

## ЛЕКЦИЯ 15

### ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

#### 1 Характеристики и модели атомного ядра

##### 1.1 Состав атомного ядра. Массовое и зарядовое числа, размер ядра

Исследование атомных ядер началось после установления следующих экспериментальных фактов: 1) открытие в 1896 году французским учёным Анри Беккерелем естественной радиоактивности; 2) открытие в 1910 году английским учёным Содди изотопии химических элементов; 3) ядерная модель атома, предложенная в 1911 году великим английским физиком Эрнестом Резерфордом.

Резерфорд, исследуя радиоактивность, пришел в 1908 году к выводу, что при радиоактивном распаде происходит превращение атомов одних химических элементов в атомы других элементов. Позже, исследуя прохождение  $\alpha$ -частиц с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт через тонкие пленки золота, Резерфорд открыл ядерную модель атома, после чего стало ясно, что при радиоактивности имеет место превращение ядер одних элементов в ядра других элементов.

Открытие изотопии сыграло следующую роль. Атомные веса, т.е. массы атомов химически чистых элементов, как правило, выражаются в а.е.м. числами, не очень близкими к целым. Например, атомный вес бора (В) – 10,82; Ne – 20,183; Cl – 35,457; Fe – 56,85 ;... . С открытием изотопии утвердилось мнение, согласно которому химически чистый элемент представляет собой смесь изотопов, отличающихся друг от друга атомными весами. Атомные веса изотопов оказались ближе к целым числам, чем атомные веса элементов, причём тем ближе, чем легче изотоп, т.е. чем меньше его атомный вес. Это навело ученых на мысль, что ядро состоит из частиц, атомные веса которых близки к единице. Этому условию хорошо удовлетворяет ядро атома водорода – протон, атомный вес которого близок к единице (1,008). Кроме того, так как заряд протона положителен, то напрашивалась идея, что в состав ядра обязательно должны входить протоны. Другие составные частицы ядра пришлось выяснять довольно долго. Явление естественной  $\beta$ -активности, казалось, свидетельствовало о том, что в состав ядра входят электроны. Поэтому была предложена протонно-электронная модель ядра. Однако протонно-электронная модель оказалась несостоятельной. По этой модели спин ядра, составленного из чётного числа протонов и электронов, должен быть целым (спин протона, как и спин электрона равен  $\frac{1}{2} \hbar$ ), а на практике наблюдаются и полуцелые числа. Модель не объясняла, почему магнитный момент ядра в 2000 раз меньше магнитного момента электрона. Наконец, протонно-электронная модель оказалась в противоречии с принципом Гейзенберга. Зная размеры ядра, можно оценить величину импульса электрона, входящего в состав ядра, а следовательно, и величину его энергии. Такие оценки дают, что энергия электрона в ядре около 200 Мэв. Согласно эксперименту, энергия связи одной частицы в ядре 7 – 8 Мэв. Кроме того, энергия в 200 Мэв во много раз превышает энергию электронов, испускаемых ядром при  $\beta$ -распаде.

Выход из затруднения был найден после того, как в 1932 году сотрудник Резерфорда, Чадвик, открыл новую элементарную частицу – нейтрон. Масса нейтрона примерно равна массе протона, чуть превышая её, а электрический заряд равен 0. Вскоре после открытия нейтрона, в 1934 году, советским физиком Д.Д.Иваненко была высказана гипотеза о протонно-нейтронном строении ядра. Эта же гипотеза была независимо высказана Гейзенбергом.

В настоящее время **протонно-нейтронная структура ядра** является общепризнанной и лежит в основе современных представлений о ядре и всей ядерной физики.

По современным данным протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрода  $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл и массу покоя  $m_p = (1,0075957 \pm \pm 0,000001)$  а.е.м.  $= (1836,09 \pm 0,01) m_e$ .

Нейтрон (n) — нейтральная частица с массой покоя  $m_n = (1,008982 \pm \pm 0,000003)$  а.е.м.  $= (1838,63 \pm 0,01) m_e$ , где 1 а.е.м.  $= 1,667 \cdot 10^{-27}$  кг – 1/12 массы атома  $C^{12}$ ;

$m_e = 9,106 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона.

В современной физике считается, что протон и нейтрон – два зарядовых состояния одной и той же частицы, которая называется **нуклоном** (от лат. nucleus - ядро). Итак, протон – протонное состояние нуклона, нейтрон – нейтронное состояние нуклона. Общее число нуклонов в атомном ядре называется **массовым числом А**.

Атомное ядро характеризуется зарядом  $Ze$ , где **Z** — **зарядовое число ядра**, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в периодической, системе элементов Менделеева. Известные в настоящее время 107 элементов таблицы Менделеева имеют зарядовые числа ядер от  $Z=1$  до  $Z=107$ . Так как  $Z$  равно числу протонов в ядре, то число нейтронов в ядре равно:  $N = A - Z$ . В ядерной физике принято ядро обозначать тем же символом, что и нейтральный атом:  ${}^A_Z X$ , где  $X$  - символ химического элемента,  $Z$  - атомный номер (число протонов в ядре),  $A$  — массовое число (число нуклонов в ядре).

Так как атом нейтрален, то заряд ядра определяет в число электронов в атоме. От числа же электронов зависит их распределение по состояниям в атоме, от которого, в свою очередь, зависят химические свойства атома. Следовательно, заряд ядра определяет специфику данного химического элемента, т. е. определяет число электронов в атоме, конфигурацию их электронных оболочек, величину и характер внутриатомного электрического поля.

Ядра с одинаковыми  $Z$ , но разными  $A$  (т. е. с разными числами нейтронов) называются изотопами, а ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  изобарами. Например, водород ( $Z=1$ ) имеет три изотопа;  ${}^1_1H$  - протий ( $Z=1, N=0$ );  ${}^2_1H$  - дейтерий, ( $Z=1, N=1$ );  ${}^3_1H$  - тритий ( $Z=1, N=2$ ). В подавляющем большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами (исключение составляют изотопы водорода), определяющимися в основном

структурой электронных оболочек, которая является одинаковой для всех изотопов данного элемента.

Примером ядер-изобар могут служить ядра:  ${}^{10}_4\text{Be}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{10}_6\text{C}$ . В настоящее время известно более 2500 ядер, отличающихся либо  $Z$ , либо  $A$ , либо тем и другим.

Резерфорд показал, что атомные ядра имеют размеры примерно  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  м (для сравнения, линейные размеры атома примерно  $10^{-10}$  м). Радиус ядра - задается эмпирической формулой  $R = R_0 A^{1/3}$ , где  $R_0 = (1,3 \div 1,7) 10^{-15}$  м. Однако при употреблении этого понятия необходимо соблюдать осторожность из-за его неоднозначности, например из-за размытости границы ядра. Объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Следовательно, плотность ядерного вещества примерно одинакова для всех ядер:  $\rho \approx 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

## 1.2 Дефект массы и энергия связи ядра

Исследования показывают, что атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Это означает, что в ядре между нуклонами существует определенная связь. Изучение этой связи может быть проведено без привлечения сведений о характере и свойствах ядерных сил, а основываясь на законе сохранения энергии. Введём определения.

**Энергией связи нуклона в ядре** называется физическая величина, равная работе, которую необходимо совершить для удаления данного нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии.

Полная **энергия связи ядра** определяется работой, которую нужно совершить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра из составляющих его нуклонов должна выделиться энергия, равная энергии связи ядра. Очевидно, что энергия связи ядра равна разности между суммарной энергией свободных нуклонов, составляющих данное ядро, и их энергией в ядре. Из теории относительности известно, что между энергией и массой имеется связь:

$$E = mc^2. \quad (250)$$

Если через  $\Delta E_{св}$  обозначить энергию, выделяющуюся при образовании ядра, то с этим выделением энергии, согласно формуле (250), должно быть связано уменьшение суммарной массы ядра при его образовании из составных частиц:

$$\Delta m = \Delta E_{св} / c^2 \quad (251)$$

Если обозначить через  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_я$  соответственно массы протона, нейтрона и ядра, то  $\Delta m$  можно определить по формуле:

$$\Delta m = [Zm_p + (A-Z)m_n] - m_{\text{я}} \quad (252)$$

Массу ядер очень точно можно определить с помощью масс-спектрометров - измерительных приборов, разделяющих с помощью электрических и магнитных полей пучки заряженных частиц (обычно ионов) с разными удельными зарядами  $q/m$ . Масс-спектрометрические измерения показали, что, действительно, *масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов*.

Разность между суммой масс нуклонов, составляющих ядро, и массой ядра называется **дефектом массы ядра** (формула (252)).

Согласно формуле (251), энергия связи нуклонов в ядре определится выражением:

$$\Delta E_{CB} = [Zm_p + (A-Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2. \quad (253)$$

В таблицах обычно приводятся не массы ядер  $m_{\text{я}}$ , а массы атомов  $m_a$ . Поэтому для энергии связи пользуются формулой

$$\Delta E_{CB} = [Zm_H + (A-Z)m_n - m_a]c^2 \quad (254)$$

где  $m_H$  - масса атома водорода  ${}_1\text{H}^1$ . Так как  $m_H$  больше  $m_p$ , на величину массы электрона  $m_e$ , то первый член в квадратных скобках включает в себя массу  $Z$  электронов. Но, так как масса атома  $m_a$  отличается от массы ядра  $m_{\text{я}}$  как раз на массу  $Z$  электронов, то вычисления по формулам (253) и (254) приводят к одинаковым результатам.

Часто вместо энергии связи ядра рассматривают **удельную энергию связи**  $\delta E_{CB}$  - это энергия связи, приходящаяся на один нуклон ядра. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер, т. е. чем больше  $\delta E_{CB}$ , тем устойчивее ядро. Удельная энергия связи зависит от массового числа  $A$  элемента. Для легких ядер ( $A \leq 12$ ) удельная энергия связи круто возрастает до  $6 \div 7$  МэВ, претерпевая целый ряд скачков (см. рисунок 93). Например, для  ${}_1^2\text{H}$   $\delta E_{CB} = 1,1$  МэВ, для  ${}_2^4\text{He}$  - 7,1 МэВ, для  ${}_3^6\text{Li}$  - 5,3 МэВ. При дальнейшем увеличении массового числа  $\delta E_{CB}$  возрастает более медленно до максимальной величины 8,7 МэВ у элементов с  $A=50 \div 60$ , а потом постепенно уменьшается для тяжелых элементов. Например, для  ${}_{92}^{238}\text{U}$  она составляет 7,6 МэВ. Отметим для сравнения, что энергия связи валентных электронов в атомах составляет примерно 10 эВ (в  $10^6$  раз меньше). На кривой зависимости удельной энергии связи от массового числа для стабильных ядер (рисунок 93) можно отметить следующие закономерности:

а) Если отбросить самые легкие ядра, то в грубом, так сказать нулевом приближении, удельная энергия связи постоянна и равна примерно 8 МэВ на нуклон. Приближенная независимость удельной энергии связи от числа нуклонов свидетельствует о свойстве насыщения ядерных сил. Это свойство состоит в том, что каждый нуклон может взаимодействовать только с несколькими соседними нуклонами.

