписать *барионное квантовое число* $B = +1$, антибарионам — барионное число $B = -1$, а всем остальным частицам — барионное число $B = 0$, то процесс (2) будет нарушением закона сохранения барионного числа (у протона $B = +1$, а у позитрона и нейтрино $B = 0$).

Аналогично для регламентирования процессов с участием лептонов вводится *лептонное число* - L : для лептонов $L = +1$, для антилептонов $L = -1$, для всех других частиц $L = 0$. В этих условиях во всех процессах необходимо руководствоваться законом сохранения лептонного числа: алгебраическая сумма лептонных чисел частиц до превращения равна алгебраической сумме лептонных чисел частиц, возникших в результате преобразования. По этому закону, например, в реакцию распада (3) необходимо ввести антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (10.3)$$

Пример. Пользуясь законом сохранения лептонного заряда, определим, какие из приведенных реакций разрешены, а какие - нет:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+,$$

$$\nu_e + p \rightarrow n + e^+,$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-,$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + \mu^+.$$

Ответ: Первая и третья реакции разрешены законом и реально происходят: $(-1) + 0 = 0 + (-1)$, $(+1) + 0 = 0 + (+1)$; вторая и четвертая - запрещены: $(+1) + 0 \neq 0 + (-1)$; $(+1) + 0 \neq 0 + (-1)$.

Античастицы. Универсальным свойством элементарных частиц является существование *античастиц*. Античастица отличается от частицы только знаками всех величин, характеризующих взаимодействия (заряды, магнитные моменты, странность, шарм и др.). Частицы, у которых эти величины равны нулю, тождественны со своими античастицами и поэтому называются истинно нейтральными. Самой легкой истинно нейтральной частицей является фотон.

При столкновении частицы с античастицей обе они могут исчезнуть, превратившись в фотоны. Такой процесс называется *аннигиляцией*.

Например, позитрон и электрон, сталкиваясь, превращаются в два (или три) фотона по схеме

$$e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma. \quad (10.4)$$

Один фотон при этом не может излучаться, поскольку нарушается закон сохранения импульса.

Пример. При столкновении нейтрона и антинейтрона происходит их аннигиляция, в результате чего возникают два γ -кванта. Полагая кинетическую энергию частиц до их столкновения пренебрежимо малой, определить энергию каждого из γ -квантов.

Запишем реакцию: ${}_0^1n + {}_0^1\bar{n} \rightarrow 2\gamma$. Энергия покоя частиц $E = 2 m_n c^2$. Тогда $E_\gamma = m_n c^2 = 940$ МэВ.

При аннигиляции тяжелых частиц и античастиц возникают не столько γ -кванты, сколько другие легкие частицы, например π - мезоны при аннигиляции протона и антипротона:

$$\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0. \quad (10.5)$$

Процесс, обратный аннигиляции, называется *рождением пар* частица-античастица. Так, при взаимодействии γ -фотона с тяжелыми ядрами может рождаться пара электрон-позитрон.

Для этого, прежде всего, необходимо, чтобы энергия γ -фотона была не меньше, чем собственная энергия пары $2 m_e c^2$. Кроме того, этот процесс может происходить только в присутствии третьего тела, например, атомного ядра, поскольку без него снова будет иметь место нарушение закона сохранения импульса.

Современная наука допускает возможность существования в галактических системах антивещества, состоящего из антиатомов; которые являются образованием из антипротонов, антинейтронов и позитронов. Однако, наблюдае-

мая часть Вселенной состоит только из вещества, антивещество пока не обнаружено.

В таблице 2 приведены наиболее изученные элементарные частицы и их квантовые числа.

Таблица 2.

Частица (античастица)	Масса по- кою, МэВ	Спин s , в ед \hbar	Электриче- ский заряд Q , в ед. за- ряда элек- трона e	Лептон- ный заряд L_e, L_μ, L_τ	Бари- он- ный заряд B	Время жизни, с
<i>Фотон</i> γ	0	1	0	0	0	ста- бильное
Лептоны						
<i>Электрон</i> , e^- (позитрон e^+)	0,511003	1/2	-1(+1)	+1(-1)	0	ста- бильное
$\mu^-(\mu^+)$ - мезон (мюон)	105,6595	1/2	-1(+1)	+1(-1)	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$
$\tau^-(\tau^+)$ - лептон (таон)	1782	1/2	-1(+1)	+1(-1)	0	$< 3 \cdot 10^{-12}$
<i>Нейтрино</i>						
Электронное $\nu_e, (\bar{\nu}_e)$	$0 (< 3,5 \cdot 10^{-5})$	1/2	0	+1/-1	0	ста- бильное
Мюонное $\nu_\mu, (\bar{\nu}_\mu)$	$0 (< 0,51)$	1/2	0	+1/-1	0	ста- бильное
Таонное $\nu_\tau, (\bar{\nu}_\tau)$	< 250	1/2	0	+1/-1	0	ста- бильное
Мезоны						
<i>Пионы</i>						
$\pi^+, (\pi^-)$	139,569	0	+1(-1)	0	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
π^0	134,964	0	0	0	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$
<i>Каоны</i>						
$K^+(K^-)$	493,71	0	+1(-1)	0	0	$1,3 \cdot 10^{-8}$ ($0,9 \cdot 10^{-10}$) ¹⁰⁾
$K^0, (\bar{K}_0)$	497,7	0	0	0	0	$5,6 \cdot 10^{-8}$
Барионы						
<i>Нуклоны</i>						
<i>Протон</i> p (анти- протон \bar{p})	938,28	1/2	+1(-1)	0	+1(-1)	ста- бильное
<i>Нейтрон</i> n (анти- нейтрон \bar{n})	939,573	1/2	0	0	+1(-1)	1000
<i>Гипероны</i>						
Лямбда Λ (анти-	1115,6	1/2	0	0	+1(-1)	$2,6 \cdot 10^{-10}$

