

# Лекция 1

## Введение

### Модель ядра

### Элементарные частицы и их классификация

### Шкала масштабов в ядерной физике

### Фундаментальные взаимодействия

### Законы сохранения в физике частиц и ядерной физике

## Введение

**Ядерная физика** – это молодая наука, которая изучает строение, свойства и взаимодействия атомных ядер. На заре своего развития она включала многие вспомогательные направления, которые сегодня являются самостоятельными дисциплинами, такие как: **детекторы излучений, взаимодействие излучения с веществом, физика элементарных частиц** и другие. При помощи детекторов в научных установках экспериментаторы регистрируют ядра, испускаемые ими излучения и продукты разнообразных реакций. Благодаря этому определяются характеристики ядер и вычисляются вероятности различных ядерных превращений. Экспериментальные точности зависят, в том числе, от знания механизмов взаимодействий частиц и ядер с веществом детектора. Современное теоретическое описание ядра (а также атомов и всего Мира) невозможно без знаний из области физики элементарных частиц. Сегодня применения этих наук разнообразны и многочисленны как в повседневной жизни, так и в фундаментальных исследованиях.

Одно из основных прикладных применений ядерной физики – это создание атомных станций, основанных на принципе деления ядер, и вырабатывающих большое количество используемой человеком электрической энергии (по данным МАГАТЭ<sup>1</sup> на 2017 год доля, приходящаяся на этот вид энергии в мире ~ 10.9%, в России ~17.8%). Однако, ядерное топливо (урановые руды), в конце концов, истощится, как и другие полезные ископаемые (например, каменный уголь). Наиболее перспективным источником энергии в будущем видятся термоядерные реакторы, в которых основная энергия будет выделяться в результате слияния легких ядер, например, дейтерия, запасы которого на Земле практически неисчислимы, или гелия-3, содержащегося в лунном грунте.

Изотопные источники тока сегодня широко применяются в труднодоступных (например, полярных) районах Земли, в автоматических метеорологических станциях, маяках, и на космических аппаратах. Так, станция «Новые горизонты», предназначенная для изучения Плутона и исследования объектов пояса Койпера, и космические аппараты программы «Вояджер», предназначенные для исследований дальних планет Солнечной системы, не могут получать энергию от солнечных батарей из-за низкой освещенности на удалении от Солнца. Для их энергоснабжения применяется радиоизотопный источник электроэнергии (РИТЭГ), использующий тепло, выделяющееся при естественном распаде радиоактивных изотопов и преобразующий его в электроэнергию с помощью термоэлектрогенератора. Мощные атомные реакторы установлены на ледоколах, военных кораблях и подводных лодках. Россия обладает единственным атомным ледокольным флотом в мире, задачей которого является обеспечение судоходства по северным морям и освоение арктического шельфа. Благодаря реакторам, атомные ледоколы могут длительно находиться на трассах, не нуждаясь в заправке. Атомными реакторами оснащены самые большие в мире действующие не авианосные боевые ракетные крейсера «Петр Великий» и «Адмирал Нахимов», а также серия российских подводных лодок проекта «Борей».

Важную роль ядерная физика имеет в промышленности и используется, например, для опреснения морской воды, дефектоскопии, нахождения примесей в минералах

---

<sup>1</sup>Международное агентство по атомной энергетике, [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

(например, в алмазах) и сплавах, определения доли металла в руде, качества угля и т.п. Так, радиационные дефектоскопы производят облучение объектов рентгеновскими,  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучами, а также нейтронами, позволяя выявлять наличие в них пор или трещин.  $\gamma$ -источники находят многочисленное применение в автоматизации различных операций, как-то: измерение уровня жидкости, плотности и влажности среды. Нейтронный каротаж используется для определения толщины слоя, в частности каменноугольного пласта, для поисков нефти и т.п. Метод меченых атомов помогает обнаруживать места утечки газа в газопроводах или, наоборот, места засорения в водопроводах, нефтепроводов и др.

Все чаще ядерная физика применяется в медицине – это диагностика заболеваний при помощи рентгеновского аппарата, активационного анализа, метода меченых атомов и радиографии; лечение опухолей  $\gamma$ -лучами,  $\beta$ -частицами и тяжёлыми ионами; стерилизация фармацевтических препаратов, одежды медицинских инструментов и оборудования  $\gamma$ -излучением и др.

И так во многих сферах деятельности человека, даже там, где использование ядерной физики на первый взгляд кажется совершенно неожиданным. В сельском хозяйстве создаются установки для облучения картофеля с целью предохранения его от прорастания, овощей и фруктов для сохранения их от плесени и продления срока годности. Благодаря генетическим транс мутациям становится возможным выведение новых сортов растений, более устойчивых к вредителям и заболеваниям. Ядерная физика различным образом используется историками и криминалистами для определения возраста исторических предметов или обнаружения улик на месте преступления. Так, с помощью ядерных реакций было установлено, что причиной смерти Наполеона Бонапарта было отравление мышьяком.

Наиболее известным результатом ядерных исследований является создание ядерного оружия, оказавшее огромное влияние на международную политику. Однако его можно применять и в мирных целях. В частности, подземные ядерные взрывы уже используются для создания огромных пещер для газохранилищ.

Знание механизмов протекания ядерных реакций дает ответы на многие фундаментальные вопросы космологии и астрофизики. В частности, появляется понимание процессов, протекающих на ранней стадии эволюции Вселенной (нуклео и бариосинтез), механизмов возникновения химических элементов в природе и генерации энергии в звездах, необходимой, в том числе, для зарождения биологической жизни на планетах.

Ускорители элементарных частиц и ядер используются для изучения природы микромира и Вселенной в первые мгновения после Большого взрыва. Благодаря им открыто большинство частиц, античастиц и переносчиков взаимодействий, например: антипротон (1955 г.), переносчик слабого взаимодействия W-бозон (1983 г.) и бозон Хиггса (2012 г.); ведутся поиски новых частиц и других форм материи. Эксперименты на ускорителях позволяют исследовать причины возникновения барионной асимметрии мира, т.е. превышение количества материи над антиматерией.

