

## Глава 5. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

### 5.1. Атомное ядро.

#### 5.1.1. Состав ядра

Ядра всех атомов состоят из двух видов элементарных частиц – *протонов* и *нейтронов*. Обе эти частицы называют также *нуклонами*. Основные свойства этих частиц в той или иной степени рассматривались в этом курсе физики ранее при изучении релятивистской механики и основных законов электромагнетизма [1-4]. Ниже напомним основные характеристики протона и нейтрона.

А) *Протон*  $p$  – заряженная частица, положительный заряд протона по модулю равен заряду электрона (элементарный заряд):

$$e = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГСЭ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Масса протона  $m_p$  почти в 2000 раз больше массы электрона  $m_e$ :

$$m_p = 938.28 \text{ МэВ} = 1836 m_e$$

Протон – *фермион*, поскольку он имеет собственный механический момент импульса (спин), равный

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad (5.1.1)$$

со *спиновым квантовым числом*  $s = 1/2$ . По модулю получаем для спина следующую величину:

$$L_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar, \quad (5.1.2)$$

где постоянная Планка  $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ . Собственный *магнитный момент протона* (следуя релятивистской теории) должен равняться ядерному магнетону. В действительности он равен

$$\mu_p = +2.793 \frac{e\hbar}{2m_p c} = 2.793 \mu_{\text{я}} \quad (5.1.3)$$

Здесь  $\mu_{\text{я}}$  – *ядерный магнетон*, который в 1836 раз меньше магнетона Бора (магнетон Бора равен  $M_B = e\hbar/2m_0 c = 9,27 \cdot 10^{-21} \text{ эрг} / \text{Гс}$ ):

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5.05 \cdot 10^{-24} \text{ эрг} / \text{Гс} \quad (5.1.4)$$

Б) *Нейтрон*  $n$  – нейтральная частица, открытая Д. Чадвиком в 1932 году. Масса нейтрона близка к массе протона:

$$m_n = 939.55 \text{ МэВ} = 1838.68 m_e$$

Разница в их массах обусловлена наличием электрического заряда у протона и составляет величину:

$$m_n - m_p = 1.3 \text{ МэВ} = 2.5 m_e \quad (5.1.5)$$

Нейтрон – фермион, его спиновое квантовое число также как у протона равно половине  $s = 1/2$ .

У **нейтрона** не должно быть магнитного момента (согласно релятивистской теории П.Дирака), поскольку нейтрон не несёт электрического заряда, но опыт показывает, что несмотря на электронейтральность нейтрон обладает *собственным магнитным моментом*. Собственный магнитный момент нейтрона направлен в противоположную сторону по отношению к направлению собственного механического момента и составляет примерно величину

$$\mu_n = -1.913 \mu_y$$

Аномальные магнитные моменты протона и нейтрона возникают из-за того, что протон и нейтрон в действительности состоят из электрически заряженных частиц – *кварков* (подробнее о кварках см ниже §5.4). Отношение магнитных моментов нейтрона и протона равно:

$$\frac{\mu_n}{\mu_p} = -\frac{2}{3} \quad (5.1.6)$$

что объясняется *кварковой теорией* (§5.4).

В свободном состоянии нейтрон нестабилен и испытывает радиоактивный распад на протон, электрон и антинейтрино:



*Время жизни* свободного нейтрона составляет  $\tau = (880.1 \pm 1.1)$  секунд, что соответствует *периоду полураспада*  $T_{1/2} = (611 \pm 0,8)$  с. В распаде принимает участие нейтральная частица нейтрино, которая имеют ненулевую *массу*, но эта масса крайне мала (о свойствах элементарных частиц также см ниже).

Протоны и нейтроны удерживаются внутри ядра ядерными силами – *сильными взаимодействиями*. Основные характеристики ядра: *зарядовое число*  $Z$  и *массовое число*  $A$ . При этом заряд ядра обычно записывается в единицах заряда электрона –  $+Ze$ , где  $Z$  определяет атомный номер ядра. Соответственно, число нейтронов в ядре равно:

$$N = A - Z.$$

Для обозначения ядер и его состава используется следующая запись:

$${}^A_Z X \text{ или } {}_Z X^A,$$

где  $X$  – краткое обозначение элемента в Периодической системе элементов Менделеева.

*Изотопы* – ядра с одинаковым числом протонов, но различным числом нейтронов. Например, изотопы с зарядовым числом  $Z = 1$ : *водород* ( $N = 0$ ), *дейтерий* ( $N = 1$ ), *тритий* ( $N = 2$ ).

В природе встречаются элементы с зарядами ядра  $Z$  от 1 до 92, другие – трансурановые элементы с  $Z$  от 93 до 107 – получены искусственным путем.

Размеры (радиусы) ядер растут с ростом массового числа  $A$ :

$$r = 1.3 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3} \text{ см} = 1.3 \cdot A^{1/3} \text{ ферми}$$

Полный спин ядра складывается из спинов нуклонов и их орбитальных моментов импульса. Спин ядра может быть целым или полуцелым числом в зависимости от числа нуклонов, четного или нечетного. Со спином ядра связан магнитный момент ядра. Взаимодействие магнитного момента ядра и магнитных моментов электронов приводит к дополнительному расщеплению линий тонкой структуры атома – сверхтонкая структура спектральных линий. Соответствующее расщепление в длинах волн весьма мало – тысячные доли нанометра.

---

Примечание 1. *Джеймс Чадвик, английский физик, 1891 – 1974*, за открытие нейтрона получил Нобелевскую премию по физике в 1935 году

---

### 5.1.2. Масса и энергия связи ядра.

Из-за сильного взаимодействия между нуклонами ядра для ядер в полной мере проявляются релятивистские эффекты. В частности, масса покоя ядра  $M_{\text{я}}$  оказывается меньше суммы масс покоя составляющих это ядро нуклонов. Это явление, называемое *дефектом масс*, рассматривалось ранее в курсе Механики ([1] Глава 2). Таким образом, дефект масс определяется следующей разностью

$$\Delta = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_{\text{я}} \quad (5.1.8)$$

При этом *энергия связи ядра* определяется соотношением [1]:

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta = c^2 \{ [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_{\text{я}} \} \quad (5.1.9)$$

*Удельная энергия связи* – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон, она определяется отношением:  $E_{\text{св}}/A$ . Она составляет величину  $7.1 \div 8.7 \text{ МэВ}$  на нуклон (за исключением нескольких легких ядер). Слабая зависимость удельной энергии связи от размеров ядра говорит о свойстве насыщения ядерных сил. На рис.1.1. показана примерная зависимость удельной энергии связи от массового числа ядра  $A$ .

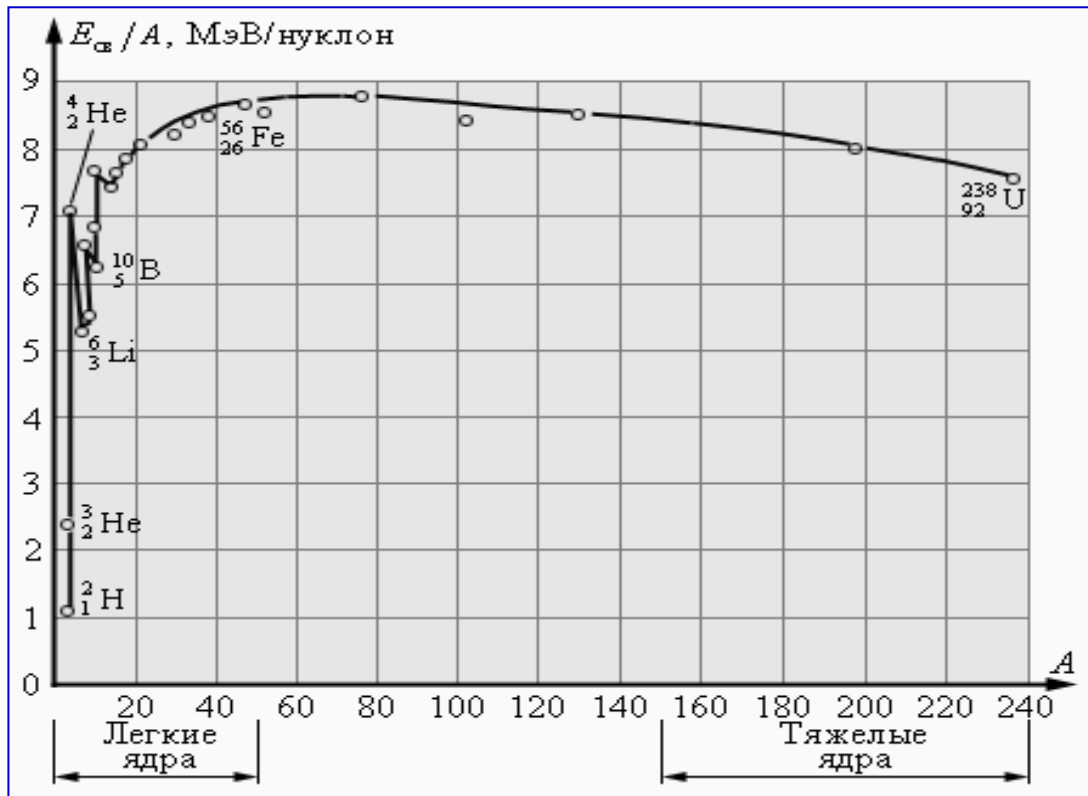


Рис. 1.1.

Силы взаимодействия между нуклонами (протонами и нейтронами) – *ядерные силы* – являются самым сильным взаимодействием из фундаментальных. Основные свойства ядерных сил состоят в следующем.

- 1). Силы *короткодействующие*, радиус их действия  $\sim 10^{-13}$  см.
- 2). *Зарядо-независимые* силы, т.е. парные силы одинаковы для протонов и нейтронов отдельно и между собой.
- 3). Силы *спиновзависящие*, т.е. зависят от ориентации спинов нуклонов.
- 4). *Не являются центральными*, т.е. их действие нельзя представить направленным вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов. Это связано с тем, что ядерные силы зависят от ориентации спинов нуклонов.
- 5). Силы обладают свойством *насыщения*. Каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом ближайших нуклонов.

Благодаря насыщению плотность ядерного вещества внутри ядра постоянна и быстро спадает на границе ядра. Именно поэтому линейные размеры ядра пропорциональны  $A^{1/3}$ , а удельная энергия связи слабо зависит от массового числа  $A$  (для ядер с  $Z \geq 4$ ).

Взаимодействие между нуклонами осуществляется путем обмена  $\pi$ -мезонами, массы которых равны:  $264m_e$  для нейтрального  $\pi$ -мезона,  $273 m_e$  – для заряженных  $\pi$ -мезонов.  $\pi$ -мезоны были предсказаны Юкавой в 1935 году и затем обнаружены экспериментально. Подобные процессы *обменного взаимодействия* могут происходить только благодаря соотношению неопределенностей, поскольку покоящийся нуклон не может превратиться в нуклон и  $\pi$ -мезон самопроизвольно, т.к. их суммарная масса больше нуклона. Квантовая механика этот запрет устраняет на короткое время, определяемое соотношением неопределенностей. Частицы, испускание и поглощение которых происходит с кажущимся нарушением закона сохранения энергии, называют *виртуальными*.

Свободные нуклоны испускают виртуальные мезоны, которые поглощаются обратно нуклоном. Нуклон всегда окружен «мезонной шубой». Расстояние, на которое мезоны удаляются от нуклона, в среднем порядка Комптоновской длины волны мезона  $l$ :

$$l \sim c\tau_\pi \approx \frac{\hbar}{m_\pi c} \quad (5.1.10)$$

где  $\tau_\pi$  – время нарушения закона сохранения энергии, определяемое из соотношения неопределенностей. Когда сближаются 2 нуклона, то их мезонные шубы соприкасаются и создаются условия для обмена виртуальными мезонами. Это и обуславливает ядерное взаимодействие. Учитывая массы испускаемых мезонов, получаем из (5.1.10) радиус действия ядерных сил  $\sim 10^{-13}$  см.

Если нуклону передать энергию больше энергии покоя  $\pi$ -мезона, то один или несколько виртуальных мезонов могут быть превращены в обычные  $\pi$ -мезоны, которые могут существовать независимо от нуклона. Спин  $\pi$ -мезонов равен 0. Частицы нестабильны и распадаются на  $\mu$ -мезоны, нейтрино и кванты (подробнее о свойствах этих частиц см §5.4).

### 5.1.3. Модели ядер.

*Ядерные модели* – приближённые методы описания некоторых свойств ядер, основанные на отождествлении ядра с какой-либо другой физической системой, свойства которой либо хорошо изучены, либо поддаются более простому теоретическому анализу. Таковы, например, капельная модель ядра, оболочечная модель, модель нуклонных ассоциаций.

Степени свободы ядра можно разделить на одночастичные и коллективные. Соответственно ядерные модели делятся на:

а) одночастичные (модели независимых частиц), описывающие движение индивидуальных частиц, в некотором среднем поле, создаваемом другими нуклонами,

б) коллективные (модели с сильным взаимодействием), описывающие коррелированное движение большого числа частиц и

в) обобщенные, в которых рассматривается как одночастичные, так и коллективные степени свободы.

Для простоты ограничимся упоминанием двух моделей ядра, которые появились исторически первыми и смогли описать ряд свойств ядра.

1). *Капельная модель* (Я.И.Френкель, Н.Бор, М.Борн). Атомное ядро рассматривается как капля заряженной **несжимаемой жидкости** с очень высокой плотностью вещества  $\sim 10^{14} \text{ г/см}^3$ . В капельной модели ядро рассматривается как непрерывная среда, состоящая из нейтронной и протонной жидкостей и описываемая уравнениями классической гидродинамики. Плотность ядерной жидкости почти постоянна внутри объёма капли и резко падает в поверхностном слое, толщина которого значительно меньше радиуса капли. Примерное распределение концентрации нуклонов в зависимости от расстояния до центра ядра показано на рис. 1.2, где  $r_{\text{я}}$  – радиус ядра.