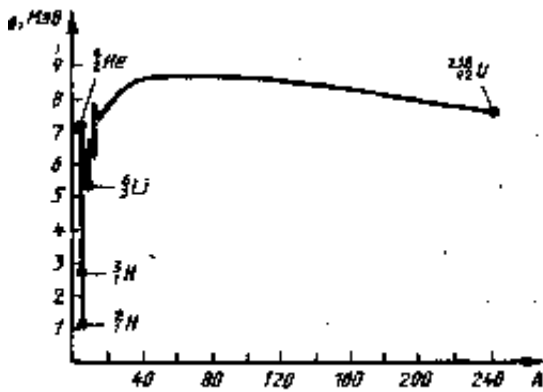


Рисунок 93

б) Удельная энергия связи не строго постоянна, а имеет максимум (~8,7 МэВ/нуклон) при  $A = 56$ , т.е. в области ядер железа, и спадает к обоим краям. Максимум кривой соответствует наиболее стабильным ядрам. Легчайшим ядрам энергетически выгодно сливаться друг с другом с выделением термоядерной энергии. Для наиболее тяжелых ядер, наоборот, выгоден процесс деления на осколки, идущий с выделением энергии, получивший название атомной.

Наиболее устойчивыми оказываются так называемые магические ядра, у которых число протонов или число нейтронов равно одному из магических чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Особенно стабильны дважды магические ядра, у которых магическими являются и число протонов, и число нейтронов. Этих ядер насчитывается всего пять:  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ .

### 1.3 Спин и магнитный момент ядра

Использование приборов высокой разрешающей способности и специальных источников возбуждения спектра излучения химических элементов позволило обнаружить сверхтонкую структуру спектральных линий. Ее существование В. Паули объяснил (1924) наличием у атомных ядер собственного момента импульса (спина) и магнитного момента.

Собственный момент импульса ядра — спин ядра — складывается из спинов нуклонов и из орбитальных моментов импульса нуклонов (моментов импульса, обусловленных движением нуклонов внутри ядра). Обе эти величины являются векторами, поэтому спин ядра представляет их векторную сумму. Спин ядра квантуется по закону  $L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{I(I+1)}$ , где  $I$  — спиновое ядерное квантовое число (его часто называют просто спином ядра), которое принимает целые или полуцелые значения. Ядра с четными  $A$  имеют целые  $I$ , с нечетными — полуцелые  $I$ .

Атомное ядро кроме спина обладает магнитным моментом  $\mathbf{p}_m$ . Единицей магнитных моментов ядер служит ядерный магнетон  $\mu_{\text{я}} = e\hbar/2m_p = 5,0508 \cdot 10^{-27}$  Дж/Тл, где  $m_p$  — масса протона. Ядерный магнетон примерно в 1836 раз меньше магнетона Бора, поэтому магнитные свойства атомов определяются в основном магнитными свойствами их электронов.

Измерения показали, что протон и нейтрон имеют магнитные моменты:

$\mu_p = 2,79\mu_N$ ,  $\mu_n = -1,91\mu_N$ ;  $\mu_p / \mu_n = -3/2$ . Знак « - » у магнитного момента нейтрона свидетельствует о том, что спиновый и магнитный моменты нейтрона антипараллельны.

## 2 Ядерные силы

Прочная связь, существующая между нуклонами в ядре, свидетельствует о наличии в атомных ядрах особых, так называемых, **ядерных сил**. С помощью экспериментальных данных по рассеянию нуклонов на ядрах, ядерным превращениям и т. д. доказано, что ядерные силы имеют специфическую природу и не сводятся ни к одному из типов сил, рассмотренных в предыдущих разделах курса физики. Ядерные силы не являются гравитационными. Они в  $10^{38}$  раз превышают гравитационные силы между нуклонами. Отпадает предположение об электрической природе ядерных сил, т.к. в этом случае невозможно объяснить существование ядра тяжёлого водорода  ${}^2_1H$ , состоящего из одного протона и одного нейтрона. Ядерные силы не магнитного происхождения, несмотря на то, что нуклоны обладают магнитными моментами. Согласно расчётам сила магнитного взаимодействия между протоном и нейтроном всего около  $10^5$  эВ, что значительно меньше энергии связи этих нуклонов в дейтроне  ${}^2_1H$ . Ядерные силы относятся к классу так называемых **сильных взаимодействий** и на настоящее время являются самыми мощными силами в природе. Они в 137 раз интенсивней электромагнитного взаимодействия и, как отмечалось выше, в  $10^{38}$  раз интенсивнее гравитационных сил.

Перечислим основные свойства ядерных сил:

1) Ядерные силы являются *силами притяжения* на расстояниях между нуклонами больше  $0,7$  Фм и *силами отталкивания* на расстояниях меньших  $0,7$  Фм..

2) Ядерные силы являются *короткодействующими*. Их действие проявляется только на расстояниях примерно  $10^{-15}$  м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях, меньших их радиуса действия, оказываются примерно в 100 раз больше кулоновских сил, действующих между протонами на том же расстоянии.

3) Ядерным силам свойственна *зарядовая независимость*: ядерные силы, действующие между двумя протонами или двумя нейтронами, или, наконец, между протоном и нейтроном, одинаковы по величине. Отсюда следует, что ядерные силы имеют неэлектрическую природу. В смысле динамического взаимодействия нейтроны и протоны равноправны. Поэтому для характеристики ядерного взаимодействия нуклонов вводят так называемый *барионный заряд*. Барионный заряд нейтрона и протона одинаков и равен 1. Для него имеет место закон сохранения.

4) Ядерным силам свойственно *насыщение*, т. е. каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов.

Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре (если не учитывать легкие ядра) при увеличении числа нуклонов не растет, а остается приблизительно постоянной. В этом отношении ядерные силы похожи на силы, обуславливающие химическую валентность. Если бы насыщения не было, нуклон мог бы взаимодействовать одновременно со всеми нуклонами, и энергия связи росла бы с ростом  $A$  не линейно, а квадратично, так как  $A$  нуклонов ядра можно объединить в пары  $A(A-1)/2$  способами. В отношении приближенного постоянства удельной энергии связи ядро похоже на жидкость или твердое тело.

5) Ядерные силы зависят от взаимной *ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов. Например, протон в нейтрон образуют дейтрон (ядро изотопа  ${}^2_1\text{H}$ ) только при условии параллельной ориентации их спинов.

6) Ядерные силы не являются *центральными*, т. е. их нельзя представить действующими вдоль линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов, и они зависят не только от расстояния между нуклонами.

7) Ядерные силы носят *обменный характер*. Идея о взаимодействии двух частиц путём обмена третьей частицей была выдвинута впервые советскими физиками Таммом И.Е. и Иваненко Д.Д. Обменная теория ядерных сил была впервые предложена японским физиком Хидеки Юкавой в 1935 году. Согласно этой теории вокруг нуклона имеется ядерное поле, квантами которого являются частицы, масса которых промежуточная между массой нуклона и электрона, – мезоны. Впоследствии такие частицы, удовлетворяющие всем необходимым требованиям,  $\pi$  – мезоны (пионы), были обнаружены в космических лучах. Согласно мезонной теории взаимодействие между нуклонами осуществляется путём обмена виртуальными пионами. За работы в области ядерных сил Юкава в 1949 году был награждён Нобелевской премией по физике.

Следует отметить, что в последнее время выяснилась ограниченность мезонной теории ядерных сил. С открытием кварковой структуры нуклонов возникло представление о том, что переносчиками сильного взаимодействия являются так называемые глюоны – электрически нейтральные и безмассовые элементарные частицы. Несмотря на это, мезонная теория ядерных сил сыграла в физике выдающуюся роль, т.к. именно в её рамках окончательно сформировалась важнейшая концепция единства механизмов всех фундаментальных взаимодействий. Таким образом, *все фундаментальные взаимодействия: гравитационные, электромагнитные, сильные, слабые, имеют обменный характер*. Переносчиками гравитационного взаимодействия являются гравитоны, электромагнитного – фотоны, сильного – глюоны и слабого – промежуточные бозоны. Следует отметить, что в настоящее время пока остаются экспериментально не обнаруженными гравитоны.

### 3 Модели ядра

Сложный характер ядерных сил и трудность точного решения уравнений движения всех нуклонов ядра (ядро с массовым числом  $A$  представляет собой систему из  $A$  тел) не позволили до настоящего времени разработать единую последовательную теорию атомного ядра. Поэтому на данной стадии прибегают к рассмотрению приближенных ядерных моделей, в которых ядро заменяется некоторой модельной системой, довольно хорошо описывающей только определенные свойства ядра и допускающей более или менее простую математическую трактовку. Из большого числа моделей, каждая из которых обязательно использует подобранные произвольные параметры, согласующиеся с экспериментом, рассмотрим две: капельную и оболочечную.

1. *Капельная модель ядра* является исторически первой моделью. Она была предложена в 1936 г. известным советским физиком – теоретиком Я. И. Френкелем и получила развитие в работах Н. Бора и немецкого физика-теоретика К. Вейцеккера. Капельная модель основана на аналогии между поведением нуклонов в ядре и поведением молекул в капле жидкости. Так, в обоих случаях силы, действующие между составными частицами — молекулами в жидкости и нуклонами в ядре, — являются короткодействующими, и им свойственно насыщение. Для капли жидкости при данных внешних условиях характерна постоянная плотность ее вещества. Ядра же характеризуются практически постоянной удельной энергией связи и постоянной плотностью, не зависящей от числа нуклонов в ядре. Наконец, объем капли, так же как и объем ядра, пропорционален числу частиц. Существенное отличие ядра от капли жидкости в этой модели заключается в том, что она трактует ядро как каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости (с плотностью, равной ядерной), подчиняющуюся законам квантовой механики. Капельная модель ядра позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре, объяснила механизм ядерных реакций и особенно реакции деления ядер. Однако эта модель не смогла объяснить повышенную устойчивость ядер, содержащих магические числа протонов и нейтронов.