## **Модель ядра**

Зарождению ядерной физики в значительной мере способствовало усовершенствование методов экспериментальных исследований в конце 19 века. В 1895 году английский физик Дж. Дж. Томсон измерил отношение заряда к массе для частиц, из которых состояли катодные лучи, таким образом, открыв электроны, а немецкий физик В.К. Рентген обнаружил рентгеновское излучение, вызванное торможением электронов на катоде. В 1896 году французский физик А. Беккерель открыл естественную радиоактивность некоторых элементов. Впоследствии на основе его работ польским химиком М. Складовской-Кюри и ее мужем французским физиком П. Кюри изучены многочисленные свойства атомов и атомных ядер. В 1900-1905 годах исследование излучения абсолютно черного тела и фотоэлектрического эффекта позволили немецким

физикам М. Планку и А. Эйнштейну ввести вторую (после электрона) элементарную частицу – фотон. Совокупность результатов опытов указывала на сложный состав и общность структуры разных атомов.

Обобщив известные к 1904 г. экспериментальные сведения Дж. Дж. Томпсон предложил первую модель структурного элемента вещества – атома. Согласно ей, атом представляет собой массивный положительно заряженный шар (среду) радиусом  $10^{-8}$  см, равномерно заполненный легкими электронами.

Однако уже в 1909 году модель вступила в противоречие с результатами эксперимента Э. Резерфорда, проводившего изучение рассеяния альфа-частиц на тонких металлических фольгах (к тому времени уже было известно, что альфа-частицы - это атомы гелия, несущие заряд  $+2e$ ).  $\alpha$ -частицы были зарегистрированы в области больших углов рассеяния, а их распределение оказалось непрерывным. В частности, наблюдались  $\alpha$ -частицы с углами рассеяния больше 90 градусов, т.е. рассеянными в противоположном направлении. В 1911 г. Э. Резерфорд смог объяснить полученные результаты, предложив новую ядерную модель атома, согласно которой его положительный заряд сосредоточен в очень малом объеме в центре, на котором и происходит рассеяние  $\alpha$ -частиц, а вокруг по орбитам с радиусом порядка  $10^{-8}$  см вращаются электроны.

И все же модель Резерфорда имела существенный недостаток – было не ясно как объяснить стабильность такой системы. В соответствии с законами электродинамики, заряженная частица, движущаяся по окружности, должна терять энергию на излучение. Следовательно, радиус орбиты будет уменьшаться до тех пор, пока электрон не упадет на ядро. Также было не ясно как объяснить дискретный атомный спектр, так как с изменением радиуса орбиты изменяется и частота испускаемого излучения.

В 1913 г. для устранения противоречий, датский ученый Н. Бор впервые предложил использовать квантовую теорию для описания атомных процессов. Он постулировал: орбитальный момент импульса электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, может принимать лишь целые значения кратные постоянной Планка  $h$ . Объяснить эти постулаты удалось в 1926 году с созданием Гейзенбергом и Шредингером полноценной квантовой теории. Дискретные энергетические уровни электронов получались естественным образом из решения квантово-механического уравнения Шредингера, записанного для атома.

Первые сведения о структуре атомного ядра получены в 1919 г., когда в его составе Э. Резерфордом были обнаружены протоны. Позднее в 1932 г. Дж. Чедвик открыл в составе ядра нейтроны. Таким образом, изучение любого вещества независимо от его состояния (твердого, жидкого и газообразного) в конечном итоге сводится к изучению свойств и взаимодействия трех частиц: протонов, нейтронов и электронов (любой атом состоит только из этих частиц).

Протон (p) – стабильная частица с массой в 1837 раз больше массы электрона и положительным зарядом равным по величине заряду электрона. Нейтрон (n) – не имеет заряда и примерно на 2.5 массы электрона тяжелее протона (отличие их масс  $\sim 0.1\%$ ). По этой причине свободный нейтрон не стабилен и распадается со средним временем жизни  $\sim 880$  секунд ( $\sim 15$  минут).

Характеристики ядер определяются количеством и соотношением между протонами и нейтронами (их также называют нуклонами). Ядра имеют положительный электрический заряд  $Q$ , кратный абсолютной величине заряда электрона  $Q=Ze$ . Целое число  $Z$  равно числу протонов в ядре и совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической таблице Д. И. Менделеева. Масса ядра меньше суммы масс входящих в него протонов и нейтронов на величину так называемой энергии связи ( $M_{\text{яд}} = \sum m_{\text{нук}} - E_{\text{св}}$ ). Масса ядра приблизительно равна целому числу атомных единиц массы, за которую принимается 1/12 часть массы нейтрального атома углерода.<sup>2</sup> Ближайшее

<sup>2</sup> 1 а. е. м. =  $\left(\frac{1}{12}\right) \left(\frac{12}{N_A}\right) \frac{\text{г/моль}}{1/\text{моль}} = \frac{1}{6.022 \cdot 10^{23}}$  г =  $1.66 \cdot 10^{-24}$  г

целое к массе ядра число, выраженное в атомных единицах, называется массовым числом и обозначается буквой  $A$ . Число нейтронов в ядре определяется как разность массового числа  $A$  и заряда  $Z$ .

Терм ядра с массой  $A$  и зарядом  $Z$ , соответствующего химическому элементу  $X$ , имеет вид  $X_Z^A$ , например  $He_2^4$ . Заряд можно опускать, так как он непосредственно определяет название элемента  $X$ . Ядра с одинаковым зарядом ( $Z_1 = Z_2 = \dots$ ), но разным весом называются изотопы. Ядра с одинаковым весом ( $A_1 = A_2 = \dots$ ), но разным зарядом называются изобары. Ядра с одинаковым количеством нейтронов ( $N_1 = N_2 = \dots$ ), но разным зарядом называются изотоны.