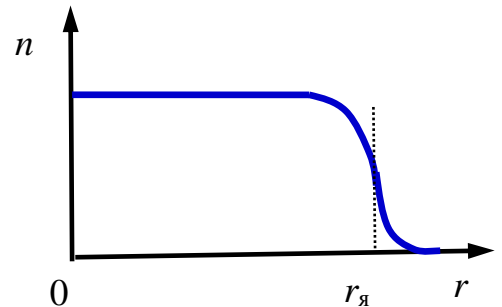


Рис. 1.2

2). *Оболочечная модель* (М.Гепперт-Майер и другие). Каждый нуклон движется в среднем поле, создаваемом всеми остальными нуклонами ядра. В этом среднем потенциальном поле имеются дискретные энергетические уровни. Эти уровни группируются в оболочки, в которых может находиться определенное количество нуклонов. Заполнение дискретных энергетических уровней происходит в соответствии с принципом Паули. Полностью заполненные оболочки образуют наиболее устойчивые структуры – **магические ядра**. **Магические числа** – характеризуют магические ядра с числом протонов или нейтронов равным:

$$2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, \dots$$

Дважды магические ядра – это те ядра, у которых количество как протонов, так и нейтронов равно магическим числам – являются наиболее устойчивыми. Оболочечная модель позволила объяснить спины и магнитные моменты ядер, различную устойчивость атомных ядер, а также периодичность изменений их свойств. Модель применима для описания легких и средних ядер, а также ядер, находящихся в основном состоянии.

Помимо выше перечисленных было развито много других ядерных моделей, которые с помощью сравнительно простых математических средств позволяли описывать определенную совокупность свойств ядра и определенный круг явлений. Коротко перечислим ряд наиболее популярных моделей: сверхтекучая модель ядра, кластерная модель, статистическая модель ядра, оптическая модель ядра. В каждой модели содержатся произвольные параметры, значения которых подбираются для лучшего согласия с экспериментальными данными.

---

Примечание 2.

*Хидэки Юкава – японский физик-теоретик, 1907 – 1981.* Нобелевская премия 1949 года за предсказание существования мезонов и теоретические исследования природы ядерных сил.

*Яков Ильич Френкель – советский физик-теоретик, 1894 – 1952.* Работал в физико-техническом институте и в Ленинградском политехническом институте.

*Макс Борн – немецкий и британский физик-теоретик, 1882 – 1970.* Нобелевская премия 1954 года за фундаментальные исследования по квантовой механике, особенно за его статистическую интерпретацию волновой функции.

*Мария Гепперт-Майер – немецкий физик, 1906 – 1972.* Нобелевская премия 1963 года за открытия касающиеся оболочечной структуры ядра (совместно с Х. Йенсенем)

---

## 5.2. Радиоактивность.

### 5.2.1. Радиоактивность.

Среди ядер различают стабильные и радиоактивные ядра. *Радиоактивность* – спонтанный распад ядер с испусканием одной или нескольких частиц. Ядро до распада называют *материнским*, а ядро, образующееся в результате распада, – *дочерним*.

Различают *естественную* (А. Беккерель, 1896 г.) и *искусственную* радиоактивность.

Радиоактивный распад ядра возможен тогда, когда он энергетически выгоден, т.е. сопровождается выделением энергии. Условием этого является превышение массы  $M$  исходного ядра над суммой масс  $m_i$  продуктов распада, которому соответствует неравенство

$$M > \sum m_i. \quad (5.2.1)$$

Это условие является необходимым, но не всегда достаточным. Распад может быть запрещен другими законами сохранения – сохранения момента количества движения, электрического заряда, барионного заряда и т.д.

Радиоактивный распад характеризуется временем жизни радиоактивного изотопа, типом испускаемых частиц, их энергиями. Можно записать, что

убыль числа ядер  $dN$  за счет распада пропорциональна числу имеющихся ядер и времени  $dt$ :

$$dN = -\lambda N dt$$

Откуда получаем *закон радиоактивного распада*:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5.2.2)$$

где  $\lambda$  – постоянная распада,  $N_0$  – начальное количество распадающихся ядер. Интенсивность радиоактивного распада характеризуют *активностью* – числом ядер, распадающихся в единицу времени. Численно активность определяется как производная по времени от (5.2.2)

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = \left| \frac{d}{dt} N_0 e^{-\lambda t} \right| = \lambda N \quad (5.2.3)$$

и фактически равна произведению постоянной распада на количество еще нераспавшихся ядер. Активность распада в системе СИ измеряют в *Беккерелях* –  $1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с}$ , а также в несистемных единицах *Кюри* –  $1 \text{ Ки} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

*Период полураспада*  $T$  – время, за которое распадается половина начального количества ядер:

$$\begin{aligned} \frac{N_0}{2} &= N_0 e^{-\lambda T}, \\ T &= \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}. \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

*Среднее время жизни* радиоактивного ядра  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (5.2.5)$$

Таким образом, получаем, что среднее время жизни определяется обратной величиной постоянной распада  $\lambda$ .

Основными видами радиоактивного распада являются следующие процессы:

- *$\alpha$ -распад* – испускание атомным ядром  $\alpha$ -частицы;
- *$\beta$ -распад* – испускание атомным ядром электрона и антинейтрино, позитрона и нейтрино, поглощение ядром атомного электрона с испусканием нейтрино;
- *$\gamma$ -распад* – испускание атомным ядром  $\gamma$ -квантов;
- *спонтанное деление* – распад атомного ядра на два осколка сравнимой массы.

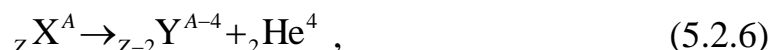
К более редким видам радиоактивного распада относятся процессы испускания ядром двух электронов, одного или двух протонов, а также



кластеров – лёгких ядер от  $^{12}\text{C}$  до  $^{32}\text{S}$ . Во всех видах радиоактивности (кроме  $\gamma$ -распада) изменяется состав ядра – число протонов  $Z$ , массовое число  $A$  или и то и другое одновременно. На характеристики радиоактивного распада существенное влияние оказывает тип взаимодействия, вызывающего распад ядра.

### 5.2.2. $\alpha$ – распад.

*Альфа - распад* – это самопроизвольное испускание ядром  $\alpha$ -частицы – ядра атома гелия:



где  ${}_Z\text{X}^A$  – химический символ материнского ядра, а  ${}_{Z-2}\text{Y}^{A-4}$  – химический символ дочернего ядра. Для того чтобы происходил  $\alpha$ -распад, необходимо, чтобы масса исходного ядра  $M(A,Z)$  была больше суммы масс конечного ядра  $M(A-4, Z-2)$  и  $\alpha$ -частицы  $m_\alpha$ :

$$M(A,Z) > M(A-4, Z-2) + m_\alpha.$$

Энергия  $\alpha$ -распада

$$Q_\alpha = [M(A,Z) - M(A-4, Z-2) - m_\alpha]c^2. \quad (5.2.7)$$

Энергия, освобождающаяся при  $\alpha$ -распаде, обычно заключена в интервале 2 – 9 МэВ, и основная её часть (~ 98%) уносится  $\alpha$ -частицей в виде её кинетической энергии. Оставшиеся 2% – это кинетическая энергия конечного

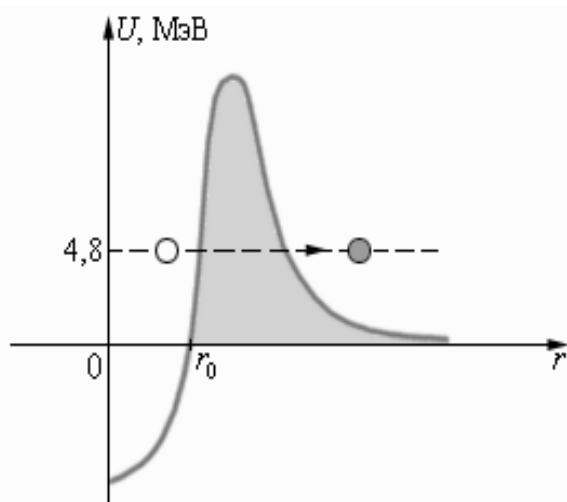


Рис. 2.1.

(дочернего) ядра. Периоды полураспада  $\alpha$ -излучателей изменяются в очень широких пределах: от  $5 \cdot 10^{-8}$  с до  $8 \cdot 10^{18}$  лет. Столь широкий разброс периодов полураспада, а также огромные значения этих периодов для многих  $\alpha$ -радиоактивных ядер объясняется тем, что  $\alpha$ -частица не может «мгновенно» покинуть ядро, несмотря на то, что это энергетически выгодно. Для того чтобы покинуть ядро,  $\alpha$ -частица должна преодолеть потенциальный барьер (рис. 2.1).

Распад с испусканием  $\alpha$ -частицы происходит путем *туннельного эффекта*. Потенциальный барьер на границе ядра образуется за счет потенциальной энергии электростатического отталкивания  $\alpha$ -частицы и конечного ядра и потенциальной энергии сил притяжения между нуклонами.

Однако дочернее ядро может возникать не только в основном, но и в возбужденных состояниях. Такие возбужденные состояния ядра распадаются с испусканием либо  $\gamma$ - квантов, либо с испусканием других частиц, либо с возбуждением внутренних электронов атома, в состав которого входило распадающееся ядро. Последний процесс имеет название *внутренней конверсии*, и он обычно сопровождается испусканием характеристических рентгеновских лучей.

### 5.2.3. $\beta$ - распад.

Самопроизвольный процесс распада ядра, при котором изменяется зарядовое состояние ядра на  $\pm 1$ , называется *бета - распад*.

*Электронный*  $\beta$ - распад – спонтанное превращение свободного нейтрона в протон  $p$ , электрон  $e^-$  и *антинейтрино*  $\tilde{\nu}$ , вызываемое *слабым взаимодействием*



Спектр кинетической энергии излучаемого электрона лежит в диапазоне от 0 до 782,3 *КэВ*.

Аналогичным образом, нейтрон, находящийся в ядре с зарядовым числом  $Z$  и массовым числом  $A$ , распадается по схеме

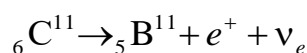


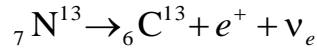
Бета-распад может сопровождаться также испусканием  $\gamma$ - квантов, поскольку дочернее ядро возникает не только в основном, но и в возбужденных состояниях. В отличие от  $\alpha$ -частиц  $\beta$ - электроны обладают самой разнообразной кинетической энергией от 0 до  $E_{\max}$ .

*Позитронный распад* — второй тип бета-распада, также иногда называемый «бета-плюс-распад» ( $\beta^+$ -распад), «эмиссия позитронов» или «позитронная эмиссия». Это распад, при котором один из протонов ядра превращается посредством слабого взаимодействия в нейтрон, позитрон и нейтрино:



Для свободного протона такой процесс невозможен по энергетическим соображениям, т.к. масса протона меньше массы нейтрона. Однако в ядре протон может получить требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра. Многие изотопы испускают позитроны, в том числе *углерод* -  ${}_6 C^{11}$ , *азот* -  ${}_7 N^{13}$ , *кислород* -  ${}_8 O^{15}$ , *фтор* -  ${}_9 F^{18}$ , *иод* -  ${}_{53} I^{121}$ . Например, позитронный распад изотопов углерода и азота:





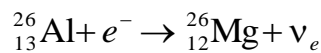
*К-захват* – это еще один вид  $\beta$ -распада – захват ядром электрона со внутренней оболочки атома. Обычно захват электрона происходит с К оболочки, реже с L и M оболочек, своего атома, при этом протон ядра превращается в нейтрон и часть энергии уносит нейтрино:



Схема процесса выглядит следующим образом



Пример реакции К-захвата:



Главной особенностью  $\beta$ -распада является то, что он обусловлен **слабым взаимодействием**. Бета-распад – это процесс внутринуклонный: в ядре распадается одиночный нуклон.

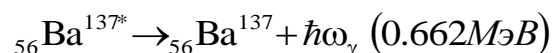
#### 5.2.4. $\gamma$ - излучение.

Процесс испускания возбужденным ядром  $\gamma$ - квантов называется  *$\gamma$  - распад* или  *$\gamma$  - излучение*.

Энергии испускаемых квантов простираются от 10 КэВ до 5 МэВ. а при ядерных реакциях рождаются  $\gamma$ -кванты до 20 МэВ. Длина волны этого "жесткого" коротковолнового излучения составляет  $10^{-8}$  —  $10^{-11}$  см.

Периоды полураспада для  $\gamma$ -переходов изменяются от  $10^{-19}$  с до  $10^{10}$  лет. Так как в  $\gamma$ -распаде не происходит рождения протона или нейтрона, то, в отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов, каждый из которых является ядерным превращением, при  $\gamma$ -распаде ядерного превращения не происходит. Верхний предел энергии испускаемых квантов, как и для альфа- или бета-распадов, связан с энергией связи нуклона в ядре.

Свободный нуклон испускать  $\gamma$ -квант не может из-за нарушения законов сохранения энергии и импульса. Однако такой процесс возможен для нуклона, находящегося внутри ядра, поскольку испущенный  $\gamma$ -квант может обмениваться импульсом не только с порождаемым его нуклоном, но и с остальными нуклонами ядра. Таким образом, в отличие от  $\beta$ -распада  $\gamma$ -распад – процесс **внутриядерный**, а не внутринуклонный. В качестве примера можно рассмотреть распад возбужденного состояния ядра бария с испусканием высокоэнергетического  $\gamma$ -кванта:



Полный момент количества движения фотона  $J$  называется мультипольностью фотона. Значение спина фотона  $J = 1$ , а поэтому, полный

момент  $J$ , уносимый фотоном, может принимать целочисленные значения 1, 2, ... (кроме нуля). Различают электрические ( $EJ$ ) и магнитные ( $MJ$ ) переходы.  $E1$  – электрический дипольный переход,  $M1$  – магнитный дипольный переход,  $E2$  – электрический квадрупольный переход и т.д. Для электрических переходов четность определяется соотношением  $P = (-1)^J$ , для магнитных переходов — соотношением  $P = (-1)^{J+1}$ .

