

Профессор
И.Н.Бекман

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Лекция 6. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

В настоящее время полагают, что мир состоит из фундаментальных частиц, часть из которых неделима, т.е. элементарна. Но только часть!

Замечание. Эти частицы не только не фундаментальны, но и не элементарны. Лучше их называть субъядерными. Однако, мы далее сохраним принятую терминологию, хотя смысла в ней мало. Андроны и лептоны, входя в структуру ядра, определяют его свойства, в частности, устойчивость ядерной структуры, что непосредственно сказывается на интересующем нас явлении радиоактивности. Кроме того, фундаментальные частицы – нейтроны, нейтрино, электроны, гамма-кванты и др. входят в состав ионизирующих излучений, испускаемых атомными ядрами при их распаде. Поэтому для радиохимиков, имеющих дело с радиоактивными веществами (а, иногда и с космическими излучениями) фундаментальные частицы представляют определённый интерес.

В данной лекции мы коротко рассмотрим современную классификацию фундаментальных частиц, типы существующих физических полей и взаимодействий, некоторые статистические распределения, управляющие вероятностными процессами в микромире и роль частиц в устойчивости ядер.

1. ЧАСТИЦЫ

Элементарные частицы – мельчайшие известные частицы физической материи.

Элементарная частица - собирательный термин, относящийся к микрообъектам в субъядерном масштабе, которые (согласно существующим представлениям) невозможно расщепить на составные части. Их строение и поведение изучается физикой элементарных частиц. Понятие элементарных частиц основывается на факте дискретного строения вещества. Ряд элементарных частиц имеет сложную внутреннюю структуру, однако разделить их на части невозможно. Другие элементарные частицы на данный момент считаются бесструктурными и рассматриваются как первичные фундаментальные частицы.

Фундаментальная частица – бесструктурная элементарная частица, которую до настоящего времени не удалось описать как составную. В настоящее время термин применяется преимущественно для лептонов и кварков (по 6 частиц каждого рода, вместе с античастицами, составляют набор из 24 фундаментальных частиц) в совокупности с калибровочными бозонами (частицами-переносчиками фундаментальных взаимодействий).

Представления об элементарных частицах отражают ту степень в познании строения материи, которая достигнута современной наукой. Характерная особенность элементарных частиц – способность к взаимным превращениям, что не позволяет рассматривать элементарные частицы как простейшие, неизменные «кирпичики мироздания», подобные атомам Демокрита.

Первоначально термин «элементарная частица» подразумевал нечто абсолютно элементарное, первокирпичик материи. Однако, когда в 1950-х и 1960-х годах были открыты сотни адронов с похожими свойствами, стало ясно, что по крайней мере адроны обладают внутренними степенями свободы, т. е. не являются элементарными. Это подозрение в подтвердилось, когда выяснилось, что адроны состоят из кварков. Поэтому сейчас самыми элементарными, точечными частями вещества считаются лептоны и кварки. Для них (вместе с калибровочными бозонами) применяется термин «**фундаментальные частицы**».

Исторически первыми экспериментально обнаруженными элементарными частицами были электрон, протон, а затем нейтрон. Казалось, что совокупности этих частиц и кванта электромагнитного поля фотона достаточно для построения известных форм вещества (атомов и молекул). Вещество при таком подходе строилось из протонов, нейтронов и электронов, а электромагнитное поле (фотоны) осуществляло взаимодействие между ними. Однако вскоре выяснилось, что мир устроен значительно сложнее. Было установлено, что для каждой частицы имеется своя античастица, отличающаяся от нее лишь знаком зарядов; для частиц с нулевыми значениями всех зарядов античастица совпадает с частицей (пример - фотон). Позднее к перечисленным выше четырём (или с учётом античастиц - семи) частицам прибавилось еще около 400 частиц. Можно считать установленным, что большинство этих частиц построено из кварков, число которых равно 6 (или 12 с учётом антикварков).

Важным обстоятельством оказалось то, что элементарным частицам присуще не только электромагнитное взаимодействие. С изучением строения атомных ядер выяснилось, что силы, удерживающие протоны и нейтроны в ядре, не являются электромагнитными.

Характерное для нуклонов (протонов и нейтронов в ядре) взаимодействие получило название сильного. Оно оказалось короткодействующим - на расстояниях r , превышающих 10^{-13} см, сильное взаимодействие пренебрежимо мало. Однако при $r < 10^{-13}$ см его величина существенно (в 10-100 раз) превосходит электромагнитное. Открытие нестабильности нейтрона и некоторых атомных ядер указало на существование ещё одного типа взаимодействия - названного слабым. Тремя перечисленными выше типами взаимодействий, а также гравитационным взаимодействием исчерпываются известные типы фундаментальных физических взаимодействий. Полагают, что все 4 (или хотя бы 3) типа взаимодействий представляют собой явления одной природы и должны описываться единым образом.

Число частиц, которые называются в современной теории элементарными, очень велико. Каждая элементарная частица (за исключением истинно нейтральных частиц) имеет свою античастицу. И них стабильны фотон, электронное и мюонное нейтрино, электрон, протон и их античастицы; остальные элементарные частицы самопроизвольно распадаются за время от 10^3 с для свободного нейтрона, до 10^{-22} - 10^{-23} с для резонансов. Однако нельзя сказать, что нестабильные элементарные частицы «состоят» из стабильных хотя бы потому, что одна и та же частица может распадаться несколькими способами на различные элементарные частицы.

Классификация элементарных частиц производится по типам фундаментальных взаимодействий, в которых они участвуют, и на основе законов сохранения ряда физических величин. Отдельную «группу» составляет фотон. Частицы со спином $1/2$, не участвующие в сильном взаимодействии и обладающие сохраняющейся внутренней характеристикой - лептонным зарядом, образуют группу лептонов. Элементарные частицы, участвующие во всех фундаментальных взаимодействиях, включая сильные, называются адронами. Характерным для адронов сильным взаимодействиям свойственно максимальное число сохраняющихся величин (законов сохранения), в том числе специфических для них - барионного заряда, странности, изотопического спина, «очарования». Адроны делятся на барионы и мезоны. Адроны имеют сложную внутреннюю структуру: барионы состоят из трёх кварков, мезоны - из кварка и антикварка. При столкновениях элементарных частиц происходят всевозможные превращения их друг в друга (включая рождение многих дополнительных частиц), не запрещаемые законами сохранения. Последовательная теория элементарных частиц ещё не создана.

Дадим краткое описание некоторых частиц.

Фотон - квант электрического магнитного поля, нейтральная элементарная частица с нулевой массой и спином 1: переносчик электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами. Фотон обладает энергией $E = \hbar\omega$ и импульсом, $p = \hbar\omega/c$, где \hbar - постоянная Планка, c - скорость света в вакууме, ω - угловая частота соответствующего электромагнитного излучения. **Квант** - минимальная единица, на которую может измениться значение физической величины (в данной лекции используется как синоним фотона).

Электрон - стабильная отрицательно заряженная частица со спином $1/2$, массой около $9 \cdot 10^{-28}$ г и магнитным моментом равным магнетону Бора; относится к лептонам и участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях.

Позитрон - античастица электрона. Относится к антивеществу, имеет электрический заряд $+1$, спин $1/2$, лептонный заряд -1 и массу, равную массе электрона. При аннигиляции позитрона с электроном их масса превращается в энергию в форме двух (и гораздо реже - трёх и более) гамма-квантов.

Протон (от греч. *protos* - первый) - стабильная элементарная частица с зарядом $+e$, со спином $1/2$, магнитным моментом $\mu = 2,79\mu_B$ и массой $1838,5$ электронных масс (10^{-24} г), относящаяся к группе барионов (класс адронов). Положительный заряд протона точно равен элементарному заряду $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона равна $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг $= 1,00726470$ а.е.м. $= 938,27231$ МэВ. Масса легкого изотопа атома водорода (протия). $m_{ам}(^1H^1) = 1,00814$ а.е.м. $= 938,7$ МэВ $= 1837m_e$, $m_p = 1,00759$ а.е.м. $= 938,7$ МэВ $= 1839m_e$

Нейтрон (от лат. *neuter* - ни тот ни другой), электрически нейтральная элементарная частица (нулевой заряд) со спином $1/2$, магнитным моментом $\mu = -1,91\mu_B$ и массой, превышающей массу протона на $2,5$ электронных масс; относится к барионам $M_n = 1,008986$ а.е.м. $= 939,5$ МэВ $= 1838,5 m_e$. Из $m_n > m_p + m_e$. В свободном состоянии нейтрон нестабилен: он распадается с периодом полураспада $T = 878,5$ сек $= 14,64$ мин образуя протон и испуская электрон и антинейтрино, $\bar{\nu}$ (β - распад). Вместе с протонами нейтроны образуют атомные ядра; в ядрах нейтрон стабилен.

Нейтрино (итал. «нейтрончик») - (ν), стабильная незаряженная элементарная частица со спином $1/2$ и, возможно, нулевой массой; относится к лептонам. Нейтрино участвуют только в слабом и гравитационном взаимодействиях и поэтому чрезвычайно слабо, взаимодействуют с веществом. Различают электронное нейтрино (ν_e) всегда выступающее в паре с электроном или позитроном, мюонное нейтрино (ν_μ), выступающее в паре с мюоном, и лептонное нейтрино (ν_l), связанное с тяжелым лептоном. Каждый тип нейтрино имеет свою античастицу ($\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_l$), отличающуюся от нейтрино знаком соответствующего лептонного заряда и спиральностью. нейтрино имеют левую спиральность, (спин направлен против движения частицы), а антинейтрино - правую (спин - по направлению движения).

Адроны, элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии (барионы и мезоны, включая все резонансы).

Барионы – (от тяжёлый) – «тяжёлые» элементарные частицы с полуцелым спином, не меньшей массы протона; участвуют во всех известных фундаментальных взаимодействиях. К барионам относятся нуклоны, гипероны и многие из резонансов.

Мезоны - нестабильные элементарные частицы с нулевым или целым спином, принадлежащие к классу адронов и не имеющие барионного заряда. К мезонам относятся пи-мезоны, К-мезоны, многие резонансы, обнаружены мезоны с «очарованием» и «красотой».

Гипероны (от сверх) – нестабильные барионы с массами, большими массы нейтрона и большим временем жизни по сравнению с ядерным временем; обладают особой внутренней характеристикой – странностью. Существуют гипероны лямбда, сигма, кси и омега.

Резонансы (резонансные частицы), адроны, которые могут распасться за счёт сильного взаимодействия и поэтому имеют крайне малое время жизни – порядка $10^{-22} - 10^{-24}$ с.

Лептоны (от лёгкий) – элементарные частицы со спином $1/2$, не участвующие в сильном взаимодействии. К лептонам относятся электрон, отрицательно заряженные мюон и тяжёлый τ -лептон (с массой около двух протонных масс), электронное, мюонное нейтрино и их античастицы.

Мюон [сокр. мю-мезон] — физически неустойчивая элементарная частица с массой покоя, равной 207 электронных масс, зарядом, равным положительному или отрицательному электрическому заряду и спином $1/2$; время жизни мюона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с; относится к классу лептонов. Отрицательно заряженный мюон является античастицей по отношению к положительно заряженному мюону, и наоборот.

Фермион (от фамилии физика Ферми) - частица (или квазичастица) с полуцелым значением спина. Фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака: в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частицы. Волновая функция системы одинаковых фермионов антисимметрична относительно перестановки двух любых фермионов. Квантовая система, состоящая из нечётного числа фермионов, сама является фермионом. Примеры фермионов: кварки (они формируют протоны и нейтроны, которые также являются фермионами), лептоны (электроны, мюоны, нейтрино), дырки (квазичастицы в полупроводнике). Принцип запрета Паули ответственен за стабильность электронных оболочек атомов, делая возможным существование сложных химических элементов. Он также позволяет существовать вырожденной материи под действием высоких давлений (нейтронные звёзды).

Кварки – материальные объекты (частицы) со спином $1/2$ и дробным (от единицы) зарядом. Предложены независимо друг от друга физиками Гелл-Маном (США) и Цвейгом (Австрия) в 1964 году для объяснения составного строения внутриядерных частиц – мезонов, адронов и резонансов. Кварки и антикварки наряду с лептонами принадлежат к числу самых фундаментальных (неделимых, а точнее говоря, бесструктурных с точки зрения современной физики) компонентов окружающей нас материи. По современным представлениям из кварков состоят все адроны (барионы и мезоны), т.е. сильновзаимодействующие частицы - адроны - обладают определённой структурой (являются составными объектами). Описание барионов как связанных состояний трёх кварков требует, чтобы кварки имели спин $1/2$. Кварки имеют по шесть различных разновидностей или "ароматов": "верхний" (up), "нижний" (down), "странный" (strange), "очарованный" (charm), "красивый" (beauty или bottom-дно) и "истинный" (truth или top-вершина), - и обычно объединяются в пары или тройцы, формируя другие частицы - мезоны и барионы, которые скрепляются за счёт ядерных сил (или "цветных", иначе говоря, сильных взаимодействий, переносчиками которых являются другие частицы - глюоны). Так, мезоны содержат кварк и антикварк, в то время как барионы состоят из трех кварков или трех антикварков. Два "верхних" и один "нижний" кварк образуют протон, а странный кварк и антикварк в совокупности дают отрицательный каон (ка-мезон). Сверх сильную связь кварков между собой (не позволяющую обнаружить экспериментально кварки в отдельности) обеспечивают глюоны.

Глюон (англ. glue - клей) - элементарная частица со спином, равным 1 и нулевой массой, являющаяся переносчиком сильного (цветового) взаимодействия между кварками, которое склеивает их в адроны. При испускании или поглощении глюона кварки изменяют свой цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются. Глюоны обладают цветом: красным, синим и зелёным. Всего существует восемь видов (цветовых комбинаций) глюонов. Они являются квантами векторного поля в квантовой хромодинамике.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

По первоначальному смыслу понятие «элементарный» означает простейший, не имеющий внутренней структуры, неделимый. Известно, что многие объекты микромира, ранее считавшиеся элементарными, теперь потеряли право так называться. Электроны, протоны и нейтроны, пока относят к элементарным частицам, хотя они состоят из кварков. В то же время у электронов и других лептонов, а также у кварков внутренняя структура не обнаружена, хотя и существуют теоретические модели, согласно которым и лептоны, и кварки построены из более фундаментальных кирпичиков мироздания - преонов. Сейчас число элементарных частиц перевалило за 400, причём установлено, что большинство из них построено из кварков, число которых равно 6 (или 12 с учетом антикварков). Поэтому называть «элементарные частицы» элементарными нельзя, но другого названия пока нет...