Таблица 1

ядро	изотоп	изобар	изотон
$He_2^5$	$He_2^4$	$Li_3^5$	$Li_3^6$
$C_6^{13}$	$C_6^{12}$	$N_7^{13}$	$O_8^{15}$

### Элементарные частицы и их классификация.

В 1932 г. К. Андерсен, изучая космическое излучение высоко над уровнем моря, открыл позитрон (античастицу электрона), а спустя пять лет -  $\mu$ -мезоны (мюоны). Строительство ускорителей частиц, способных достигать всё больших энергий, позволило быстро открывать новые частицы, их многообразие увеличивалось с каждым годом. Физике потребовалась систематизация, основанная на упорядочивании по общим признакам. В результате физика элементарных частиц, которая была лишь небольшим разделом ядерной физики, превратилась в самостоятельную науку.

Обычно частицы, которые не удается расщепить на составные части, называют элементарными или фундаментальными. В этом названии отражаются главные отличительные свойства – неизменность, неспособность к распаду и отсутствие структуры.

Сегодня известно, что каждая из элементарных частиц может участвовать не более, чем в четырех видах взаимодействия<sup>3</sup>:

- сильном (ядерном);
- электромагнитном;
- слабом;
- и гравитационном.

Гравитационное взаимодействие – универсально, но в микромире ввиду малой массы объектов его можно не учитывать<sup>4</sup>. Поэтому любое явление природы (механическое, химическое электрическое, магнитное, тепловое или ядерное), происходящее с любыми состояниями вещества (твердое, жидкое, газообразное или плазма) сводится к взаимодействию элементарных частиц посредством одного (как правило) или нескольких типов взаимодействий.

Слабое взаимодействие делит частицы на так называемые «левовинтовые» и «правовинтовые» в зависимости от направления спина и импульса. Электромагнитное взаимодействие делит частицы на заряженные и нейтральные. Сильное взаимодействие делит частицы на лептоны (не участвующие в сильном взаимодействии) и адроны (участвующие в сильном взаимодействии).

Современная классификация элементарных частиц представлена на рисунке 1.

<sup>3</sup> В некоторых современных теориях предсказывается, что кроме указанных 4-х видов взаимодействий существуют и другие типы, но их проявления пока никак не обнаружены.

<sup>4</sup> Силы гравитационного взаимодействия между объектами с массами  $M_1$  и  $M_2$   $F = GM_1M_2/r^2$ , где  $G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г} \cdot \text{с}^2$  – гравитационная постоянная. Для сравнения масса Земли  $M_3 = 5.97 \cdot 10^{27} \text{ г}$ , масса Солнца  $M_C = 1.99 \cdot 10^{33} \text{ г}$ , масса электрона  $M_e = 9.11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ , масса протона  $M_p = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ .



Рис. 1. Классификация элементарных частиц.

### Лептоны

К настоящему времени обнаружено всего шесть элементарных частиц, которые не участвуют в сильном взаимодействии, т.е. лептонов: электрон  $e^-$ ,  $\mu^-$ -мезон (мюон),  $\tau^-$ -лептон (таон) и три соответствующих типа нейтрино – электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$ , таонное  $\nu_\tau$  (табл. 2). Все они являются фермионами, т.е. имеют полуцелый спин  $1/2\hbar$ . Электрон, мюон и таон заряжены отрицательно, нейтрино не имеют электрического заряда. У каждого из лептонов есть античастица – антилептон (табл. 3). Так, античастицей отрицательно заряженного электрона является положительно заряженный позитрон.

Таблица 2

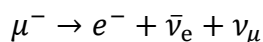
Заряд, e	Семейство			Спин
	I	II	III	
-1	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$\frac{1}{2}\hbar$
0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	

Таблица 3

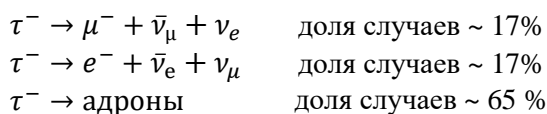
Заряд, e	Семейство			Спин
	I	II	III	
+1	$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$	$\frac{1}{2}\hbar$
0	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	

Наименьшую массу имеют частицы, относящиеся к первому семейству; масса электрона  $m_e = 0.511$  МэВ. Поэтому распаду электрона на другие элементарные частицы препятствует закон сохранения энергии, а распад на нейтрино и фотоны запрещен законом сохранения электрического заряда.

Мюон, относящийся ко второму семейству, тяжелее электрона в 206 раз ( $m_\mu \approx 206m_e$ ) и имеет массу  $\sim 106$  МэВ. Он не является стабильной частицей, его время жизни составляет  $\tau_\mu = 2.2 \cdot 10^{-6}$  с.



Таон, относящийся к третьему семейству, был открыт в 1975 г. на электрон-позитронном коллайдере SPEAR. Этот лептон тяжелее электрона в 3480 раз ( $m_\tau \approx 3480m_e$ ) и его масса равна  $\sim 1777$  МэВ. Таон не стабилен и распадается за короткое время  $\tau_\tau = 2.9 \cdot 10^{-13}$  с.



Все нейтрино имеют не нулевую, но чрезвычайно малую массу, которая до сих пор экспериментально не измерена, но в опытах по изучению  $\beta$ -распада ядер, распада мюонов  $\tau$ -лептонов и  $\pi$ -мезонов на нее установлены верхние ограничения:  $m_{\nu_e} < 2.05$  эВ,  $m_{\nu_\mu} < 190$  кэВ,  $m_{\nu_\tau} < 18.2$  МэВ. Однако в косвенных космологических наблюдениях эти

ограничения намного строже – с высокой вероятностью сумма масс нейтрино всех сортов находится в диапазоне от 0.25 до 1.5 эВ.