#### 5.2.5. Спонтанное деление ядер.

Четвертым видом радиоактивности, открытым в 1940 Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком под руководством И.В.Курчатова, оказалось самопроизвольное (спонтанное) деление ядер, в процессе которого некоторые достаточно тяжелые ядра распадаются на два осколка с примерно равными массами. *Спонтанное* (самопроизвольное) деление – радиоактивный распад, при котором ядро расщепляется без всякого внешнего вмешательства, т.е. без привнесения энергии. Спонтанное деление впервые было обнаружено для природного урана. Ядра урана  $^{238}\text{U}$  могут делиться различным образом, давая два осколка (например,  $^{56}\text{Ba}-^{36}\text{Kr}$ ,  $^{54}\text{Xe}-^{38}\text{Sr}$  и т.п.).

О сложности проведения эксперимента свидетельствуют следующие цифры. Парциальный период полураспада по отношению спонтанному делению изотопа  $^{238}\text{U}$  составляет  $10^{16}-10^{17}$  лет, в то время как период распада изотопа  $^{238}\text{U}$  составляет  $4.5 \cdot 10^9$  лет. Основным каналом распада изотопа  $^{238}\text{U}$  является  $\alpha$ -распад. Для того, чтобы наблюдать спонтанное деление изотопа  $^{238}\text{U}$ , нужно было регистрировать один акт деления на фоне  $10^7-10^8$  актов  $\alpha$ -распада.

Вероятность спонтанного деления в основном определяется проницаемостью барьера деления. Вероятность спонтанного деления увеличивается с увеличением заряда ядра, т.к. при этом увеличивается параметр деления  $Z^2/A$ . В изотопах  $Z < 92 - 95$  деление происходит преимущественно с образованием двух осколков деления с отношением масс тяжёлого и лёгкого осколков 3:2. В изотопах  $Z > 100$  преобладает симметричное деление с образованием одинаковых по массе осколков. С увеличением заряда ядра доля спонтанного деления по сравнению с  $\alpha$ -распадом увеличивается.

Для всех существующих в природе ядер вероятность и соответственно скорость спонтанного деления очень малы. Лишь для самых тяжёлых из них  $Z \geq 90$  скорости увеличиваются настолько, что могут быть определены экспериментально.

Процесс спонтанного деления может протекать только в том случае, когда потенциальная энергия начального состояния делящегося ядра превышает сумму масс осколков деления. Поскольку удельная энергия связи тяжёлых ядер уменьшается с увеличением их массы, это условие выполняется почти

для всех ядер с массовым числом  $A > 90$ . Однако, даже самые тяжёлые ядра самопроизвольно делятся с очень малой вероятностью. Это означает, что существует энергетический барьер, препятствующий делению.

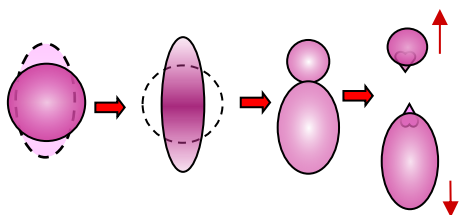


Рис. 2.1.

В процессе деления ядро изменяет форму - последовательно проходит через следующие стадии (Рис. 2.1): шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка. Начальная стадия деления - медленное изменение формы ядра, при котором

появляется шейка, соединяющая два ещё не полностью сформированных осколка. Время прохождения этой стадии ( $10^{-14}$  -  $10^{-18}$  с) зависит от того, насколько сильно возбуждено делящееся ядро. Постепенно шейка утончается, и в некоторый момент происходит её разрыв. Образующиеся осколки с большой энергией разлетаются в противоположные стороны. После того как деление произошло, и осколки находятся друг от друга на расстоянии, много большем их радиуса, потенциальную энергию осколков, определяемую кулоновским взаимодействием между ними, можно считать равной нулю.

В некоторых случаях переход из возбуждённого в основное состояние оказывается запрещён каким-либо законом сохранения, и тогда ядро может оставаться в возбуждённом состоянии гораздо дольше, чем этого можно ожидать в «нормальном» случае. Такое метастабильное (то есть «почти-стабильное») состояние ядра называют изомером.

*Изомеры* – долгоживущие возбужденные состояния атомных ядер. Сочетание высокой мультипольности и малой энергии переходов обуславливает существование состояний с большими периодами полураспада, которые могут составлять годы. У изотопа может быть несколько изомерных уровней.

Характерное время жизни ядра в «нормальном» возбуждённом состоянии составляет порядка  $10^{-12}$  с. Поэтому к изомерным состояниям относят состояния, в которых ядро находится  $10^{-9}$  секунды или дольше. Среди изомеров есть рекордсмены с большими временами жизни: изомер тантала  ${}_{83}\text{Ta}^{180}$  со временем жизни, оцениваемым в 1015 лет (содержится в природных образцах в отношении около 1:8300, релаксирует с испусканием фотона с энергией 75 кэВ).

---

Примечание 1. *Георгий Николаевич Флеров – советский физик-ядерщик, 1913 – 1990;*  
*Константин Антонович Петржак – советский физик, 1907 – 1998;*  
*Игорь Васильевич Курчатов, советский физик, 1903 = 1960.*

---

### 5.3. Ядерные реакции

#### 5.3.1. Механизмы ядерных реакций.

Процессы сильного взаимодействия атомного ядра с другими ядрами или с элементарными частицами, которые сопровождаются преобразованием ядер, составляют суть с *ядерных реакций*. Ядерное взаимодействие возникает при сближении ядер до расстояний порядка  $10^{-13}$  см. Вероятность взаимодействия между ядерными частицами принято характеризовать с помощью *эффективного сечения*  $\sigma$  (см также [1] §1.15). Эффективное сечение ядерных процессов принято выражать в единицах, получивших название *барн*:

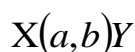
$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2 \quad (5.3.1)$$

Ядерные реакции являются эффективным средством изучения структуры атомных ядер. Если длина волны налетающей частицы больше размеров ядра, то в таких экспериментах получается информация о ядре в целом. Если меньше размеров ядра, то из сечений реакций извлекается информация о распределении плотности ядерной материи, строении поверхности ядра, корреляции между нуклонами в ядре, распределении нуклонов по ядерным оболочкам.

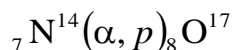
Наиболее распространенным видом ядерной реакции является взаимодействие легкой частицы  $a$  с ядром  $X$  с образованием ядра  $Y$  и частицы  $b$ :



Или эту же реакцию сокращенно записываем в виде:



Впервые ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г. При облучении азота  $\alpha$ -частицами, испускаемыми радиоактивным источником, некоторые атомы азота превращались в ядра кислорода, испуская при этом протон:



В дальнейшем по мере развития техники ускорения заряженных частиц (ускорителей) множилось число ядерных превращений, осуществляемых искусственным путем.

При ядерных реакциях выполняются все законы сохранения классической физики. Эти законы накладывают ограничения на возможность осуществления ядерной реакции. Однако даже энергетически выгодный процесс оказывается невозможным, если сопровождается нарушением какого-либо закона сохранения. Кроме того, существуют законы сохранения,

специфичные для микромира; некоторые из них, насколько это известно, выполняются всегда, например закон сохранения **барионного числа**, **лептонного числа** (см ниже §5.4.). Другие законы сохранения, связанные с такими характеристиками как **изоспин**, **чётность**, **странность**, приводят обычно к подавлению определённых реакции, поскольку не выполняются для некоторых из **фундаментальных взаимодействий**. Следствиям законов сохранения являются так называемые **правила отбора**, указывающие на возможность или запрет тех или иных реакций.

Ядерные реакции могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии. Количество выделяющейся (поглощающейся) энергии называется **энергией реакции**. Она обычно определяется разностью масс исходных и конечных ядер.

Классификацию ядерных реакций обычно проводят по типу ядер-мишеней и энергии налетающей частицы. По механизму взаимодействия ядерные реакции делятся на два вида:

- реакции с образованием **составного ядра**, это двухстадийный процесс, протекающий при не очень большой кинетической энергии сталкивающихся частиц (примерно до 10 МэВ).
- прямые ядерные реакции, проходящие за **ядерное время**, необходимое для того, чтобы частица пересекла ядро. Главным образом такой механизм проявляется при больших энергиях бомбардирующих частиц.

Теория механизма реакции с образованием составного ядра (компаунд-ядро) была разработана Н. Бором в 1936 г. совместно с теорией капельной модели ядра и лежит в основе современных представлений о наибольшей части ядерных реакций. Согласно этой теории, ядерная реакция идёт в два этапа. В начале исходные частицы образуют промежуточное (составное) ядро  $C^*$  за **ядерное время**, то есть время, необходимое для того, чтобы частица пересекла ядро, примерно равное  $10^{-23}$ — $10^{-21}$  с.



При этом составное ядро всегда образуется в возбуждённом состоянии, так как оно обладает избыточной энергией, приносимой частицей в ядро в виде энергии связи нуклона в составном ядре, а также части его кинетической энергии. Последняя равна сумме кинетической энергии ядра-мишени с массовым числом и частицы в системе **центра инерции**.

Составное ядро  $C^*$  существует достаточно долго по сравнению с временем пролета налетающей частицы  $a$  через ядро. Так при энергии одного нуклона в 1 МэВ время пролета его через ядро ( $\sim 10^{-12}$  см) составляет время  $\sim 10^{-21}$  с. Время же жизни составного ядра в возбужденном состоянии  $\sim 10^{-14}$ - $10^{-12}$  с, т.е. в ядерном масштабе составное ядро живет очень долго и практически «забывает» об истории его образования. Поэтому вторая стадия реакции –

распад составного ядра – происходит независимо от способа образования составного ядра.

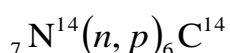
Течение ядерных реакций возможно и через механизм *прямого ядерного взаимодействия*, в основном, такой механизм проявляется при очень больших энергиях бомбардирующих частиц, когда нуклоны ядра можно рассматривать как свободные. От механизма составного ядра прямые реакции отличаются, прежде всего, распределением векторов импульсов частиц-продуктов относительно импульса бомбардирующих частиц. В отличие от *сферической симметрии* механизма составного ядра для прямого взаимодействия характерно преимущественное направление полёта продуктов реакции вперёд относительно направления движения налетающих частиц. Распределения по энергиям частиц-продуктов в этих случаях также различны. Для прямого взаимодействия характерен избыток частиц с высокой энергией. При столкновениях с ядрами сложных частиц возможны процессы передачи нуклонов от ядра к ядру или обмен нуклонами. Такие реакции происходят без образования составного ядра и им присущи все особенности прямого взаимодействия.

Типичная реакция прямого взаимодействия – это *реакция срыва*, когда при нецентральных соударениях с ядром налетающей частицей является дейтрон. При таких соударениях один из нуклонов дейтрона попадает в зону действия ядерных сил и захватывается ядром, в то время как другой нуклон оказывается вне зоны действия ядерных сил и пролетит мимо ядра. В краткой записи такие реакции имеют вид



Обратной по отношению к реакции срыва является *реакция подхвата*, когда налетевший нуклон “откалывает” от ядра другой нуклон, превращаясь в дейтрон:  $(n, d)$  или  $(p, d)$ .

Большое значение имеют реакции, вызываемые нейтронами, поскольку они не испытывают кулоновского отталкивания от ядра. Вследствие этого нейтроны проникают внутрь ядра даже при малой энергии налетающих частиц, что приводит к увеличению эффективного сечения реакции. В качестве примера приведем ядерную реакцию, которая протекает в земной атмосфере под воздействием нейтронов, образуемых космическими лучами:



Возникающий при этом углерод называется *радиоуглеродом*, так как он радиоактивен и его период полураспада составляет 5730 лет. Радиоуглерод усваивается при фотосинтезе растениями и участвует в круговороте веществ в природе. Пока организм растения или животного живет концентрация радиоактивного углерода пополняется за счет обмена веществ при его



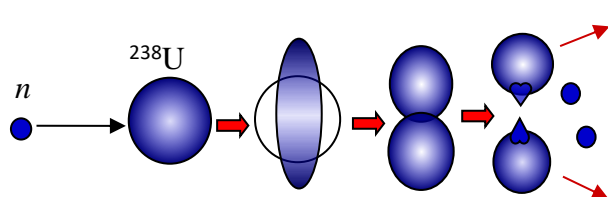
питании. После смерти организма процесс усвоения углерода прекращается. Измерение концентрации радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  в останках организмов – радиоуглеродный анализ - используется для определения их возраста.

### 5.3.2. Деление ядер.

Ядерная реакция деления — процесс расщепления атомного ядра на два (реже три) ядра с близкими массами, называемых **осколками деления**. В результате деления могут возникать и другие продукты реакции: лёгкие ядра (в основном, альфа-частицы), нейтроны и гамма-кванты.

Деление бывает спонтанным (самопроизвольным) и вынужденным (в результате взаимодействия с другими частицами, прежде всего, с нейтронами). Однако **спонтанные** процессы, которые кратко были рассмотрены в предыдущем параграфе, обычно не относятся к ядерным реакциям, поэтому ядерной реакцией является лишь **вынужденное** деление (при захвате нейтронов, фотоделение и т.п.). Деление тяжёлых ядер — **экзоэнергетический процесс**, в результате которого высвобождается большое количество энергии в виде кинетической энергии продуктов реакции, а также излучения.

В 1934 г. Э. Ферми решил получить трансурановые элементы, облучая  $^{238}\text{U}$  нейтронами. Идея Э. Ферми заключалась в том, что в результате  $\beta$ -распада изотопа  $^{239}\text{U}$  образуется химический элемент с порядковым номером  $Z = 93$ . Однако идентифицировать образование 93-его элемента не удалось. Вместо этого в результате радиохимического анализа радиоактивных элементов, выполненного О. Ганом и Ф. Штрассманом, было показано, что одним из продуктов облучения урана нейтронами является барий ( $Z = 56$ ) – химический элемент среднего атомного веса, в то время как согласно предположению теории Ферми, должны были получаться трансурановые элементы.



Л. Мейтнер и О. Фриш высказали предположение, что в результате захвата нейтрона ядром урана происходит развал составного ядра на две части (Рис. 3.1)

Рис.3.1.