В основе классификации подобных частиц лежит представление о силе взаимодействия, т.е. о величине сил, которые действуют между частицами. Известны три типа взаимодействия с участием фундаментальных частиц: сильные (ядерные), электромагнитные и слабые. Сила взаимодействия характеризуется так называемыми константами, которые являются своего рода «зарядами» частиц по отношению к этим взаимодействиям. Сильным взаимодействиям отвечает константа 1; эти взаимодействия характеризуются малым радиусом действия (10^{-13} см) и протекают за очень короткие промежутки времени (10^{-23} сек). Электромагнитные взаимодействия слабее сильных в 100 раз, их радиус действия бесконечен, а протекают они за время, превышающее 10^{-16} сек. Величина слабых взаимодействий меньше сильных в 10^{13} раз, эти взаимодействия характеризуются конечным радиусом действия и временем, более 10^{-10} сек.

По величине **спина** элементарные частицы делятся на два класса:

Фермионы - частицы с полуцелым спином (например, электрон, протон, нейтрон, нейтрино);

Бозоны - частицы с целым спином (например, фотон, глюон, мезоны).

По видам взаимодействий элементарные частицы делятся на:

1) Составные частицы: **адроны** - частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий. Они состоят из **кварков** и подразделяются, в свою очередь, на: **мезоны** (адроны с целым спином, то есть бозоны); **барионы** (адроны с полуцелым спином, то есть фермионы). К ним, в частности, относятся частицы, составляющие ядро атома, - протон и нейтрон.

2) Фундаментальные (бесструктурные) частицы:

Лептоны - фермионы, которые имеют вид точечных частиц (т.е. не состоящих ни из чего) вплоть до масштабов порядка 10^{-18} м. Не участвуют в сильных взаимодействиях. Участие в электромагнитных взаимодействиях экспериментально наблюдалось только для заряженных лептонов (электроны, мюоны, тау-лептоны) и не наблюдалось для нейтрино. Известны 6 типов лептонов.

Кварки - дробнозаряженные частицы, входящие в состав адронов. В свободном состоянии не наблюдались (для объяснения отсутствия таких наблюдений предложен механизм конфайнмента). Как и лептоны, делятся на 6 типов и являются бесструктурными, однако, в отличие от лептонов, участвуют в сильном взаимодействии.

Калибровочные бозоны - частицы, посредством обмена которыми осуществляются взаимодействия:

Фотон - частица, переносящая электромагнитное взаимодействие;

Восемь глюонов - частиц, переносящих сильное взаимодействие; **Три промежуточных векторных бозона** W^+ , W^- и Z^0 , переносящие слабое взаимодействие;

Гравитон - гипотетическая частица, переносящая гравитационное взаимодействие. Существование гравитонов, хотя пока не доказано экспериментально в связи со слабостью гравитационного взаимодействия, считается вполне вероятным; однако гравитон не входит в Стандартную модель элементарных частиц.

Адроны и лептоны образуют вещество. Калибровочные бозоны - это кванты разных видов излучения.

Кроме того, в Стандартной модели с необходимостью присутствует **хиггсовский бозон**, который, впрочем, пока ещё не обнаружен экспериментально

В соответствии с типом взаимодействий, присущим элементарным частицам, их делят на три класса: фотоны, лептоны и адроны (**Табл.1**). К первому классу принадлежит одна частица-**фотон**, т.е. квант электромагнитного излучения. Фотоны участвуют только в электромагнитных взаимодействиях.

Второй класс составляют **лептоны**, участвующие в слабых взаимодействиях. Лептоны разделяются на два семейства: *электронное*, в которое входит **электрон** (масса $5.49 \cdot 10^{-4}$ а.е.м. или 0.51 МэВ), и *мюонное*, в которое входят отрицательно заряженный **мюон** (масса 105,6 МэВ (в 210 раз массивнее электрона), время жизни $2.2 \cdot 10^{-6}$ сек) и тау-лептон («тяжёлый лептон» - в 3600 раз массивнее электрона). Каждому заряженному лептону отвечает нейтральная частица - нейтрино (электронное, мюонное или тау). Масса нейтрино равна нулю или весьма мала. Известно 6 (с античастицами 12) типов лептонов. Нейтральные лептоны участвуют только в слабом взаимодействии; заряженные - с слабым и электромагнитным. У нейтральных лептонов, впрочем, могут быть очень малые магнитные моменты. Лептоны не участвуют в сильных взаимодействиях, но каждый лептон может участвовать в слабых взаимодействиях, а частицы, несущие электрический заряд, взаимодействуют и с электромагнитным полем.

Третий класс составляют частицы, участвующие в сильных взаимодействиях - **адроны**, подразделяющиеся на два семейства: мезонное и барионное. (*Мезоны*: Каон, K^+ , масса 494 МэВ, время жизни $1.2 \cdot 10^{-8}$ сек; *Барионы*: Σ^+ -частица, масса 1189 МэВ, время жизни $8 \cdot 10^{-11}$ сек, Ω^- -частица, масса 1675, время жизни $7 \cdot 10^{-11}$ сек). Адроны участвуют в слабых, а при наличии электрического заряда и в электромагнитных взаимодействиях. *Барионы* подразделяются на две группы: нуклоны, к которым принадлежат **протон** и **нейтрон**, и *гипероны-барионы* с массами, превышающими массы нуклонов.

Частицы - переносчики взаимодействий: фотон (переносчик электромагнитного взаимодействия), W^\pm и Z^0 -бозоны (переносчики слабого взаимодействия). Считается, что существует переносчик гравитационного взаимодействия - гравитон.

Особенность элементарных частиц заключается в том, что хотя ни одна частица не может считаться построенной из других частиц, все они способны к взаимным превращениям. Любая фундаментальная частица может рождаться и погибать в результате сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий с другими частицами. Кроме электрона, протона и частиц лишенных массы покоя (т.е. фотона и двух нейтрино), все прочие частицы нестабильны. Это означает, что, будучи представлены самим себе, почти все они претерпевают распад. При распаде какой-либо частицы она исчезает, а вместо нее появляются другие элементарные частицы. В соответствии со способом распада фундаментальные частицы делят на квазистационарные, т.е. относительно долгоживущие и короткоживущие, или резонансы.

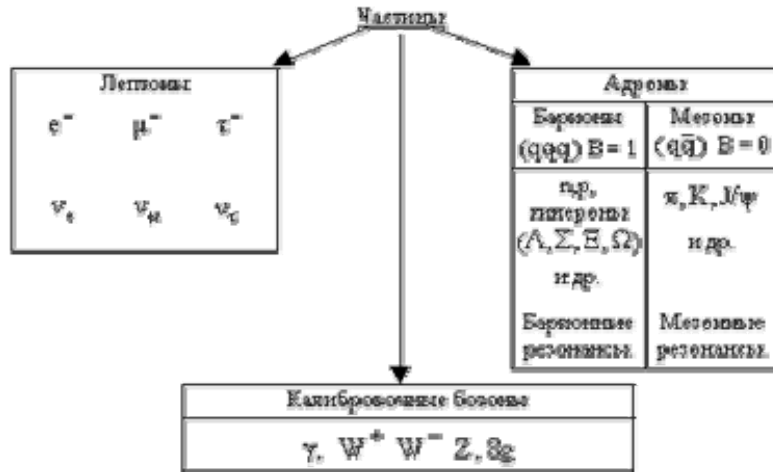


Рис.1. Общая схема классификации элементарных частиц

Основными характеристиками элементарных частиц являются их масса покоя, заряд, механический момент (спин), внутренняя четность и др. Кроме того, частицам приписывается ряд специфических характеристик. Так, всем барионам приписывается барионный заряд, или барионное число, равный +1, а антибарионам -1. Лептонам, входящим в электронное семейство, приписывается специфический электронно-лептонный заряд, равный +1 для электрона и нейтрино и -1 для позитрона и антинейтрино.

Наряду с законом сохранения электрического заряда в природе существуют и законы сохранения барионного и обоих лептонных зарядов.

Многообразие элементарных частиц подчиняется более или менее стройной системе классификации (Рис.1).

Каждая частица описывается набором физических величин - квантовых чисел - определяющих её свойства (Табл. 1.). Элементарные частицы характеризуются своей массой, электрическим зарядом, собственным моментом количества движения - спином.

Массы легчайших частиц (таких, как фотоны) равны нулю, а массы наиболее тяжелых из известных частиц в 100 раз превышают массу протона. Электрический заряд элементарных частиц представляет собой целое кратное заряда электрона. Спин частиц бывает либо целым (0, 1, 2, ...) - в этом случае они называются бозонами, либо полуцелым (1/2, 3/2, ...) - в этом случае их называют фермионами.

Приведём наиболее часто употребляемые характеристики частиц:

Масса частицы, m . Массы частиц меняются в широких пределах от 0 (фотон) до 90 ГэВ (Z-бозон). Z-бозон - наиболее тяжелая из известных частиц. Однако могут существовать и более тяжелые частицы. Массы адронов зависят от типов входящих в их состав кварков, а также от их спиновых состояний.

Время жизни, τ . В зависимости от времени жизни частицы делятся на стабильные частицы, имеющие относительно большое время жизни, и нестабильные. К стабильным частицам относят частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию. Деление частиц на стабильные и нестабильные - условно. Поэтому к стабильным частицам принадлежат такие частицы как электрон, протон, для которых в настоящее время распады не обнаружены, так и π^0 -мезон, имеющий время жизни $\tau = 0.8 \cdot 10^{-16}$ с. К нестабильным частицам относят частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют резонансами. Характерное время жизни резонансов - $10^{-23} - 10^{-24}$ с.

Спин J . Величина спина измеряется в единицах \hbar и может принимать 0, полуцелые и целые значения. Например, спин π , K-мезонов равен 0. Спин электрона, мюона равен 1/2. Спин фотона равен 1. Существуют частицы и с большим значением спина. Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми-Дирака, с целым спином - Бозе-Эйнштейна.

Электрический заряд Q . Электрический заряд является целой кратной величиной от $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кулон (или $48 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЕ) - элементарный электрический заряд. Частицы могут иметь заряды 0, ± 1 , ± 2 .

Внутренняя четность P . Квантовое число P характеризует свойство симметрии волновой функции относительно пространственных отражений. Квантовое число P имеет значение +1, -1.

Наряду с общими для всех частиц характеристиками, используют также квантовые числа, которые описывают только отдельным группам частиц. Квантовые числа - барионное число B , странность s , очарование (charm) c , красота (bottomness или beauty) b , верхний (topness) t , изотопический спин I приписывают только сильно взаимодействующим частицам - адронам.

Лептонные числа L_e, L_μ, L_τ . Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов. Лептоны e, μ и τ участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны ν_e, ν_μ и ν_τ участвуют только в слабых взаимодействиях. Лептонные числа имеют значения $L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1$. Например, e^-, ν_e имеют $L_e = +1$; $e^+, \bar{\nu}_e$ имеют $L_e = -1$. Все адроны имеют $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$.

Лептонный заряд (лептонное число, L), внутренняя характеристика лептонов: $L=+1$ для лептонов и -1 для антилептонов. Различают: электронный лептонный заряд, которым обладают только электроны, позитроны, электронные нейтрино и антинейтрино; мюонный лептонный заряд, которым обладают только мюоны и мюонные нейтрино и антинейтрино; лептонный заряд тяжелых τ -лептонов и их нейтрино. Алгебраическая сумма лептонного заряда каждого типа с очень высокой точностью сохраняется при всех взаимодействиях.

Лептонам приписывают лептонный заряд L , принимаемый равным $+1$ для частиц $e^-, \mu^-, \tau^-, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ и -1 для их античастиц. Введение этого заряда обосновано тем, что во всех процессах, происходящих в замкнутой системе, полное число лептонов минус число антилептонов сохраняется. Кроме того, каждая пара лептонов (e^-, ν_e), (μ^-, ν_μ), (τ^-, ν_τ) обладает своим специальным лептонным зарядом, соответственно L_e, L_μ, L_τ . Введение этих зарядов отражает то обстоятельство, что, например, электронное нейтрино, налетая на нейтрон, может родить электрон, но не мюон или τ -лептон. Значения L_e, L_μ, L_τ равны $+1$ для указанных пар лептонов и -1 для их античастиц. Свободное нейтрино со временем может изменять свой лептонный заряд, превращаясь в нейтрино другого типа (нейтринные осцилляции). В результате на разных расстояниях от места своего рождения нейтрино способно рожать заряженные лептоны различного типа.

Пример. Возможна ли реакция: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$?

Решение. Левая сторона $L_\mu=1, L_e=0$
 Правая сторона $L_e=1+(-1)=0$
 $L_\mu=+1$

Да, реакция возможна.

Барионное число (барионный заряд) B – одна из характеристик барионов. Барионное число имеет значение $B = 0, +1, -1$. Барионы, например, n, p, Λ, Σ , нуклонные резонансы имеют барионное число $B = +1$. Мезоны, мезонные резонансы $-B = 0$, антибарионы $-B = -1$. Алгебраическая сумма барионных зарядов, входящих в систему частиц, сохраняется при всех взаимодействиях.

Странность s . Квантовое число s может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ и определяется кварковым составом адронов. Например, гипероны Λ, Σ имеют $s = -1$; K^+, K^- -мезоны имеют $s = +1$.

Charm (очарование) c . Квантовое число c может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. Есть частицы, имеющие $c = 0, +1$ и -1 . Например, барион Λ_c имеет $c = +1$.

Bottomness b . Квантовое число b может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. В настоящее время обнаружены частицы, имеющие $b = 0, +1, -1$. Например, B^+ -мезон имеет $b = +1$.

Topness t . Квантовое число t может принимать значения $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$. В настоящее время обнаружено всего одно состояние с $t = +1$.

Изоспин I . Сильно взаимодействующие частицы разбиты на группы частиц, со схожими свойствами (одинаковое значение спина, чётности, барионного числа, странности и др. квантовых чисел, сохраняющихся в сильных взаимодействиях) - изотопические мультиплеты. Величина изоспина I определяет число частиц, входящих в один изотопический мультиплет. n и p составляют изотопический дуплет $I=1/2$; $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$ входят в состав изотопического триплета $I = 1$, Λ - изотопический синглет $I = 0$, число частиц, входящих в один изотопический мультиплет $2I + 1$.

G-чётность - это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения $\bar{\psi}$ и изменения знака третьей компоненты I_z изоспина. G-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

Табл. 1. Элементарные частицы (Q - Электрический заряд, L - Лептонный заряд, B - Барионный заряд, S - Странность, C - Очарование).