Доказательство наличия массы нейтрино получено в опытах по поиску т.н. нейтринных осцилляций, т.е. превращений одного типа нейтрино в другой или в антинейтрино, что было бы невозможно в случае безмассовых частиц. Эта идея впервые высказана советско-итальянским физиком Б. Понтекорво в 1957 году, а в 2015-ом за их открытие Т. Кадзита и А. Макдональду была вручена Нобелевская премия.

### Адроны

Адроны в отличие от лептонов, можно назвать элементарными только с оговоркой – их действительно нельзя разбить на составные части, но в тоже время сегодня достоверно известно, что адроны имеют внутреннюю структуру и состоят из кварков  $q$ .

Всего открыто 6 кварков  $u$  (up),  $d$  (down),  $c$  (charm),  $s$  (strange),  $t$  (top или truth) и  $b$  (bottom или beauty). Последний  $t$ -кварк был открыт не так давно – в 1995 году. Как и лептоны, все кварки являются фермионами и группируются в три семейства (табл. 4). Кварки  $u$ ,  $c$ , и  $t$  имеют заряд  $+2/3$ , остальные кварки  $-1/3$ . Кварки первого семейства ( $u$ ,  $d$ ) стабильны, остальные имеют большую массу и нестабильны. Каждому кварку в природе соответствует свой антикварк (табл. 5).

Таблица 4

Заряд, $e$	Семейство			Спин
	I	II	III	
$+2/3$	$u$	$c$	$t$	$\frac{1}{2}\hbar$
$-1/3$	$d$	$s$	$b$	

Таблица 5

Заряд, $e$	Семейство			Спин
	I	II	III	
$-2/3$	$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	$\frac{1}{2}\hbar$
$+1/3$	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	

Используя комбинации кварков и антикварков, все адроны можно разделить на два больших класса: барионы, состоящие из 3-х кварков, и мезоны, состоящие из пары кварк - антикварк<sup>5</sup> (рис. 1). Среди барионов можно выделить несколько категорий: стабильные, к которым относятся нуклоны – протоны и нейтроны, и короткоживущие резонансы.

Протоны и нейтроны состоят из самых легких кварков первого семейства:  $p$  ( $uud$ ) и  $n$  ( $udd$ ). Суммарные заряд и спин двух  $u$ -кварков в протоне равны  $+4/3$  и 1; складывая<sup>6</sup> их с зарядом и спином  $d$ -кварка, получим соответствующие характеристики протона  $+1$  и  $1/2$ .

Самыми легкими из мезонов являются  $\pi$ -мезоны:

$$\begin{aligned} \pi^+ &= u\bar{d} & \pi^0 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}) \\ \pi^- &= \bar{u}d \end{aligned}$$

Кварк и антикварк в  $\pi$ -мезоне находятся с в состоянии с противоположно направленными спинами, поэтому суммарный спин частицы равен нулю<sup>7</sup>.

Примером резонансов являются  $\Delta$ -барионы – самые легкие из барионных резонансов; за время  $\sim 10^{-23}$  с они распадаются на нуклоны  $N$  и  $\pi$ -мезоны  $\Delta \rightarrow N \pi$ . При этом  $\Delta$ -барионы могут состоять из следующих комбинаций кварков:

$$\begin{aligned} \Delta^{++} &= uuu & \Delta^0 &= udd \\ \Delta^+ &= uud & \Delta^- &= ddd \end{aligned}$$

С одной стороны, может показаться, что в частице  $\Delta^{++}$  нарушается Принцип Паули: действительно, как минимум два, а может быть и все три кварка находятся в состоянии с одинаковыми квантовыми числами. Однако, это не так. Согласно современной модели сильных взаимодействий, кварки обладают дополнительным квантовым числом, которое называется «цвет» и отличается у всех трех кварков. Обычно говорят, что кварки имеют

<sup>5</sup> В 2015 году открыты короткоживущие частицы - пентакварки, состоящие из 4-х кварков и одного антикварка, например,  $uudc\bar{s}$ .

<sup>6</sup> Согласно кварковой модели орбитальные угловые моменты кварков в нуклоне равны нулю.

<sup>7</sup> Согласно кварковой модели орбитальные угловые момент кварка и антикварка в  $\pi$ -мезоне равны нулю.

три цвета – желтый, синий и красный (анти-кварки имеют антицвета), что обеспечивает белый цвет всех наблюдаемых частиц.

Таким образом, ядерные реакции на фундаментальном уровне описываются взаимодействием и (или) рождением новых кварков и изменением кваркового состава участвующих в реакции адронов.

Итак, фермионы первого поколения ( $e^-$ ,  $\nu_e$ ,  $u$ ,  $d$ ) и фотоны являются той материей, из которой построена наша Вселенная. Из  $u$ - и  $d$ -кварков состоят протоны и нейтроны, а значит, и ядра атомов, из электронов – атомные оболочки; без электронных нейтрино не могут протекать реакции ядерного синтеза в Солнце и звездах. Фермионы второго и третьего поколений сыграли важную роль в ранней Вселенной, в первые мгновения Большого Взрыва. В частности, число сортов нейтрино определило соотношение между распространенностями водорода и гелия во Вселенной.

Отметим, что соотношение между массами  $u$ -,  $d$ -кварков и электрона определило существование сложных форм материи. Если бы выполнялось неравенство

$$m_p(uud) - m_n(udd) + 2.5m_e > 0,$$

то водород был бы нестабилен, и существование Вселенной в привычном для нас виде было бы невозможным.