Процесс деления урана сопровождается появлением вторичных нейтронов ( $x > 1$ ), способных вызвать деление других ядер урана, что открывает потенциальную возможность возникновения цепной реакции деления – один нейтрон может дать начало разветвленной цепи делений ядер урана. При этом число разделившихся ядер должно возрастать экспоненциально. Н. Бор и Дж. Уиллер рассчитали критическую энергию необходимую, чтобы ядро  $^{236}\text{U}$ , образовавшееся в результате захвата нейтрона

изотопом  $^{235}\text{U}$ , разделилось. Эта величина равна 6,2 МэВ, что меньше энергии возбуждения изотопа  $^{236}\text{U}$ , образующегося при захвате теплового нейтрона  $^{235}\text{U}$ . Поэтому при захвате тепловых нейтронов возможна цепная реакция деления  $^{235}\text{U}$ .

Для наиболее распространенного изотопа  $^{238}\text{U}$  критическая энергия равна 5,9 МэВ, в то время как при захвате теплового нейтрона энергия возбуждения образовавшегося ядра  $^{239}\text{U}$  составляет только 5,2 МэВ. Поэтому цепная реакция деления наиболее распространенного в природе изотопа  $^{238}\text{U}$  под действием тепловых нейтронов оказывается невозможной. В одном акте деления высвобождается энергия  $\approx 200$  МэВ (для сравнения в химических реакциях горения в одном акте реакции выделяется энергия  $\approx 10$  эВ).

Осколки являются ядрами радиоактивных изотопов элементов середины таблицы Менделеева. Обычно один из осколков больше другого. Например, при бомбардировке урана  $^{92}\text{U}^{235}$  могут встречаться такие комбинации осколков, т.е. реакция идёт по следующим каналам:

- Барий и криптон:  $^{92}\text{U}^{235} + n \rightarrow ^{56}\text{Ba}^{144} + ^{36}\text{Kr}^{89} + 3n.$
- Цезий и рубидий:  $^{92}\text{U}^{235} + n \rightarrow ^{55}\text{Cs}^{140} + ^{37}\text{Rb}^{94} + 2n.$
- Ксенон и стронций:  $^{92}\text{U}^{235} + n \rightarrow ^{54}\text{Xe}^{140} + ^{38}\text{Sr}^{94} + 2n.$

В каждой из этих реакций выделяется очень большая энергия — порядка 200 МэВ. Откуда берётся такое количество энергии?

Начнём с того, что из-за большого числа протонов (92), упакованных в ядре урана, кулоновские силы отталкивания, распирающие ядро, очень велики. Ядерные силы ещё в состоянии удерживать ядро от распада, но сильный кулоновский фактор готов проявиться в любой момент. Такой момент настаёт, когда в ядре застревает нейтрон — застрявший нейтрон вызывает деформацию ядра. При этом начинаются колебания формы ядра, которые могут стать столь интенсивными, что ядро вытягивается в «гантельку». Короткодействующие ядерные силы, скрепляющие небольшое число соседних нуклонов перешейка, не справляются с силами электрического отталкивания половинок гантели, и в результате ядро разрывается. Осколки разлетаются с огромной скоростью — около 1/30 скорости света. Они и уносят большую часть высвобождающейся энергии (около 170 МэВ из 200).

Масса делящегося ядра больше суммы масс образующихся осколков. Разница в массах соответствует энергии, выделяемой при делении атомного ядра. Значительная часть этой энергии выделяется в виде кинетической энергии осколков, приблизительно равной энергии их электростатического отталкивания в момент деления. Суммарная кинетическая энергия осколков несколько увеличивается по мере возрастания массового числа  $A$  делящегося ядра и составляет для урана и **трансурановых элементов** около 200 МэВ. Осколки быстро тормозятся в

среде, вызывая ионизацию, нагревание и нарушая её структуру. Утилизация кинетической энергии осколков деления за счёт нагревания ими среды – основа использования ядерной энергии.

Появление двух-трёх нейтронов в процессе деления ядра урана — важнейший факт, который лежит в основе и осуществлении *цепной ядерной реакции*. Эти два-три нейтрона «первого поколения» могут попасть в новые ядра и вызвать их деление; в результате деления новых ядер возникнут нейтроны «второго поколения», которые попадут в следующие ядра и вызовут их деление; возникнут нейтроны «третьего поколения», которые приведут к делению очередных ядер и т. д. Так идёт цепная ядерная реакция, в ходе которой высвобождается колоссальное количество энергии.

Для протекания цепной ядерной реакции необходимо, чтобы число  $N_i$  высвободившихся нейтронов в очередном поколении было не меньше числа  $N_{i-1}$  нейтронов в предыдущем поколении. Величина

$$k = N_i / N_{i-1} \quad (5.3.5)$$

называется *коэффициентом размножения нейтронов*. Таким образом, цепная реакция идёт при условии  $k > 1$ . Если  $k < 1$ , то цепная реакция не возникает.

В случае  $k > 1$  происходит лавинообразное нарастание числа освобождающихся нейтронов, и цепная реакция становится неуправляемой. Так происходит взрыв атомной бомбы. В ядерных реакторах происходит управляемая цепная реакция деления с коэффициентом размножения  $k = 1$ . Стационарное течение управляемой цепной реакции обеспечивается введением в активную зону реактора (то есть в ту область, где протекает реакция) специальных управляющих стержней, поглощающих нейтроны. При полностью введённых стержнях поглощение ими нейтронов настолько велико, что  $k < 1$  и реакция не идёт. В процессе запуска реактора стержни постепенно выводят из активной зоны, пока выделяемая мощность не достигнет требуемого уровня. Этот уровень тщательно контролируется, и при его превышении включаются устройства, вводящие управляющие стержни назад в активную зону.

Возможности создания условий для цепной реакции деления открыли перспективы использования энергии цепной реакции для создания атомных реакторов и атомного оружия. Первый ядерный реактор был построен Э. Ферми в США в 1942 г. В СССР первый ядерный реактор был запущен под руководством И. Курчатова в 1946 г. В 1954 г. в г. Обнинске начала работать первая в мире атомная электростанция. В настоящее время электрическая энергия вырабатывается примерно в 440 ядерных реакторах в 30 странах мира.

---

Примечание 1.

*Отто Ган, немецкий химик, 1879 – 1968.* Нобелевская премия по химии 1944 г. за открытие расщепления тяжёлых атомных ядер;

*Фриц Штрассман, немецкий химик и физик, 1902 – 1980;*

*Ли́за Мейтнер, австрийский физик и радиохимик, 1878 – 1968;*

*Отто Роберт Фриш, английский физик-ядерщик, 1904 – 1979;*

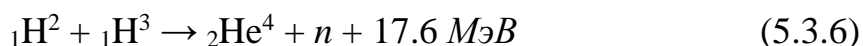
*Джон Арчибальд Уилер, американский физик-теоретик, 1911 – 2008 .*

---

### 5.3.3. Термоядерные реакции синтеза.

**Термоядерный синтез** – это процесс объединения или “слияния” ядер с выделением огромного количества тепла.

Наряду с реакцией деления тяжёлых ядер энергетически возможным оказывается и обратный в некотором смысле процесс — **синтез лёгких ядер**, то есть слияние ядер лёгких элементов, расположенных в начале периодической таблицы, с образованием более тяжёлого ядра. Чтобы началось слияние ядер, их нужно сблизить вплотную — чтобы вступили в действие ядерные силы. Для такого сближения нужно преодолеть кулоновское отталкивание ядер, резко возрастающее с уменьшением расстояния между ними. Это возможно лишь при очень большой кинетической энергии ядер, а значит — при очень высокой температуре (в десятки и сотни миллионов градусов). Поэтому реакция ядерного синтеза называется *термоядерной реакцией*. В качестве примера термоядерной реакции приведём реакцию слияния ядер дейтерия и трития (тяжёлого и сверхтяжёлого изотопов водорода), в результате которой образуется ядро гелия и нейтрон:

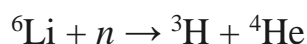


Эта реакция идёт с огромным выделением энергии, равной 17,6 МэВ, учитывая, что в реакции участвуют всего 5 нуклонов. В самом деле, в расчёте на один нуклон в реакции выделяется энергия примерно 3,5 МэВ, в то время как при делении ядра урана выделяется «всего» ~ 1 МэВ на нуклон. Таким образом, термоядерные реакции служат источником ещё большего количества энергии, чем реакции деления ядер.

С физической точки зрения это понятно: энергия реакции ядерного деления есть в основном кинетическая энергия осколков, разогнанных электрическими силами отталкивания, а при ядерном синтезе энергия высвобождается в результате разгона нуклонов навстречу друг другу под действием куда более мощных ядерных сил притяжения. Иначе говоря, при делении ядер высвобождается энергия электрического взаимодействия, а при синтезе ядер — энергия сильного (ядерного) взаимодействия. В недрах звёзд достигаются температуры, подходящие для синтеза ядер. Свет Солнца и

далёких звёзд несёт энергию, выделяющуюся в термоядерных реакциях — при слиянии ядер водорода в ядра гелия и последующем слиянии ядер гелия в ядра более тяжёлых элементов, расположенных в средней части периодической системы. Синтез лёгких ядер энергетически выгоден, так как направлен в сторону увеличения удельной энергии связи ядра.

В основных ядерных реакциях, которые планируется использовать в целях осуществления управляемого термоядерного синтеза, будут применяться дейтерий ( $\text{H}^2$ ) и тритий ( $\text{H}^3$ ), а в более отдалённой перспективе — гелий-3 ( $\text{He}^3$ ) и бор-11 ( $\text{B}^{11}$ ). Для поддержания запасов трития его, в свою очередь, нужно «воспроизводить» путем улавливания тяжёлым изотопом лития ( $\text{Li}$ ) нейтронов, излучаемых в процессе реакции:



Существует две формы термоядерного синтеза: **неконтролируемый**, при котором результирующая энергия высвобождается неконтролируемым образом, как это происходит в термоядерном оружии ("водородных бомбах") и в большинстве звезд; и **контролируемый**, когда реакции синтеза происходят в среде, позволяющей использовать часть или всю высвобожденную энергию для конструктивных целей.

Неуправляемая термоядерная реакция осуществляется при взрыве **водородной бомбы**. Сначала взрывается встроенная атомная бомба — это нужно для создания высокой температуры на первой ступени термоядерного взрыва. При достижении необходимой температуры в термоядерном горючем бомбы начинаются реакции синтеза, и происходит взрыв собственно водородной бомбы.

Получение **полезной термоядерной энергии** возможно при выполнении двух условий.

1) Предназначенная для синтеза смесь должна быть нагрета до температуры, при которой кинетическая энергия ядер обеспечивает высокую вероятность их слияния при столкновении.

2) Реагирующая смесь должна быть очень хорошо термоизолирована, т.е. высокая температура должна поддерживаться достаточно долго, чтобы произошло необходимое число реакций и выделившаяся за счет этого энергия превышала энергию, затраченную на нагрев топлива.

Из трех ключевых параметров термоядерного синтеза - температуры, плотности и времени удержания плазмы - один, температура, задается выбранной реакцией. Соотношение двух других можно варьировать. Соответственно есть два основных пути: либо выбрать относительно низкую плотность топлива и продолжительное время удержания, либо, наоборот, максимально возможную плотность при очень небольшой продолжительности реакции.

Управляемый термоядерный синтез возможен при одновременном выполнении двух условий:

- Скорость соударения ядер соответствует температуре плазмы:

$$T > 10^8 \text{ К} \quad (\text{для реакции дейтерия и трития (5.3.6)}).$$

- Соблюдение критерия Лоусона:

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с} \quad (\text{для реакции дейтерия и трития (5.3.6)}),$$

где  $n$  — плотность высокотемпературной плазмы,  $\tau$  — время удержания плазмы в системе. Критерий Лоусона определяет условие начала управляемой реакции термоядерного синтеза. Его смысл в том, что по достижении температуры запуска реакции необходим компромисс между концентрацией (или плотностью) частиц и временем их удержания в объеме, обеспечивающем эту плотность. Можно «разжечь» термоядерный синтез при меньшей концентрации частиц за счет более длительного удержания плазмы, а можно — при меньшем времени удержания плазмы за счет повышения плотности частиц в ней. От значения этих двух критериев в основном зависит скорость протекания той или иной термоядерной реакции.

Наибольшие успехи в термоизоляции плазмы были достигнуты на так называемых *токамаках* — тороидальных камерах с магнитным полем. Их идея была предложена А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом в начале 1950-х годов, а в конце 1960-х — начале 1970-х годов на них в Курчатовском институте под руководством академика Л. А. Арцимовича была впервые получена высокотемпературная термоядерная плазма.

**Токамак** — устройство для осуществления реакции термоядерного синтеза в горячей плазме в квазистационарном режиме, причем плазма создается в тороидальной камере и ее стабилизирует магнитное поле. В установках типа токамак плазму создают внутри тороидальной камеры с помощью безэлектродного кольцевого разряда. Через плазменный сгусток пропускают электрический ток. При этом у него появляется собственное магнитное поле - сгусток плазмы как бы сам становится магнитом. Теперь с помощью внешнего магнитного поля определенной конфигурации можно подвесить плазменное облако в центре камеры, не позволяя ему соприкоснуться со стенками.

Кроме магнитного управляемого термоядерного синтеза, существует и другой подход к проблеме — **инерциальный управляемый термоядерный синтез**. Идея заключается в быстром и равномерном нагреве термоядерного топлива, так, чтобы образовавшаяся плазма до разлёта успела прореагировать. Таким образом, при использовании данного принципа реактор будет импульсным. В 2009 году в США в рамках исследования инерциального термоядерного синтеза произвели пробный запуск лазеров в национальном комплексе лазерных термоядерных реакций. В эксперименте на этой установке 5 декабря 2022 года учёные впервые в истории добились

положительного выхода энергии в ходе реакции термоядерного синтеза, удалось получить около 3,15 мегаджоуля энергии, что превысило направленную лазерами в мишень энергию — 2,05 мегаджоуля. В то же время речь идёт лишь о превышении выделившейся энергии над энергией, непосредственно переданной в мишень; для накачки системы лазеров потребовалась энергия, превышающая 400 мегаджоулей, то есть КПД установки в этом эксперименте — менее 1%.