Тип частицы	Символ	Масса m , МэВ	Спин, в ед. \hbar	Время жизни, С	Q	L	B	S	C
Лептоны	e^-	0,511	1/2	$>6 \cdot 10^{29}$	-1	1	0	0	0
	ν_e	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$		стабильно	0				
	μ^-	105		$2,2 \cdot 10^{-6}$	-1				
	ν_μ	$< 0,52$		стабильно	0				
	τ^-	1784		$\approx 5 \cdot 10^{-13}$	-1				

	ν_τ	<150 ¹⁾		стабильно	0				
Мезоны-переносчики взаимодействия	γ	0	1	Стабилен	0	0	0	0	0
	W^\pm	$\approx 8.3 \cdot 10^4$		$\approx 3 \cdot 10^{-25}$	± 1				
	Z^0			$\approx 3 \cdot 10^{-25}$	0				
	Глюон ⁵⁾	0 ¹⁾		Стабилен ¹⁾	0				
Мезоны (адроны)	π^0	135	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$	0	0	0	0	0
	π^+	140		$2,6 \cdot 10^{-8}$	+1			0	0
	K^0	498			0			+1	0
	K^+	494		$1,1 \cdot 10^{-8}$	+1			+1	0
	D^0	1864		$\approx 5 \cdot 10^{-13}$	0			0	+1
	D^+	1869		$\sim 10^{-12}$	+1			0	+1
	F^+	2020		$\approx 2 \cdot 10^{-13}$	+1			-1	+1
Барионы (адроны)	p	938,3	1/2	$> 10^{38}$	+1	0	1	0	0
	n	939,6		≈ 900	0			0	0
	Λ	1115		$2,6 \cdot 10^{-10}$	0			-1	0
	Σ^+	1189		$0,8 \cdot 10^{-10}$	+1			-1	0
	Σ^0	1192		$6 \cdot 10^{-20}$	0			-1	0
	Σ^-	1197		$1,5 \cdot 10^{-10}$	-1			-1	0
	Ξ^0	1315		$2,9 \cdot 10^{-10}$	0			-2	0
	Ξ^-	1321		$1,6 \cdot 10^{-10}$	-1			-2	0
	Ω^-	1672		$0,8 \cdot 10^{-10}$	-1			-3	0
	Λ_c^+	2280		$\sim 10^{-13}$	+1			0	1

Примечания к Табл.1. Кроме частиц, приведенных в таблице, имеется большое число короткоживущих частиц, т.н. резонансов, обладающих временем жизни $\sim 10^{-20}-10^{-24}$ с. Для приведенных частиц в таблице частиц не указаны их античастицы, имеющие те же значения массы, времени жизни, но противоположные знаки квантовых чисел Q, L, B, S, C . Сейчас полагают, что масса нейтрино равна нулю, хотя оснований для этого нет. Если масса нейтрино отлична от нуля то естественно ожидать, что нейтрино нестабильны, хотя их время жизни может быть очень велико. Глюон как свободная частица не существует. K^0 - и \tilde{K}^0 - мезоны не обладают определенным временем жизни.

У мезонов всегда целые спины, а у барионов - полуцелые. Переходы барионов в мезоны (и наоборот) запрещены законом барионного заряда. Это очень важное свойство элементарных частиц. Дело в том, что барионы (протоны) стабильны, тогда как мезоны могут распадаться на еще более легкие частицы. Если барионы могли бы превращаться в мезоны, то все атомные ядра «рассыпались». Закон барионного заряда обеспечивает стабильность ядерной материи.

Природа сохранения лептонного и барионного зарядов до конца не ясна. Более того, модели великого объединения предсказывают, что это сохранение является лишь приближенным, хотя обнаружение возможного нарушения сохранения находится за пределами современных экспериментальных возможностей. Все известные лептоны и барионы являются фермионами. Мезоны не имеют ни барионного, ни лептонного заряда и являются бозонами. Специфические квантовые числа (заряды) адронов, называемые странностью, очарованием и т.п., которые, в отличие от B и L , не сохраняются в слабых взаимодействиях, сохраняются в сильных и электромагнитных. В силу этого легчайшие частицы с $S \neq 0$ (или $C \neq 0$), являясь нестабильными, имеют довольно большое время жизни в масштабах мира элементарных частиц, т.к. к их распаду может привести только слабое взаимодействие.

3. СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Рассмотрим свойства некоторых элементарных частиц более подробно.

3.1 Фотон

Фотон (от др.-греч. $\phi\acute{o}\varsigma$, род. пад. $\phi\omega\tau\acute{o}\varsigma$, «свет») - элементарная частица, переносчик электромагнитного взаимодействия, квант электромагнитного поля. Фотоны обозначаются буквой γ^0 (или $h\nu$), поэтому их часто

называют гамма-квантами (особенно фотоны высоких энергий); эти термины практически синонимичны. (Гамма-квант - фотон большой энергии). Относится к классу бозонов, переносчик электромагнитного взаимодействия. Изотопический спин, барионное число, странность и очарование равны нулю. Другие свойства фотона приведены в Табл. 2.

Табл. 2. Характеристика фотона

название	символ	заряд	масса	спин	Время жизни
фотон	γ	0	0	1	Стабильный

Квантовый характер излучения и поглощения энергии электромагнитного поля был постулирован М.Планком в 1900 для объяснения свойств теплового излучения. Термин «фотон» введён химиком Г.Льюисом в 1926. В современной физике фотон — переносчик электромагнитного взаимодействия (часто называется элементарной частицей), фундаментальная составляющая света и всех других форм электромагнитного излучения.

В соответствии со *Стандартной Моделью* физики элементарных частиц, фотоны ответственны за наличие всех электрических и магнитных полей, а само их существование следует из симметрии физических законов относительно пространства и времени. Внутренние свойства фотона (электрический заряд, масса и спин) определяются калибровочной симметрией.

Фотон относится к калибровочным бозонам. Он не имеет массы покоя и электрического заряда, стабилен. Спин фотона равен 1, но из-за нулевой массы более правильное число - спиральность; по этой же причине внутренняя чётность фотона не определена. Является истинно нейтральной частицей (античастица для самого себя). Зарядовая чётность отрицательная. Фотон участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействии. Массу покоя фотона считают равной нулю, не имеет электрического заряда и не распадается спонтанно в вакууме. Фотон может иметь одно из двух состояний поляризации и описывается тремя пространственными параметрами - составляющими волнового вектора, который определяет его длину волны λ и его направление распространения. Фотоны излучаются во многих природных процессах, например, при движении электрического заряда с ускорением, когда атом или ядро переходят из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией, или при аннигиляции пары электрон-позитрон. При обратных процессах (возбуждение атома, рождение электрон-позитронных пар) происходит поглощение фотонов.

Поскольку фотон - безмассовая частица, он движется в вакууме со скоростью c (скорость света в вакууме). Если его энергия равна E , то импульс p связан с энергией соотношением $E=cp$. Для сравнения, для частиц с ненулевой массой покоя связь массы и импульса с энергией определяется формулой $E^2=c^2p^2+m^2c^4$, как показано в специальной теории относительности. Энергия и импульс фотона зависят только от его частоты ν (или, что то же самое, длины волны λ)

$$E = \hbar\omega = h\nu \quad (1)$$

$$p = \hbar k \quad (2)$$

и, следовательно, величина импульса есть

$$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c} \quad (3)$$

где \hbar - постоянная Планка, $h/2\pi$; \mathbf{k} - волновой вектор и $k=2\pi/\lambda$ - его величина (волновое число), и $\omega=2\pi\nu$ - угловая частота. \mathbf{k} указывает направление движения фотона. Фотон также имеет спин, который не зависит от частоты.

Фотону свойственен корпускулярно-волновой дуализм. Фотон демонстрирует свойства волны в явлениях дифракции и интерференции при масштабах, сравнимых с длиной волны фотона. Например, *одиночные* фотоны, проходящие через двойную щель, создают на экране интерференционную картину, определяемую уравнениями Максвелла. Но фотон не есть короткий импульс электромагнитного излучения: он не делится на несколько пучков оптическими делителями лучей. Скорее, фотон ведет себя как частица, которая излучается или поглощается целиком объектами, размеры которых много меньше его длины волны (например, атомными ядрами), или, вообще, могут считаться точечными (например, электрон).

3.2 Протон

Наряду с нейтронами, протоны составляют ядро, скрепляемое сильным взаимодействием. Протон – барион и составлен из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка. Его долгое время считали стабильной частицей, но с развитием модели великого объединения, предложили, что он может распадаться с периодом полураспада примерно 10^{32} лет. Распад протона нарушил бы закон сохранения барионного числа, и стал бы единственным известным процессом в природе его нарушающим. Природа заключения кварка предполагает, что кварк

окружен облаком глюонов, и в пределах крошечного объема протона другие пары кварк-антикварк могут возникнуть, а затем аннигилировать без изменения чисто внешнего появления протона.

Протон (от греч. *protos* — первый; символ *p*), стабильная элементарная частица, ядро атома водорода. Протон имеет массу $m_p = (1,6726485 \pm 0,0000086) \times 10^{-24}$ г ($m_p = 1836 m_e = 938,3$ Мэв/ c^2 где m_e — масса электрона, c — скорость света) и положительный электрический заряд $e = (4,803242 \pm 0,000014) \times 10^{-10}$ единиц заряда в системе СГС. Спин протона равен $1/2$ (в единицах постоянной Планка), и как частица с полуцелым спином протон подчиняется статистике Ферми-Дирака (является фермионом). Магнитный момент протона равен $m_p = (2,7928456 \pm 0,0000011) m_n$, где m_n - ядерный магнетон. Вместе с нейтронами протон образуют атомные ядра всех химических элементов, при этом число протонов в ядре равно атомному номеру данного элемента и, следовательно, определяет место элемента в периодической системе элементов. Свободные протоны составляют основную часть первичной компоненты космических лучей. Существует античастица по отношению к протону - антипротон.

В 1919-20 Э. Резерфорд экспериментально наблюдал ядра водорода, выбитые α -частицами из ядер др. элементов; он же в начале 20-х гг. ввёл термин «протон».

Протон является сильно взаимодействующей частицей (адроном) и относится к «тяжёлым» адронам – барионам, барионный заряд протона $B = +1$. Закон сохранения барионного заряда объясняет стабильность протона — самого лёгкого из барионов. Протоны участвуют также во всех других видах фундаментальных взаимодействий элементарных частиц - электромагнитном, слабом и гравитационном.

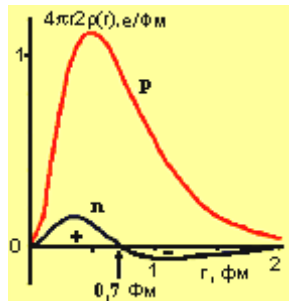


Рис. 2. Распределение электрического заряда в нейтроне и протоне.

В сильном взаимодействии протон и нейтрон имеют совершенно одинаковые свойства и поэтому рассматриваются как два квантовых состояния одной частицы — нуклона. Возможность объединения адронов в такого рода семейства частиц с общими свойствами - изотонические мультиплеты - учитывается введением квантового числа «изотопический спин»; изотопический спин нуклона $I = 1/2$. Важнейшим примером сильного взаимодействия с участием протонов являются ядерные силы, связывающие нуклоны в ядре. По-видимому, протон окружен «облаком» виртуальных частиц (глюонов), которые он непрерывно испускает и поглощает.

Данные по рассеянию электронов на нуклонах показали, что размер протона $\sim 0,8$ Фм. Размер нейтрона приблизительно такой же. Протон лишен четкой границы.

Плотность заряда в протоне плавно убывает по закону

$$\rho(r) = \rho(0)\exp(-r/a), \quad (4)$$

где $\rho(0) = 3 e/\text{Фм}^3$, $a = 0,23$ Фм.

Среднее от квадрата радиуса протона

$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int_0^{\infty} 4\pi r^2 \rho(r) r^2 dr}{\int_0^{\infty} 4\pi r^2 \rho(r) dr} = 0,62 \text{Фм} \quad (5)$$

Отличие величины $\langle r_E^2 \rangle_n^{1/2}$ от нуля означает, что заряд нейтрона только после усреднения по всему объему нейтрона равен нулю.

В нейтроне центральная часть ($r < 0,7$ Фм) заряжена положительно, периферийная часть — отрицательно.

Распределения магнитных моментов протона и нейтрона совпадают.

Данные о структуре нуклона свидетельствуют о том, что нуклон имеет сложную внутреннюю структуру. По современным представлениям он состоит из кварков, взаимодействующих посредством обмена квантами сильного взаимодействия — глюонами.

В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонных внутри нуклона. Внутри нуклона существуют точечноподобные объекты — партонны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партоннов $< 10^{-17}$ см. Заряженные партонны имеют характеристики кварков — их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$. 3. Нейтральные партонны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.

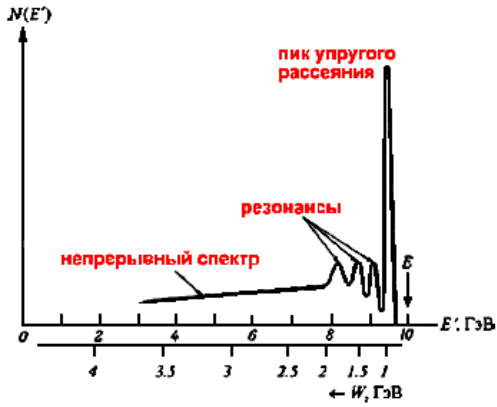


Рис. 3. Схематический спектр электронов с энергией $E \approx 10$ ГэВ, рассеянных на нуклоне.

В энергетическом спектре глубоконеупруго рассеянных электронов с начальной энергией $E = 10$ ГэВ на протонах наряду с пиком упругого рассеяния отчетливо наблюдаются резонансы, соответствующие возбужденным состояниям нуклона. Ближайший к упругому пику соответствует возбуждению нуклонного резонанса $\Delta(1232)$. За ним видны еще два более высокораспределенных нуклонных резонанса. При меньших энергиях наблюдается непрерывный спектр.

Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

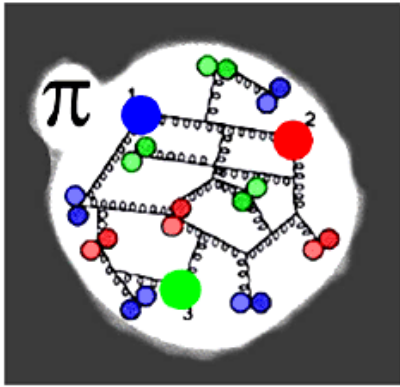


Рис. 4. Структура протона.

Электромагнитные свойства протона неразрывно связаны с его участием в сильном взаимодействии. Примером такой связи является фоторождение мезонов при взаимодействии протона с γ -квантом с энергией порядка 150 МэВ. Взаимодействием протона с виртуальными π^+ -мезонами качественно объясняется большое отличие магнитного момента протона от ядерного магнетона (которому он должен быть равен согласно предсказанию уравнения Дирака). В 1950-х обнаружено пространственное распределение электрического заряда и магнитного момента протона, что свидетельствует о наличии внутренней структуры протона (см. далее «кварки»).