2. *Оболочечная модель ядра* предложена в 1949 американским физиком М. Гепперт-Майер (1906-1972) и немецким физиком Х. Иенсенем (1907—1973). Оболочечная модель предполагает распределение нуклонов в ядре по дискретным энергетическим уровням (оболочкам), заполняемым нуклонами согласно принципу Паули, и связывает устойчивость ядер с заполнением этих уровней. Считается, что ядра с полностью заполненными оболочками являются наиболее устойчивыми. Такие особо устойчивые (магические) ядра действительно существуют.

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



3) По мере дальнейшего накопления экспериментальных данных о свойствах атомных ядер появлялись все новые факты, не укладывающиеся в рамки описанных моделей. Так возникли обобщенная модель ядра (синтез капельной к оболочечной моделей), а также и другие модели.

## 4 Ядерные превращения

### 4.1 Радиоактивный распад и радиоактивные излучения

Французский физик А. Беккерель (1852—1908) в 1896 г. при изучении люминесценции солей урана случайно обнаружил самопроизвольное испускание ими излучения неизвестной природы, которое действовало на фотопластинку, ионизировало воздух, проникало сквозь тонкие металлические пластинки, вызывало люминесценцию ряда веществ. Продолжая исследование этого явления, французские ученые супруги Кюри, Мария (1867—1934) и Пьер (1859—1906), обнаружили, что беккерелевское излучение свойственно не только урану, но и многим другим тяжелым элементам, таким, как торий и актиний. Они показали также, что урановая смоляная обманка (руда, из которой добывается металлический уран) испускает излучение, интенсивность которого во много раз превышает интенсивность излучения урана. Таким образом, удалось выделить два новых элемента — носителя беккерелевского излучения: полоний  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  и радий  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ . Обнаруженное излучение было названо радиоактивным излучением, а само явление испускания радиоактивного излучения — радиоактивностью.

Дальнейшие опыты показали, что на характер радиоактивного излучения препарата не оказывают влияния вид химического соединения, агрегатное состояние, механическое давление, температура, электрические и магнитные поля, т. е. все те воздействия, которые могли бы привести к изменению состояния электронной оболочки атома. Радиоактивность — это ядерный процесс, радиоактивные свойства элемента обусловлены лишь структурой его ядра. Радиоактивность данного элемента не меняется, если элемент вступает в какое-либо химическое соединение.

Радиоактивные излучения бывают трех типов:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение.

**$\alpha$ -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью. Оно представляет собой поток ядер гелия; заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ , а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ .  **$\beta$ -излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями;  $\beta$ -излучение представляет поток быстрых электронов.  **$\gamma$ -излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями. Исследования показали, что  $\gamma$ -излучение это ни что иное, как коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны ( $\lambda < 10^{-10}$  м) и, вследствие этого, ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е.  $\gamma$ -излучение является потоком частиц -  $\gamma$ -квантов.

## 4.2 Закон радиоактивного распада.

В настоящее время под **радиоактивностью** понимают способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. **Элементарной частицей** называется микробъект, который невозможно расщепить на составные части. Радиоактивность подразделяется на естественную (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и искусственную (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Теория радиоактивного распада строится на предположении о том, что радиоактивный распад является спонтанным процессом, подчиняющимся законам статистики. Так как отдельные радиоактивные ядра распадаются независимо друг от друга, то можно считать, что число ядер  $dN$ , распавшихся в среднем за интервал времени от  $t$  до  $t+dt$ , пропорционально промежутку времени  $dt$  и числу  $N$  нераспавшихся ядер к моменту времени  $t$ :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (255)$$

где  $\lambda$  - постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая **постоянной радиоактивного распада**; знак минус указывает, что общее число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Разделив переменные и интегрируя, получим:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t, \\ N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (256)$$

где  $N_0$  - начальное число ядер (в момент времени  $t = 0$ ),  $N$  — число *нераспавшихся* ядер в момент времени  $t$ . Формула (256) выражает **закон радиоактивного распада**, согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону. Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют две величины: период полураспада  $T_{1/2}$  и среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра. **Периодом полураспада**  $T_{1/2}$  называется время, за которое исходное число радиоактивных ядер *в среднем* уменьшается вдвое. Тогда, согласно уравнению (256),

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad \text{откуда} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (257)$$

Периоды полураспада для естественно-радиоактивных элементов колеблются от десятиллионных долей секунды до многих миллиардов лет.

Суммарная продолжительность жизни  $dN$  ядер равна  $t|dN| = \lambda N dt$ . Проинтегрировав это выражение по всем возможным  $t$  (т. е. от 0 до  $\infty$ ) и разделив на начальное число ядер  $N_0$ , получим среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (258)$$

Таким образом, среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада  $\lambda$ .

**Активностью  $A$**  нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ ) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad (259)$$

Единица активности в СИ — беккерель (Бк): 1 Бк — активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада. До сих пор в ядерной физике применяется и внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике — Кюри ( $Ku$ ):  $1 Ku = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

1  $Ku$  — это активность, которой обладает 1 г радия. Кюри — очень крупная единица, потому что радий сам по себе очень активный элемент и масса в 1 г — довольно большая величина для реальных препаратов. Достаточно сказать, что наличное количество радия во всём мире сейчас измеряется килограммами.

**Удельной активностью** называют число распадов ядер, происходящих за 1 с в единице массы вещества:

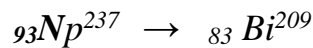
$$a = \left| \frac{dN}{m dt} \right| = \lambda N / m \quad (260)$$

Единица удельной активности — Бк / кг.

Исходные ядра радиоактивного вещества называются материнскими, а продукт распада — дочерними ядрами. Часто дочерние ядра в свою очередь являются радиоактивными. Они распадаются с образованием новых радиоактивных ядер и т.д. Образуется цепочка радиоактивных превращений, называемая радиоактивным семейством или радиоактивным рядом. В настоящее время известно 4 радиоактивных ряда:

- |                              |                   |               |                   |
|------------------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| 1. ряд урана                 | ${}_{92}U^{238}$  | $\rightarrow$ | ${}_{82}Pb^{206}$ |
| 2. ряд актиния (актиноурана) | ${}_{92}U^{235}$  | $\rightarrow$ | ${}_{82}Pb^{207}$ |
| 3. ряд тория                 | ${}_{90}Th^{232}$ | $\rightarrow$ | ${}_{82}Pb^{208}$ |

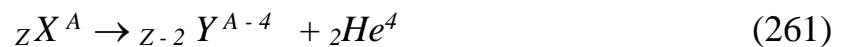
## 4. ряд нептуния



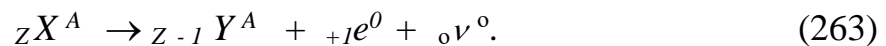
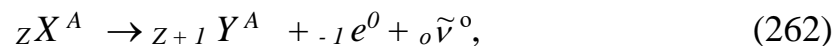
Первые три ряда являются естественно радиоактивными. Родоначальник последнего семейства  ${}_{93}\text{Np}^{237}$  получен искусственным путём.

### 4.3 Правила смещения

Радиоактивный распад происходит в соответствии с так называемыми правилами смещения, позволяющими установить, какое ядро возникает в результате распада материнского ядра. Правила смещения являются следствием двух законов сохранения: закона сохранения массового числа и закона сохранения заряда. Для  $\alpha$ -распада это правило имеет вид:



Для электронного и позитронного  $\beta$ -распадов правила смещения имеют вид:



где  $X$  – химический символ материнского ядра;  $Y$  – химический символ дочернего ядра;  ${}_0\tilde{\nu}^0$  и  ${}_0\nu^0$  – антинейтрино и нейтрино соответственно;  ${}_{-1}e^0$  – электрон;  ${}_{+1}e^0$  – позитрон.

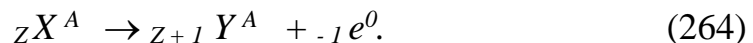
### 4.4 $\alpha$ -распад

Распад тяжёлых ядер ( $A > 200$ ) и ( $Z > 82$ ) и испусканием  $\alpha$ -частиц называется  $\alpha$ -распадом.  $\alpha$ -частицы это ядра атома гелия  ${}_2\text{He}^4$ , следовательно заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ , а массовое число равно 4. Правило смещения для  $\alpha$ -распада имеет вид соотношения (261).  $\alpha$ -частицы не содержатся в ядре в готовом виде. Они образуются в ядре в момент его распада. Для понимания механизма  $\alpha$ -распада большую роль сыграли опыты Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц на ядрах урана. Было установлено, что  $\alpha$ -частицы, испускаемые  $\text{Th C}'$  и обладающие энергией 8,8 МэВ, отталкиваются от ядра по закону Кулона на любых расстояниях, вплоть до 30 Фм. Следовательно, высота кулоновского барьера ядра урана больше 8,8 МэВ. С другой стороны,  $\alpha$ -частицы, испускаемые самим ядром урана, имеют энергию лишь 4 МэВ. Отсюда следует, что *вылет  $\alpha$ -частицы из ядра при его распаде представляет собой квантовый туннельный эффект*. Опыты показывают, что  $\alpha$ -радиоактивные ядра испускают несколько групп  $\alpha$ -частиц с определёнными энергиями. Это свидетельствует о том, что атомные ядра обладают дискретным набором значений энергий.

При прохождении в веществе  $\alpha$ -частицы расходуют свою энергию на ионизацию среды. Так как  $\alpha$ -частицы являются тяжёлыми заряженными частицами с энергией много большей энергии ионизации атомов, то ионизационная способность  $\alpha$ -частиц очень велика. В ионизационной камере или в фотоэмульсии  $\alpha$ -частицы оставляют короткие жирные прямолинейные следы. Длина пробега  $\alpha$ -частиц в среде невелика.  $\alpha$ -частицы задерживаются бумагой, одеждой. Следовательно, защита от  $\alpha$ -излучения не представляет собой проблему, но, попадая в слизистые оболочки, оно производит наиболее сильные поражения.