Управляемый термоядерный синтез пока не осуществлён в промышленных масштабах. Наиболее трудная задача, стоящая на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза, заключается в изоляции плазмы от стенок реактора. Если удастся добиться управляемого течения термоядерного синтеза, то человечество получит в своё распоряжение фактически неограниченный источник энергии.

---

Примечание 2.

*Джон Дэвид Лоусон, английский физик, 1923 – 2008 ;*

*Андрей Дмитриевич Сахаров, советский физик-теоретик, 1921 – 1989; Нобелевская премия мира (1975);*

*Игорь Евгеньевич Тамм, советский физик-теоретик, 1895 – 1971; Нобелевская премия по физике (1958).*

*Лев Андреевич Арцимович, советский физик, 1909 – 1973.*

---

Новый этап в теории ядра связан с развитием в 70- 80-х гг. *квантовой хромодинамики* (КХД) как теории сильных взаимодействий. Согласно этой теории, нуклоны и мезоны не являются истинно *элементарными частицами*, а состоят из более фундаментальных частиц: *кварков* (фермионов) и *глюонов* (*бозонов*), взаимодействующих между собой. Последовательная теория КХД нуклона и ядра еще в процессе построения. Однако многие представления КХД и *кварковые модели* адронов позволили описать *ядерные реакции* под воздействием частиц высоких энергий, сопровождающиеся большой передачей энергии и импульса. При этом ожидалось, что ядро должно вести себя как система свободных нуклонов и что трудно найти специфически ядерные эффекты КХД. Однако такой эффект был обнаружен в 1982 Европейской мюонной коллаборацией (эффект ЕМС). Он заключается в значительном (до 15 %) отличии сечения *глубоко неупругого процесса* рассеяния мюонов с энергиями порядка 100 ГэВ на ядре Fe (в расчёте на нуклон) от сечения на свободном нуклоне. Из этого наблюдения можно сделать вывод, что распределение импульсов кварков в нуклонах, связанных внутри ядер, отличается от распределения импульсов свободных нуклонов. До настоящего времени нет однозначной интерпретации этого явления. Эффект ЕМС оказался важным тестом для КХД моделей нуклона: оказалось, что

некоторые модели не могут описать этот эффект, не вступая в сильное противоречие с другими ядерными свойствами. К настоящему времени обнаружено несколько ЕМС-подобных эффектов, и возникла новая область исследований – *релятивистская ядерная физика*, объединяющая ядерную физику с физикой *элементарных частиц*.

## 5.4. Элементарные частицы.

### 5.4.1. Фундаментальные взаимодействия

В первом томе настоящего курса физики [1] во Введении уже были рассмотрены *четыре качественно различных вида фундаментальных взаимодействий*, которые определяют физические законы и следствия при взаимодействии различных видов материи. Фундаментальные взаимодействия переносятся *квантами* – переносчиками взаимодействий. Все остальные силы в нашем мире являются частными проявлениями этих фундаментальных взаимодействий.

В настоящее время большое значение приобретает идея объединения фундаментальных взаимодействий, поэтому, строго говоря, при их объединении фундаментальных взаимодействий становится меньше. Однако при энергиях, реализующихся в нашей обычной жизни, эти проявления фундаментальных взаимодействий имеют качественные и количественные различия, поэтому напомним их отдельно в порядке увеличения интенсивности.

#### 1) *Гравитационное взаимодействие*

*Гравитационное взаимодействие* присуще всем видам материи, имеет вид притяжения или тяготения и описывается Общей Теорией Относительности (ОТО). В случае пренебрежения всеми релятивистскими эффектами и рассмотрения слабых стационарных гравитационных полей, ОТО сводится к Ньютонской *теории всемирного тяготения*. Тогда сила  $F$  и энергия  $U$  взаимодействия двух точечных частиц с массами  $m_1$  и  $m_2$  определяются следующими фундаментальными соотношениями:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}, \quad U(r) = G \frac{m_1 m_2}{r} \quad (5.4.1)$$

где  $r$  – расстояние между частицами,  $G$  – *Ньютоновская гравитационная постоянная*, которая играет роль константы гравитационного взаимодействия и которая равна

$$G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ дин} \cdot \text{см}^2 / \text{г}^2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2. \quad (5.4.2)$$

О таких силах, которые убывают с расстоянием обратно пропорционально квадрату расстояния, говорят, как о дальнедействующих силах. Радиус действия таких сил равен бесконечности.



Чтобы говорить о величине взаимодействия (интенсивности) удобно иметь безразмерную **константу связи**. Чтобы получить такую константу, можно использовать **фундаментальные постоянные**, которые мы неоднократно использовали в настоящем курсе

$$\text{постоянную Планка} \quad \hbar = 1.05459 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 1.05459 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\text{скорость света} \quad c = 2.9979 \cdot 10^{10} \text{ см/с} = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

$$\text{массу протона} \quad m_p = 1.67265 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1.67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Тогда безразмерная константа связи гравитационного взаимодействия равна

$$\frac{Gm_p^2}{\hbar c} \sim 6 \cdot 10^{-39}, \quad (5.4.3)$$

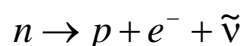
что, конечно, является очень малой величиной. Гравитационные взаимодействия ответственны за силу тяготения на Земле, за образование звезд, планет, планетарных и звездных систем, галактик.

В квантовой теории тяготения переносчиками гравитационного взаимодействия являются **гравитоны** (или гравитационные волны) – безмассовые частицы  $m_G = 0$ . Гравитационные волны предсказываются **общей теорией относительности** и многими другими теориями гравитации, но ввиду их чрезвычайной малости не были зарегистрированы в течение 100 лет со времени их предсказания Эйнштейном.

Однако в 2015 году международная коллаборация LIGO сообщила об экспериментальном обнаружении гравитационных волн от слияния двух черных дыр, что подтверждает одно из важных положений общей теории относительности.

## 2) **Слабое взаимодействие.**

Так называемые **слабые взаимодействия** присущи всем элементарным частицам (кроме фотона, гравитона). Они ответственны за распад элементарных частиц, причем за счет этих сил происходит нарушение пространственной четности. Характерно, что, если в каком-либо процессе появляется или участвует элементарная частица **нейтрино** (или **антинейтрино**), то взаимодействие, определяющее этот процесс, является слабым. Типичный пример: распад нейтрона  $n$  ( $\beta$ -распад нейтрона) на протон  $p$ , электрон  $e^-$  и антинейтрино  $\tilde{\nu}$ :



Существуют также слабые взаимодействия, не сопровождающиеся участием нейтрино или антинейтрино.

Интенсивность слабого взаимодействия характеризуется **константой связи Ферми**  $G_F$ . Эта константа имеет размерность и, чтобы образовать

безразмерную величину для сравнения с другими константами взаимодействия, необходимо использовать какую-нибудь эталонную массу, например, массу протона  $m_p$ . Тогда безразмерная константа связи слабого взаимодействия будет равна

$$G_F m_p^2 \sim 10^{-5}. \quad (5.4.4)$$

Видно, что слабое взаимодействие гораздо интенсивнее гравитационного, однако, с другой стороны, оно является самым слабым взаимодействием, которое проявляется в распадах элементарных частиц.

Слабое взаимодействие в отличие от гравитационного является *короткодействующим*, характерный радиус действия сил  $r \leq 10^{-15}$  см. Переносчиками слабых взаимодействий являются частицы конечной массы – заряженные  $W^\pm$  - *бозоны* и нейтральные  $Z^0$  - *бозоны*. Эти элементарные частицы имеют спин, равный 1, и массы, равные по порядку величины  $100m_p$  или  $160000m_e$  ( $m_e = 9.1095 \cdot 10^{-28}$  г). Если взять в качестве эталонной массы массу электрона, то безразмерная константа слабого взаимодействия примерно равна  $G_F m_e^2 \sim 10^{-10}$ .

### 3) *Электромагнитное взаимодействие.*

Электромагнитные взаимодействия проявляются при взаимодействии электрических зарядов, магнитных моментов (токов) и электромагнитных полей. Они осуществляются квантами электромагнитного поля – *фотонами* (частицы-волны с массой покоя  $m_\gamma = 0$ ).

Классическая теория электромагнитного взаимодействия – электродинамика Максвелла – обобщение опытных фактов и явлений, представленное в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные явления [3,4]. Система уравнений электромагнитного поля обобщает описание фундаментальных экспериментальных законов таких как закон Кулона, законы Ампера и Био-Савара, законы электромагнитной индукции и распространения электромагнитных волн.

В квантовой теории переносчиком электромагнитного взаимодействия является квант электромагнитного поля – *фотон*, – частица, имеющая нулевую массу покоя и спин 1. Квантовое электромагнитное взаимодействие 2-х зарядов представляется следующим образом: заряд испускает фотон, в силу чего его состояние изменяется, а другой заряд поглощает этот фотон и также изменяет свое состояние.

Интенсивность электромагнитного взаимодействия характеризуется *зарядом электрона* как минимальным обнаруженным электрическим зарядом свободной частицы

$$e = 4.8032 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГС} = 1.60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Удобно ввести безразмерную константу связи электромагнитного взаимодействия, используя, помимо заряда электрона, фундаментальные постоянные  $\hbar$  и  $c$ . Эта константа называется *постоянной тонкой структуры*:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (5.4.5)$$

Таким образом, безразмерная константа электромагнитного взаимодействия составляет величину  $\sim 10^{-2}$ , а это означает, что электромагнитное взаимодействие значительно сильнее слабого и гравитационного взаимодействия.

#### 4) *Сильное взаимодействие.*

Сильное взаимодействие ответственно за устойчивость атомных ядер, проявляется в ядерных реакциях, т.е. описывает взаимодействие между *нуклонами* и *гиперонами*, объединенными общим названием – *адроны*. Адроны – сильно взаимодействующие элементарные частицы, к которым относятся нейтрон  $n$ , протон  $p$ , гипероны  $\lambda$ ,  $\Sigma$  .... Сильное взаимодействие зарядонезависимое, т.е. оно одинаковое для протонов и нейтронов.

Классическая квантовая теория ядра описывала сильные взаимодействия как обмен  $\pi$  - *мезонами*. Поскольку масса  $\pi$  - мезона конечная, то и радиус действия ядерных сил конечен  $r \leq 10^{-13}$  см. Безразмерная *константа сильного взаимодействия*  $\sim 1$ , т.е. сильное взаимодействие является, в самом деле, наиболее сильным из всех фундаментальных взаимодействий.

Современная квантовая теория сильных взаимодействий – *квантовая хромодинамика*. Согласно этой теории, все адроны состоят из кварков. *Кварки* – элементарные частицы ненулевой массы со спином  $1/2$  и с дробным электрическим зарядом по отношению к электронному заряду. Кварки формируются в три пары (дублеты) и записываются парами в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}. \quad (5.4.6)$$

Каждый тип кварков принято называть *ароматом* (6 ароматов). При этом  $u$ -,  $c$ -,  $t$ - кварки имеют электрический заряд  $\frac{2}{3}|e|$ , а  $d$ -,  $s$ -,  $b$ - кварки –  $-\frac{1}{3}|e|$ . Кроме того, каждый кварк (каждый аромат) может обладать разным *цветом* (так называют их различные характеристики – квантовые числа). Выделяют три цвета: желтый, синий и красный. Каждому кварку соответствует *антикварк*, имеющий по отношению к данному кварку, противоположный

электрический заряд и антицвет. В итоге существует 36 кварков и антикварков.

Взаимодействие между кварками осуществляются квантами сильных взаимодействий – *глюонами*, которые являются переносчиками сильных взаимодействий со спином 1 и массой равной 0. При этом в процессе взаимодействия цвета кварков могут меняться. Все наблюдаемые частицы (адроны) – *бесцветны*, т.е. они представляют собой объединение как минимум 3-х разноцветных кварков и в целом цветом не обладают. Мезоны также бесцветные частицы, но они образуются двумя кварками с одним цветом и соответствующим антицветом.

Отличительная черта кварк-кваркового взаимодействия через обмен глюонами состоит в том, что с уменьшением расстояния между кварками их взаимодействие ослабляется, а с увеличением расстояния между кварками растет. Внутри адрона кварки можно рассматривать как свободные частицы (понятие *асимптотической свободы*), но они не могут вылетать из адронов. Поэтому одиночные кварки и глюоны, как частицы, обладающие цветом, не могут существовать как свободные частицы. Явление удержания элементарных частиц, обладающих цветом, внутри адронов получило название *конфайнмента*.

В настоящее время существует тенденция объединения всех фундаментальных взаимодействий в одно с единой константой. Создана модель – *Теория Великого Объединения*, в рамках которой объединяются сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия и при этом характерная энергия объединения оказывается  $\sim 10^{15}$  ГэВ. Отметим, что наибольшая энергия, достижимая на современных ускорителях, не превышает  $10^3$  ГэВ.

Проблема объединения всех фундаментальных взаимодействий остается открытой.

#### 5.4.2. О систематике элементарных частиц. Стандартная модель.

Вернемся снова к элементарным частицам и их систематике. Можно выделить **3 основных класса элементарных частиц**:

- 1) частицы переносчики взаимодействия или кванты всех полей, рассмотренных выше,
- 2) бесструктурные частицы – лептоны,
- 3) сильно взаимодействующие частицы – адроны.

Все известные на настоящий момент элементарные частицы, из которых образуются структурные частицы вещества, и элементарные переносчики взаимодействий кратко представлены в Таблице 4.1. В левой части Таблицы 4.1 стрелками показаны какие частицы составляют более сложные частицы и

структуры вещества. В правой части таблицы представлены кванты фундаментальных физических полей, а стрелками показаны теории, которые объединяют описание (теорий) этих взаимодействий.

Таблица 4.1.