Примерами слабого взаимодействия с участием протонов являются внутриядерные превращения протона в нейтрон и наоборот (бета-распад ядер и K -захват). В 1953 наблюдался процесс, обратный β -распаду, - образование нейтрона и позитрона при поглощении свободным протоном антинейтрино, что было первым прямым экспериментальным доказательством существования нейтрино.

Важное следствие теории великого объединения – нестабильность протона и его распад с периодом полураспада порядка 10^{32} лет. Такой длительный период полураспада чрезвычайно трудно измерить, однако попытки предпринимаются. Распад протона возможен различными путями: минимальное время жизни протона ($2,9 \cdot 10^{32}$ лет) ожидается при распаде $p \rightarrow e^+ + \omega$, а максимальное ($50 \cdot 10^{32}$) – при распаде $p \rightarrow e^+ + \pi^0$.

3.3 Нейтрон

Совместно с протонами, нейтроны образуют ядра атомов. В ядре они удерживаются вместе сильным взаимодействием.

Нейтрон – нейтральная (не обладающая электрическим зарядом) элементарная частица со спином 1/2 и массой, превышающей массу протона на 2.5 электронной массы (на 0,2%, что соответствует разнице в энергии 1,29 МэВ); относится к барионам. Магнитный момент нейтрона равен примерно двум ядерным магнетонам и отрицателен, т. е. направлен противоположно механическому, спиновому, моменту количества движения. Нейтроны относятся к классу сильно взаимодействующих частиц (адронов) и входят в группу барионов, т. е. обладают барионным зарядом, равным, как и у протона (p), + 1. Нейтроны устойчивы только в составе стабильных атомных ядер. Свободный нейтрон нестабильная частица, распадающаяся на протон, электрон (e^-) и электронное антинейтрино ($\bar{\nu}_e$):

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (6)$$

Табл. 3. Основные характеристики нейтронов.

Спин	1/2
Заряд (e - заряд электрона)	$q_n = -0,4 \cdot 10^{-21} e$
Масса в атомных единицах	$m_n = 939,56533 \text{ МэВ} = 1,00866491578 \text{ а.е.м.}$
Разность масс нейтрона и протона в атомных единицах	$m_n - m_p = 1,2933318 \text{ МэВ} = 0,0013884489 \text{ а.е.м.}$
Время жизни	$t_n = 885,4 \text{ с}$

Магнитный момент	$\mu_n = -1,9130427 \mu_N$
Электрический дипольный момент	$d_n < 0,63 \cdot 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{см} \text{ (CL=90\%)}$
Электрическая поляризуемость	$a_n = 0,98 \cdot 10^{-3} \Phi_m^3$

Нейтрон был открыт в 1932 английским физиком Дж.Чедвигом, который установил, что обнаруженное немецкими физиками В. Боте и Г. Бекером проникающее излучение, возникающее при бомбардировке атомных ядер (в частности, бериллия) α -частицами, состоит из незаряженных частиц с массой, близкой к массе протона.

По своим свойствам нейтрон очень близок протону: n и p имеют почти равные массы, один и тот же спин, способны взаимно превращаться друг в друга, например в процессах бета-распада; они одинаковым образом проявляют себя в процессах, вызванных сильным взаимодействием, в частности ядерные силы, действующие между парами $p-p$, $n-p$ и $n-n$, одинаковы (если частицы находятся соответственно в одинаковых состояниях). Такое сходство позволяет рассматривать нейтрон и протон как одну частицу - нуклон, которая может находиться в двух разных состояниях, отличающихся электрическим зарядом Q . Нуклон в состоянии с $Q = +1$ есть протон, с $Q = 0$ — нейтрон. Соответственно, нуклону приписывается (по аналогии с обычным спином) некоторая внутренняя характеристика — изотопический спин I , равный $1/2$, «проекция» которого может принимать (согласно общим правилам квантовой механики) $2I + 1 = 2$ значения: $+1/2$ и $-1/2$. n и p образуют изотопический дублет: нуклон в состоянии с проекцией изотопического спина на ось квантования $+1/2$ является протоном, а с проекцией $-1/2$ — нейтроном. Как компоненты изотопического дублета, нейтрон и протон имеют одинаковые квантовые числа: барионный заряд $B = +1$, лептонный заряд $L = 0$, странность $S = 0$ и положительную внутреннюю чётность. Изотопический дублет нуклонов входит в состав более широкой группы «похожих» частиц - октет барионов с $J = 1/2$, $B = 1$ и положительной внутренней чётностью; помимо n и p в эту группу входят Λ^- , Σ^{\pm} , Σ^0 , Ξ^- , Ξ^0 - гипероны, отличающиеся от n и p странностью.

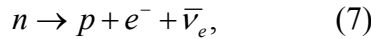
Магнитный дипольный момент нейтрона равен: $\mu_n = -1,91315 \mu_N$, где $\mu_N = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/гс}$ - ядерный магнетон. Частица со спином $1/2$, описываемая уравнением Дирака, должна обладать магнитным моментом, равным одному магнетону, если она заряжена, и нулевым, если не заряжена. Наличие магнитного момента у нейтрона, так же как аномальная величина магнитного момента протона ($\mu_p = 2,79 \mu_N$), указывает на то, что эти частицы имеют сложную внутреннюю структуру, т. е. внутри них существуют электрические токи, создающие дополнительный «аномальный» магнитный момент протона $1,79 \mu_N$ и приблизительно равный ему по величине и противоположный по знаку магнитный момент нейтрона ($-1,9 \mu_N$).

Электрический дипольный момент d любой элементарной частицы должен быть равен нулю, если взаимодействия элементарных частиц инвариантны относительно обращения времени (T -инвариантность). Для нейтрона $d_n < 10^{-23} \text{ см}\cdot\text{e}$. Это означает, что сильное, электромагнитное и слабое взаимодействия с большой точностью T -инвариантны.

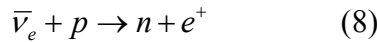
Нейтрон и протон участвуют в сильных взаимодействиях как компоненты единого изотопического дублета нуклонов. Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий приводит к связи между характеристиками различных процессов с участием нейтрона и протона, например эффективные сечения рассеяния π^+ -мезона на протоне и π^- -мезона на нейтроне равны, так как системы π^+p и π^-n имеют одинаковый изотопический спин $I = 3/2$ и отличаются лишь значениями проекции изотопического спина I_3 ($I_3 = +3/2$ в первом и $I_3 = -3/2$ во втором случаях), одинаковы сечения рассеяния K^+ на протоне и K на нейтроне и т.п. При низких энергиях реальные взаимодействия нейтронов и протонов с заряженными частицами и атомными ядрами различаются из-за наличия у протона электрического заряда, обуславливающего существование далекодействующих кулоновских сил между протоном и др. заряженными частицами на таких расстояниях, на которых короткодействующие ядерные силы практически отсутствуют. Если энергия столкновения протона с протоном или атомным ядром ниже высоты кулоновского барьера (которая для тяжелых ядер порядка 15 МэВ), рассеяние протона происходит за счёт сил электростатического отталкивания, не позволяющих частицам сблизиться до расстояний порядка радиуса действия ядерных сил. Отсутствие у нейтрона электрического заряда позволяет ему проникать через электронные оболочки атомов и свободно приближаться к атомным ядрам. Именно это обуславливает уникальную способность нейтрона сравнительно малых энергий вызывать различные ядерные реакции, в том числе реакцию деления тяжёлых ядер. Рассеяние медленных нейтронов на протонах при энергиях вплоть до 15 МэВ сферически симметрично в системе центра инерции, т.е. определяется взаимодействием $n-p$ в состоянии относительного движения с орбитальным моментом количества движения $l = 0$ (так называемая S -волна).

Электромагнитные свойства нейтрона определяются наличием у него магнитного момента, а также существующим внутри нейтрона распределением положительного и отрицательного зарядов и токов. Все эти характеристики связаны с участием нейтрона в сильном взаимодействии, обуславливающим его структуру. Магнитный момент нейтрона определяет поведение нейтрона во внешних электромагнитных полях: расщепление пучка нейтронов в неоднородном магнитном поле, прецессию спина нейтрона. Внутренняя электромагнитная структура нейтрона проявляется при рассеянии электронов высокой энергии на нейтроне и в процессах рождения мезонов на нейтроне γ -квантами (фоторождение мезонов). Взаимодействие магнитного момента нейтрона с магнитными моментами электронных оболочек атомов проявляется существенно для нейтронов, длина волны которых порядка или больше атомных размеров (энергия $E < 10$ эВ). Интерференция с ядерным рассеянием позволяет получать пучки поляризованных медленных нейтронов.

Слабое взаимодействие нейтрона проявляется в таких процессах, как распад нейтрона:



захват электронного антинейтрино протоном:



и мюонного нейтрино (ν_μ) нейтроном: $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$, ядерный захват мюонов: $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$, распады странных частиц, например $\Lambda \rightarrow \pi^0 + n$, и т.д.

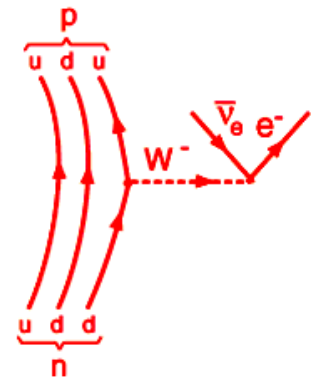


Рис. 5. Диаграмма Феймана для распада нейтрона, демонстрирующая участие W^- -мезона, как переносчика взаимодействия

Нейтрон - единственная из имеющих массу покоя элементарных частиц, для которой непосредственно наблюдалось гравитационное взаимодействие - искривление в поле земного тяготения траектории хорошо коллимированного пучка холодных нейтронов.

Нейтрон – барион и состоит из двух d -кварков и одного u -кварка. Как частица с полуцелым спином, нейтрон подчиняется статистике Ферми-Дирака (является фермионом).

Рис. 6. Детальная картина распада нейтрона при слабом взаимодействии (Подобная трансформация кварков происходит во многих ядерных процессах, включая β -распад).



Распад нейтрона включает слабое взаимодействие, как указано на фейнмановской диаграмме **Рис. 5**. Его распад есть пример бета распада с эмиссией электрона и электронного антинейтрино. Распад нейтрона связан с трансформацией кварка, при которой d («down»)-кварк конвертируется в u («up»)-кварк под действием слабого взаимодействия. Среднее время жизни $10.3 \text{ мин}/0.693 = 14.9$ мин удивительно длинное для образования излучения с энергией 1.29 МэВ.

	U = "up" кварк $+\frac{2}{3}e$	$m_p = 1838.68 m_e$
	D = "down" кварк $-\frac{1}{3}e$	Масса = $1.6749 \times 10^{-27} \text{ кг}$ $= 939.5656 \text{ МэВ}/c^2$ $= 1.0086647 \text{ а.е.}$

Рис. 7. Процессы в нейтроне при его β -распаде.

Распад нейтрона – пример наблюдений, приведших к открытию нейтрино.

3.4 Нейтрино

Нейтрино — стабильные нейтральные лептоны, возможно нулевой массы, с полуцелым $(1/2)\hbar$ спином, участвующие только в слабом и гравитационном взаимодействиях. При нулевой массе покоя магнитный момент нейтрона равен нулю. Чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом: нейтрино с энергией 1 МэВ имеют в свинце длину свободного пробега $\sim 10^{20}$ см (~ 100 световых лет). Известно три типа нейтрино и три соответствующие им антинейтрино. Каждому заряженному лептону соответствует своя пара нейтрино/антинейтрино: электронное нейтрино/антинейтрино, мюонное нейтрино/антинейтрино, тау-нейтрино/антинейтрино. (Названия - электронное, мюонное, таонное – объединены термином «ароматы»). Электронное, мюонное и тау-нейтрино, превращаются в процессах слабого взаимодействия в соответствующие заряженные лептоны - электрон, мюон и тритон. Частица от античастицы здесь отличаются знаком соответствующего лептонного заряда и спиральностью. Нейтрино имеет левую спиральность (спин направлен против движения частицы), а антинейтрино – правую (спин – по направлению движения). Нейтрино и антинейтрино - разные частицы. Нейтрино не истинно нейтрально; оно имеет незлектрический заряд - так называемый нейтринный заряд.

Масса электронного нейтрино крайне мала. Верхняя экспериментальная оценка составляет всего 2 эВ (получена для антинейтрино). Верхние пределы для масс мюонного и тау-нейтрино на 2006 оценивались в 190 кэВ и 18.2 МэВ соответственно. Масса нейтрино важна для объяснения феномена скрытой массы в космологии, так как, несмотря на её малость, концентрация нейтрино во Вселенной достаточно высока, чтобы существенно повлиять на среднюю плотность. Если нейтрино имеют ненулевую массу, то различные виды нейтрино могут преобразовываться друг в друга. Это так называемые нейтринные осцилляции.

Любой вид нейтрино обладает собственным угловым моментом - спином. По величине он одинаков для всех видов нейтрино и такой же, как у протона или любого лептона, - $1/2h$ (постоянной Планка). Нейтрино всех видов взаимодействуют с веществом с одинаковой интенсивностью. При взаимодействии с веществом электронное нейтрино превращается в электрон, а электронное антинейтрино - позитрон. Взаимодействие мюонного нейтрино с веществом приводит к образованию μ^- , а мюонного антинейтрино - к образованию μ^+ . Эти свойства взаимодействия нейтрино связаны с сохранением лептонного числа. Нейтрино рождаются и взаимодействуют с веществом только в состояниях с определённой проекцией спина на направление движения - спиральностью. Все нейтрино имеют левую спиральность, а все антинейтрино - правую, т.е. проекция спина всех нейтрино на направление движения отрицательна, а антинейтрино - положительна.

Коротко остановимся на истории открытия нейтрино. Одной из основных проблем в ядерной физике 20-30-х годов XX века была проблема бета-распада: спектр электронов, образующихся при β -распаде, измеренный английским физиком Д.Чедвигом в 1914 имеет непрерывный характер, то есть, из ядра вылетают электроны самых различных энергий. Развитие квантовой механики в 20-х годах привело к пониманию дискретности энергетических уровней в атомном ядре (Л.Мейтнер, 1922). Спектр вылетающих при распаде ядра частиц должен быть дискретным (состоять из одной вертикальной линии), и показывать энергии, равные разнице энергий уровней, между которыми при распаде происходит переход. Таковым, например, является спектр α -частиц при α -распаде. Таким образом, непрерывность спектра электронов β -распада ставила под сомнение закон сохранения энергии. Чтобы спасти закон сохранения энергии было высказано предположение, что потерянную энергию уносит какая-то неизвестная и незаметная частица. Гипотезу о существовании чрезвычайно слабо взаимодействующей с веществом лёгкой нейтральной частицы со спином $1/2$, выдвинул в 1930 В.Паули. Несколько позже Э.Ферми назвал её нейтрино, т.е. нейтрончик. Введение такой частицы обеспечило сохранение энергии и момента количества движения в β -распаде.

