

17. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Элементарными называются наименьшие частицы, не являющиеся атомами или атомными ядрами.

Существование элементарных частиц физики обнаружили при изучении ядерных процессов, поэтому вплоть до середины XX века физика элементарных частиц была разделом ядерной физики. В настоящее время физика элементарных частиц и ядерная физика являются близкими, но самостоятельными разделами физики, объединёнными общностью многих рассматриваемых проблем и применяемыми методами исследования. Главная задача физики элементарных частиц – это исследование природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.

§ 17.1 История развития представлений об элементарных частицах

Представление о том, что мир состоит из фундаментальных частиц, имеет долгую историю. Впервые мысль о существовании мельчайших невидимых частиц, из которых состоят все окружающие предметы, была высказана за 400 лет до нашей эры греческим философом **Демокритом**. Он назвал эти частицы *атомами*, то есть неделимыми частицами. Наука начала использовать представление об атомах только в начале XIX века, когда на этой основе удалось объяснить целый ряд химических явлений. В 30-е годы XIX века в теории электролиза, развитой М. Фарадеем, появилось понятие иона и было выполнено измерение элементарного заряда. Конец XIX века ознаменовался открытием явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г.), а также открытиями *электронов* (Дж. Томсон, 1897 г.) и *α -частиц* (Э. Резерфорд, 1899 г.). В 1900 г немецкий физик Макс Планк выдвинул гипотезу о существовании кванта электромагнитного излучения – *фотона*, которую в 1905 г развил Альберт Эйнштейн. В 1912 г американский физик Р. Милликен, а в 1922 г. Комптон экспериментально подтвердили существование фотонов.

В 1911 году было открыто атомное ядро (Э. Резерфорд) и окончательно было доказано, что атомы имеют сложное строение. В 1919 году Резерфорд в продуктах расщепления ядер атомов обнаружил *протоны*. В 1932 году Дж. Чедвик открыл *нейтрон*. Стало ясно, что ядра атомов, как и сами атомы, имеют сложное строение. Возникла протон-нейтронная теория строения ядер (Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг).

В 1928 году П. Дираком теоретически было предсказано существование *позитрона* – античастицы электрона, а в 1932 году в космических лучах он был обнаружен (К. Андерсон). Позитрон – положительно заряженная частица, имеющая ту же массу и тот же по величине заряд, что и электрон.

В эти же годы были исследованы взаимные превращения протонов и нейтронов и стало ясно, что эти частицы также не являются неизменными элементарными «кирпичиками» природы.

В 1930 г. В. Паули выдвинул гипотезу о существовании *нейтрино*, которые лишь спустя 23 года, в 1953 г были экспериментально обнаружены. Нейтрино – нейтральные частицы, которые благодаря своим необычным свойствам, обладают чудовищной проникающей способностью, они свободно пронизывают Земной шар и при этом практически не взаимодействуют с его веществом.

В 1935 г. Х. Юкавой теоретически было предсказано существование частиц, близких по своим свойствам к электронам. Эти частицы были названы *мюонами* (или *μ -мезонами*), которые в 1937 г были обнаружены в космических лучах. Их масса оказалась в 207 больше массы электрона.

Затем в 1947 г. английский физик С. Пауэлл со своими сотрудниками в космических лучах обнаружил *пионы* (т. е. *π -мезоны*), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между протонами и нейтронами в атомных ядрах.

В 1955 г в ускорителе был обнаружен антипротон, а в 1956 году антинейтрон.

Таким образом, к концу 50-х годов XX века были известны 32 элементарные частицы, причем каждая новая частица была связана с открытием принципиально нового круга физических явлений.

В последующие годы число вновь открываемых частиц стало быстро расти. Этому способствовали исследования космических лучей, развитие ускорительной техники и изучение ядерных реакций.

В 70–80-е годы XX века поток открытых частиц увеличился, среди них появились *странные, красивые, очарованные* частицы, а также *резонансы*.

В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть элементарными. Подавляющее большинство этих частиц являются нестабильными. Исключение составляют лишь фотон, электрон, протон и нейтрино. Все остальные частицы через определенные промежутки времени испытывают самопроизвольные превращения в другие частицы. Нестабильные элементарные частицы сильно отличаются друг от друга по временам жизни. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни свободного нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньшее время. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с.

Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим 10^{-17} с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют относительно стабильными. Большинство короткоживущих элементарных частиц имеют времена жизни порядка (10^{-22} – 10^{-23}) с.