### Шкала масштабов в ядерной физике

Сегодня человечество накопило немало удивительных сведений об окружающем мире: пространственные и временные масштабы Вселенной огромны (см. Приложение) – структуры материи, удаленные от Земли на расстояния  $\sim 10^{28}$  см или  $10^{24}$  световых лет состоят из мельчайших фундаментальных частиц всего нескольких типов, имеющих размер  $< 10^{-17}$  см.

По этой причине в ядерной физике вводится своя удобная система масштабов.

Таблица 6

	Расстояние, Ферми (фм)	Энергия, Электрон-вольт (эВ)	Масса, $m = \frac{E}{c^2}$ (эВ/ $c^2$ )
СИ	1 фм = $10^{-15}$ м	1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж	1 эВ/ $c^2$ = $1.78 \cdot 10^{-36}$ кг
СГС	1 фм = $10^{-13}$ см	1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-12}$ эрг	1 эВ/ $c^2$ = $1.78 \cdot 10^{-33}$ г

Так, если в атомной физике за характерный размер принимается радиус первой орбиты электрона в атоме водорода (боровский радиус), равный  $\sim 0.53 \cdot 10^{-8}$  см, то в субъядерной области эти расстояния становятся очень большими и неудобными для использования. Характерный ядерный размер составляет  $\sim 10^{-13}$  см или 1 фемтометр (ферми, фм). В этой шкале радиусы нейтрона и протона равны  $\sim 0.85$  фм.

В качестве оценки «ядерной секунды» принимается время, за которое свет проходит расстояние, равное диаметру ядра  $D$  (в предположении сферической формы). Тогда «ядерная секунда»  $\tau = D/c = 10^{-23} \div 10^{-24}$  с, где  $c$  - скорость света в вакууме.

Энергии, характерные для ядерной физики, заметно превосходят по величине все известные. Как показывает опыт, энергия связи нуклонов в ядре, приходящаяся на одну частицу, в среднем составляет величину  $\sim 8$  МэВ<sup>8</sup>. Эта величина в  $10^6$  раз превосходит характерную энергию связи в атомной физике, которая соответствует энергии связи электрона в атоме водорода в основном состоянии 13.6 эВ. Именно благодаря такой колоссальной энергоёмкости по сравнению с химической энергией, использование ядерной энергии в атомных электростанциях становится таким выгодным.

### Фундаментальные взаимодействия.

Для обозначения многообразных связей в физике элементарных частиц используется понятие «взаимодействия». С одной стороны, термин достаточно

<sup>8</sup> 1 эВ – это энергия, которую приобретает однозарядная частица, проходя разность потенциалов в 1 эВ.

конкретный, с другой стороны весьма широкий. Независимо от происходящих процессов – притяжение или отталкивание, аннигиляция или распад – частицы «взаимодействуют» друг с другом.

**Сильное взаимодействие** – это ядерные силы, обеспечивающие связь между нуклонами в атомном ядре (в том числе между одноименно заряженными протонами). Ядерные силы имеют характер притяжения и высокую интенсивность, значительно превосходящую все остальные виды взаимодействий. Их радиус действия  $\sim 10^{-16}$  см, что на несколько порядков больше размеров самих нуклонов. Характерное время сильного взаимодействия чрезвычайно мало и близко к одной ядерной секунде ( $\sim 10^{-23}$  с).

Рассмотрим облучение (ядер) мишени поочередно протонами и нейтронами низких энергий, и определим долю нуклонов, возникающих только в упругих взаимодействиях. До измерений можно предположить, что вперед должно лететь значительно больше нейтронов, чем протонов, т.к. даже очень интенсивные ядерные силы не могут отклонить быстрый нейтрон на большой угол от первоначального направления в силу своего короткодействия, в отличие от дальнедействующих электромагнитных сил, эффективно отклоняющих заряженные протоны. В эксперименте было обнаружено, что в направлении первичного пучка летят как нейтроны, так и протоны, и примерно в равном количестве! Объяснить результат можно, если предположить, что в процессе ядерного взаимодействия нейтрон и протон «обмениваются» своими электрическими зарядами (нейтрон становится протоном, а протон – нейтроном). Это явление называется «перезарядкой», а соответствующие ядерные силы – обменными.

Механизм такого взаимодействия в 1934 г. описал советский физик И.Е. Тамм, предположив, что в процессе ядерного взаимодействия нуклоны испускают и поглощают заряженные частицы. В то время кроме нуклонов были известны электроны и только что открыты позитроны. По предположению Тамма, нейтрон в процессе ядерного взаимодействия с протоном испускает электрон, превращаясь в протон, а протон поглотивший электрон, становится нейтроном. Однако сам же Тамм показал: эти частицы не обладают достаточной массой для того, чтобы с их помощью можно было одновременно объяснить короткодействие и высокую интенсивность ядерных сил.

В 1935 г. японский физик Х. Юкава вычислил массу подходящей частицы, фактически предсказал существование заряженных частиц тяжелее электрона. Он назвал их мезонами от греческого слова «мезо» – средний, промежуточный, что подчеркивает промежуточное значение массы частиц по сравнению с массами электронов и протонов.

Теорию Юкавы можно проиллюстрировать при помощи соотношения неопределенностей

$$\Delta E \Delta t \leq \hbar$$

Согласно ему, за короткое время  $\Delta t$  энергия системы может измениться только на величину  $\Delta E \leq \hbar/\Delta t$ . Это означает, что при очень малом времени  $\Delta t$ , изменение энергии  $\Delta E$  может быть достаточно большим. Как уже было сказано, характерное ядерное время  $\Delta t = 0,5 \cdot 10^{-23}$  с; подставив его в соотношение неопределенностей

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} \approx \frac{6,58 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}}{0,5 \cdot 10^{-23} \text{ с}} \approx 130 \text{ МэВ},$$

получим, что на короткое время  $\sim 10^{-23}$  с возможно возникновение частицы с массой  $M \sim 300 m_e$  ( $\pi$ -мезона<sup>9</sup>), которая за время существования пролетает расстояние  $\sim 10^{-13}$  см.