На примере нейтрона рассмотрим алгоритм введения дополнительной частицы в схему β -распада нейтрона.

Используя понятие энергии связи, и представляя массы покоя частиц в энергетических единицах, выход энергии при распаде нейтрона можно вычислить в зависимости от массы частицы. Выход энергии обычно обозначают символом Q . Поскольку энергия и импульс должны быть сохранены в распаде, то более легкий электрон уносит большую часть кинетической энергии. Для расчёта кинетической энергии этой частицы следует использовать выражение для релятивистской кинетической энергии.

(N) $m_n = 939.5656 \text{ МэВ}$

(+) $m_p = 938.2723 \text{ МэВ}$

(-) $m_e = 0.510999 \text{ МэВ}$

$0.7823 \text{ МэВ} = Q \text{ для } n \rightarrow p + e^-$

Сначала предположим (неправильно), что продуктами распада являются протон и электрон. Выход энергии Q тогда будет разделен между протоном и электроном. Электрон получит большинство кинетической энергии и станет релятивистским, а протон - нерелятивистским. Баланс

$$Q = 0,7823 \text{ МэВ} = E_{ке} = \frac{1}{2} m_p v_p^2 = E_{ке} + \frac{p_p^2 c^2}{2m_p c^2} \quad (9)$$

Согласно закону сохранения импульса:

$$p_{\text{электрон}} = -p_{\text{протон}} \quad (10)$$

и импульс электрона p_e может быть выражен в терминах кинетической энергии электрона

$$p_e^2 = E_{ке}^2 + 2E_e m_e c^2 \quad (11)$$

Энергетический баланс тогда становится

$$0,7823 \text{ МэВ} = E_{ке} + \frac{E_e^2 + 2E_e m_e c^2}{2m_p c^2} \quad (12)$$

Член $E_{ке}^2$ пренебрежимо мал, что позволяет рассчитать кинетическую энергию электрона для этой двухчастичной схемы распада

$$0,7823 \text{ МэВ} = E_{ке} \left[1 + \frac{m_e}{m_p} \right]; \quad E_{ке} = 0,7819 \text{ МэВ} \quad (13)$$

Аналогично, импульс электрона для этого двухчастичного распада должен быть

$$p_e = \sqrt{E_e^2 + 2E_{ке}m_e c^2} = 1,188 \text{ МэВ} \quad (14)$$

Мы нашли импульс и энергию для двухчастичного распада нейтрона. Однако в эксперименте не фиксируется одно значение энергии и одно значения электрона – существует непрерывное распределение и по импульсу и по энергии (**Рис.8**).

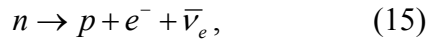


Рис. 8. Распределение электронов по энергиям и импульсам при β -распаде нейтрона.

Тот факт, что электроны, возникшие при распаде нейтрона имеют непрерывное распределение по энергии и импульсам, является ясным признаком, что ещё одна (дополнительная) частица испускается наряду с электроном и протоном. Эта частица должна быть нейтральной и в предельном случае

уносить всю энергию и импульс распада. В принципе, это понятно. Но! Когда электрон приобретёт получит всю энергию распада, не останется энергии для образования массы третьей частицы (нейтрино). То есть дополнительная частица мало того, что не имеет заряда, она ещё не должна иметь никакой массы! Эта мистическая частица была названа нейтрино; впоследствии она была обнаружена экспериментально.

Трёхчастичное (правильное) понимание распада нейтрона записывается так:



где $\bar{\nu}_e$ - электронное антинейтрино.

Протон, как продукт распада, удовлетворяет закону сохранения барионного числа, но появление электрона без дополнительной частицы нарушило бы сохранение лептонного числа. Для выполнения закона сохранения лептонного числа, третья частица должна быть электронным антинейтрино, т.к. у электрона лептон 1, и у антинейтрино лептон 1.

4. КВАРКИ

Кварки и Лептоны - стандартные блоки, создающие материю, поэтому их называют фундаментальными частицами. В существующей стандартной модели, есть шесть «ароматов» кварка. Они составляют все известные мезоны и барионы (более 200). Самые известные барионы - протон и нейтрон, каждый из которых построен из u - и d - кварков. Кварк существует только в виде комбинации двух кварков (мезоны), трёх кварков (барионы), и недавно обнаруженных частиц с пятью кварком (пентакварк). Кварки обладают и дополнительной внутренней характеристикой, называемой цвет.

Гипотеза о том, что адроны построены из специфических субъединиц, была впервые выдвинута М.Гелл-Манном и, независимо от него, Дж.Цвейгом в 1964 году. Слово «кварк» было заимствовано Гелл-Манном из романа Дж.Джойса «Поминки по Финнегану», где в одном из эпизодов звучит фраза «Three quarks for Mister Mark!» (обычно переводится как «Три кварка для мистера Марка!»), слово «quark» в этой фразе является звукоподражанием крику морских птиц.

Табл. 4. Характеристики кварков.

Название	Спин	Заряд	Масса	Барионное число	S	C	B	T
Первое поколение								
d Нижний (down)	1/2	-1/3	360 МэВ	1/3	0	0	0	0
u Верхний (up)	1/2	+2/3	360 МэВ	1/3	0	0	0	0
Второе поколение								
s Странный (strange)	1/2	-1/3	540 МэВ	1/3	-1	0	0	
c Очарованный (charm)	1/2	+2/3	1,5 ГэВ	1/3	0	+1	0	0
Третье поколение								
b Красивый (beauty, bottom)	1/2	-1/3	5 ГэВ	1/3	0	0	+1	0
t Истинный (truth, top)	1/2	+2/3	174 ГэВ	1/3	0	0	0	+1

*К массам нельзя отнести слишком серьезно, потому что невозможно извлечь кварк из нуклона и непосредственно взвесить. Массы оцениваются косвенно из экспериментов по рассеиванию. Массы, указанные для u - и d -кварков составляют $1/3$ массы, протона, ибо протон имеет три кварка.

Размеры кварков можно считать точечными (по современным оценкам диаметр кварка менее 10^{-17} см).

Кварки принято характеризовать **ароматом** (странность, очарование, красота, прелесть), т.е. специфическим зарядом (аддитивным квантовым числом, не являющимся источником взаимодействия). Аромат кварка переносится на частицы, в состав которых входит данный кварк. Величина этого заряда позволяет классифицировать различные адроны (например, адроны со странностью -1 , адроны с очарованием $+1$). Поскольку кварк и его антикварк имеют все заряды противоположных знаков, в истинно нейтральных мезонах, состоящих из кварков и соответствующих антикварков, аромат кварка явно не проявляется. Такие мезоны обладают скрытым ароматом. В сильных и электромагнитных взаимодействиях аромат кварка сохраняется, т.е. сохраняется полное число кварков данного аромата минус число соответствующих антикварков. Поэтому в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий странные, очарованные, красивые и т.п. частицы могут образовываться только парами. Аромат кварка может изменяться только в процессах слабого взаимодействия. Например, в β -распаде нейтрона происходит превращение d -кварка нейтрона в u -кварк конечного протона.

Каждый из шести «ароматов» кварка может иметь три различных «цвета».

Каждый кварк имеет квантовое число, называемое цветом. Цвет является аналогом электрического заряда, хотя и более сложным. Наличие цвета объясняет сильное взаимодействие кварков, отсутствующее у не имеющих цвета лептонов.

Силы кварка являются силами притяжения только в «бесцветных» комбинациях трех кварков (барионы), пар кварк - антикварк (мезоны) и, возможно, в больших комбинациях, типа пентакварка. Кварк подвергается преобразованиям путём обмена бозонами W ; те же преобразования определяют скорость и природу распада адронов при слабым взаимодействии.

Цвет – квантовое число, характеризующее кварки и глюоны. Для каждого типа кварка принимает одно из трёх возможных значений. В квантовой хромодинамике с цветом связан специфический «цветовой заряд», определяющий взаимодействие «цветных» частиц.

Кварки группируются в три поколения, в каждом из которых один кварк обладает зарядом $+2/3$, а другой - $(-1/3)$. Подразделение на поколения распространяется также и на лептоны. Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях. Сильные взаимодействия (обмен глюоном) могут изменять цвет кварка, но не меняют его аромат. Слабые взаимодействия, наоборот, не меняют цвет, но могут менять аромат.

Аналогично тому, как электрические заряды взаимодействуют посредством фотонов, так взаимодействие цветовых зарядов осуществляют переносчики сильного взаимодействия - глюоны. Однако в отличие от единственного фотона, имеется восемь различных типов глюонов. Если фотон не имеет электрического заряда и поэтому сам с собой не взаимодействует, то глюоны, обладая цветовым зарядом, взаимодействуют друг с другом. В этом лежит причина принципиально нового явления, называемого конфайнментом или невылетанием кварков (*confinement-заключение в тюрьму*). Дело в том, что, несмотря на достаточно большие энергии частиц, ускоренных в современных ускорителях, кварки наблюдать в свободном состоянии не удастся. Они существуют в природе только в виде пар кварк-антикварк ($q\bar{q}$), троек (qqq) или более сложных образований, таких, чтобы электрический заряд этих объектов оказывался целочисленным. Все подобные объекты обладают нулевым цветовым зарядом. Явление конфайнмента состоит в следующем. При попытке получить кварк в свободном состоянии (т.е. «вытащить» его из адрона на достаточно большое расстояние, сообщив ему высокую энергию) напряженность поля нескомпенсированного цветового заряда кварка оказывается столь сильной, что за счет сообщенной энергии из вакуума рождается пара ($q\bar{q}$) и антикварк \bar{q} движется вместе с кварком, который пытаются оторвать. В результате вылетает не кварк, а составная частица, не имеющая цвета. По этой же причине глюоны также не удастся наблюдать в свободном состоянии. Явление конфайнмента обуславливает малый радиус действия сильного взаимодействия. Цветная сила, удерживающая кварк в нуклоне, не уменьшается с расстоянием, как это принято у других сил, а увеличивается!). С расстоянием она растёт очень сильно – 1 ГэВ на ферми. Поэтому нужны силы совершенно немыслимые в земных условиях, чтобы оторвать кварк от нуклона и выделить его в свободном состоянии. Рост сил с расстоянием не позволяет возникнуть эффекту туннелирования, как это имеет место при α -распаде.

Замечание. Несколько проясняет ситуацию «модель сумки». Пусть миллиардный шар находится в сумке с упругими стенками. Внутри её он может перемещаться достаточно свободно. Но если вы попытаетесь вытащить шар из сумки, стенки её сомкнутся и станут препятствовать вам сделать это. Чем сильнее будете тянуть, тем сильнее будет сопротивляться сумка.

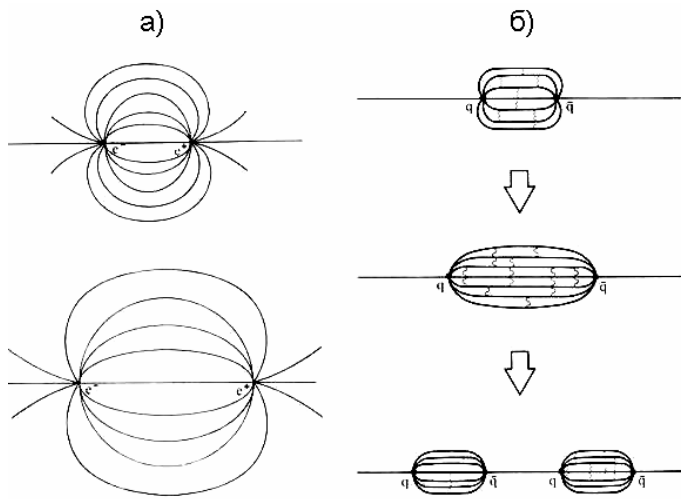


Рис. 9. Схема, иллюстрирующая различие в поведении электромагнитных и сильных взаимодействий. а) При разделении зарядов, линии электрического поля расходятся; б) Цветовые силовые линии между кварками коллимируются в подобную трубе форму и не расходятся при разделении кварков. В конечном счете, после того, как примененная сила произвела необходимую работу единственная трубка раскалывается на две.

Симметрия между кварками и лептонами, предполагает, что кварки могут сами состоять из чего-то более простого. Рабочее название для гипотетических частиц-составляющих кварков - преоны (айконы).

5. ЯДЕРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Прежде чем рассматривать ядерные силы и участие в них элементарных частиц, дадим определения некоторых важных понятий.

Материя (от лат. *Materia*- вещество) - философская категория для обозначения объективной реальности, которая отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них (объективно). Материя является обобщением понятия материального и идеального, в силу их относительности.

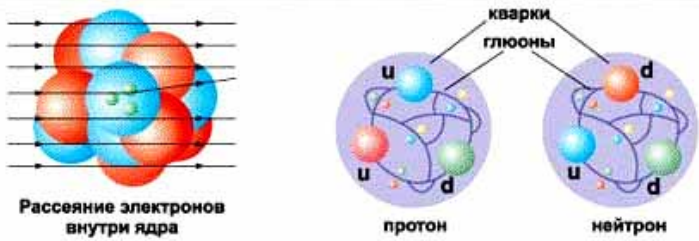
Вещество - форма материи, в отличие от поля, обладающая массой покоя. Вещество состоит из частиц, среди которых чаще всего встречаются электроны, протоны и нейтроны. Последние два образуют атомные ядра, а все вместе - атомы (атомное вещество), из которых - молекулы, кристаллы и т. д. Вещество есть энергообразование из фрагментов материи.

Антивещество - материя, состоящая из античастиц. По современным представлениям, силы, определяющие структуры материи (сильное взаимодействие, образующее ядра, и электромагнитное взаимодействие, образующее атомы и молекулы) совершенно одинаковы как для частиц, так и для античастиц. Это означает, что структура антивещества должна быть идентична структуре обычного вещества. Отличие вещества и антивещества возможно только за счёт слабого взаимодействия, однако при обычных температурах слабые эффекты пренебрежимо малы. Ведется довольно много рассуждений на тему того, почему наблюдаемая часть вселенной состоит почти исключительно из вещества и существуют ли другие места, заполненные, наоборот, практически полностью антивеществом; но на сегодняшний день наблюдаемая асимметрия вещества и антивещества во вселенной - одна из самых больших нерешенных задач физики. Предполагается, что столь сильная асимметрия возникла в первые доли секунды после Большого Взрыва. Первым объектом, целиком составленным из античастиц, был синтезированный в 1965 анти-дейтрон; затем были получены и более тяжёлые антиядра. В 1995 в ЦЕРНе был синтезирован атом антиводорода, состоящий из позитрона и антипротона. В последние годы антиводород был получен в значительных количествах и было начато детальное изучение его свойств. При взаимодействии вещества и антивещества их масса превращается в энергию. Такую реакцию называют аннигиляцией. Антивещество - лидер среди известных веществ по плотности энергии.