Развитие физики элементарных частиц тесно связано с изучением космического излучения — излучения, приходящего на Землю из космоса.

§ 17.2 Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц

Один из наиболее общих принципов регистрации частицы состоит в следующем. Заряженная частица, двигаясь в нейтральной среде детектора (газ, жидкость, твердое тело, аморфное или кристаллическое), вызывает за счёт электромагнитных сил ионизацию, возбуждение и поляризацию атомов среды. Таким образом, вдоль пути движения частицы появляются свободные заряды (электроны и ионы), возбужденные и поляризованные атомы. Если среда находится в электрическом поле, то в ней возникает электрический ток, который фиксируется в виде короткого электрического импульса.

При переходе возбужденных атомов в исходное состояние, а также возвращении поляризованных атомов в начальное неполяризованное положение излучаются фотоны, которые могут быть зарегистрированы в виде оптической вспышки в видимой или ультрафиолетовой области.

При определенных условиях траекторию свободных электронов и ионов, созданную пролетающей заряженной частицей, можно сделать видимой. Это осуществляется в так называемых **трековых детекторах**.

Нейтральные частицы, такие как нейтрон и нейтрино, непосредственно не вызывают ионизацию и возбуждение атомов среды. Они могут быть зарегистрированы лишь в результате появления вторичных заряженных частиц, возникших в реакциях этих нейтральных частиц с ядрами среды.

Гамма-кванты также регистрируются по вторичным заряженным частицам – электронам и позитронам, возникающим в среде вследствие фотоэффекта, Комптон-эффекта и рождения электрон-позитронных пар.

Приборы, применяемые для регистрации частиц, делятся на две группы:

1. **приборы, позволяющие регистрировать частицы** (сцинтилляционный счётчик, черенковский счётчик, импульсная ионизационная камера, газоразрядный счётчик, полупроводниковый счётчик и др.).
2. **приборы, позволяющие наблюдать следы (треки) частиц в веществе** (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоимпульсии и др.).

Счётчик Гейгера (или счётчик Гейгера-Мюллера) - газонаполненный счётчик заряженных элементарных частиц, электрический сигнал с которого усилен за счёт вторичной ионизации газового объёма счётчика и не зависит от энергии, оставленной частицей в этом объёме. Изобретён в 1908 г. Х. Гейгером и Э. Резерфордом, позднее усовершенствован Гейгером и В. Мюллером (см. рис. 17.1).



Рис. 17.1

Искровая камера – трековый детектор заряженных частиц, в котором трек (след) частицы образует цепочка искровых электрических разрядов вдоль траектории её движения.

В местах прохождения заряженной частицы между пластинами за счёт ионизации ею атомов среды возникают свободные носители зарядов (электроны, ионы), что вызывает искровой пробой (разряд). Совокупность этих последовательных разрядов формирует трек частицы. Этот трек может быть зафиксирован либо оптическими методами (например, сфотографирован), либо электронными.