Тогда ядерное взаимодействие двух рядом находящихся нуклонов заключается в испускании одним из них частицы с массой  $\sim 300 m_e$ , и её поглощении другим нуклоном через время, близкое к ядерному. Такие промежуточные частицы-переносчики называют виртуальными. Их нельзя представить существующими отдельно от нуклонов вне области ядерного взаимодействия. Тем не менее, виртуальные частицы можно превратить в

<sup>9</sup> Массы  $\pi$ -мезонов:  $m(\pi^\pm) = 139.6 \text{ МэВ}$  и  $m(\pi^0) = 135.0 \text{ МэВ}$



реальные, способные «отделиться» от нуклонов и «жить» самостоятельно. Для этого нуклоны должны обладать большим запасом кинетической энергии (например, при облучении мишени протонами или нейтронами на ускорителях частиц), часть которой при их столкновении может преобразоваться в массу покоя мезона.

В фундаментальном сильном взаимодействии роль виртуальных частиц-переносчиков (квантов) играют восемь нейтральных векторных частиц (бозонов), которые получили названия глюонов (от англ. glue – клей). Обмениваясь глюонами, кварки обмениваются цветовыми зарядами (аналогично электрическим зарядам в электромагнитном взаимодействии), кварки «склеиваются» друг с другом в адроны<sup>10</sup>.

Электромагнитное взаимодействие примерно в 100 раз слабее сильного, но радиус его действия не ограничен. Квант электромагнитного поля – фотон, является бозоном и обладает целым спином  $1\hbar$ . В макромире он проявляет себя в виде электромагнитной волны, например, при передаче радио сигналов. В микромире виртуальные фотоны переносят взаимодействие между зарядами поглощаясь и излучаясь на короткое время.

Два электрических заряда  $q_1$  и  $q_2$ , находящиеся на расстоянии  $r$ , притягиваются или отталкиваются с силой, определяемой законом Кулона:

$$F_{\text{эм}} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Обращает на себя внимание схожесть с законом гравитационного взаимодействия, в том числе, в обоих случаях присутствует обратная пропорциональность квадрату расстояния между взаимодействующими объектами. Сравним электромагнитные и гравитационные силы по своей интенсивности для двух протонов, находящихся на расстоянии  $2 \cdot 10^{-13}$  см

$$F_{\text{гр}} = G \frac{m_p^2}{r^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-8} \text{ дн} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-2} \cdot (1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г})^2}{(2 \cdot 10^{-13} \text{ см})^2} \approx 4,5 \cdot 10^{-30} \text{ дн} \sim 5 \cdot 10^{-35} \text{ Н};$$

$$F_{\text{эл}} = \frac{(q_p)^2}{r^2} = \frac{(4,8 \cdot 10^{-10} \text{ ед. СГС})^2}{(2 \cdot 10^{-13} \text{ см})^2} \approx 5,8 \cdot 10^6 \text{ дн} \sim 60 \text{ Н}$$

Т.о. электростатическое взаимодействие двух протонов примерно в  $10^{36}$  раз сильнее, чем их гравитационное взаимодействие, причем это соотношение справедливо при любом расстоянии между протонами. Почему же, сталкиваясь с электростатическим взаимодействием в жизни, мы не замечаем его огромной силы; наоборот, складывается впечатление, что оно гораздо слабее гравитационного.

Дело в том, что наблюдаемые гравитационные эффекты определяет не только масса данного тела, но и вся огромная масса притягивающей его Земли. Сила гравитации обладает свойством аддитивности, т.е. результирующая сила складывается из взаимодействий всех протонов, нейтронов и электронов, входящих в атомы вещества. В тоже время, полного проявления электромагнитных сил в повседневной жизни нет, т.к. в макроскопических веществах почти все положительные и отрицательные электрические заряды скомпенсированы в виде электрически нейтральных атомов. Часто наблюдаемый эффект взаимодействия наэлектризованных при трении предметов обусловлен ничтожным избытком заряда по сравнению с общим количеством атомов в этих предметах. И только в микромире, где заряд есть у каждой частицы, электромагнитные силы проявляются в полной мере. Любопытно заметить, что если бы окружающие нас

<sup>10</sup> Основное отличие глюонов от фотонов в том, что фотон – один и он электрически-нейтрален, а глюонов – восемь и они несут цветовые заряды. Благодаря им, глюоны могут сильно взаимодействовать друг с другом и даже испускать друг друга («светящийся свет»). В результате такого сложного взаимодействия распространение глюонов в вакууме совершенно не похоже на распространение фотонов, а цветовые силы не похожи на электромагнитные.

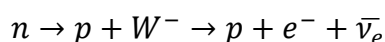
предметы состояли не из нейтральных атомов, а хотя бы из однозарядных ионов<sup>11</sup>, то электростатическое взаимодействие между ними было бы чрезвычайно велико.

Электромагнитное взаимодействие лучше остальных изучено теоретически. Согласно квантовой электродинамике любой электрический заряд окружен электромагнитным полем виртуальных фотонов (испускаемых и поглощаемых через короткое время согласно принципу неопределенностей), с которым взаимодействует другие заряды с характерным временем  $\tau_{эм} \approx 10^{-20}$  с.

В электромагнитном взаимодействии участвуют все заряженные частицы, фотон ( $\gamma$ -квант, переносчик электромагнитного взаимодействия)  $\pi^0$ -мезон (распадающийся на два  $\gamma$ -кванта) и нейтрон (у которого нет заряда, но есть магнитный момент).

По своей интенсивности слабое взаимодействие составляет лишь  $10^{-14}$  от сильного. Диапазон изменения времени жизни частиц, распадающихся при участии слабых сил, очень широк: от 1000 до  $10^{-10}$  с, однако характерным временем для процесса слабого взаимодействия считается нижняя граница этого диапазона. Слабое взаимодействие может протекать как с обменом зарядами, так и без, поэтому квантами поля являются три частицы-бозоны – две переносящие заряд  $W^\pm$  и одна нейтральная  $Z^0$ .