Многие элементарные частицы являются квантами физического поля того или иного типа.

Поле физическое - особая форма материи, система с бесконечным числом степеней свободы. К физическим полям относятся электромагнитные и гравитационные поля, поле ядерных сил, а также волновые (квантованные) поля, соответствующие различным частицам (напр., электрон-позитронное поле). Источниками поля физического являются частицы (например, для электромагнитного поля - заряженные частицы). Создаваемые частицами физические поля переносят (с конечной скоростью) взаимодействие между соответствующими частицами (в квантовой теории взаимодействие обусловлено обменом квантами поля между частицами).

Физические поля ответственны за взаимодействия в материальном мире. Остановимся на некоторых из них.



Фундаментальные элементарные частицы

Кварки		Лептоны		
Обозначение	Электрический заряд	Название	Обозначение	Электрический заряд
u	$+\frac{2}{3}e$	Электрон	e	-e
c	$+\frac{2}{3}e$	Мюон	μ	-e
t	$+\frac{2}{3}e$	Таон	τ	-e
d	$-\frac{1}{3}e$	Электронное нейтрино	ν_e	0
s	$-\frac{1}{3}e$	Мюонное нейтрино	ν_μ	0
b	$-\frac{1}{3}e$	Таонное нейтрино	ν_τ	0

Фундаментальные взаимодействия

	Сильное	Электромагнитное	Слабое	Гравитационное
Взаимодействующие частицы	кварки, нуклоны	частицы с электрическими зарядами	кварки, лептоны	все частицы
Радиус действия сил	10^{-15} м	∞	10^{-17} м	∞
Относительная сила взаимодействия	1	10^2	10^3	10^{38}
Частицы - носители взаимодействия	глюоны, мезоны	фотоны	промажуточные бозоны	гравитоны (?)

5.1 Виды взаимодействий

Электромагнитные взаимодействия ответственны за энергетический вклад в связь заряженных частиц. Эти силы проявляются на достаточно больших расстояниях.

Слабые взаимодействия ответственны за энергетический вклад в связь элементарных частиц, составляющих нуклоны. Взаимодействия этого типа проявляются при самопроизвольном распаде нуклонов

Сильные взаимодействия ответственны за основной энергетический вклад в связь нуклонов внутри ядра. В сильных взаимодействиях участвуют адроны. Радиус действия этих сил очень мал - около 10^{-13} см (примерно равен радиусу ядер) и практически отсутствует вне радиуса их действия. Эти силы сильнее электромагнитных примерно в 100 раз. Частный случай сильного взаимодействия - ядерные силы.

Гравитационные взаимодействия - слабые взаимодействия, ответственные за энергетический вклад в связь элементарных частиц, составляющих нуклоны. Взаимодействия этого типа проявляются при самопроизвольном распаде нуклонов

Существует точка зрения, что все четыре типа взаимодействий представляют собой явления одной природы и должны описываться единым образом. Единая теория слабых и электромагнитных взаимодействий уже построена. Называется она модель великого объединения.

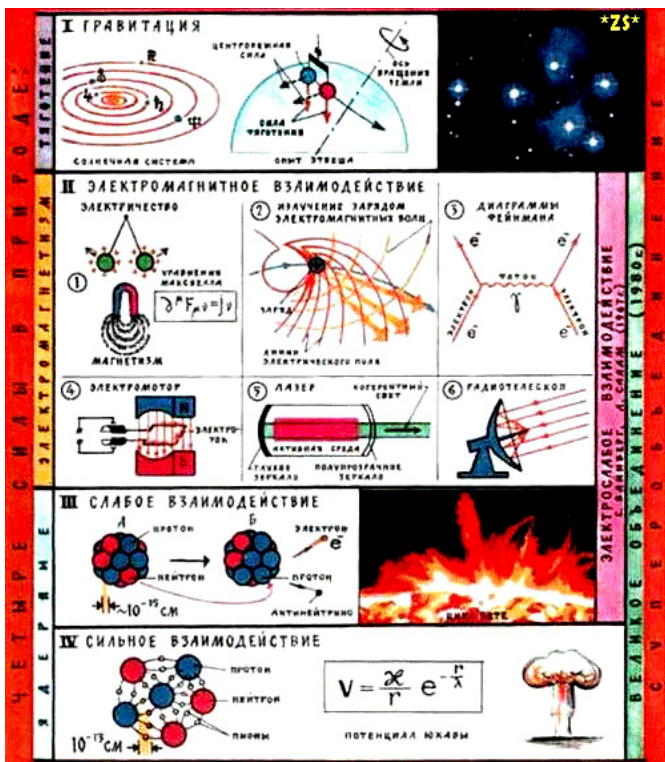
Далее мы ограничимся случаем сильного взаимодействия применительно к ядерным силам.

5.2 Сильные взаимодействия

Сильное ядерное взаимодействие - одно из четырёх фундаментальных взаимодействий в физике. Оно действует в масштабах атомных ядер и меньше, отвечая за притяжение между нуклонами в ядрах и между кварками в адронах. В сильном взаимодействии участвуют кварки и глюоны, а также составленные из них элементарные частицы, называемые **адронами**.

Необходимость введения понятия сильных взаимодействий возникла в 1930-х годах, когда стало ясно, что ни явление гравитационного, ни явление электромагнитного взаимодействия не могли ответить на вопрос, что связывает нуклоны в ядрах. В 1935 японский физик Х.Юкава построил первую количественную теорию взаимодействия нуклонов, происходящего посредством обмена новыми частицами, которые сейчас известны как пи-мезоны (или пионы). Пионы были впоследствии открыты экспериментально в 1947. В этой пион-нуклонной теории притяжение или

отталкивание двух нуклонов описывалось как испускание пиона одним нуклоном и последующее его поглощение другим нуклоном (по аналогии с электромагнитным взаимодействием, которое описывается как обмен виртуальным фотоном). Эта теория успешно описала целый круг явлений в нуклон-нуклонных столкновениях и связанных состояниях, а также в столкновениях пионов с нуклонами.



Force	Diagram	Strength	Range (m)	Particle
Strong		1 Force which holds nucleus together	10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	gluons, π (nucleons)
Electromagnetic		$\frac{1}{137}$	Infinite	photon mass = 0 spin = 1
Weak		10^{-6}	10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z^0 , mass > 80 GeV spin = 1
Gravity		6×10^{-39}	Infinite	graviton ? mass = 0 spin = 2

Рис. 10. Некоторые свойства фундаментальных взаимодействий.

На расстояниях $r_0 \approx 10^{-15}$ м величина сильного взаимодействия между нуклонами, составляющими атомное ядро, настолько велика, что позволяет практически не принимать во внимание их электромагнитное взаимодействие (отталкивание). В хорошем приближении потенциальная функция взаимодействия двух нуклонов описывается выражением

$$U(r) = -k \frac{\exp(-r/r_0)}{r} \quad (15)$$

в котором, $r_0 = 1,23 \times 10^{-15}$ м, k - константа сильного взаимодействия, обычно полагающаяся равной 1 в «системе констант» фундаментальных взаимодействий, где, например, постоянная электромагнитного взаимодействия равна постоянной тонкой структуры (Такая потенциальная функция называется потенциалом Юкавы.) Модуль этой функции очень быстро убывает и на расстояниях, больших r_0 уже ничтожно мал.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ:

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
Гравитационное взаимодействие имеет универсальный характер и выступает в виде притяжения. Оно является самым слабым из всех остальных взаимодействий (сила электрического отталкивания электронов в 1040 раз больше силы их гравитационного притяжения). В классической физике гравитационное взаимодействие описывается законом всемирного тяготения Ньютона. В общей теории относительности гравитация - проявление кривизны пространственно-временного континуума (поле тяготения создает искривление пространства тем больше, чем больше тяготеющая масса). В квантовой теории квантами поля тяготения являются гравитоны, которые переносят энергию, обладают импульсом и другими характеристиками.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
Электромагнитное взаимодействие имеет универсальный характер и может выступать в зависимости от знака заряда либо как притяжение, либо как отталкивание. Оно определяет возникновение атомов, молекул и макроскопических тел. Электромагнитное взаимодействие в 100–1000 раз слабее сильного взаимодействия. Электромагнитное взаимодействие описывается электростатикой, электродинамикой, квантовой электродинамикой

СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
Слабое взаимодействие действует только в микромире и описывает некоторые виды ядерных процессов. Оно короткодействующее и характеризует все виды бета-превращений. Слабое взаимодействие слабее электромагнитного, но сильнее гравитационного. Слабое взаимодействие описывается теорией слабого взаимодействия, созданной в 1967 г. С. Вайнбергом и А. Саламом.

СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
Сильное взаимодействие обеспечивает связь нуклонов в ядре и определяет ядерные силы. Оно описывается теорией сильных взаимодействий (квантовой хромодинамикой).

ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ = ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ - СЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ - СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Ядерные силы относятся к сильным. Их природа ещё не выяснена. Даже для простейшей системы из двух нуклонов неизвестна зависимость ядерных сил от расстояния между нуклонами.

Перечислим свойства ядерных сил и укажем на экспериментальные факты, подтверждающие эти свойства.

1. Огромная энергия связи нуклонов в ядре свидетельствует о том, что между нуклонами действуют силы притяжения, что подтверждается существованием стабильных ядер. Эти силы самые интенсивные в природе. Например, энергия связи простейшего ядра - ${}^4\text{He}$ - составляет 2,22 МэВ, а простейшего атома - водорода - равна 13,6 эВ.

2. Ядерные силы - *короткодействующие*. Они удерживают нуклоны на расстояниях $(1,2 \div 1,4) \cdot 10^{-13}$ см. При расстояниях между нуклонами, превышающих $2 \cdot 10^{-13}$ см действие ядерных сил не обнаруживается, тогда как на расстояниях меньших $1 \cdot 10^{-13}$ см, притяжение нуклонов заменяется отталкиванием.

3. На расстояниях, где между протонами действуют ядерные силы притяжения, они превосходят кулоновские силы отталкивания

приблизительно в 100 раз, действие которых на этих расстояниях также очень велико. Короткодействие ядерных сил приводит к резкому разграничению областей, где действуют только далекодействующие кулоновские силы, или только ядерные, которые подавляют кулоновские силы на малых расстояниях. На **Рис. 11а** показана потенциальная энергия взаимодействия протона с тремя различными ядрами: легким (${}^2\text{He}$), средним (${}_{28}^{60}\text{Ni}$) и тяжелым (${}_{92}^{238}\text{U}$). Функции $U(r)$ представляют собой энергию взаимодействия между протоном и ядром. За границами ядра существует только кулоновское отталкивание, энергия которого равна

$$U_k = \frac{Zze^2}{r}, \quad (16)$$

где Z - заряд ядра, z - заряд налетающей частицы. На расстоянии от ядра, где начинает проявляться действие ядерных сил притяжения, потенциальная энергия круто падает на расстояниях $\sim 10^{-13}$ см, что соответствует большой интенсивности ядерных сил (сила пропорциональна антиградиенту потенциальной энергии dU/dr). Внутри ядра потенциальная энергия отрицательна и представлена некоторой средней величиной (дно

потенциальной ямы). На **Рис. 11а** пунктиром

Вид	Взаимодействующие частицы	Проявление	Механизм	Интенсивность	Радиус действия, м
СИЛЬНОЕ	тяжелые частицы (кварки, нуклоны)	ядерные силы, обеспечивающие существование ядер	обмен глюонами	1	10^{-15}
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ	заряженные частицы, фотоны	кулоновская сила, обеспечивающая существование атома	обмен фотонами	$\frac{1}{137}$	∞
СЛАБОЕ	кварки, лептоны	β -распад	обмен бозонами	10^{-10}	10^{-18}
ГРАВИТАЦИОННОЕ	все тела Вселенной	всемирное тяготение, обеспечивающее существование звезд, планетных систем	обмен гравитонами ?	10^{-38}	∞

Субатомные частицы		
Фотон	Лептоны Электроны Нейтрино Мюоны	Адроны Мезоны Барьоны Протоны Нейтроны

показаны удельные энергии связи рассматриваемых ядер. Энергия ядерного взаимодействия характеризует только центрально-симметричную часть ядерных сил и не учитывает зависимость ядерных сил от спина и нецентральный характер ядерных сил.

Заряженная частица для сближения с ядром или при вылете из ядра должна преодолеть кулоновский барьер. На **Рис. 11б** приведена модельная потенциальная функция, где ядро и частица представлены в виде точечных зарядов. Высота кулоновского барьера в этом случае составит

$$B_k = \frac{Zze^2}{R} \approx \frac{Zz}{A^{1/3}} \text{ МэВ} \quad (17)$$

Ядерное взаимодействие между ядром и частицей аппроксимируется отвесной линией. Нейтроны не имеют электрического заряда и потому беспрепятственно сближаются с ядрами, т.е. для них отсутствует кулоновский барьер (жирная горизонтальная линия на **Рис. 11б** в области $r > R$), а ядерный потенциал у нейтрона оказывается таким же (с точностью до различия в массах), как и у протона.

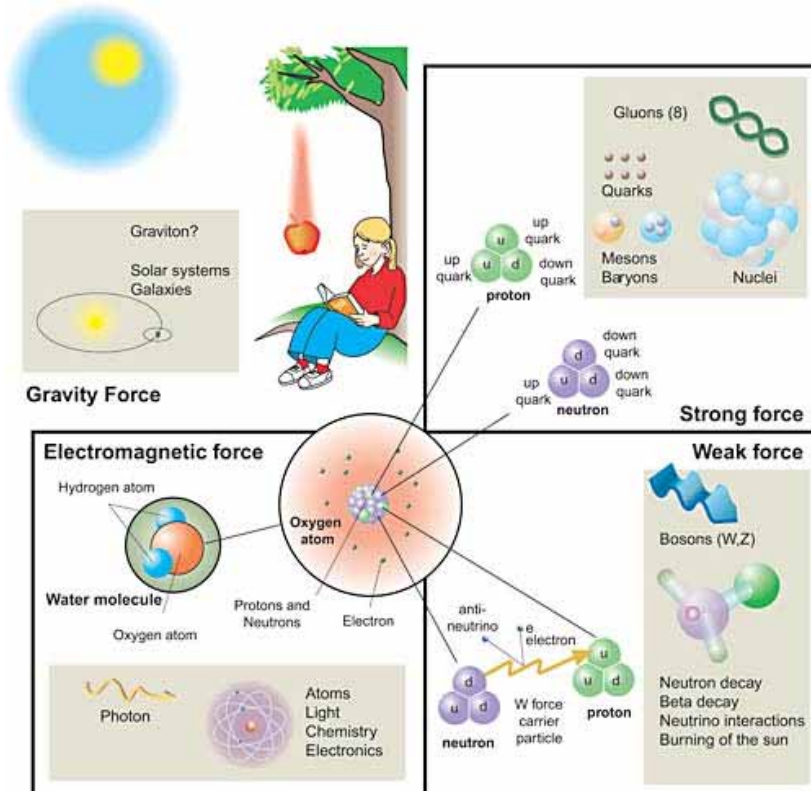
Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов взаимодействующих нуклонов и от взаимной ориентации орбитального и спинового моментов каждого

из нуклонов. Это означает, что внутри ядра следует учитывать спин-орбитальное взаимодействие нуклонов. Зависимость ядерных сил от спина хорошо видна на примере дейтона, который имеет спин, равный единице, т.е. нейтрон и протон могут существовать в связанном состоянии только при параллельных спинах. При антипараллельных спинах нейтрон и протон не образует связанной системы, но притяжение между ними все же существует, что приводит к значительной эффективности рассеяния нейтронов на протонах. Поэтому рассеяние нейтронов на водородосодержащих средах оказывается также эффективным и широко используется для замедления нейтронов в ядерных реакторах. Если нуклоны одноименные, то наибольшее притяжение между ними наблюдается в случае антипараллельной ориентации их спинов. Как раз этой особенностью объясняется эффект спаривания нуклонов.