лямбда $\tilde{\Lambda}$)						
Сигма-плюс Σ^+ (анти-сигма-плюс $\tilde{\Sigma}^+$)	1189,37	1/2	+1(-1)	0	+1(-1)	$0,8 \cdot 10^{-10}$
Сигма-минус Σ^- (анти-сигма-минус $\tilde{\Sigma}^-$)	1197,35	1/2	-1(+1)	0	+1(-1)	$1,4 \cdot 10^{-10}$
Сигма-ноль Σ^0 (анти-сигма-ноль $\tilde{\Sigma}^0$)	1192,48	1/2	0	0	+1(-1)	$<1 \cdot 10^{-14}$
Кси-ноль Ξ^0 (антикси-ноль $\tilde{\Xi}^0$)	1314,9	1/2	0	0	+1(-1)	$3 \cdot 10^{-10}$
Кси-минус Ξ^- (антикси-минус $\tilde{\Xi}^-$)	1321,3	1/2	-1(+1)	0	+1(-1)	$1,6 \cdot 10^{-10}$

Контрольные вопросы

1. Какой смысл вкладывается в понятие «элементарная частица» в современной физике?
2. Почему протоны и нейтроны не являются в истинном смысле элементарными частицами?
3. Перечислите известные четыре типа фундаментальных взаимодействий, а также сравните радиусы их действий. Укажите роль каждого из видов фундаментальных взаимодействий в различных физических явлениях.
4. Почему слабое взаимодействие, несмотря на свою малую интенсивность и короткодействующий характер, играет очень важную роль в эволюции Вселенной?
5. Почему гравитационное взаимодействие не играет роли в системах атомных размеров?
6. Каковы современные физические представления о механизме взаимодействия в мире элементарных частиц?
7. Как связаны между собой радиус действия сил и масса частиц, обменом которыми обусловлено данное взаимодействие?
8. Как с помощью соотношения неопределенностей оценить массу мезона, переносящего сильное взаимодействие?
9. Чем отличаются два больших класса элементарных частиц – адроны и лептоны?
10. На какие типы частиц подразделяются адроны? Какая характеристика элементарных частиц положена в основу деления на мезоны и барионы?
11. Можно ли назвать все лептоны истинно элементарными частицами?
12. Какого порядка время жизни τ резонансов?
13. Какие частицы являются абсолютно стабильными?
14. Перечислите известные ароматы кварков.
15. Что такое цвет кварков?
16. Какие частицы являются переносчиками взаимодействия между кварками?
17. Что такое конфайнмент кварков?
18. Какая элементарная частица обладает наименьшей массой покоя. Чему равен электрический заряд этой частицы?
19. Чем отличается позитрон от электрона?
20. Есть ли античастица у фотона?
21. При соударении положительного мюона и электрона образуются два нейтрино. Запишите эту реакцию и объясните, какой тип нейтрино образуется.

22. При захвате протоном отрицательного мюона образуется нейтрон и еще одна частица. Что это за частица?
23. Почему невозможна аннигиляция электрона и позитрона с рождением только одного кванта?

Рекомендованная литература

1. Савельев И.В. Курс физики. Учебник. В 3 томах. Т.3 Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. – М. Наука.1989 – 304 с
2. Бушок Г.Ф., Венгер Е.Ф. Курс фізики. Кн.2. Оптика. Фізика атома і атомного ядра. Молекулярна фізика і термодинаміка. К. «Либідь»2001. – 422 с.
3. Кучерук І. М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики. У 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. – К.; «Техніка», 2006, – 518 с.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М. «Высш. шк.», 1989, – 609 с.
5. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. В 2 т. Т. 2. М.: Дрофа, 2004 - 431 с.
6. Астахов А.В., Широков Ю.М. Курс физики: В 3 т. Т. 3: Квантовая физика. М.: Наука, 1983.- 240с.
7. Бутиков Е. И., Кондратьев А. С, Уздин В. М. Физика: Учеб. пособие: В 3 кн. Кн.3. Структура и свойства вещества. — М.: Физматлит, 2004 — 336 с.
8. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. Учеб. пособие. М. «Наука»,1972. – 672 с.
9. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. М. Атомиздат,1965, 720 с.
10. Белонучкин В.Е., Заикин Д. А., Ципенюк Ю.М., Основы физики. Курс общей физики: Учебн. В 2 т. Т. 2. Квантовая и статистическая физика / - М.: Физматлит, 2001. - 504 с.
11. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1984.
12. Гаркуша И.П., Куринной В.П. Физика. Ч. 6. Квантовая физика. Учебное пособие: – Д. Национальный горный университет, 2016. – 92 с
- 13.. Чертов А.Г. Воробьев А.А. Задачник по физике. – М.: «Физмат лит», 2005 – 640 с.
- 14.. Гаркуша І.П., Горбачук І.Т., Курінний В.П. та ін. Загальний курс фізики: Збірник задач – К.: «Техніка», 2004,– 560 с.