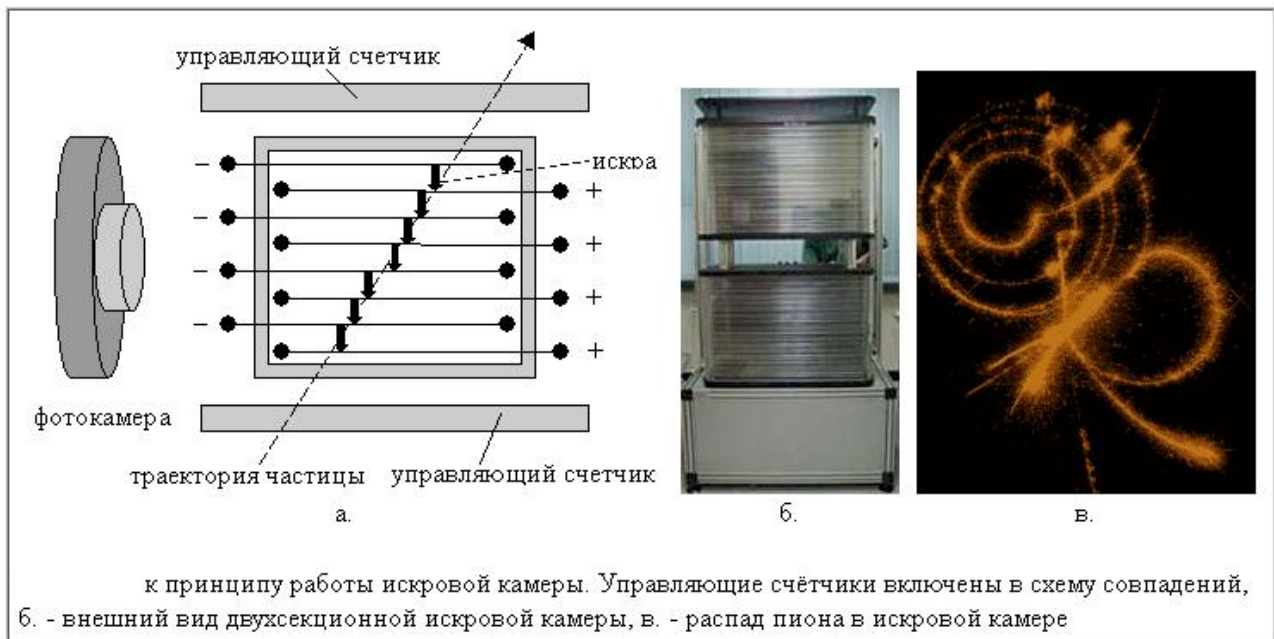


Рис. 17.2

Камера Вильсона – трековый детектор элементарных заряженных частиц, в котором трек (след) частицы образует цепочка мелких капелек жидкости вдоль траектории её движения. Изобретена Ч. Вильсоном в 1912 г. (Нобелевская премия 1927 г.).

В камере Вильсона (см. рис. 17.3) треки заряженных частиц становятся видимыми благодаря конденсации перенасыщенного пара на ионах газа, образованных заряженной частицей. На ионах образуются капли жидкости, которые вырастают до размеров достаточных для наблюдения (10^{-3} - 10^{-4} см) и фотографирования при хорошем освещении.



Рис. 17.3

§ 17.3 Основные свойства элементарных частиц

1. Малые массы и размеры элементарных частиц обуславливают квантовую специфику в их поведении,

2. наиболее важное свойство элементарных частиц – способность рождаться и уничтожаться (то есть испускаться и поглощаться) при взаимодействии с другими элементарными частицами.

Нестабильные частицы распадаются самопроизвольно, а стабильные частицы только при взаимодействии с другими. Примером взаимопревращений может служить **аннигиляция** (т. е. исчезновение) электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением фотонов большой энергии. Может протекать и обратный процесс – рождение электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона с достаточно большой энергией с ядром атома.

3. вероятностный характер в их поведении (они имеют разные схемы распада с разными вероятностями).

Именно вероятностный характер законов не позволяет утверждать наверняка, что произойдет при столкновении двух частиц. Так, при столкновении быстрого протона с нейтроном могут появиться самые разнообразные частицы. Может быть рождено три π -мезона и пара K -мезонов. С тем же успехом π -мезонов может быть пять и т. д. В большой серии одинаковых опытов реализуются все возможности. Вероятности конечных результатов столкновения различны, но все они не равны нулю, если не противоречат законам сохранения. Поэтому всегда можно сказать, что не произойдет, но никогда нельзя заранее утверждать, что же получится в конце реакции.

Ниже приводятся в качестве примера вероятности, с которыми может распадаться K^+ -мезон по различным схемам распада.

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + \mu^- & 63,5 \% \\ \pi^+ + \pi^- & 21,2 \% \\ \pi^+ + \pi^+ - \pi^- & 5,6 \% \\ \text{другие} & 11,7 \% \end{cases}$$

4. у всех элементарных частиц проявляются корпускулярно-волновые свойства,

5. наличие почти у всех частиц соответствующих им **античастиц** (они имеют одинаковые с частицами массу, спин, среднее время жизни, но противоположные по знаку электрический, барионный и лептонный заряды, а так же магнитный момент).

Античастицы отсутствуют лишь у фотона и двух мезонов (π^0 -мезон и η^0 -мезон), вернее сказать, что они с ними просто тождественно равны. Эти частицы называют **истинно нейтральными**.

6. при соприкосновении частицы с соответствующей ей античастицей происходит процесс **аннигиляции** – превращение частиц и античастиц в фотоны и мезоны больших энергий.

(истинно нейтральные частицы не способны к аннигиляции, но испытывают взаимные превращения).

Возможно существование атомов антивещества, ядра которых состоят из антинуклонов (античастиц протонов и нейтронов), а оболочка – из позитронов (античастиц электронов). При аннигиляции вещества с антивеществом энергия покоя превращается в энергию квантов излучения. Это огромная энергия, значительно превосходящая ту, которая выделяется при ядерных и термоядерных реакциях.