Так, например, в реакции  $\beta$ -распада сначала рождаются две частицы – протон и  $W^-$ -бозон, а электрон и антинейтрино имеют вторичную природу, возникая в результате распада  $W^-$ -бозона:



Сводная информация о характеристиках взаимодействий приведена в таблице 7.

Таблица 7

	Слабое	Электромагнитное	Сильное	
			Фундамент.	Нуклон - нуклонное
Взаимодействующие фермионы	Кварки, лептоны	Кварки, заряженные лептоны	Кварки	p, n
Переносчики взаимодействий (бозоны)	$W^\pm, Z^0$	$\gamma$	g (8 шт.)	$\pi^\pm, \pi^0$
Константы	$10^{-5}$	1/137	$\lesssim 1$	14.6
Характерное время, с	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-20}$	$\sim 10^{-21} - \sim 10^{-23}$	
Радиус, см	$\sim 10^{-16}$	$\infty$	$\sim 10^{-13}$	
Описывающая теория	Слабая	Квантовая электродинамика	Квантовая хромодинамика	
		Электрослабая		

Каждая частица может участвовать в одном или нескольких типах взаимодействий.

Например, для нейтрино возможно только слабое взаимодействие<sup>12</sup>. Поэтому любой процесс с участием нейтрино обязательно слабый, т.е. идет медленно, и наоборот, в сильном и электромагнитном процессе не может возникнуть или поглотиться нейтрино. Аналогично  $\gamma$ -квант участвует только в электромагнитном взаимодействии.

Некоторые частицы могут участвовать в двух взаимодействиях:

- Электрон образуется в слабом процессе  $\beta$ -распада и в электромагнитном процессе рождения электрон-позитронной пары  $\gamma$ -квантом.
- $\pi^0$ -мезон рождается в сильном процессе столкновения нуклонов, а распадается по схеме  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  т.е. электромагнитным способом.

<sup>11</sup>Однозарядный ион - это атом, в котором не хватает одного электрона (положительный ион) или в котором имеется один лишний электрон (отрицательный ион).

<sup>12</sup> Есть ли магнитный момент у нейтрино и антинейтрино сегодня не известно.

- $\Lambda^0$ -гиперон рождается в сильном процессе взаимодействия  $\pi^-$ -мезонов с протонами  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ , а распадается по схеме  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$  за время  $\tau \approx 10^{-10}$  с, т.е. слабым образом.

Многие частицы, например, протон, нейтрон или заряженные  $\pi$ -мезоны, способны участвовать во всех трех взаимодействиях.

Элементарные частицы и взаимодействия между ними описываются в рамках т.н. Стандартной модели, основанной на релятивистской квантовой теории поля. Она многократно проверена и позволяет делать достоверные теоретические предсказания различных свойств элементарных частиц. Однако она не может считаться окончательной, так как не описывает некоторые явления, наблюдаемые в природе, например, наличие темной материи и энергии (см. Приложение).

### **Законы сохранения в физике частиц и ядерной физике.**

Из сравнения свойств фундаментальных сил следует, что наиболее вероятны реакции, протекающие за счет сильного взаимодействия, затем идут электромагнитные процессы, и наименее вероятны реакции за счет слабого взаимодействия. Однако возможность осуществления той или иной реакции ограничивается набором законов сохранения, и для разных взаимодействий эти ограничения различаются.

#### **Энергия и импульс**

Законы сохранения энергии, импульса и момента импульса относятся к числу наиболее часто используемых законов физики. Применять их можно не только к макроскопическим телам, но и к элементарным частицам.

#### **Электрический заряд**

Также существует закон сохранения электрического заряда, который выполняется в любой замкнутой системе (как из макроскопических тел, так и из элементарных частиц), согласно которому во всех реакциях с участием элементарных частиц суммы зарядов с обеих сторон равенства всегда должны быть одинаковы.

#### **Барионный и лептонный заряды**

По аналогии с электрическим зарядом в физике микромира вводятся понятия других «зарядов». Если каждому бариону поставить в соответствие так называемый барионный заряд  $B = +1$ , а антибариону  $B = -1$ , то их суммы до и после реакции должны быть равны. В качестве одного из примеров можно привести реакцию рождения пиона

$$\begin{array}{ccccccc} p & + & p & \rightarrow & p & + & n & + & \pi^+ \\ B & +1 & +1 & = & +1 & & +1 & & 0 \end{array}$$

Т.к. пион не является барионом, его барионный заряд равен нулю. Сумма барионных зарядов в обеих частях равенства совпадает, значит данный закон сохранения реакцию не запрещает.

Кроме закона сохранения барионного заряда существует введенный по аналогии закон сохранения лептонного заряда  $L$ , относящийся к частицам-лептонам. Рассмотрим, например, процесс  $\beta$ -распада:

$$\begin{array}{ccccccc} n & \rightarrow & p & + & e^- & + & \bar{\nu}_e \\ L_e & 0 & = & 0 & +1 & & -1 \end{array}$$

Т.к. протон и нейтрон являются барионами, их лептонный заряд равен 0. Для электрона лептонный заряд равен +1. Тогда законы сохранения требуют наличия в продуктах реакции античастицы-лептона с электрическим зарядом 0. Именно поэтому в правой части также рождается электронное антинейтрино.