#### 4.5 $\beta$ -распад

Естественный радиоактивный  $\beta$ -распад заключается в самопроизвольном распаде ядер с испусканием  $\beta$ -частиц - электронов. Правило смещения для естественного (электронного)  $\beta$ -распада описывается выражением:

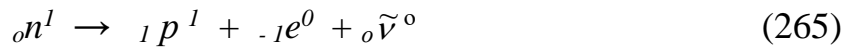


Исследование энергетического спектра  $\beta$ -частиц показало, что, в отличие от спектра  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частицы имеют непрерывный спектр от 0 до  $E_{\max}$ . При открытии  $\beta$ -распада необходимо было объяснить следующее:

- 1) почему материнское ядро всегда теряет энергию  $E_{\max}$ , а энергия  $\beta$ -частиц может быть меньше  $E_{\max}$ ;
- 2) как образуется  ${}_{-1} e^0$  при  $\beta$ -распаде?, ведь в состав ядра электрон не входит;
- 3) если при  $\beta$ -распаде вылетает  ${}_{-1} e^0$ , то нарушается закон сохранения момента импульса: число нуклонов ( $A$ ) не изменяется, но электрон обладает спином  $\frac{1}{2}\hbar$ , следовательно, в правой части соотношения (264) спин отличается от спина левой части соотношения на  $\frac{1}{2}\hbar$ .

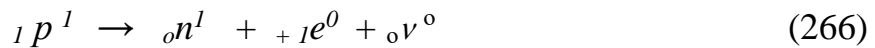
Для выхода из затруднения в 1931г. Паули предположил, что кроме  ${}_{-1} e^0$  при  $\beta$ -распаде вылетает ещё одна частица – нейтрино ( ${}_{0}\nu^0$ ), масса которой много меньше массы электрона, заряд равен 0 и спин  $s = \frac{1}{2}\hbar$ . Эта частица уносит энергию  $E_{\max} - E_{\beta}$  и обеспечивает выполнение законов сохранения энергии и импульса. Экспериментально  ${}_{0}\nu^0$  было обнаружено в 1956 году. Трудности обнаружения  ${}_{0}\nu^0$  связаны с его малой массой и нейтральностью. В связи с этим  ${}_{0}\nu^0$  может проходить огромные расстояния до поглощения веществом. В воздухе один акт ионизации под действием нейтрино происходит на расстоянии около 500 км. Пробег  ${}_{0}\nu^0$  с энергией 1 МэВ в свинце  $\sim 10^{18}$  м.  ${}_{0}\nu^0$  можно обнаружить косвенным путём с использованием закона сохранения импульса при  $\beta$ -распаде: сумма векторов импульсов  ${}_{-1} e^0$ ,  ${}_{0}\nu^0$  и ядра отдачи должна быть равна 0. Опыты подтвердили это ожидание.

Так как при  $\beta$ -распаде число нуклонов не изменяется, а заряд увеличивается на 1, единственное объяснение  $\beta$ -распада может быть следующее: один из  ${}_n^1$  ядра превращается в  ${}_1 p^1$  с испусканием  ${}_{-1} e^0$  и нейтрино:



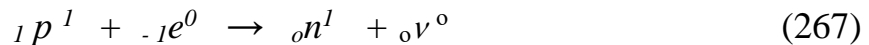
Установлено, что при естественном  $\beta$ -распаде испускается *электронное антинейтрино* -  ${}_0\tilde{\nu}^0$ . Энергетически реакция (265) выгодна, так как масса покоя  ${}_0n^1$  больше массы покоя  ${}_1p^1$ . Следовало ожидать, что и свободный  ${}_0n^1$  радиоактивен. Это явление действительно было обнаружено в 1950 году в потоках нейтронов больших энергий, возникающих в ядерных реакторах, и служит подтверждением механизма  $\beta$ -распада по схеме (262).

Рассмотренный  $\beta$ -распад называется электронным. В 1934 г. Фредерик и Жолио-Кюри обнаружили искусственный позитронный  $\beta$ -распад, при котором из ядра вылетает античастица электрона – позитрон и нейтрино (см. реакцию (263)). В этом случае один из протонов ядра превращается в нейтрон:



Для свободного протона такой процесс невозможен, по энергетическим соображениям, т.к. масса протона меньше массы нейтрона. Однако в ядре протон может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов ядра. Таким образом реакция (344) может протекать как внутри ядра, так и для свободного нейтрона, а реакция (345) происходит только внутри ядра.

Третий вид  $\beta$ -распада – К-захват. В этом случае ядро спонтанно захватывает один из электронов К-оболочки атома. При этом один из протонов ядра превращается в нейтрон по схеме:



При этом виде  $\beta$ -распада из ядра вылетает только одна частица -  ${}_0\nu^0$ . К-захват сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

Таким образом при всех видах  $\beta$ -распада, протекающим по схемам (265) – (267), выполняются все законы сохранения: энергии, массы, заряда, импульса, момента импульса.

Превращения нейтрона в протон и электрон и протона в нейтрон и позитрон обусловлены не внутриядерными силами, а силами, действующими внутри самих нуклонов. Связанные с этими силами **взаимодействия называются слабыми**. Слабое взаимодействие гораздо слабее не только сильного, но и электромагнитного взаимодействия, но гораздо сильнее гравитационного. О силе взаимодействия можно судить по скорости протекания процессов, которые оно вызывает при энергиях  $\sim 1$  ГэВ, характерных для физики элементарных частиц. При таких энергиях процессы, обусловленные сильным взаимодействием, происходят за время  $\sim 10^{-24}$ с, электромагнитный процесс за время  $\sim 10^{-21}$ с, а время, характерное для процессов, происходящих за счёт слабого взаимодействия, гораздо больше:  $\sim 10^{-10}$ с, так что в мире элементарных частиц слабые процессы протекают чрезвычайно медленно.

При прохождении  $\beta$ -частиц через вещество они теряют свою энергию. Скорость  $\beta$ -электронов, возникающих при  $\beta$ -распаде, может быть очень велика – сравнима со скоростью света. Их энергетические потери в веществе происходят за счёт ионизации и тормозного излучения. *Тормозное излучение* является основным источником потерь энергии для *быстрых электронов*, в то время как для протонов и более тяжёлых заряженных ядер тормозные потери несущественны. При *малых энергиях электронов* основным источником потерь энергии являются *ионизационные потери*. Существует некоторая *критическая энергия электронов*, при которой тормозные потери становятся равными ионизационным. Для воды она равна около 100 МэВ, для свинца – около 10 МэВ, для воздуха – несколько десятков МэВ. Поглощение потока  $\beta$ -частиц с одинаковыми скоростями в однородном веществе подчиняется экспоненциальному закону  $N = N_0 e^{-\mu x}$ , где  $N_0$  и  $N$  – число  $\beta$ -частиц на входе и выходе слоя вещества толщиной  $x$ ,  $\mu$  – коэффициент поглощения.  $\beta$ -излучение сильно рассеивается в веществе, поэтому  $\mu$  зависит не только от вещества, но и от размеров и формы тел, на которые падает  $\beta$ -излучение. Ионизационная способность  $\beta$ -лучей невелика, примерно в 100 раз меньше чем у  $\alpha$ -частиц. Поэтому и проникающая способность  $\beta$ -частиц намного больше, чем у  $\alpha$ -частиц. В воздухе пробег  $\beta$ -частиц может достигать 200 м, в свинце до 3 мм. Так как  $\beta$ -частицы обладают очень малой массой и единичным зарядом, то их траектория движения в среде – ломаная линия.

#### 4.6 $\gamma$ - лучи

Как отмечалось в п.12.4.1,  $\gamma$  - лучи представляют собой жёсткое электромагнитное излучение с ярко выраженными корпускулярными свойствами. Понятия  *$\gamma$ -распад* не существует.  $\gamma$  - лучи сопровождают  $\alpha$ - и  $\beta$ -распад всегда, когда дочернее ядро оказывается в возбуждённом состоянии. Для каждого сорта атомных ядер имеется дискретный набор частот  $\gamma$ -излучений, определяемый совокупностью энергетических уровней в атомном ядре. Итак,  $\alpha$ - и  $\gamma$ -частицы имеют дискретные спектры излучения, а  $\beta$ -частицы - сплошные спектры. Наличие линейчатого спектра  $\gamma$ - и  $\alpha$ -лучей имеет принципиальное значение и является доказательством того, что атомные ядра могут находиться в определённых дискретных состояниях.

Поглощение  $\gamma$  - лучей веществом происходит по закону:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (268)$$

где  $I$  и  $I_0$  - интенсивности  $\gamma$  - лучей до и после прохождения через слой вещества толщиной  $x$ ;  $\mu$  – коэффициент линейного поглощения. Поглощение  $\gamma$  - лучей веществом происходит, в основном, за счёт трёх процессов: фотоэффекта, комптоновского эффекта и образования электронно-позитронных ( $e^+ e^-$ ) пар. Поэтому  $\mu$  можно представить в виде суммы:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_{\eta}. \quad (269)$$

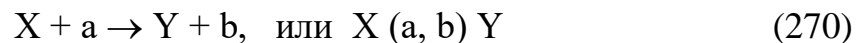
При поглощении  $\gamma$  – кванта электронной оболочкой атомов происходит фотоэффект, в результате которого электроны вырываются из внутренних слоёв электронной оболочки. Этот процесс называется *фотоэлектрическим поглощением*  $\gamma$  - лучей. Расчёты показывают, он существенен при энергиях  $\gamma$  - квантов  $\leq 0,5$  МэВ. Коэффициент поглощения  $\mu_{\phi}$  зависит от атомного номера  $Z$  вещества и длины волны  $\gamma$  - лучей. По мере всё большего увеличения энергии  $\gamma$  - квантов по сравнению с энергией связи электронов в атомах, в молекулах или в кристаллической решётке вещества взаимодействие  $\gamma$  - фотонов с электронами всё более приближается по своему характеру к взаимодействию со свободными электронами. В этом случае происходит *комптоновское рассеяние*  $\gamma$  - лучей на электронах, характеризуемое коэффициентом рассеяния  $\mu_{\kappa}$ .