Группа теоретических моделей в физике элементарных частиц, описывающих единым образом **сильное**, **слабое** и **электромагнитное** взаимодействия, составляет суть **Теории Великого объединения**. Предполагается, что при чрезвычайно высоких энергиях (выше  $10^{14}$  ГэВ) эти взаимодействия объединяются. Хотя это единое взаимодействие не наблюдалось непосредственно, многие модели Теории Великого Объединения предсказывают его существование. Если объединение этих трех взаимодействий возможно, то вероятно, что в очень ранней Вселенной была великая объединительная эпоха, в которой эти три фундаментальных взаимодействия еще не были разделены друг от друга. Современная теория в физике элементарных частиц, которая описывает электромагнитное, слабое и

сильное взаимодействие всех элементарных частиц, носит название *Стандартной модели*. Модель основана на принципах локальной калибровочной инвариантности, т.е. инвариантности уравнений движения к произвольным изменениям координат пространства-времени.

Эксперименты подтвердили, что при высокой энергии электромагнитное взаимодействие и слабое взаимодействие объединяются в единое *электрослабое взаимодействие*. Модели Теории Великого Объединения предсказывают, что при достаточно высоких энергиях, сильные взаимодействия и электрослабые взаимодействия объединяются в одно *электроядерное взаимодействие*. Это взаимодействие характеризуется одной единой калибровочной симметрией и, следовательно, несколькими носителями силы, но одной унифицированной константой связи.

Экспериментальное подтверждение существования промежуточных векторных бозонов в середине 80-х годов завершило построение Стандартной модели и её принятие как основной. Необходимость незначительного расширения модели возникла в 2002 году, после обнаружения нейтринных осцилляций, а подтверждение существования бозона Хиггса в 2012 году завершило экспериментальное обнаружение предсказываемых Стандартной моделью элементарных частиц.

Стандартная модель включает в себя следующие ингредиенты: 6 кварков, 6 лептонов, 4 частицы-переносчика силовых взаимодействий, а также 1 хиггсовский бозон. Если учитывать античастицы и различные цветовые заряды у глюонов, то в общей сложности Стандартная модель описывает 61 уникальную частицу

Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает *тёмную материю*, *тёмную энергию* и не включает в себя *гравитацию*. Объединение гравитации с электроядерным взаимодействием привело бы скорее к *Теории Всего*, поэтому Теория Великого Объединения часто рассматривается как промежуточный этап на пути к Теории Всего.

#### 5.4.3. Переносчики взаимодействий.

Кванты или переносчики фундаментальных взаимодействий представлены в правой колонке Таблицы 4.1. Ниже в этой части параграфа кратко перечислим кванты фундаментальных взаимодействий.

*Фотоны* – кванты электромагнитного поля, *фундаментальная частица* и переносчик электромагнитного взаимодействия, распространяется в виде поперечных электромагнитных волн. Это *безмассовая частица*, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Фотон может находиться только в двух спиновых состояниях с проекцией спина на направление движения (спиральностью)  $\pm 1$ .

Как переносчик электромагнитного взаимодействия обеспечивает связь атомов, молекул. Фотон относится к **калибровочным бозонам** как переносчик фундаментальных взаимодействий. Он участвует в **электромагнитном** и **гравитационном** взаимодействии.

Переносчиками слабого взаимодействия являются **векторные бозоны**  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ . Все три частицы очень короткоживущие, со средним временем жизни около  $3 \cdot 10^{-25}$  секунд. Эти **бозоны** отвечают за так называемое слабое взаимодействие, которое умеет превращать одни частицы в другие. При этом различают взаимодействие так называемых **заряженных слабых токов** и **нейтральных слабых токов**. Взаимодействие заряженных токов (при участии заряженных бозонов  $W^\pm$ ) приводит к изменению зарядов частиц и превращению одних лептонов и кварков в другие лептоны и кварки. Взаимодействие нейтральных токов (при участии нейтрального бозона  $Z^0$ ) не меняет заряды частиц и переводит лептоны и кварки в те же самые частицы.

Пример слабого взаимодействия — распад нейтрона: один из кварков, составляющих нейтрон, излучает  $W^-$ -бозон и превращается в другой кварк, а  $W^-$ -бозон распадается на электрон и антинейтрино (см (5.1.7)).

В Стандартной модели фотон является одним из четырёх **калибровочных бозонов**, осуществляющих электрослабое взаимодействие. Остальные три бозона ( $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ ) отвечают только за слабое взаимодействие. В отличие от фотона, у векторных бозонов есть масса, они обязаны быть массивными вследствие того, что слабое взаимодействие проявляется лишь на очень малых расстояниях,  $< 10^{-15}$  см. Объединение фотона с калибровочными  $W^-$  и  $Z^-$  бозонами в электрослабом взаимодействии осуществили Ш.Л. Глэшоу, А. Салам и С. Вайнберг, за что были удостоены Нобелевской премии по физике в 1979 г. Их теория **электрослабого взаимодействия** предсказала не только  $W^-$ -бозон, необходимый для объяснения бета-распада, но также новый  $Z^-$ -бозон, который до этого никогда не наблюдался. Экспериментальное открытие самих  $W^-$  и  $Z^-$ -бозонов состоялось позже, пока не стало возможным построение достаточно мощных ускорителей, чтобы создать их. Частицы были обнаружены в 1983 году международной коллаборацией физиков в ЦЕРНе при столкновении встречных пучков протонов и антипротонов. Руководители эксперимента К.Руббиа и С. ван дер Меер были награждены Нобелевской премией по физике 1984 года.

**Глюон** — элементарная безмассовая частица, фундаментальный бозон, квант векторного поля, переносчик **сильного взаимодействия** (*gluon*, от *glue* — клей). Именно сильное взаимодействие отвечает за ядерные силы, скрепляющие протоны и нейтроны в ядрах. Иначе, глюоны — **векторные калибровочные бозоны**, непосредственно отвечающие за **сильное цветное** взаимодействие между кварками в квантовой хромодинамике (КХД). В отличие от фотонов в квантовой электродинамике, которые электрически

нейтральны и не взаимодействуют друг с другом, глюоны сами несут цветовой заряд и поэтому они не только переносят сильное взаимодействие, но и участвуют в нём. Всего существует 8 независимых типов глюонов, что делает КХД значительно более сложной для понимания по сравнению с квантовой электродинамикой.

Безмассовые векторные калибровочные бозоны, такие, как глюон и фотон, имеют только две возможных поляризации из-за того, что калибровочная инвариантность требует поперечной поляризации.

В рамках Стандартной модели возникает необходимость рассматривать еще один бозон – *бозон Хиггса*. Теоретически он был предсказан еще в 60-х годах прошлого века, но экспериментально его существование было доказано только в 2013 году. С помощью поля Хиггса объясняется наличие инертной массы частиц-переносчиков *слабого взаимодействия* (т.е. у *W* и *Z* бозонов) и отсутствие массы у частиц-переносчиков сильного (*глюон*) и электромагнитного взаимодействия (*фотон*). По построению хиггсовский бозон является *скалярной* частицей, то есть обладает нулевым *спином*. Его открытие завершает построение Стандартной модели.

Итак, поле Хиггса составляет вездесущий и постоянный фон, в результате сильных колебаний которого и появляется бозон Хиггса. И именно благодаря этому полю элементарные частицы наделяются массой, которая определяет эффекты инерции, а не эффекты притяжения. Квантовой теории, которая связала бы и инерцию, и гравитацию, пока что нет.

*Гравитоны* – бозоны – кванты гравитационного поля. В квантовой теории тяготения переносчиками гравитационного взаимодействия являются гравитационные волны или *гравитоны* – безмассовые частицы  $m_G = 0$ . Гравитационные волны предсказываются *общей теорией относительности* и многими другими теориями гравитации, но ввиду их чрезвычайной малости не были зарегистрированы в течение 100 лет со времени их предсказания Эйнштейном. Однако в 2015 г. коллаборация LIGO сообщила, что впервые наблюдала колебания пространства-времени— гравитационные волны, возникшие в результате слияния двух черных дыр массами 36 и 29 солнечных масс.

Однако несмотря на многие усилия физиков, гравитация — единственное из фундаментальных взаимодействий, для которого пока ещё не построена общепризнанная непротиворечивая *квантовая теория*. При низких энергиях, в духе квантовой теории поля, гравитационное взаимодействие можно представить как обмен гравитонами — калибровочными бозонами со спином 2. Однако получающаяся теория неперенормируема, и поэтому считается неудовлетворительной.



#### 5.4.4. Лептоны.

*Лептоны* — это элементарные частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях и имеющие спин, равный  $\frac{1}{2}$ . (см Таблицу 4.1.). Все лептоны являются фермионами, которые участвуют в слабом взаимодействии, а заряженные лептоны еще в электромагнитном взаимодействии. Лептоны можно отнести к истинно элементарным частицам, поскольку у них в отличие от других элементарных частиц (адронов) внутренняя структура не обнаружена.

К числу лептонов относятся следующие частицы и их античастицы: **электроны** и **позитроны** ( $e^-$  и  $e^+$ ), **мюоны** ( $\mu^-$  и  $\mu^+$ ), **таоны** ( $\tau^-$  и  $\tau^+$ ), а также 3 пары соответствующих нейтрино и антинейтрино ( $\nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau$ ). Каждому заряженному лептону (электрон, мюон, тау-лептон) и его античастице соответствует своя пара лёгких нейтральных лептонов: нейтрино — антинейтрино. Лептон с антилептоном и соответствующая пара нейтрино образуют, так называемое, одно **поколение лептонов**. Таким образом, имеем 3 поколения лептонов, которые представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2. Лептоны

Частица / Античастица	масса $mc^2$ (МэВ)	электр. заряд	спин ( $\hbar$ )	время жизни (с)
электрон $e^-$ / позитрон $e^+$	0.511	-1 / +1	1/2	стабилен
электронное нейтрино $\nu_e / \tilde{\nu}_e$	$< 2 \cdot 10^{-6}$	0 / 0	1/2	стабильно
мюон $\mu^-$ / мюон $\mu^+$	105.66	-1 / +1	1/2	$2.2 \cdot 10^{-6}$
мюонное нейтрино $\nu_\mu / \tilde{\nu}_\mu$	$< 0.19$	0 / 0	1/2	стабильно
таон $\tau^-$ / антаон $\tau^+$	1782.0	-1 / +1	1/2	$3.4 \cdot 10^{-13}$
таонное нейтрино $\nu_\tau / \tilde{\nu}_\tau$	$< 18.2$	0 / 0	1/2	

Из заряженных лептонов стабильным является только самый лёгкий из них — **электрон** (и его античастица — **позитрон**). Более тяжёлые заряженные лептоны распадаются на более лёгкие. Например, отрицательный мюон распадается на мюонное нейтрино и промежуточный  $W^-$  бозон, который превращается в электрон и электронное антинейтрино, со **временем жизни** около 2 мкс.

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^- \rightarrow \nu_\mu + \tilde{\nu}_e + e^- \quad (5.4.7)$$

Тау-лептон (время жизни около  $3 \cdot 10^{-13}$  с) может распадаться с вылетом не только лептонов, но и лёгких **адронов** (каонов и пионов, см ниже Таблица 4.4). Распад нейтрино не обнаружен, в настоящее время они считаются стабильными.

До недавнего времени считалось, что каждое поколение лептонов обладает своим дополнительным квантовым числом — **лептонным зарядом**. Иными словами, лептон может возникнуть только вместе с антилептоном из своего поколения, так, чтобы разность количества лептонов и антилептонов каждого поколения в замкнутой системе была постоянной. Эта разность называется электронным, мюонным или тау-лептонным числом, в зависимости от рассматриваемого поколения. **Лептонное число** лептона равно +1, антилептона – -1.

С открытием **осцилляций нейтрино** обнаружено, что это правило сохранения лептонного заряда нарушается: электронное нейтрино может превратиться в мюонное или тау-нейтрино и т.д. Таким образом, индивидуальное (для каждого поколения) лептонное число не сохраняется, однако процессов, в которых не сохранялось бы общее лептонное число (не зависящее от поколения), пока не обнаружено. Лептонное число иногда называют лептонным зарядом, хотя с ним, в отличие от электрического заряда, не связано какое-либо калибровочное поле. **Закон сохранения лептонного числа** является экспериментальным фактом и пока не имеет общепринятого теоретического обоснования.

**Нейтрино** – фундаментальная стабильная частица – также входит в группу лептонов, относится к семейству фермионов со спином  $\frac{1}{2}\hbar$  и участвует в слабом и гравитационном взаимодействиях. Как видно из Таблицы 4.2, имеется 6 частиц нейтрино: 3 частицы и 3 античастицы. Нейтрино имеют **ненулевую массу**, но эта масса крайне мала. Верхняя экспериментальная оценка суммы масс всех типов нейтрино составляет всего 0,28 эВ. Разница квадратов масс нейтрино разных поколений, полученная из осцилляционных экспериментов, не превышает  $2,7 \cdot 10^{-3}$  эВ.

Нейтрино малой энергии чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом: так, нейтрино с энергией порядка 3 – 10 МэВ имеют в воде длину свободного пробега порядка  $10^{18}$  м (около 100 световых лет). Каждую секунду через площадку на Земле площадью в 1 см<sup>2</sup> проходит около  $6 \times 10^{10}$  нейтрино, испущенных **Солнцем**, однако их влияние на вещество практически никак не ощущается. В то же время нейтрино высоких энергий успешно обнаруживаются по их взаимодействию с мишенями.

С современной точки зрения электромагнитное и слабое взаимодействия представляют собой различные стороны единого **электрослабого**

*взаимодействия.* Создана объединенная теория электрослабого взаимодействия – теория Вайнберга- Салама- Глэшоу, объясняющая с единых позиций все аспекты электромагнитных и слабых взаимодействий. Пока энергии взаимодействия достаточно малы электромагнитное и слабое взаимодействия отделены и не влияют друг на друга. С ростом энергии начинается их взаимовлияние, и при достаточно больших энергиях эти взаимодействия сливаются в единое (Таблица 4.1). Характерная *энергия объединения* оценивается по порядку величины как  $10^2 \text{ ГэВ} = 10^{11} \text{ эВ}$  (напомним  $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Для сравнения отметим, что энергия связи атома водорода  $\sim 10^{-8} \text{ ГэВ}$ , а энергия связи атомного ядра  $\sim 10^{-2} \text{ ГэВ}$  существенно меньше характерной энергии объединения. По этой причине электромагнитное и слабое взаимодействия не проявляют в обычных физических явлениях своей единой сущности.