5. Интенсивность ядерного взаимодействия не зависит от электрического заряда нуклонов. Ядерные силы, действующие между двумя протонами (p – p), протоном и нейтроном (p – n) и двумя нейтронами (n – n),

находящихся в одинаковых пространственных и спиновых состояниях, одинаковы по величине. Это свойство называется *зарядовой независимостью* ядерных сил. Другими словами, протон и нейтрон оказываются равноправными относительно ядерного взаимодействия. Это, конечно, не означает, что кулоновское расталкивание протонов не играет роли внутри ядра или при рассеянии двух свободных протонов.

Зарядовую независимость обычно иллюстрируют на зеркальных ядрах (например, ${}^3_3\text{Li}$ и ${}^4_4\text{Be}$). Зеркальными называются ядра изобаров, количество протонов в одном из которых равно количеству нейтронов в другом и наоборот. В зеркальных ядрах число (p – n) связей остается постоянным, а (p – p) связи заменены на (n – n) связи. Энергии основных состояний у них сдвинуты друг относительно друга на величину разности $\Delta U_{\text{кул}}$ кулоновской энергии ядер и разность $\Delta m_{\text{нук}}$ нуклонов ($m_n > m_p$)



$$\Delta E = \Delta U_{\text{кул}} - \Delta m_{\text{нук}} \quad (18)$$

Соответствующие уровни энергии (энергетические спектры зеркальных ядер) очень близки, а спины и четности уровней совпадают. Однако, это не является прямым доказательством зарядовой независимости ядерных сил, так как сопоставляются не процессы парных взаимодействий между нуклонами отдельных типов, а рассматриваются свойства сложных нуклонных систем. Непосредственное доказательство гипотезы о зарядовой независимости ядерных сил получено в прямых опытах по изучению (p – p) и (n – p) рассеяния.

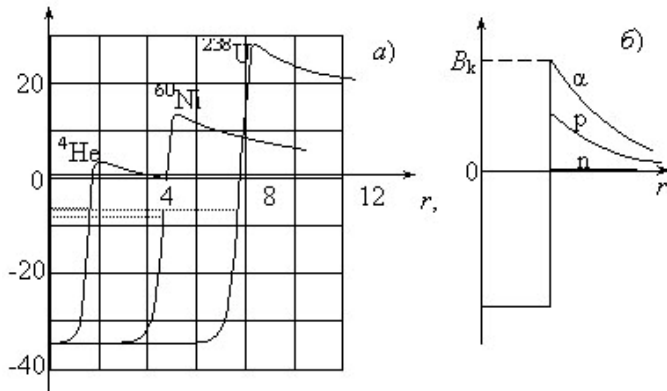


Рис. 11. а) Потенциальная функция взаимодействия α -частицы с лёгким (^4He), средним (^{60}Ni) и (^{238}U) ядрами; б) Идеализированная потенциальная функция.

б. Постоянство средней энергии связи на нуклон указывает на *свойство насыщения* ядерных сил: каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом соседних нуклонов. Свойство насыщения ядерных сил имеет парный характер. Например, пара нейтронов и пара протонов образует одно из самых прочных легких ядер ^4_2He - α -частицу. Присоединение еще одного нейтрона к α -частице оказывается невозможным.

7. Ядерные силы имеют *нецентральный* характер. Центральными называются силы, которые действуют вдоль прямой, соединяющей взаимодействующие тела. Центральные силы могут зависеть от относительной ориентации спинов частиц, но не должны зависеть от ориентации спинов относительно линии, соединяющей частицы. Рассмотрим некоторые свойства простейшего ядра ^2_1H . Спины нейтрона и протона в дейтоне параллельны, поэтому магнитный момент дейтона должен определяться алгебраической суммой магнитных моментов протона и нейтрона, равной $\mu_d + \mu_n = 2,79 - 1,91 = 0,88$. Измеренное значение магнитного момента дейтона $\mu_d = 0,86$ немного отличается, хотя величина расхождения намного превышает точность измерений. Различие можно объяснить только наличием у протона орбитального момента. Дейтон имеет квадрупольный момент $+0,0028 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, т.е. распределение плотности электрического заряда (а следовательно и ядерного вещества) отлично от сферически симметричного и вытянуто вдоль спина. Таким образом, система из протона и нейтрона имеет наибольшую энергию связи только тогда, когда спины обоих нуклонов направлены вдоль оси дейтона. Это свидетельствует о том, что ядерные силы в общем случае имеют нецентральный характер, так как они зависят не только от расстояния между нуклонами, но и от ориентации спинов относительно линии, соединяющей нуклоны.

8. Ядерные силы имеют *обменный* характер. Это означает, что они обусловлены обменом третьей частицей, пи-мезоном. Взаимодействие между зарядами осуществляется через электромагнитное поле, которое может быть представлено как совокупность квантов энергии – фотонов. Каждый заряд создает вокруг себя поле, непрерывно испуская и поглощая фотоны. Процесс взаимодействия между двумя зарядами заключается в обмене виртуальными, а не реальными фотонами. В квантовой механике виртуальными называются частицы, которые не могут быть обнаружены за время их существования.

Можно показать, что для образования свободных (не виртуальных) квантов ядерного поля необходима энергия не менее 140 МэВ. Эти частицы были впоследствии открыты в составе космических лучей и были названы π -мезонами (пионами). Существует три типа пионов - положительный (π^+) пион с зарядом e , отрицательный (π^-) с зарядом $-e$ и нейтральный (π^0). Все три частицы нестабильны. Заряженные пионы имеют одинаковую массу, равную $273m_e$ (140 МэВ), и время жизни $\tau = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ с}$. Масса нейтрального пиона составляет $264m_e$ (135 МэВ), а время жизни $\tau = 2,1 \cdot 10^{-16} \text{ с}$. Спин любого пиона равен нулю.

В результате виртуальных процессов

$$p \Leftrightarrow (n) + \pi^+ \quad (19)$$

$$n \Leftrightarrow (p) + \pi^- \quad (20)$$

$$p \Leftrightarrow (p) + \pi^0, \quad n \Leftrightarrow (n) + \pi^0 \quad (21)$$

нуклон оказывается окруженным облаком виртуальных π -мезонов, которые образуют поле ядерных сил. Поглощение этих пионов другими нуклонами приводит к сильному взаимодействию между нуклонами и происходит по одной из следующих схем:

$$p + n \Leftrightarrow (n) + \pi^+ + n \Leftrightarrow n + p \quad (22)$$

$$n + p \Leftrightarrow (p) + \pi^- + p \Leftrightarrow p + n \quad (23)$$

$$p + n \Leftrightarrow (p) + \pi^0 + n \Leftrightarrow p + n \quad (24)$$

$$p + p \Leftrightarrow (p) + \pi^0 + p \Leftrightarrow p + p \quad (25)$$

$$n + n \Leftrightarrow (n) + \pi^0 + n \Leftrightarrow n + n \quad (26)$$

Процесс (22) находит экспериментальное подтверждение в рассеянии нейтронов на протонах. После прохождения пучка нейтронов через мишень, содержащую ядра ^1H в пучке появляются протоны, которые имеют ту же энергию и направление движения, что и падающие нейтроны. Количество таких протонов на много превышает возможность образования протонов в результате упругого взаимодействия нейтронов с протонами мишени. Соответствующее количество нейтронов обнаруживается и в мишени. Остается признать, что часть нейтронов, пролетая вблизи ядер ^1H захватывает виртуальные π^+ -мезоны и превращается в протоны. Орбитальное движение π^- -мезонов в процессе (20) вызывает возникновение у нейтрона отрицательного магнитного момента, так как нейтрон часть времени проводит в виртуальном состоянии $(p) + \pi^-$. Аномальный магнитный момент протона ($2,79\mu_B$) вместо одного ядерного магнетона можно также объяснить орбитальным движением π^+ -мезонов в течение того времени, когда протон находится в виртуальном состоянии (19).

Время виртуального процесса $\Delta t \approx 2 \cdot 10^{-23}$ с - *характерное время ядерного взаимодействия*.

Обмен пионами между одним и двумя другими нуклонами, находящимися в пределе радиуса действия ядерных сил мало вероятен. Отсюда вытекает свойство насыщения ядерных сил со всеми вытекающими последствиями: постоянство удельной энергии связи, рост объема ядра пропорционально числу частиц нуклонов в ядре, независимость потенциала от координаты внутри ядра. Мезонная теория даёт правильное описание природы ядерных сил, но уравнения этой теории настолько сложны математически, что до настоящего времени не существует надежных способов их решения.

5.3 Квантовая хромодинамика

В 1970-х годах была построена микроскопическая теория сильного взаимодействия кварков, которая получила название квантовая хромодинамика.

Первоначально в составных моделях кварки выступали скорее как удобный элемент теоретического описания симметрии адронов и их взаимодействий, нежели как реальные физические объекты. Вопрос о реальности существования кварков усложнялся тем, что свободные кварки не были обнаружены ни в экспериментах на ускорителях, ни в космических лучах. Этот вопрос, по-видимому, разрешается современной теорией сильного взаимодействия - квантовой хромодинамикой (КХД).

Квантовая хромодинамика начинается с того, что мы постулируем, что каждый кварк обладает новым внутренним квантовым числом, условно называемым цветовым зарядом, или просто цветом. Термин «цвет», конечно же, не имеет никакого отношения к оптическим цветам и введён исключительно для целей популяризации.

(a) The Standard Model

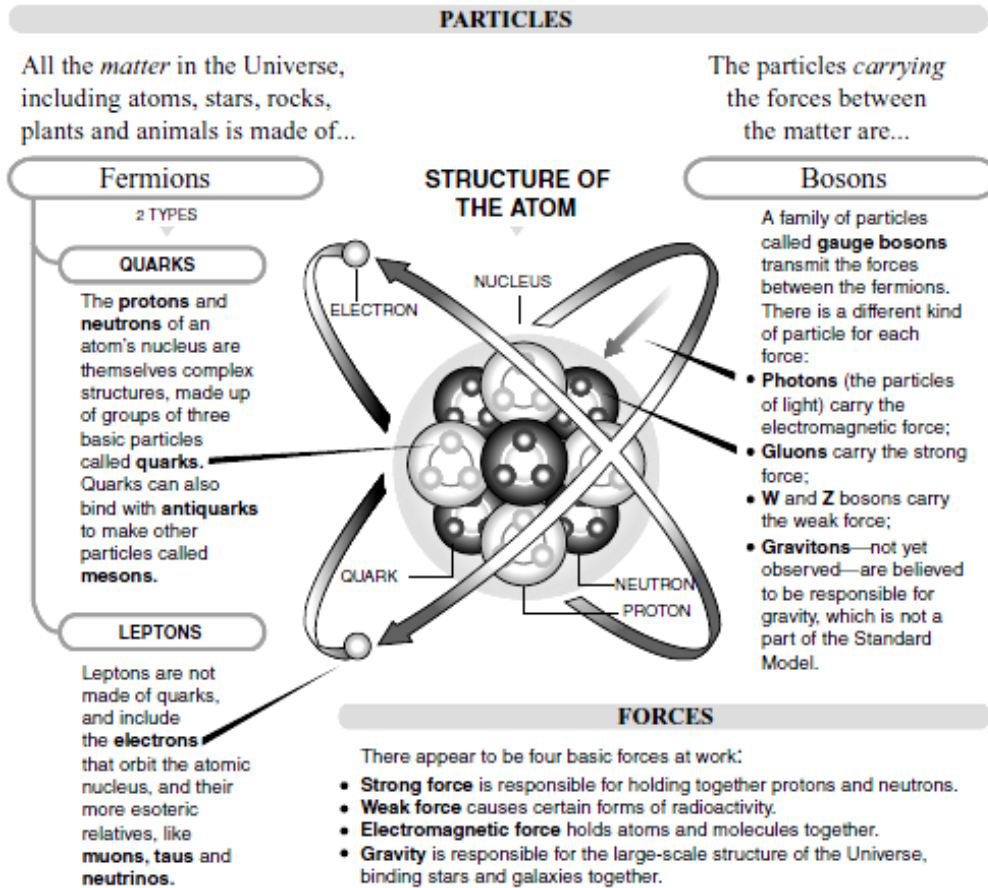


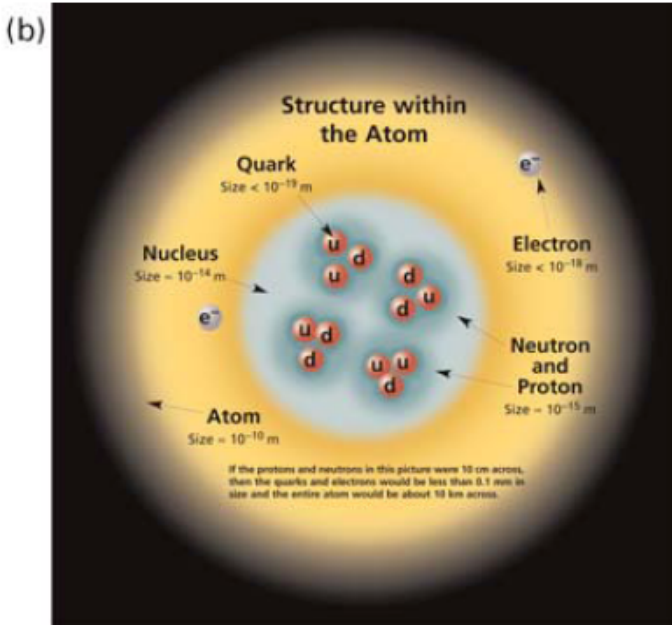
Рис. 12. Две трактовки стандартной модели.