При увеличении энергии  $\gamma$  - квантов до значений, превышающих удвоенную энергию покоя электрона  $2m_0c^2$  (1,022 МэВ), возникает аномально большое поглощение  $\gamma$  - лучей, связанное с образованием электронно-позитронных пар, особенно в тяжёлых веществах. Этот процесс характеризуется коэффициентом поглощения  $\mu_{\eta}$ .

Само  $\gamma$ -излучение обладает относительно слабой ионизирующей способностью. Ионизацию среды производят, в основном, вторичные электроны, появляющиеся при всех трёх процессах.  $\gamma$  - лучи - одно из наиболее проникающих излучений. Например, для более жёстких  $\gamma$  - лучей толщина слоя половинного поглощения равна в свинце 1,6 см, в железе – 2,4 см, в алюминии – 12 см, в земле – 15 см.

## 5 Ядерные реакции

Ядерные реакции - это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами ( в том числе и с  $\gamma$  - квантами) или друг с другом. Символическая запись ядерной реакции:



где  $X$  и  $Y$  – исходные ядра,  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая ( или испускаемые ) частицы.

В ядерной физики эффективность взаимодействия характеризуют *эффективным сечением*  $\sigma$ . С каждым видом взаимодействия связывают свое эффективное сечение (рассеяния, поглощения). Эффективное сечение ядерной реакции  $\sigma = \frac{dN}{nNdx}$ , где  $N$ - число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества,  $n$  – число ядер в единице объема облучаемого вещества,  $dN$ - число частиц, вступивших в ядерную реакцию в слое толщиной  $dx$ . Эффективное сечение  $\sigma$  имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на



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

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел. Выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

Ядерные реакции могут быть как *экзотермическими*, протекающими с выделением энергии, так и *эндотермическими*, сопровождающимися поглощением энергии.

Важную роль в объяснении механизма ядерных реакции сыграло предложение Н.Бора (1936) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия – это захват ядром  $X$  частицы  $a$ , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно  $2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ ), 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 – ядро тяжелого изотопа водорода, содержащее один протон и один нейтрон, или  $\alpha$ -частица) может получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате возможна вторая стадия реакции – распад составного ядра на ядро  $Y$  и частицу  $b$ .

В ядерной физике вводится понятие характерное ядерное время – время, необходимое для пролета частицей расстояния, примерно равного диаметру ядра ( $10^{-15} \text{ м}$ ). Так для частицы с энергией 1 МэВ (что соответствует ее скорости порядка  $10^7 \text{ м/с}$ ) характерное ядерное время  $\tau = 10^{-22} \text{ с}$ . С другой стороны, время жизни составного ядра равно  $10^{-16} - 10^{-12} \text{ с}$ , т.е. составляет  $(10^6 - 10^7)\tau$ . За это время может произойти очень много столкновений нуклонов между собой. Следовательно, составное ядро живет настолько долго, что полностью «забывает», каким образом оно образовалось. Поэтому характер распада не зависит от способа образования составного ядра.

## 5.1 Ядерные реакции под действием нейтронов

К началу 40-х годов было доказано, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины периодической системы. Реакция деления тяжелых ядер происходит как под действием нейтронов, так и других частиц. Нейтрон, проникающий в ядро, вносит туда энергию, которая в очень короткое время распределяется между всеми нуклонами. В результате образуется новое ядро в возбужденном состоянии. Если энергия возбуждения невелика, то деления ядра не происходит, и ядро, потеряв избыток энергии путем испускания  $\gamma$ -фотона или нейтрона, возвратится в исходное состояние. Но если вносимая нейтроном энергия велика, то возбужденное ядро-капля начинает

деформироваться, в нем образуется перетяжка, и в результате оно делится на два осколка, разлетающихся с огромными скоростями, вследствие действия между ними сил электростатического отталкивания. Мерой устойчивости ядер к делению является отношение электростатической энергии отталкивания протонов, стремящейся разорвать ядро, к энергии поверхностного натяжения, стремящейся удержать ядро в равновесии. Условие устойчивости имеет вид:

$\frac{Z^2}{A} < 45$ . Энергия, до которой нужно возбудить ядро, чтобы произошел процесс

деления, называется *критической энергией*.  $E_{кр}$  для  $^{235}\text{U} = 6,5$  МэВ, для  $^{238}\text{U} = 7$  МэВ. Энергия, вносимая в ядро медленным нейтроном, для  $^{235}\text{U} = 6,8$  МэВ, а для  $^{238}\text{U} = 5,5$  МэВ. Поэтому деление  $^{235}\text{U}$  возможно как медленными, так и быстрыми нейтронами, а  $^{238}\text{U}$  – только быстрыми. Замечательной особенностью реакции деления ядер является то, что оно сопровождается испусканием двух-трёх вторичных нейтронов, называемых нейтронами деления. Т.к. для средних ядер число нейтронов примерно равно числу протонов ( $N/Z \sim 1$ ), а для тяжелых ядер число нейтронов значительно превышает число протонов ( $N/Z \sim 1,6$ ), то образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они выделяют нейтроны деления. Однако испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку ядер-осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными. Они могут претерпевать ряд электронных  $\beta$ -превращений, сопровождаемых испусканием  $\gamma$ -квантов:  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + {}_0^0\tilde{\nu}$  е. Большинство нейтронов при делении испускаются практически мгновенно ( $t \leq 10^{-14}$  с), а часть (около 0,7%) испускается осколками деления спустя некоторое время после деления ( $0,05 \leq t \leq 60$  с). Первые из них называются мгновенными, вторые – запаздывающими. В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 испущенных нейтрона. Они имеют сравнительно широкий энергетический спектр в пределах от 0 до 7 МэВ, причем на один нейтрон в среднем приходится энергия около 2 МэВ.

Для осуществления цепной реакции деления необходимо, чтобы хотя бы один из вторичных нейтронов, образующихся при одном акте деления, смог вызвать следующий акт деления. Несмотря на то, что в процессе деления ядра урана в среднем возникает 2-3 нейтрона, не все они участвуют в ядерных реакциях, а те нейтроны, которые попадают в ядро, не всегда вызывают деление. Условие существования цепной реакции определяется величиной коэффициента размножения  $k$  нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. При  $k < 1$  цепная ядерная реакция невозможна, при  $k = 1$  поддерживается цепная реакция с постоянным количеством нейтронов, такая реакция применяется в ядерных реакторах. При  $k > 1$  число нейтронов, а значит и число делений, непрерывно возрастает и реакция может стать взрывной. Коэффициент размножения зависит от ряда факторов, в частности, для данного изотопа он зависит от количества делящегося вещества, от его геометрической формы и объема. При одной и той же массе потери тем меньше, чем меньше поверхность куска, поэтому для развития реакции выгоднее шарообразная форма

делящегося вещества. Увеличивая массу можно достичь состояния, при котором  $k=1$  и реакция перестанет затухать. Предельная масса, при которой выполняется условие  $k=1$ , называется *критической массой*. Для  ${}_{92}\text{U}^{235}$   $m_k = 47$  кг, а для среды из урана с частыми и тонкими полиэтиленовыми прокладками и с отражающей оболочкой из бериллия  $m_k = 242$  г.

Для получения максимума энергии от деления необходимо, чтобы как можно большее число нейтронов использовалось только для осуществления деления, т.е. нужно свести к минимуму число нейтронов, исчезающих в результате радиационного захвата. При энергиях нейтронов порядка 0,01 эВ вероятность реакции деления  $\sim$  в 1000 раз выше, чем при энергии 1 МэВ, поэтому для протекания самоподдерживающейся цепной реакции необходимо замедлять нейтроны.

## 5.2 Ядерная энергетика

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

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

Большое значение в ядерной энергетике приобретает не только осуществление, но и управление цепной реакцией деления. Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, называются ядерными реакторами. Пуск первого в мире реактора осуществлен в Чикагском университете (1942) под руководством Э. Ферми, в России (и в Европе) — в Москве (1946) под руководством И.В. Курчатова.

Рассмотрим принцип действия реактора на тепловых нейтронах (рисунок 93). В активной зоне реактора расположены тепловыделяющие элементы 1 и замедлитель 3, в котором нейтроны замедляются до тепловых скоростей.

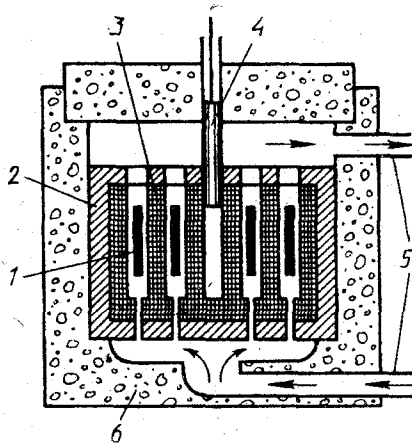


Рисунок 93

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) представляют собой блоки из делящегося материала, заключенные в герметичную оболочку, слабо поглощающую нейтроны. За счет энергии, выделяющейся при делении ядер, ТВЭЛы разогреваются, а поэтому для охлаждения они помещаются в поток теплоносителя (5 — канал для протока теплоносителя). Активная зона окружается отражателем 2, уменьшающим утечку нейтронов.

Управление цепной реакцией осуществляется специальными управляющими стержнями 4 из материалов, сильно поглощающих нейтроны

(например, В, Cd). Снаружи реактор окружают защитной оболочкой б, задерживающей  $\gamma$ -излучение и нейтроны.

Параметры реактора рассчитываются так, что при полностью вставленных стержнях реакция заведомо не идет. При постепенном вынимании стержней коэффициент размножения нейтронов растет и при некотором их положении принимает значение, равное единице. В этот момент реактор начинает работать. По мере его работы количество делящегося материала в активной зоне уменьшается и происходит ее загрязнение осколками деления, среди которых могут быть сильные поглотители нейтронов. Чтобы реакция не прекратилась, из активной зоны с помощью автоматического устройства постепенно извлекаются управляющие (а часто специальные компенсирующие) стержни. Подобное управление реакцией возможно благодаря существованию запаздывающих нейтронов, испускаемых делящимися ядрами с запаздыванием до 1 мин. Когда ядерное топливо выгорает, реакция прекращается. До нового запуска реактора выгоревшее ядерное топливо извлекают и загружают новое. В реакторе имеются также аварийные стержни, введение которых при внезапном увеличении интенсивности реакции немедленно ее обрывает.