#### 5.4.5. Кварки и адроны.

*Адроны* – это элементарные частицы, которые участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях и имеют внутреннюю структуру, в отличие от бесструктурных лептонов. Слово "адрон" имеет греческий корень и переводится как "массивный, плотный". То есть речь идет о плотной частице материи, имеющей большую массу.

К адронам относятся сильно взаимодействующие частицы: *мезоны и барионы*. В состав ядра входят простейшие барионы – нуклоны: протоны и нейтроны. *Классическая квантовая теория* ядра описывала сильные взаимодействия и стабильность ядер как обмен  $\pi$  - *мезонами*.

Согласно *квантовой хромодинамике* все адроны являются составными частицами, они состоят из кварков. *Кварки* – элементарные частицы ненулевой массы со спином  $1/2$  и с дробным электрическим зарядом по отношению к электронному заряду. Кроме того, по характеру взаимодействия между кварками они обладают дополнительными свойствами, определяемыми дополнительным квантовым числом – «*цветом*».

Адроны делятся на две основные группы в соответствии с их кварковым составом: *мезоны и барионы*. Основные характеристики кварков и основных адронов представлены в Таблицах 4.3 и 4.4.

Перейдем к краткому рассмотрению свойств кварков.

**Кварк** – это фундаментальная частица в Стандартной модели, обладающая спином равным  $1/2$ , электрическим зарядом, кратным  $e/3$ . и не обнаруженная в свободном состоянии.

Кварки, как гипотетические частицы, образующие все адроны, появились впервые в 1964 году в работах Гелл-Манна и, независимо, Цвейга. В дальнейшем многочисленные экспериментальные данные получают свое

объяснение в рамках этой модели и тем самым подтверждают справедливость такого представления.

Кварки обладают различными внутренними свойствами, включая **электрический заряд, массу, цветовой заряд и спин** (см Таблица 4.3). Это единственные элементарные частицы в Стандартной модели физики элементарных частиц, которые участвуют во всех четырёх **фундаментальных взаимодействиях** (электромагнитном, гравитационном, сильном и слабом), а также единственные известные частицы, электрические заряды которых не являются **целыми** числами, кратными **элементарному заряду** (электрона).

Таблица 4.3. Кварки.

Тип (ароматы) кварков									
Частица	Масса ( $MэВ/c^2$ )	$J$	$B$	$Q$ ( $e$ )	$I_3$	$C$	$S$	$T$	$B'$
<i>Первое поколение</i>									
верхний $u$	2,3	1/2	+1/3	+2/3	+1/2	0	0	0	0
нижний $d$	4,8	1/2	+1/3	-1/3	-1/2	0	0	0	0
<i>Второе поколение</i>									
очарованный $c$	1275	1/2	+1/3	+2/3	0	+1	0	0	0
странный $s$	95	1/2	+1/3	-1/3	0	0	-1	0	0
<i>Третье поколение</i>									
истинный $t$	173 210	1/2	+1/3	+2/3	0	0	0	+1	0
прелестный $b$	4180	1/2	+1/3	-1/3	0	0	0	0	-1
$J$ — полный угловой момент, $B$ — барионное число, $Q$ — электрический заряд, $I_3$ — изоспин, $C$ — очарование, $S$ — странность, $T$ — истинность, $B'$ — прелесть, красота.									

Поскольку кварки – фермионы, то они подчиняются принципу Паули, согласно которому никакие два идентичных фермиона не могут одновременно занимать одно и то же квантовое состояние. В отличие от лептонов кварки обладают **цветовым зарядом**, который заставляет их вступать в сильное взаимодействие. В результате притяжения между различными «разноцветными» кварками образуются составные частицы – адроны. Соответственно, наука, которая изучает взаимодействие кварков, называется

*квантовая хромодинамика*. Сам “цвет” кварка, так же как потенциал, физического значения не имеет, и он не наблюдаем. Наблюдаемо только изменение “цвета” от точки к точке. Эти слова имеют чёткое математическое воплощение, которое однозначно фиксирует, как конкретно кварки взаимодействуют с глюонами, а те между собой.

Кварки имеют *дробные* значения электрического заряда: “ $-1/3$ ” или “ $+2/3$ ” *элементарного электрического заряда* электрона  $e$ , в зависимости от аромата. Верхние, очарованные и истинные кварки (см Таблица 4.3.) имеют заряд  $+2e/3$ ; нижние, странные и прелестные кварки имеют заряд  $-e/3$ . *Антикварки* имеют заряд, противоположный соответствующим им кваркам; верхние антикварки имеют заряды  $-2e/3$ , и нижние антикварки имеют заряды  $+1/3 \cdot e$ . Поскольку электрический заряд адрона представляет собой сумму зарядов составляющих его кварков, все адроны имеют целочисленные заряды: сочетание трёх кварков для барионов, трёх антикварков для антибарионов или кварка и антикварка для мезонов всегда приводит к заряду, выражаемому целым числом. Например, адронные составляющие атомных ядер, нейтроны и протоны, имеют заряды  $0 e$  и  $+1 e$  соответственно; нейтрон состоит из двух нижних кварков и одного верхнего кварка, а протон — из двух верхних кварков и одного нижнего кварка.

Кварки, как уже упоминалось в первом пункте этого параграфа, формируются в три пары (дублеты) и записываются парами в виде (5.4.6):

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Первая пара кварков  $u$  (up) и  $d$  (down) - это легкие кварки - самые распространенные в природе (см Таблица 4.3). Именно из них состоят протоны, нейтроны, переносчики ядерных сил, пи-мезоны (см Таблица 4.4). И именно эта пара легких кварков составляет кварки первого поколения.

Следующая пара кварков:  $s$  - *странный* (strange) и  $c$  - *очарованный* (charmed) кварки - составляют более тяжелые частицы и в некоторых отношениях (время жизни) ведут себя иначе, чем  $u$  и  $d$  кварки. В частности, частицы, содержащие такие кварки (например, очарованные адроны), тяжелее своих легких собратьев и живут недолго, порядка одной пикосекунды в системе покоя частицы.

*Прелестный* кварк  $b$  еще тяжелее, его масса около  $5 \text{ ГэВ}$ , однако время жизни его даже больше, чем у  $c$ -кварка — около  $1,5 \text{ пс}$ . Из-за того, что масса  $b$ -кварка намного больше адронного масштаба масс (несколько сотен МэВ), становится очень удобно описывать прелестные адроны как связанную систему тяжелого и легкого кварка; многие успехи в теоретическом описании “прелестных” адронов связаны именно с этим простым фактом. *Истинный  $t$ -кварк*, или топ-кварк, является наиболее массивным среди всех частиц. Ввиду короткого времени жизни он не успевает после возникновения стать частью

**адрона** и ведёт себя как виртуальный кварк, распадаясь почти всегда слабым распадом на  $b$ -кварк и  $W$ -бозон.

Переносчиками сильного взаимодействия в квантовой хромодинамике являются **глюоны** (от glue — клей). Эти изначально безмассовые частицы со спином 1 электрически нейтральны, но несут цветной заряд. Фотоны являются квантами электромагнитного поля, а глюоны — это кванты цветного калибровочного поля. Термин глюоны появился потому, что эти глюоны, а их восемь штук, склеивают кварки внутри протона и нейтрона, т.е. они ответственны за удержание кварков внутри адронов.

Взаимодействие кварков связано с **обменом цветом**. Поэтому каждый глюон имеет составной цвет, состоящий из цвета и антицвета, например, красный-антисиний. Такой глюон меняет цвет кварка: при испускании он отнимает у кварка красный цвет и передает ему синий, при поглощении — наоборот.

Все попытки обнаружить хотя бы один свободный кварк с дробным электрическим зарядом или выбить его из адронов оканчивались неудачей. Но, несмотря на это, кварковая гипотеза стала общепринятой. Это связано с тем, что кроме систематики частиц, имеется еще ряд твердо установленных фактов, свидетельствующих в ее пользу. Фактически, в рамках кварковой модели получила объяснение вся совокупность большого числа опытных данных о структуре и свойствах адронов, об их распадах и превращениях. Кварковая гипотеза превратилась в Стандартную модель фундаментальных частиц и взаимодействий. Наиболее прямым экспериментальным подтверждением кварковой модели служат процессы глубоко неупругого рассеяния электронов и других частиц на протонах и процессы с рождением адронных струй.

В масштабах адрона кварки ведут себя как свободные частицы, а при попытке разорвать адрон сила их взаимного притяжения резко возрастает. И все попытки получить кварк-глюонную плазму, "разбив" протоны в ускорителе на встречных пучках, наталкиваются на большие технические трудности. Этот парадоксальный закон квантовой хромодинамики и получил название **асимптотической свободы**, а удержание цветных кварков внутри "бесцветных" адронов именуется **конфайнментом** (от англ. confinement — ограничение). Открытие асимптотической свободы объясняло, почему кварки ведут себя как квазисвободные частицы на малых расстояниях (при высоких энергиях) и сильно взаимодействуют на больших расстояниях. Любая попытка "выбить" кварк из адронов приводит к рождению им большого числа частиц, — так называемой, адронной струи. Это явление и называют пленением или конфайнментом кварков, а отсутствие свободных кварков и глюонов — невылетанием цвета.

Таким образом, кварки и глюоны **не существуют в свободном состоянии**, и тогда из сильно взаимодействующих частиц только адроны существуют в свободном состоянии с соответствующими временами жизни, показанными в Таблице 4.4. Рассмотрим кратко их свойства.

**Адроны** обладают сохраняющимися в процессах сильного взаимодействия характеристиками – **квантовыми числами**: **странностью  $S$** , **очарованием  $C$** , **прелестью  $B$**  и **истинностью  $T$** . По кварковому составу они подразделяются на два класса сильно взаимодействующих частиц (Таблицы 4.1 и 4.4): мезоны, состоящие из пары кварк-антикварковых частиц, и барионы, состоящие из комбинации трех кварковых частиц. Адроны характеризуются также **барионным зарядом** (или числом), который для барионов и антибарионов равен 1 и -1 соответственно, а для мезонов равен нулю. Барионное число сохраняется во всех трёх взаимодействиях Стандартной модели.

Сильно взаимодействующие частицы, относительно близкие по своим физическим свойствам, можно разбить на группы, называемые **изотопическими мультиплетами**. В каждом мультиплете, если отвлечься от электромагнитных и слабых взаимодействий, частицы одинаковым образом участвуют в сильных взаимодействиях, имеют примерно равные массы и одинаковые характеристики: барионный заряд, спин, четность, странность. По существу, получаем изотопическую независимость сильных взаимодействий. Так, благодаря схожести протона и нейтрона, за исключением электромагнитного взаимодействия, их можно рассматривать как два состояния одной и той же частицы – нуклона. По аналогии с обычным спином каждому зарядовому мультиплету приписывают определенное значение **изоспина**. Отдельным частицам мультиплета приписывают различные значения проекции  $I_3$  на ось  $z$  в изотопическом пространстве.

С изотопическим спином связан закон сохранения: при сильных взаимодействиях сохраняется как сам изоспин, так и его проекция  $I_3$  (Таблица 4.4). При электромагнитных взаимодействиях сохраняется только проекция  $I_3$ .

**Мезоны** – сильно взаимодействующие **нестабильные** частицы, состоящие из одного **кварка** и одного **антикварка**. Основные характеристики наиболее легких мезонов и нескольких более тяжелых представлены в Таблице 4.4. Мезоны квалифицируются по кварковому составу, по электрическому заряду, угловому моменту, четности, времени жизни и другими свойствами. Барионный заряд мезонов  $B = 0$ , спин всех мезонов равен нулю или целому числу, иначе говоря, они являются **бозонами**.

Мезоны обладают не только слабым и электромагнитным (в том случае, когда они заряжены), но также и сильным взаимодействием, проявляющемся при взаимодействиях их между собой и с барионами. Именно для объяснения сильного взаимодействия Хидэки Юкава в 1935 году в теоретической работе

предсказал, что существуют частицы, переносящие **сильное взаимодействие**, — мезоны.

Все мезоны нестабильны, однако время жизни мезонов с малой массой обычно больше, чем у более массивных мезонов (см Таблица 4.4). Заряженные мезоны имеют тенденцию распадаться, образуя заряженные мюоны и нейтрино, в то время как незаряженные мезоны с подавляющей вероятностью распадаются с образованием фотонов.

Таблица 4.4. Адроны

Частица	Состав	Масса <i>MэВ</i>	<i>Q</i> ( <i>e</i> )	<i>B</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>I</i> <sub>3</sub>	$\tau$ ( <i>c</i> )	
Мезоны	$\pi^0$	$u\bar{u}, d\bar{d}$	135	0	0	0	0	$0.8 \cdot 10^{-16}$	
	$\pi^+$	$u\bar{d}$	139.6	+1	0	0	1	$2.5 \cdot 10^{-8}$	
	$K^+$	$u\bar{s}$	493.8	+1	0	0	+1/2	$1.2 \cdot 10^{-8}$	
	$K^0$	$d\bar{s}$	497.8	0	0	0	-1/2	$5.8 \cdot 10^{-8}$	
	$\eta$	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$	549	0	0	0	0	$2.4 \cdot 10^{-19}$	
	$\phi$	$s\bar{s}$	1019	0	0	1	0	$\sim 10^{-19}$	
	$J/\psi$	$c\bar{c}$	3097	0	0	1	0	$7.2 \cdot 10^{-21}$	
Барионы	$p$	$uud$	938.3	+1	+1	1/2	0	1/2	-
	$n$	$udd$	939.5	0	+1	1/2	0	1/2	$0.93 \cdot 10^3$
	$\Lambda$	$uds$	1117	0	+1	1/2	-1	0	$2.5 \cdot 10^{-10}$
	$\Sigma^+$	$uus$	1189	+1	+1	1/2	-1	1	$0.8 \cdot 10^{-10}$
	$\Sigma^0$	$uds$	1193	0	+1	1/2	-1	1	$\sim 10^{-14}$
	$\Xi^0$	$uss$	1315	0	+1	1/2	-2	1/2	$3 \cdot 10^{-10}$
	$\Omega^-$	$sss$	1672	-1	+1	3/2	-3	0	$0.8 \cdot 10^{-10}$
Электрический заряд $Q$ ( $e$ ). Барионное число $B$ . Спин $I$ . Странность $S$ . Изотопический спин $I_3$ . Время жизни $\tau$ .									