Дело в том, что инвариантная в цветовом пространстве комбинация есть сумма трёх различных цветов. Это

сильно напоминает то, что сумма трёх основных оптических цветов - красного, зелёного и синего - дает белый цвет, т. е. бесцветное состояние. Именно в этом смысле базисные вектора в цветовом пространстве часто называют не первый, второй, третий, а «красный» (к), «зелёный» (з) и «синий» (с). Антикваркам соответствуют анти-цвета (ак, аз, ас), причём комбинация «цвет + антицвет» тоже бесцветна. Глюоны же в цветовом пространстве есть комбинации «цвет-антицвет», причём такие комбинации, которые не являются инвариантными относительно вращений в цветовом пространстве. Таких независимых комбинаций оказывается восемь, и выглядят они следующим образом: $k-az$, $k-as$, $z-ak$, $z-as$, $s-ak$, $s-az$, $(k-ak - z-az)/\sqrt{2}$, $(k-ak + z-az - 2c-as)/\sqrt{6}$. Например, «синий» кварк может испустить «синий-антизелёный» глюон и превратиться при этом в «зелёный» кварк.

Квантовая хромодинамика основана на предположении, что кварки каждого сорта (аромата) выступают в трёх различных модификациях,

характеризуемых новым специфическим свойством - **цветом** (красным, синим или зелёным). Цвет кварка является строго сохраняющимся зарядом, что позволяет естественным образом ввести взаимодействие между кварками, обусловленное наличием у них цветового заряда. Взаимодействие кварков происходит за счёт обмена квантами цветового поля - глюонами. Например, красный кварк, испуская глюон, превращается в синий кварк. Поскольку глюоны обладают цветовым зарядом, они сами являются источником глюонного поля. Это свойство глюонов приводит к специфическому закону изменения взаимодействия кварка с расстоянием. На малых расстояниях ($\ll 10^{13}$ см) взаимодействие между кварками в нуклоне практически отсутствует. С увеличением расстояния между кварками их цветовое взаимодействие растёт. На расстояниях



$\sim 10^{13}$ см цветное взаимодействие становится столь сильным, что препятствует дальнейшему увеличению расстояния между кварками (или глюонами, между которыми действуют те же цветовые силы). Так объясняется связывание или удержание (конфайнмент) кварков и глюонов в адронах («невыветание» свободных кварков и глюонов из адронов). Цветовой заряд кварков (и антикварков), связанных в адроны, полностью экранируется. Адроны являются белыми (бесцветными - не имеющими цветового заряда) составными частицами.

Квантовая хромодинамика позволяет описывать не только состояния адронов, но и процессы взаимодействия, в которых они участвуют. Реакция с участием адрона рассматривается как совокупность кварковых процессов. Предполагая, что кварковые процессы происходят одинаково в различных адронах, можно получить связь между сечениями реакций различных элементарных частиц, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. Согласно квантовой хромодинамике, наблюдаемые процессы аннигиляции электронов и позитронов высоких энергий с образованием адронов происходят в два этапа. На первом этапе электрон и позитрон аннигилируют в пару, состоящую из быстрого кварка и антикварка. На втором этапе в растущем с увеличением расстояния между образовавшимися кварком и антикварком глюонном поле начинается рождение пар кварков и антикварков. Начальные кварк и антикварк, взаимодействуя с вторичными кварками, антикварками и глюонами, формируют две струи адронов, сохраняющие направление движения начальных кварка и антикварка. Наблюдение двух адронных струй на встречных электрон-позитронных пучках может поэтому рассматриваться как доказательство существования кварков и антикварков.

Модели великого объединения требуют введения дополнительных векторных частиц - переносчиков взаимодействия адронов с лептонами. Таких частиц должно быть 12 с массой $m \sim 10^{14}$ - 10^{15} ГэВ. Получить и изучить экспериментально такие частицы пока невозможно, т.к. масса находится далеко за пределами энергий, достижимых на ускорителях как существующих конструкций, так и вообще мыслимых. При взаимодействиях с этими векторными бозонами не сохраняется ни барионный, ни лептонный заряд. Снова число частиц на новом уровне элементарности приближается или даже превосходит сотню.

Расчёты на основе квантовой хромодинамики хорошо согласуются с экспериментом в тех ситуациях, когда кварки и глюоны являются адекватным выбором степеней свободы. Такая ситуация имеет место при адронных столкновениях высоких энергий, в особенности, когда передача импульса от одной частицы к другой велика по сравнению с типичным адронным энергетическим масштабом (порядка 1 ГэВ). При более низких энергиях, из-за сильных многочастичных корреляций работа в терминах кварков и глюонов становится малоосмысленной, и приходится строить теорию взаимодействия бесцветных объектов - адронов.

Стандартная модель - теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Стандартная модель не включает в себя гравитацию.

Стандартная модель состоит из следующих положений.

Всё вещество состоит из 12 фундаментальных частиц-фермионов: 6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, и три сорта нейтрино) и 6 кварков (u, d, s, c, b, t), которые можно объединить в три поколения фермионов. Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) - в слабых и электромагнитных; нейтрино - только в слабых взаимодействиях. Все три типа взаимодействий возникают как следствие постулата, что наш мир симметричен относительно трёх типов калибровочных преобразований.

Рис. 13. Стандартная модель элементарных частиц; в правой колонке — калибровочные бозоны.

Три поколения материи (Фермионы)				
	I	II	III	
Масса →	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
Заряд →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Спин →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Название →	u верхний	c очаровательный	t истинный	γ фотон
Кварки	4,8 МэВ	104 МэВ	4,2 ГэВ	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d нижний	s странный	b прекрасный	g глюон
Лептоны	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	Z⁰ слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e электрон	μ мюон	τ тау	W[±] слабое взаимодействие

Частицами-переносчиками взаимодействий являются: 8 глюонов для сильного взаимодействия (группа симметрии $SU(3)$); 3 тяжёлых калибровочных бозона (W^+, W^-, Z^0) для слабого взаимодействия (группа симметрий $SU(2)$); один фотон для электромагнитного взаимодействия (группа симметрии $U(1)$).

В отличие от электромагнитного и сильного, слабое взаимодействие может смешивать фермионы из разных поколений, что приводит к нестабильности всех частиц, за исключением легчайших, и к таким эффектам, как нарушение CP-инвариантности и нейтринные осцилляции.

До сих пор все предсказания Стандартной модели подтверждались экспериментом, иногда с фантастической точностью в миллионные доли процента. Однако недавно появились результаты, в которых предсказания Стандартной модели слегка расходятся с экспериментом и даже явления, крайне трудно поддающиеся интерпретации в её рамках. С другой стороны, очевидно, что Стандартная модель не может являться последним словом в физике элементарных частиц, ибо она содержит слишком много внешних параметров, а также не включает гравитацию. Поэтому поиск отклонений от Стандартной модели (так называемой «новой физики») - одно из самых активных направлений исследования в последние годы. Ожидается, что эксперименты на коллайдере смогут зарегистрировать множество отклонений от Стандартной модели.

6. АНТИМАТЕРИЯ

Выше, при рассмотрении элементарных частиц, было продемонстрировано наличие в природе помимо частиц ещё и античастиц (например, электрона и позитрона, нейтрона и антинейтрона). Под античастицей понимают элементарную частицу, масса и спин которой точно равны массе и спину данной частицы, а электрический заряд, магнитный момент и другие соответствующие характеристики равны по величине, но противоположны по знаку. Наличие античастиц ставит вопрос о возможности получения антивещества (антиатомов и антимолекул) в земных условиях. Поскольку изучением химических свойств антиматерии будут заниматься радиохимики, коротко остановимся на этой проблеме.

Античастица — частица-двойник (зеркальное отражение) некоторой другой элементарной частицы, обладающая той же массой и тем же спином, но отличающаяся от неё знаками некоторых характеристик взаимодействия (зарядов, таких как электрический и цветовой заряд, барионное и лептонное квантовое число).

Существование античастиц было предсказано П.А.М.Дираком. Полученное им в 1928 квантовое релятивистское уравнение движения электрона (уравнение Дирака) с необходимостью содержало решения с отрицательными энергиями. В дальнейшем было показано, что исчезновение электрона с отрицательной энергией следует интерпретировать как возникновение частицы (той же массы) с положительной энергией и с положительным электрическим зарядом, т. е. античастицы по отношению к электрону. Эта частица - позитрон - была открыта в 1932.

В последующих экспериментах было установлено, что не только электрон, но и все остальные частицы имеют свои античастицы. В 1936 году в космических лучах были открыты мюон (μ^-) и μ^+ его античастица, а в 1947 - π^- и π^+ - мезоны, составляющие пару частица - античастица; в 1955 в опытах на ускорителе зарегистрирован антипротон, в 1956 — антинейтрон и т. д. К настоящему времени наблюдались античастицы практически всех известных частиц, и не вызывает сомнения, что античастицы имеются у всех частиц. Для некоторых нейтральных частиц, античастица тождественно совпадает с частицей. Это, в частности, фотон, нейтральный пи-мезон, эта-мезон, гравитон и др. Такие частицы называют истинно нейтральными. Подчеркнём, что электрически нейтральные частицы могут и не совпадать со своими античастицами. Это, в частности, касается нейтрона, нейтрино, нейтрального каона и т. д.

Существование и свойства античастиц определяются в соответствии с фундаментальным принципом квантовой теории поля — её инвариантностью относительно CPT-преобразования. Из CPT-теоремы следует, что масса, спин и время жизни частицы и её античастицы должны быть одинаковыми. В частности, стабильным (относительно распада) частицам соответствуют стабильные античастицы (однако в веществе сколько-нибудь длительное существование их невозможно из-за аннигиляции с частицами вещества). Состояния частиц и их античастиц связаны операцией зарядового сопряжения. Поэтому частица и античастица имеют противоположные знаки электрических зарядов (и магнитных моментов), имеют одинаковый изотопический спин, но отличаются знаком его третьей проекции, имеют одинаковые по величине, но противоположные по знаку странность, очарование, красоту и т. д.

Вследствие инвариантности относительно зарядового сопряжения (C-инвариантности) сильного и электромагнитного взаимодействий, связанные соответствующими силами составные объекты из частиц (атомные ядра, атомы) и из античастиц (ядра и атомы антивещества) должны иметь идентичную структуру. Слабое взаимодействие не инвариантно относительно зарядового сопряжения и, следовательно, нарушает симметрию между частицами и античастицами, что проявляется в различии некоторых дифференциальных характеристик их слабых распадов.

Рождение античастиц происходит в столкновениях частиц вещества, разогнанных до энергий, превосходящих порог рождения пары частица-античастица. Античастицы рождаются во взаимодействиях

частиц на ускорителях; хранение образующихся античастиц осуществляют в накопительных кольцах при высоком вакууме. В естественных условиях античастицы рождаются при взаимодействии первичных космических лучей с веществом, например, атмосферы Земли, а также должны рождаться в окрестностях пульсаров и активных ядер галактик. Античастицы возникают при испарении первичных чёрных дыр малой массы. Согласно теории горячей Вселенной, на очень ранних стадиях расширения Вселенной в равновесии с веществом и излучением находились пары частица-античастица всех сортов. В соответствии с моделями великого объединения эффекты нарушения С- и CP-инвариантности в неравновесных процессах с несохранением барионного числа могли привести в очень ранней Вселенной к барионной асимметрии Вселенной даже в условиях строгого начального равенства числа частиц и античастиц. Это даёт физическое обоснование отсутствию наблюдательных данных о существовании во Вселенной объектов из античастиц.

При столкновении частицы со своей античастицей возможна их аннигиляция.

Аннигиляция (лат. *annihilatio* - превращение в ничто, уничтожение) - процесс превращения элементарной частицы и античастицы при их столкновении в другие частицы, например, электрона и позитрона в фотоны.

Замечание. При аннигиляции образуется два фотона (а не один), поскольку в системе центра масс сталкивающихся частиц их суммарный импульс равен нулю, а один рожденный фотон всегда будет иметь ненулевой импульс. Закон сохранения импульса требует рождения, как минимум, двух фотонов с нулевым общим импульсом. Энергия фотонов определяется законом сохранения энергии.

Под антивеществом понимают материю, состоящую из античастиц. Ядра атомов антивещества «построены» из антинуклонов, а внешняя оболочка – из позитронов. Возможность существования антивещества следует из инвариантности законов природы относительно преобразования СРТ (заряда, пространства и времени). Вследствие инвариантности сильного взаимодействия относительно зарядового сопряжения ядерное взаимодействие между антинуклонами совпадает с соответствующим взаимодействием между нуклонами, что обеспечивает существование ядер из антинуклонов («антиядер»). Антиядра обладают массой и энергетическим спектром такими же, как у ядер, состоящих из соответствующих нуклонов. Электрические заряды и магнитные моменты антиядер равны по величине и противоположны по знаку электрическим зарядам и магнитным моментам соответствующих ядер. Вследствие инвариантности электромагнитного взаимодействия электромагнитные переходы в ядрах вещества и антивещества совпадают. Электромагнитное взаимодействие позитронов и ядер антивещества должно приводить к образованию связанных состояний - атомов антивещества, причем атомы антивещества и вещества должны иметь идентичную структуру. Вследствие CP-инвариантности слабого взаимодействия обусловленное им смешивание атомных или ядерных состояний с противоположной четностью одинаково для вещества и антивещества.

Замечание. Эквивалентность материи и антиматерии основывается на законе инвариантности, согласно которому, если у куска вещества одновременно заменить на противоположные все заряды элементарных частиц, направление потока времени и четность, то получившаяся субстанция будет подчиняться тем же самым законам физики. Если эта инвариантность существует, антиводород будет вести себя точно так же, как и водород. В частности, будет поглощать и испускать свет идентичной частоты. Если же его спектр будет различаться, то существующая сейчас стандартная модель физики частиц рассыплется.

Столкновение объекта, состоящего из вещества, с объектом из антивещества приводит к аннигиляции входящих в их состав частиц и античастиц. Аннигиляция медленных электронов и позитронов ведет к образованию гамма-квантов, а аннигиляция медленных нуклонов и антинуклонов - к образованию нескольких пи-мезонов. В результате последующих их распадов образуется жесткое гамма-излучение с энергией гамма-квантов более 70 МэВ.

В экспериментах на ускорителях были зарегистрированы события образования легких антиядер (антиводорода, антидейтерия, антигелия-3) в столкновениях адронов.

На Земле, в Солнечной системе и в непосредственно окружающем Солнечную систему космическом пространстве отсутствует сколько-нибудь заметное количество антивещества. Однако возможность существования макроскопических областей антивещества не является пока окончательно исключенной.