Ядерный реактор является мощным источником проникающей радиации (нейтроны,  $\gamma$ -излучение), примерно в  $10^{11}$  раз превышающей санитарные нормы. Поэтому любой реактор имеет биологическую защиту — систему экранов из защитных материалов (например, бетон, свинец, вода), располагающуюся за его отражателем, и пульт дистанционного управления.

Ядерные реакторы различаются:

1) по характеру основных материалов, находящихся в активной зоне (ядерное топливо, замедлитель, теплоноситель); в качестве делящихся и сырьевых веществ используются  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ; в качестве замедлителей—вода (обычная и тяжелая), графит, бериллий, органические жидкости и т. д.; в качестве теплоносителей — воздух, вода, водяной пар, He,  $\text{CO}_2$  и т. д.;

2) по характеру размещения ядерного топлива и замедлителя в активной зоне: гомогенные (оба вещества равномерно смешаны друг с другом) и гетерогенные (оба вещества располагаются порознь в виде блоков);

3) по энергии нейтронов (реакторы на тепловых и быстрых нейтронах; в последних используются нейтроны деления и замедлитель вообще отсутствует);

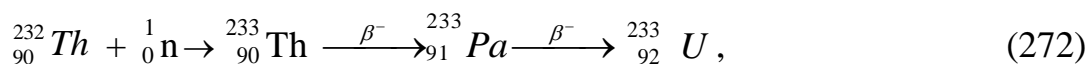
4) по типу режима (непрерывные и импульсные);

5) по назначению (энергетические, исследовательские, реакторы по производству новых делящихся материалов, радиоактивных изотопов и т. д.).

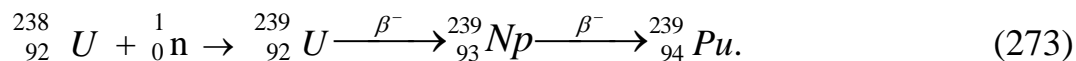
В соответствии с рассмотренными признаками и образовались такие названия, как уран-графитовые, водо-водяные, графито-газовые реакторы и др.

В природе имеются три изотопа которые могут служить ядерным топливом ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ : в естественном уране его содержится примерно 0,7%) или сырьем для его получения ( ${}_{90}^{232}\text{Th}$  и  ${}_{92}^{238}\text{U}$ : в естественном уране его содержится примерно 99,3%).

${}_{90}^{232}\text{Th}$  служит исходным продуктом для получения искусственного ядерного топлива  ${}_{92}^{233}\text{U}$  по реакции:



а  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , поглощая нейтрон и испытывая два последовательных  $\beta^-$ -распада, превращается в ядро  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ :



Создание ядерных реакторов привело к промышленному применению ядерной энергии. Энергетические запасы ядерного горючего в рудах примерно на два порядка превышает запасы химических видов топлива. Поэтому, если, как предполагается, основная доля электроэнергии будет вырабатываться на АЭС, то это, с одной стороны, снизит стоимость электроэнергии, которая сейчас сравнима с вырабатываемой на тепловых электростанциях, а с другой — решит энергетическую проблему на несколько столетий. Это позволит использовать сжигаемые сейчас нефть и газ в качестве ценного сырья для химической промышленности.

В СНГ, помимо создания мощных АЭС (например, Нововоронежской общей мощностью примерно 1500 МВт, первой очереди Ленинградской с двумя реакторами по 1000 МВт), большое внимание уделяется созданию небольших АЭС (750—1500 кВт), удобных для эксплуатации в специфических условиях, а также решению задач малой ядерной энергетики. Так, построены первые в мире передвижные АЭС. Создан первый в мире реактор ("Ромашка"), в котором с помощью полупроводников происходит непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую (в активной зоне содержится 49 кг  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , тепловая мощность реактора 40 кВт, электрическая ~ 0,8 кВт).

Огромные возможности для развития атомной энергетики открываются с созданием реакторов-размножителей на быстрых нейтронах (бридеров), в которых выработка энергии сопровождается производством вторичного горючего—плутония, что позволит кардинально решить проблему обеспечения ядерным горючим. Как показывают оценки, 1 т гранита содержит примерно 3 г  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и 12 г  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  (именно они используются в качестве сырья в реакторах-размножителях), т.е. при потреблении энергии  $5 \cdot 10^8$  МВт (на два порядка выше, чем сейчас) запасов урана и тория в граните хватит на  $10^9$  лет.

Техника реакторов на быстрых нейтронах находится в стадии поисков наилучших инженерных решений. Первая опытно-промышленная станция такого типа мощностью 350 МВт построена в г. Шевченко на берегу Каспийского моря. Она используется для производства электроэнергии и опреснения морской воды, обеспечивая водой город и прилегающий район нефтедобычи с населением порядка 150 000 человек. Шевченковская АЭС положила начало новой "атомной отрасли" — опреснению соленых вод, которая

в связи с дефицитом пресноводных ресурсов во многих районах может иметь большое значение.

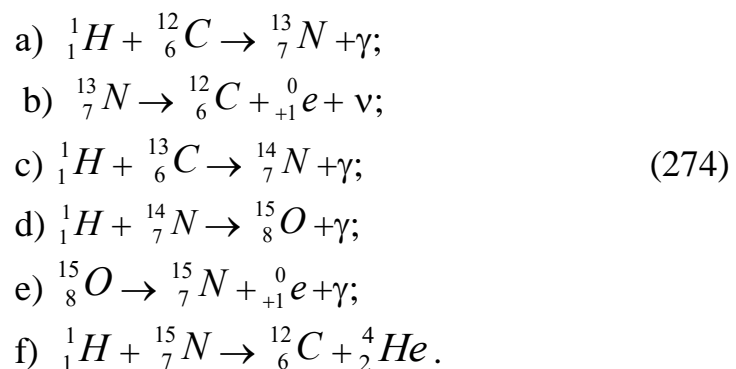
### 5.3 Реакции синтеза

Солнце заметно не охлаждается с течением времени, несмотря на огромное количество энергии, которое оно теряет. Этот факт был загадочным для физиков до тех пор, пока они не открыли существование ядерной реакции. В 1938 г. Ханс Бете выдвинул гипотезу, что за большие количества энергии, высвобождаемые на Солнце и в других звездах, ответственны ядерные реакции, в которых два легких ядра объединяются или сливаются и образуют одно более тяжелое ядро. Такие реакции называются *реакциями ядерного синтеза*.

Как видно из кривой энергии связи ядер, объединение двух легких ядер, относящихся к быстро восходящему участку этой кривой, в одно более тяжелое ядро дает ядро с большей энергией связи в расчете на один нуклон, чем в исходных легких ядрах. Так как получается большая энергия связи, суммарная масса исходных ядер, участвующих в реакции должна уменьшиться, в результате энергетический эффект получается положительным и в реакции синтеза энергия действительно будет высвобождаться.

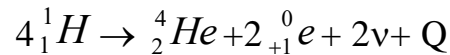
При высоких температурах и давлениях, существующих внутри Солнца и звезд, молекулы вещества диссоциированы на атомы, а высокоионизованные атомы образуют горячую и активную плазму. В этих условиях кулоновское отталкивание ядер может быть, легко преодолено и ядра могут сливаться друг с другом. В результате высвобождается огромная энергия.

В связи с тем, что водород — самый распространенный элемент во Вселенной, Бете предположил, что в звездах осуществляется так называемый «углеродный цикл». Считается, что это наиболее важная цепочка ядерных реакций, при которой энергия выделяется за счет реакции деления ядер:



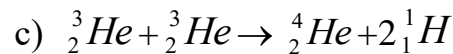
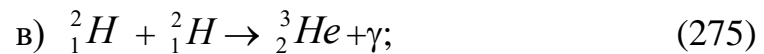
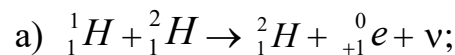
Рассматривая внимательно эту цепочку реакций, убеждаемся, что ядро углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  выступает в ней как катализатор; с него цепочка реакций начинается, но им она и заканчивается. В приведенной цепочке ядерных реакций потребляется четыре ядра водорода (протона) и образуется 3  $\gamma$ -кванта, 2

нейтрино, 2 позитрона и одно ядро гелия. Так что по существу в углеродном цикле идет реакция



Произведя расчёты, можно показать что  $Q = 25,7$  МэВ. Эту энергию уносят с собой  $\gamma$ -кванты, нейтроны и ядро гелия, т. е.  $\alpha$ -частица.

Еще в одном предполагаемом цикле ядерных реакций слияния участвуют в основном протоны, и поэтому он называется «протон-протонным циклом». В нем происходит следующая цепочка ядерных реакций:



В этой цепочке реакции а) и б) должны произойти по два раза, чтобы получились два ядра  ${}^3_2\text{He}$ , нужные для реакции с). В результате всех этих реакций из четырех ядер водорода (протонов) образуются одна  $\alpha$ -частица, 2 позитрона и 2  $\gamma$ -кванта. Энергия, выделяемая в этом цикле, равна 26,2 МэВ.

На рисунке 94 схематически изображены другие важные ядерные реакции синтеза:

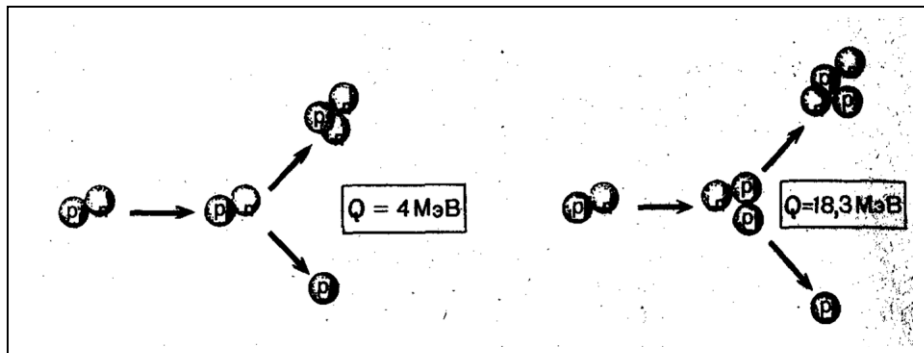
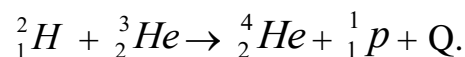
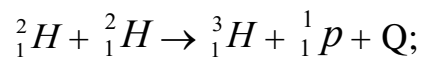


Рисунок 94

Ядерную реакцию слияния в принципе можно использовать для создания *контролируемого источника энергии*, но для этого необходимо решить целый

ряд серьезных и трудных технических проблем. И одна из самых сложных — создание «сосуда», в котором можно было бы удерживать очень горячую плазму ( $\sim 10^7$  К) при высоком давлении, необходимую для начала ядерной реакции синтеза. Так как практически любой сосуд в обычном смысле этого слова расплавился бы и испарился в присутствии такой плазмы, в настоящее время предпринимаются попытки удерживать плазму и контролировать ее поведение с помощью мощного магнитного поля специальной формы. Исследователи надеются, что при соответствующей напряженности поля и его форме в такой «магнитной бутылке» удастся нагреть плазму до требуемой температуры и довести до таких высоких давлений, при которых может начаться реакция синтеза. Другая интересная возможность — использовать мощный (максимальная мощность порядка 50 ГВт) импульсный лазер на неодимовом стекле; предполагают, что с помощью такого лазера удастся повысить температуру плазмы до 7-10 млн К. Реакция ядерного синтеза должна будет идти в мишенях из твердого дейтерия в виде мелких крупинок.