К числу самых легких относятся  $\pi$ -мезоны (пионы,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ), которые при обычных условиях отвечают за взаимодействие между нуклонами и ядрами. Эти три мезона образуют **изотопический триплет**. Заряженные  $\pi$ -мезоны имеют по ядерным меркам относительно большое время жизни и с подавляющей вероятностью имеют следующие каналы распада:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{и} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu \quad (5.4.8)$$

Нейтральный  $\pi^0$ - мезон имеет немного меньшую массу, чем заряженные мезоны, и распадается на два фотона:  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ .

К наиболее долгоживущим относятся также  $K$ - мезоны (каоны,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$  и  $\tilde{K}^0$ ), причем заряженные  $\pi^-$  и  $K^-$  мезоны являются античастицами по отношению к  $\pi^+$  и  $K^+$ . В структуре  $K$ - мезонов появляется “странный” кварк  $s$ . Странный  $K^0$  - мезон распадается на первом этапе на два  $\pi$ -мезона.

В Таблице 4.4 представлены характеристики нескольких более тяжелых мезонов, таких как  $\eta$ -мезон,  $\phi$ -мезон,  $J/\psi$ -мезон (*джей-пси-мезон*). Последний  $J/\psi$ -мезон состоит из “очарованных” кварков и носит название **чармоний**. Частицы, которые совпадают по свойствам со своими «античастицами», такие как фотон,  $\pi^0$ -бозон,  $\eta$ -мезон, называются **абсолютно нейтральными**. Последние частицы не способны к аннигиляции.

Помимо мезонов, получаемых из различных комбинаций кварков, существует множество мезонных резонансов, т.е. возбужденных состояний мезонов со временем жизни  $\sim 10^{-23}$  с.

Согласно **квантовой хромодинамике** известно, что сильное взаимодействие осуществляется посредством глюонов. Тем не менее можно сформулировать так называемую **эффективную теорию взаимодействия внутриядерных частиц**, в которой переносчиками ядерных сил взаимодействия являются пионы. Силы взаимодействия, переносимые пионами, в частности, ядерные силы, связывающие нуклоны в атомном ядре, можно компактно описать при помощи потенциала Юкавы. Несмотря на то, что эта теория, предложенная Юкавой, верна только в **определённом диапазоне энергий**, она позволяет проводить в ее рамках упрощённые вычисления и получить наглядные представления как о структуре ядра, так и различных процессах с ядрами.

**Барионы** — сильно взаимодействующие частицы, состоят из трёх кварков трёх различных **цветов**, образуя так называемую **бесцветную комбинацию** (Таблица 4.4). Подавляющая часть наблюдаемого нами вещества состоит из наиболее легких барионов — **нуклонов**, которые представлены протоном и нейтроном ( $p$ ,  $n$ ) и которые входят в состав стабильных ядра атомов.

Барионы являются фермионами, их спин равен  $1/2$  или  $3/2$ , т.е. они подчиняются статистике Ферми-Дирака, что определяет их поведение при образовании ядер. В 2015 году было также доказано существование аналогичных частиц из 5 кварков, названных **пентакварками**. Каждый барион имеет соответствующую ему **античастицу** (антибарион), в которой антикварки заменяют кварки этого бариона.

В состав нуклонов входят наиболее легкие кварки. Так, протон состоит из двух верхних кварков и одного нижнего – *uud*, а нейтрон – из одного верхнего и двух нижних – *udd* (см (5.4.6) и Таблицы 4.3 - 4.4). Сильное взаимодействие **зарядонезависимое**, т.е. оно одинаковое для протонов и нейтронов. Независимость сильного взаимодействия от электрического заряда частиц позволяет группировать частицы в изотопические мультиплеты.

Помимо легких нуклонов к барионам относятся также многочисленные **гипероны** — более тяжёлые и нестабильные частицы, содержащие как минимум один “странный” кварк. Такие частицы обычно получают на ускорителях элементарных частиц. Гипероны – нестабильные частицы с массой большей массы нуклонов. Часть гиперонов с их характеристиками представлена в Таблице 4.4: лямбда ( $\Lambda$ ), сигма ( $\Sigma^\pm, \Sigma^0$ ), кси ( $\Xi^-, \Xi^0$ ) и омега ( $\Omega^-$ ) – гипероны. Помимо барионов, представленных в Таблице 4.4, существует также широкий спектр короткоживущих возбуждённых состояний этих барионов.

Барионы участвуют во всех известных элементарных взаимодействиях: сильном, электромагнитном, слабом и гравитационном. За исключением протона все барионы нестабильны (см Таблицу 4.4). Из основных частиц, составляющих ядра, протон (насколько это сегодня известно), как самый лёгкий из барионов, стабилен как в свободном, так и связанном состояниях. Нейтрон стабилен при нахождении в атомных ядрах. Однако в свободном состоянии нейтрон испытывает бета-распад (5.2.8) с временем жизни, близким к 1000 с. Более тяжёлые барионы распадаются за время от  $10^{-23}$  до  $10^{-10}$  с.

При распаде бариона помимо других частиц обязательно образуется барион. Это следствие **закона сохранения барионного заряда**. Всем барионам приписывается барионный заряд  $B = +1$ , а антибарионам – барионный заряд  $B = -1$ , в то время как все остальным частицам соответствует барионный заряд равный  $B = 0$ . Таким образом, для всех процессов с участием барионов или антибарионов характерно сохранение барионного заряда, аналогично тому, как сохраняется электрический заряд в электромагнитных процессах. Закон сохранения барионного заряда обуславливает стабильность наиболее легкого бариона – протона. В самом деле, этот закон запрещает процесс распада протона (или другого бариона) на позитрон (другой лептон) и несколько нейтрино.

Рождение гиперонов происходит при столкновениях адронов при высоких энергиях, т.е. их рождение связано с сильным взаимодействием. Характерное время для процессов, обусловленных сильным взаимодействием должно быть порядка  $10^{-23}$  с. Однако время жизни гиперонов оказалось существенно больше (см Таблица 4.4). Оказалось, что дело в **странности** гиперонов. В сильных взаимодействиях странность сохраняется, но за счет слабого взаимодействия происходят распады частиц с нарушением закона сохранения странности, что на много порядков замедляет время их распада и увеличивает время жизни.

Квантовые числа, такие как **очарование**, **прелесть** и **истинность**, присущи немногим, довольно экзотическим мезонам и барионам, которые содержат соответствующие кварки. Здесь отметим только, что эти квантовые числа, которые в чем-то аналогичны странности, сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях.

В классе адронов, кроме нуклонов и гиперонов, обнаружено большое число сильно взаимодействующих короткодействующих частиц, которые получили название **резонансов**. Эти частицы представляют собой резонансные состояния, образованные двумя или большим числом элементарных частиц. Время жизни резонансов составляет  $\sim 10^{-22} - 10^{-23}$  с. Резонансы с целочисленным спином, являющиеся бозонами, относятся к классу мезонов, а другие резонансы с полуцелым спином – фермионы, относящиеся к классу гиперонов.

---

**Примечание 1.**

*Марри Гелл-Ман, американский физик-теоретик, 1929 – 2019; Нобелевская премия по физике за фундаментальный вклад в физику элементарных частиц (1969);*  
*Джордж Цвейг, американский физик и нейробиолог, 1937;*  
*Лиза Мейтмер, австрийский физик и радиохимик, 1878 – 1968;*  
*Отто Роберт Фриш, английский физик-ядерщик, 1904 – 1979;*  
*Стивен Вайнберг, американский физик, 1933 – 2021; Нобелевская премия по физике (1979)*  
*за вклад в объединённую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий;*  
*Мухаммад Абдус Салám, пакистанский физик-теоретик, 1926 – 1996; Нобелевская*  
*премия по физике (1979);*  
*Шелдон Ли Глэшоу, американский физик, 1932; Нобелевская премия по физике (1979);*  
*Питер Уэр Хиггс, британский физик-теоретик, 1929; Нобелевская премия по физике*  
*(2013) за предсказание бозона Хиггса;*  
*Карло Руббиа, итальянский физик, 1934; Нобелевская премия по физике (1984);*  
*Симон ван дер Меер, нидерландский физик, 1925 – 2011; Нобелевская премия по физике*  
*(1984).*

---

## Предметный указатель

- Абсолютно черное тело 15  
 Адроны 235, 237, 243  
 ----- мезоны 235, 248  
 ----- барионы, нуклоны и гипероны 235, 248, 249  
 Античастицы 236, 241, 245  
 Аромат кварка 235, 244  
 Атом Бора 69
- Барьер потенциальный 125  
 ----- прямоугольный 126  
 ----- произвольной формы 132  
 Бозоны 234, 239
- Вероятности плотность тока 99  
 Взаимодействия фундаментальные  
 ----- гравитационное 232  
 ----- слабое 233  
 ----- электромагнитное 234  
 ----- сильное 235  
 Волна де-Бройля 74  
 Волновая функция 98  
 ----- стационарных состояний 96  
 ----- радиальной части в центральном поле 163
- Гамильтониан 103, 105  
 Гамильтониан электрона в магнитном поле 196  
 Гипероны 235, 237, 250
- Дифракция электронов 79  
 Дифракция атомов 84  
 Длина волны де Бройля 75
- Закон  
 ----- Стефана-Больцмана 18  
 ----- смещения Вина 21  
 ----- Релея-Джинса 24  
 ----- Бугера – Ламберта 40  
 ----- радиоактивного распада 216
- Излучение  
 ----- вынужденное 34  
 ----- равновесное 11  
 ----- спонтанное 32  
 ----- тепловое 11  
 ----- тормозное рентгеновское 56  
 Инверсная заселенность 42  
 Интерпретация волн де-Бройля 87
- Квазиклассическое приближение 132  
 Квантования уровней энергии  
 ----- одномерная яма 115

- одномерная яма с конечными стенками 119
- атом водорода 168
- Квантовая хромодинамика 231, 235, 245
- Квантовые состояния в центральном поле 157
- Квантовые числа электронов в атоме 179
- Кварки 235, 243, 244
- Конфигурация электронов 180
- Коэффициенты Эйнштейна 35
  
- Лазеры 42
- Лептоны 241
  - электроны и позитроны 241
  - мюон и таон 241
  - нейтрино 242
  
- Мезоны 235, 247
- Момент импульса 150, 152
  - многоэлектронного атома 187
  - орбитальный 150
  - полный момент импульса 186
  - сложение двух моментов импульса 182
  - спиновый 176
  
- Нейтрино 233, 241
- Нейтрон 210
- Нормировка собственных функций 110
  
- Операторы 103
  - квадрата момента импульса 154
  - коммутирующие 106
  - момента импульса 149
  - проекции момента импульса 150
  - самосопряженные (эрмитовы) 108
  - собственные функции и собственные значения 104
  - средние значения 113
- Опыт
  - Дэвиссона и Джермера 79
  - Резерфорда 65
  - Томсона и Тартаковского 83
  - Франка - Герца 72
- Осциллятор
  - классический 135
  - квантовый 136
  
- Переносчики взаимодействий 237
  - гравитоны 233, 240
  - фотоны 46, 234, 239
  - $W^{\pm}$ ,  $Z^0$  – бозоны 233, 239
  - глюоны 235, 239
  - бозон Хиггса 240
- Правило отбора оптических переходов
  - для полного момента импульса 192

- для чисел  $L$  и  $S$  и их проекций 194
- для одного электрона 195
- Правило Хунда 190
- Приближение квазиклассическое 132
- Принцип Паули 179
- Протон 209
  
- Радиоактивность
  - альфа-распад 217
  - $\beta$  - распад 218
  - $\gamma$  - излучение 219
  - спонтанное деление ядер 220
- Распределение электронов в атоме 180
  
- Скорость волн де Бройля
  - групповая 77
  - фазовая 76
- Соотношения неопределенностей 89
- Спектральная плотность энергии излучения 13
- Спектры
  - оптические спектры атомов 195
  - собственных значений оператора 104
  - собственных значений оператора квадрата МИ 156
  - энергий атома водорода 68
- Спин электрона 174
- Стандартная модель 238, 240
  
- Теория
  - Релея-Джинса 27
  - Бора 69
- Термоядерный синтез 228
- Термы атомов 189
- Токамак 230
  
- Уравнение
  - Шредингера 94
  - Шредингера стационарное 97
  - неразрывности 100
  - для радиальной части в центральном поле 147
  - для угловой части в центральном поле 148
  
- Фермионы 234, 250
- Формула
  - Бальмера 68
  - Планка 30
- Фотоны 46
- Фотоэффект 48
- Фундаментальные постоянные 233
- Функция
  - волновая 98
  - полиномы Эрмита 140
  - радиальная атома водорода 170

- сферические или шаровые функции 156
- Частица в одномерной потенциальной яме 114
- Четность состояний 119
- Элементарные частицы 236, 237
- Энергии
  - уровней атома водорода 71, 169
  - одномерного осциллятора 140
- Эффект
  - Комптона 58
  - туннельный 129
  - Зеемана простой 197
  - Зеемана сложный 200
  - Штарка 204
- Эффективное сечение ядерных процессов 222
- Ядерные модели 214
- Ядерные силы 212
- Ядро атома 209

*Иванов Вадим Константинович*

# **ФИЗИКА**

## **ВВЕДЕНИЕ В КВАНТОВУЮ ФИЗИКУ**

Учебное пособие

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3005 – учебная литература

---

Подписано в печать 29.09.2023. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 16,0. Тираж 70. Заказ 4161.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14