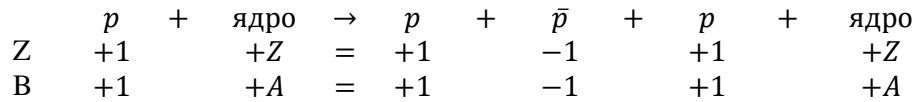
#### **Античастицы**

Сегодня считается, что многие физические свойства частиц и античастиц совпадают, в том числе в точности равны их масса покоя, среднее время жизни и магнитные моменты. Это многократно проверено на опытах с высокой точностью (см. Приложение). Даже набор реакций, характерных для системы частиц, осуществляется с той же вероятностью, если заменить все частицы на соответствующие античастицы. Тем

не менее, отличия все же есть, и они заключаются в противоположных знаках всех зарядоподобных квантовых чисел (в частности, электрического, барионного или лептонного зарядов). Однако, если все они равны нулю, частицы и античастицы различить невозможно. В качестве примеров можно привести фотоны или нейтральные пионы.

Столкновение частицы и античастицы приводит к их взаимному уничтожению или так называемой аннигиляции, в ходе которой высвобождается энергия, преобразуемая в рождение новых частиц<sup>13</sup>. В частности, широко известен процесс аннигиляции электрона и позитрона с образованием  $\gamma$ -квантов.

Также возможен процесс, обратный аннигиляции, т.е. рождение пары частица-античастица, если для этого будет достаточно энергии. Например, в 1955 г. впервые удалось искусственным образом получить антипротон, для чего проводилось облучение медной мишени ускоренными протонами, и наблюдалась реакция:



Реакция является пороговой и может протекать, только если энергия протона достаточна для создания массы покоя вновь рождающихся частицы и античастицы, и для сообщения им кинетической энергии<sup>14</sup>. При обратном процессе аннигиляции пары протон-антипротон их масса превращается в энергию в виде пяти пионов (с учетом их кинетической энергии).

Спустя год учёным удалось получить антинейтрон и осуществить его аннигиляцию, в 1969 г. были синтезированы ядра антигелия-3, а в 2011 г. – антигелия-4! Однако интерес к античастицам не ограничен простой констатацией факта их существования. Как уже было отмечено, взаимодействие античастиц ничем не отличается от взаимодействия частиц, а значит, возможно, существование антиатомов. В 1995-ом году в ЦЕРНе<sup>15</sup> удалось получить связанное состояние антипротона и позитрона – антиводород! В 2016 году там же уже создавались и удерживались специальной лазерной установкой скопления из ~ 25 000 антиатомов водорода (см. табл.8).

Таблица 8

	Эксперимент	Результат	Год
Позитроны	К. Андерсен, космические лучи, США		1932
Антипротоны	Д. Чедвик, ускоритель в Беркли, США		1955
Антинейтроны	Б. Корк, ускоритель Беватрон, США	Открытие	1956
Антигелий-3	Ю.Д. Прокошкин, ускоритель У-70 в ИФВЭ, СССР		1970
Антигелий-4	Коллаборация STAR, коллайдер RHIC, США		2010
Антиводород	Эксперимент SP20, ускоритель LEAR, ЦЕРН	Открытие	1995
		Удержание в спец. ловушке	2010-2011
		Эмиссионный спектр	2016

Поэтому сегодня предположение о существовании где-то во Вселенной огромных скоплений антиматерии уже не выглядит научной фантастикой. Разумеется, такие скопления должны существовать далеко от звездных систем, состоящих из обычного вещества, т.к. при их контакте может произойти аннигиляция, которая приведёт к «гибели» сгустков антивещества. Современные модели предполагают возможность существования антизвезд или даже скоплений антизвезд в гало галактик благодаря

<sup>13</sup> Полная аннигиляция всего 0.3 г материи и антиматерии должна оказать такое же действие, как взрыв атомной бомбы средней величины.

<sup>14</sup> Из законов сохранения энергии и импульса можно показать, что пороговая энергия реакции ~ 4.5 ГэВ.

<sup>15</sup> Европейская организация по ядерным исследованиям, www.cern.ch

аналогии с эффектом Лейденфроста<sup>16</sup>: на границе раздела сред из вещества и антивещества образуются сильные электромагнитные поля, препятствующие прямому контакту частиц и античастиц, и их аннигиляции.

### ***Законы сохранения и симметрии***

Установлено, что законы сохранения являются следствием различных симметрий<sup>17</sup> окружающего мира. Например, законы сохранения энергии и импульса связаны с однородностью времени и пространства, а сохранение момента количества движения связано с симметрией пространства относительно вращений.

Благодаря законам сохранения можно показать, какие частицы должны быть стабильны, а какие неизбежно будут распадаться. Например, протон и антипротон являются стабильными, поскольку они - самые легкие частицы с барионными зарядами  $B = 1$  и  $B = -1$ . Также стабильными оказываются электрон и позитрон, поскольку они - самые легкие частицы с электрическим зарядом  $Q = -1$  и  $Q = 1$ .

### ***Нарушение законов сохранения***

Для того чтобы правильно записать ядерные реакции или реакции, проходящие с элементарными частицами, уже использовались законы сохранения некоторых физических величин. На самом деле их больше, но, что интересно, некоторые могут нарушаться с определенной вероятностью (не быть строгими).

Отметим, что законы сохранения в ядерной физике и физике элементарных частиц играют важную роль в понимании процессов, происходящих в нашем мире. Приведём только один пример: в 1967 г. А.Д. Сахаров показал, что  $CP$ -нарушение являлось одним из необходимых условий для формирования небольшого избытка вещества над антивеществом на ранних стадиях развития Вселенной. Именно из него сегодня состоит весь наблюдаемый нами мир, в то время как основная масса вещества и антивещества аннигилировала.

---

<sup>16</sup> Явление, при котором жидкость в контакте с телом значительно более горячим, чем точка кипения этой жидкости, создаёт изолирующий слой пара, предохраняющий её от быстрого выкипания.

<sup>17</sup>Симметрия (греческое «симметрос» - совместно измеренное) – свойство объекта или совокупности объектов сохранять свою форму или взаимное соответствие при каких-либо преобразованиях.