## 6 Элементарные частицы и их свойства

### 6.1 Общие свойства элементарных частиц

Элементарные частицы в точном значении этого термина — первичные, далее неразложимые частицы, из которых, по предположению, состоит вся материя. В современной физике этот термин употребляется не в своём точном значении, а менее строго — для наименования большой группы мельчайших частиц материи, подчинённых условию, что они не являются атомами или атомными ядрами (исключение составляет протон). Элементарные частицы — это специфические кванты материи, более точно — кванты соответствующих физических полей.

Наиболее важное квантовое свойство всех элементарных частиц — способность рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться) при взаимодействии с другими частицами. В этом отношении они полностью аналогичны фотонам. Все процессы с элементарными частицами протекают через последовательность актов их поглощения и испускания. Только на этой основе можно понять, например, процесс рождения  $\pi^+$ -мезона при столкновении двух протонов ( $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ ) или процесс аннигиляции электрона и позитрона, когда взамен исчезнувших частиц возникают два  $\gamma$ -кванта:  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ . Процессы упругого рассеяния частиц, например,  $e^- + p \rightarrow e^- + p$ , также связаны с поглощением начальных и рождением конечных частиц. Распад нестабильных элементарных частиц на более лёгкие частицы, сопровождаемый выделением энергии, отвечает той же закономерности и является процессом, в котором продукты распада рождаются в момент самого распада и до этого момента не существуют. В этом отношении распад элементарных частиц подобен распаду возбуждённого атома на основное состояние и фотон. Примерами распадов элементарных частиц могут служить:  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  (знаком



«тильда» над символом частицы здесь и в дальнейшем помечены соответствующие античастицы). В настоящее время общее число известных элементарных частиц (вместе с античастицами) приближается к 400. Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится целый ряд физических величин, значениями которых они и различаются. Наиболее известными среди них являются масса, среднее время жизни, спин, электрический заряд, магнитный момент.

**Масса и размеры.** Все элементарные частицы являются объектами исключительно малых масс и размеров. У большинства из них массы имеют порядок величины массы протона, равной  $1,6 \cdot 10^{-27}$  кг (заметно меньше лишь масса электрона:  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг). Определённые из опыта размеры протона, нейтрона,  $\pi$ -мезона по порядку величины составляют  $10^{-15}$  м. Размеры электрона и мюона определить не удалось, известно лишь, что они меньше  $10^{-17}$  м. Микроскопические массы и размеры элементарных частиц обуславливают квантовую специфику их поведения. Характерные длины волн, которые следует приписать элементарным частицам в квантовой теории ( $\hbar/mc$ ), где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $m$  — масса частицы,  $c$  — скорость света), по порядку величин близки к типичным размерам, на которых осуществляется их взаимодействие (например, для  $\pi$ -мезона  $\hbar/mc \approx 1,4 \cdot 10^{-15}$  м). Это и приводит к тому, что квантовые закономерности являются определяющими в поведении элементарных частиц. Масса элементарных частиц выражается в энергетических единицах (МэВ или ГэВ) в соответствии с соотношением Эйнштейна  $W = mc^2$ . Иными словами, в таблицах приводится фактически не масса  $m$  частиц, а их энергия покоя  $W_0$ . Это удобно при составлении уравнений энергетического баланса для процессов взаимопревращений элементарных частиц. Укажем массы некоторых частиц:

$$m_\gamma = 0, \quad m_e = 0,51 \text{ МэВ}, \quad m_p = 938,3 \text{ МэВ}, \quad m_n = 939,6 \text{ МэВ}.$$

Наиболее тяжелая из известных сейчас элементарных частиц (промежуточный бозон) почти в 100 раз массивнее протона.

**Среднее время жизни** элементарной частицы  $\tau$  служит мерой стабильности частицы и выражается в секундах. Период полураспада  $T_{1/2}$  в физике элементарных частиц не употребляется, а в качестве меры стабильности резонансов принимают ширину  $\Gamma \sim \frac{\hbar}{\tau}$ , выражаемую в энергетических единицах.

В зависимости от времени жизни элементарные частицы делятся на **стабильные, квазистабильные и нестабильные** (резонансы). Стабильными в пределах точности современных измерений являются электрон ( $\tau > 5 \cdot 10^{31}$  лет), протон ( $\tau > 10^{30}$  лет), фотон и нейтрино. К квазистабильным относят частицы, распадающиеся за счёт электромагнитного и слабого взаимодействий. Их времена жизни  $> 10^{-20}$  сек. Нейтрон — квазистабильная частица, и последнее экспериментальное значение его среднего времени жизни (1986 г.) равно  $(898 \pm 16)$  с. Существуют группы частиц со средним временем жизни порядка  $10^{-6}$ ,  $10^{-$

$10^{-8}$ ,  $10^{-10}$ ,  $10^{-13}$  с. У наиболее короткоживущих частиц, называемых резонансами,  $\tau \sim 10^{-24}$ - $10^{-23}$  с. Для нестабильных частиц в таблицах наряду со временем жизни указываются также типы распадов.

**Спин** — это собственный момент импульса частицы, т. е. ее момент импульса в системе отсчета покоя. Спин не имеет классического аналога, так как элементарную частицу нельзя представлять себе в виде вращающегося шарика. Обычно спин  $J$  выражается в единицах  $\hbar$  и принимает только целые и полуцелые значения. Частица со спином  $J$  имеет  $2J + 1$  спиновых состояний, различающихся значениями проекции  $J_z$ , которая может быть равна  $-J$ ,  $(-J + 1)$ ,  $0$ , ...,  $(J - 1)$ ,  $J$ . У электрона, протона, нейтрона и нейтрино  $J = 1/2$ , у фотона  $J = 1$ . Известны частицы со спинами от 0 (многие мезоны) до 6 (мезонный резонанс, открытый на Серпуховском ускорителе в 1983г.). Спин элементарной частицы — одна из важнейших ее характеристик. Значение спина однозначно определяет тип статистики, которой подчиняются данные частицы. Все частицы с целыми спинами являются бозонами (статистика Бозе — Эйнштейна), все частицы с полуцелыми спинами — фермионами (статистика Ферми—Дирака), для которых справедлив принцип Паули. Например, электроны — это фермионы, а фотоны — бозоны.

**Электрический заряд** элементарной частицы  $q$  — физическая величина, характеризующая способность частицы участвовать в электромагнитном взаимодействии, выраженная в единицах элементарного заряда  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Для всех частиц, существующих в свободном состоянии, он принимает целочисленные значения — обычно 0 и  $\pm 1$ , для некоторых резонансов  $\pm 2$ . Это правило квантования электрического заряда выполняется с огромной точностью.

**Вектор собственного магнитного момента**  $\vec{p}_m$  — физическая величина, характеризующая взаимодействие покоящейся частицы с внешним магнитным полем. Векторы  $\vec{p}_m$  и  $\vec{J}$  параллельны:  $\vec{p}_m = \gamma \vec{J}$

Если они направлены в одну сторону, то  $\gamma > 0$ , если в противоположные стороны, то  $\gamma < 0$ . Ясно также, что магнитные моменты могут быть только у частиц с ненулевыми значениями спина. Для проекции  $p_{mz}$  вектора  $\vec{p}_m$  на направление оси  $Z$  можно записать:

$$p_{mz} = \gamma J_z$$

Так как  $J_z$  квантуется, то квантуется и  $p_{mz}$ . Значение  $p_{mz}$ , отвечающее максимальному значению  $J_z = J$ , называется просто собственным магнитным моментом частицы и обозначается символом  $\mu$ . Таким образом,  $\mu = \gamma J$ . Из сказанного ясно, что магнитный момент  $\mu$  может быть положительным (векторы  $\vec{p}_m$  и  $\vec{J}$  направлены в одну сторону), отрицательным ( $\vec{p}_m$  и  $\vec{J}$  направлены в противоположные стороны) или равным нулю (в частности, при  $J = 0$ ). Магнитные моменты элементарных частиц обычно выражают в единицах соответствующих магнетонов:

$$\mu_0 = eh / (2m).$$

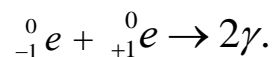
Если  $m = m_e$  то,  $\mu_0$  — магнетон Бора  $\mu_B$ ; если  $m = m_p$  то получаем ядерный магнетон  $\mu_J$ :  $\mu_B = e\hbar / (2m_e)$ ,  $\mu_J = e\hbar / (2m_p)$ .

У фотона и нейтрино  $\mu = 0$ .

## 6.2 Античастицы, аннигиляция

В 1928 г. П. Дираком было получено релятивистское волновое уравнение для электрона, которое позволило объяснить все основные свойства электрона, в том числе наличие у него спина и магнитного момента. Замечательной особенностью уравнения Дирака оказалось то, что из него для полной энергии свободного электрона получались не только положительные, но и отрицательные значения. Этот результат мог быть объяснен лишь предположением о существовании античастицы электрона — позитрона. Гипотеза Дирака, недоверчиво воспринимавшаяся большинством физиков, была блестяще подтверждена в 1932 г. К. Андерсеном [американский физик (р. 1905); Нобелевская премия 1936 г.], обнаружившим позитрон в составе космического излучения. Существование позитронов было доказано наблюдением их треков в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле. Эти частицы в камере отклонялись так, как отклоняется движущийся положительный заряд. Опыты показали, что позитрон  ${}^0_{+1}e$  — частица с массой покоя, в точности равной массе покоя электрона, и спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ), несущая положительный электрический заряд  $+e$ .

При столкновении позитрона с электроном происходит их аннигиляция — процесс взаимодействия элементарной частицы с ее античастицей, в результате которого они превращаются в  $\gamma$ -кванты (фотоны) электромагнитного поля или в другие частицы:



В результате электронно-позитронная пара превращается в два  $\gamma$ -кванта, причем энергия пары переходит в энергию фотонов. Появление в этом процессе двух  $\gamma$ -квантов следует из закона сохранения импульса и энергии.

Электрон и позитрон не являются единственной парой частица — античастица. На основе релятивистской квантовой теории пришли к заключению, что для каждой элементарной частицы должна существовать античастица (принцип зарядового сопряжения). Эксперименты показывают, что, за немногим исключением, действительно каждой частице соответствует античастица.

Из общих положений квантовой теории следует, что античастица частицы  $a$  — элементарная частица  $\tilde{a}$ , имеющая с частицей  $a$  равную массу покоя, время жизни в вакууме, одинаковые по модулю, но противоположные по знаку

электрические заряды и магнитные моменты, одинаковый спин и изотопический спин, а также одинаковые остальные квантовые числа, приписываемые элементарным частицам для описания закономерностей их взаимодействия. До 1956 г. считалось, что имеется полная симметрия, между частицами и античастицами, т. е. если какой-то процесс идет между частицами, то должен существовать точно такой же (с теми же характеристиками) процесс между античастицами. Однако в 1956 г. было доказано, что подобная симметрия характерна только для сильного и электромагнитного взаимодействий и нарушается для слабого.

Расчеты показывают, что для создания пары частица — античастица надо затратить энергию, превышающую удвоенную энергию покоя пары, поскольку частицам необходимо сообщить весьма значительную кинетическую энергию. Для создания ( $p - \bar{p}$ )-пары необходима энергия примерно 4,4 ГэВ. Антипротон был действительно обнаружен экспериментально (1955) при рассеянии протонов на нуклонах ядер мишени.

## 7 Классы взаимодействий

Различные процессы с элементарными частицами заметно отличаются по интенсивности их протекания. В соответствии с этим взаимодействия элементарных частиц можно феноменологически разделить на несколько классов: сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия. Все элементарные частицы обладают, кроме того, гравитационным взаимодействием.

*Сильное* взаимодействие выделяется как взаимодействие, которое вызывает процессы, протекающие с наибольшей, по сравнению с другими процессами, интенсивностью. Оно приводит и к самой сильной связи элементарных частиц. Именно сильное взаимодействие обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивает исключительную прочность этих образований, лежащую в основе стабильности вещества в земных условиях.

*Электромагнитное взаимодействие* характеризуется как взаимодействие, в основе которого лежит связь с электромагнитным полем. Обусловленные им процессы менее интенсивны, чем процессы сильного взаимодействия, а порождаемая им связь элементарных частиц — заметно слабее. Электромагнитное взаимодействие, в частности, ответственно за связь атомных электронов с ядрами и связь атомов в молекулах.

*Слабое взаимодействие*, как показывает само название, вызывает очень медленно протекающие процессы с элементарными частицами. Иллюстрацией их малой интенсивности может служить тот факт, что нейтрино, обладающие только слабым взаимодействием, беспрепятственно пронизывают, например, толщу Земли и Солнца. Слабое взаимодействие обуславливает также медленные распады так называемых «квазистабильных» элементарных частиц. Времена жизни большинства этих частиц лежат в диапазоне  $10^{-8}$ — $10^{-10}$  сек, тогда как типичные времена для сильного взаимодействия элементарных частиц составляют  $10^{-23}$ — $10^{-24}$  сек.

*Гравитационное взаимодействие*, хорошо известное по своим макроскопическим проявлениям, в случае элементарных частиц на характерных расстояниях ( $10^{-13}$  м) даёт чрезвычайно малые эффекты из-за малости масс элементарных частиц, но может быть существенно на расстояниях  $\sim 10^{-33}$  м.

«Силу» различных классов взаимодействий элементарных частиц можно приближённо охарактеризовать безразмерными параметрами, связанными с квадратами соответствующих констант взаимодействий. Для сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий протонов при средней энергии процесса  $\sim 1$  ГэВ эти параметры соотносятся как  $1 : 10^{-2} : 10^{-10} : 10^{-38}$ . Необходимость указания средней энергии процесса связана с тем, что для слабого взаимодействия безразмерный параметр зависит от энергии. Кроме того, сами интенсивности различных процессов по-разному зависят от энергии. Это приводит к тому, что относительная роль различных взаимодействий, вообще говоря, меняется с ростом энергии взаимодействующих частиц, так что разделение взаимодействий на классы, основанное на сравнении интенсивностей процессов, надёжно осуществляется при не слишком высоких энергиях. Разные классы взаимодействий имеют, однако, и другую специфику, связанную с различными свойствами их симметрии, которая способствует их разделению и при более высоких энергиях. Сохранится ли такое деление взаимодействий на классы в пределе самых больших энергий, пока остаётся неясным.

В зависимости от участия в тех или иных видах взаимодействий все изученные элементарные частицы, за исключением фотона, разбиваются на две основные группы: *адроны* и *лептоны*. Адроны обладают сильным взаимодействием наряду с электромагнитным и слабым, тогда как лептоны участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействиях. (Наличие общего для той и другой группы гравитационного взаимодействия подразумевается.) Массы адронов по порядку величины близки к массе протона, минимальную массу среди адронов имеет  $\pi$ -мезон:  $m_{\pi} = \frac{1}{7} m_p$ . Массы лептонов, известных до 1975—1976 гг., были невелики ( $\leq 0,1 m_p$ ), однако новейшие данные свидетельствуют о существовании тяжёлых лептонов  $\tau$  с массами такими же, как у адронов. Первыми исследованными представителями адронов были протон и нейтрон, лептонов — электрон. Фотон, обладающий только электромагнитным взаимодействием, не может быть отнесён ни к адронам, ни к лептонам и должен быть выделен в отдельную группу. По развиваемым в 70-х гг. представлениям, фотон (частица с нулевой массой покоя) входит в одну группу с очень массивными частицами, так называемыми промежуточными векторными бозонами  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , ответственными за слабое взаимодействие.  $W^+$  и  $W^-$ -бозоны могут участвовать также в электромагнитном взаимодействии. В 1983 году существование всех трёх типов бозонов было доказано экспериментально в опытах со встречными протон-антипротонными пучками.

## 8 Кварковая модель адронов

В последние годы увеличение числа элементарных частиц происходит в основном вследствие расширения группы адронов. Поэтому развитие работ по их классификации все время сопровождалось поисками новых, более фундаментальных частиц, которые могли бы служить базисом для построения всех адронов. Гипотеза о существовании таких частиц, названных кварками, была высказана независимо друг от друга (1964) австрийским физиком Дж. Цвейгом (р. 1937) и М. Гелл-Манном. Согласно модели Гелл-Манна - Цвейга, все известные в то время адроны можно было построить, постулировав существование трех типов кварков ( $u, d, s$ ) и соответствующих антикварков ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ ), если им приписать характеристики, указанные в таблице 1 (в том числе дробные электрические и барионные заряды). В 1974 г был открыт  $c$ -кварк. Самое удивительное (почти невероятное) свойство кварков связано с их электрическим зарядом, поскольку еще никто не находил частицы с дробным значением элементарного электрического заряда. Спин кварка равен  $1/2$ , поскольку только из фермионов можно «сконструировать» как фермионы (нечетное число фермионов), так и бозоны (четное число фермионов). Основные свойства этих кварков приведены в таблице 1.

Адроны строятся из кварков следующим образом: мезоны состоят из пары кварк — антикварк, барионы — из трех кварков (антибарион — из трех антикварков). Так, например, пион  $\pi^+$  имеет кварковую структуру  $u\bar{d}$ , пион  $\pi^-$  —  $\bar{u}d$ , каон  $K^0$  —  $d\bar{s}$ , протон —  $uud$ , нейтрон —  $udd$ ,  $\Sigma^+$ -гиперон —  $uus$ ,  $\Sigma^0$ -гиперон —  $u, d, s$  и т. д. Кварковая модель оказалась весьма плодотворной, она позволила определить почти все основные кварковые числа адронов. Например, из этой модели, поскольку спин кварков равен  $1/2$ , следует целочисленный (нулевой) спин для мезонов и полуцелый — для барионов в полном соответствии с экспериментом. Кроме того, эта модель позволила предсказать также и новые частицы, например  $\Omega$ -гиперон. Однако при использовании этой модели возникают и трудности. Кварковая модель не позволяет, например, определить массу адронов, поскольку для этого необходимо знание динамики

Таблица 1

Кварк (анти- кварк)	Электрический заряд В единицах $e$	Барионное число	Спин, в единицах $\hbar$	Странность $S$
$u(\bar{u})$	+2/3 (-2/3)	+1/3 (-1/3)	1/2	0
$d(\bar{d})$	-1/3 (+1/3)	+1/3 (-1/3)	1/2	0
$s(\bar{s})$	-1/3 (+1/3)	+1/3 (-1/3)	1/2	-1 (+1)
$c(\bar{c})$	+2/3 (-2/3)	+1/3 (-1/3)	1/2	-1 (+1)

взаимодействия кварков и их масс, которые пока неизвестны.

В настоящее время признана точка зрения, что между лептонами и кварками существует симметрия: число лептонов должно быть равно числу типов кварков. В 1977 г. был открыт сверхтяжелый мезон с массой около  $20000m_e$ , который представляет собой структуру из кварка и антикварка нового типа - b-кварка (является носителем сохраняющейся в сильных взаимодействиях величины, названной «прелестью» (от англ. beauty)). Заряд b-кварка равен  $-1/3$ . Предполагается, что существует и шестой кварк t с зарядом  $+2/3$ , который уже решено назвать *истинным* (от английского truth – истина), подобно тому, как c-кварк называют очарованным, b-кварк – прелестным. Является ли схема из шести лептонов и шести кварков окончательной или же число лептонов (кварков) будет расти, покажут дальнейшие исследования.