Наша наблюдаемая Вселенная состоит из вещества, а антивещество в космических масштабах не наблюдается. По современным представлениям, в первые мгновения образования Вселенной в ней было одинаковое количество вещества и антивещества. Однако распад частиц и античастиц происходит не симметрично по времени, в результате чего во Вселенной осталось только вещество.

§ 17.4 Основные характеристики элементарных частиц

- **заряд** (физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в силовые взаимодействия).

В современной физике различают следующие виды зарядов:

- **Электрический заряд** — количественная характеристика, показывающая степень возможного участия тела в электромагнитных взаимодействиях.
 - **Цветной заряд** — квантовое число в квантовой хромодинамике, приписываемое глюонам и кваркам.
 - **Слабый изоспин** — квантовое число, являющееся зарядом поля слабого взаимодействия.
 - **Барионный заряд** — вспомогательное число, сохраняющееся в определенном классе превращений элементарных частиц, не равное нулю у барионов (> 0) и антибарионов (< 0).
 - **Лептонный заряд** — вспомогательное число, сохраняющееся в определенном классе превращений элементарных частиц, не равное нулю у лептонов (> 0) и антилептонов (< 0).
 - **Гиперзаряд** — вспомогательное число, равное сумме барионного заряда и странности.
- **масса** (физическая характеристика тела, определяющая его гравитационные и инертные свойства),
- **спин** (собственный момент импульса элементарной частицы, имеющий квантовую природу и не связанный с её перемещением в пространстве как целого).

Таблица 17.1

Значение спинов некоторых микрочастиц

Спин, в единицах \hbar	общее название частиц	примеры
0	скалярные частицы	π-мезоны , K-мезоны , хиггсовский бозон , атомы и ядра ^4He , чётно-чётные ядра
1/2	спинорные частицы	электрон , кварки , мюон , тау-лептон , нейтрино , протон , нейтрон , атомы и ядра ^3He
1	векторные частицы	фотон , глюон , W- и Z-бозоны , векторные мезоны
3/2	спин-векторные частицы	Ω-гиперон , Δ-резонансы
2	тензорные частицы	гравитон , тензорные мезоны

На июль 2004 года, максимальным спином среди известных барионов обладает барионный резонанс $\Delta(2950)$ со спином $15/2$. Спин ядер может превышать $20 \hbar$.

- **среднее время жизни** (это среднее время, по истечении которого, нестабильная частица распадается на другие более лёгкие элементарные частицы).

Большинство элементарных частиц являются нестабильными. Например, среднее время жизни μ -мезона равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, нейтрального π -мезона – $0,87 \cdot 10^{-16}$ с. Многие массивные частицы – гипероны – имеют среднее время жизни порядка 10^{-10} с и т.д.

- **схема распада** (показывает с какой вероятностью и на какие частицы может произойти распад данной элементарной частицы).

§ 17.5 Классификация элементарных частиц

В настоящее время общее число известных элементарных частиц (вместе с их античастицами) приближается к 400.

В зависимости от среднего времени жизни τ элементарные частицы подразделяются на:

- **стабильные** (для них не зарегистрированы спонтанные распады)

Пример: электрон ($\tau_e \geq 2 \cdot 10^{22}$ лет), протон ($\tau_p \geq 2 \cdot 10^{32}$ лет), фотон и нейтрино.

- **квазистабильные** (к ним относятся частицы, распад которых происходит за счёт слабых и электромагнитных взаимодействий)

Пример: нейтрон ($\tau_n = 898 \pm 16$ с), а так же часть гиперонов и мезонов со временем жизни $\tau \geq 2 \cdot 10^{-20}$ с.

- **нестабильные частицы** (к ним относятся частицы, распад которых происходит за счёт сильного взаимодействия)

Пример: резонансы ($\tau \approx 10^{-23} \div 10^{-24}$ с).

Все элементарные частицы подразделяются на следующие классы:

1. **фотоны** (эта группа состоит всего из одной частицы-**фотона**-кванта электромагнитного взаимодействия)

2. **лептоны** (частицы, у которых не выявлено наличие внутренней структуры)

Лептоны относятся к лёгким частицам и участвуют в гравитационном, слабом и электромагнитном взаимодействиях (нейтрино участвуют только в слабом взаимодействии, в результате чего имеют огромную проникающую способность, и являются самыми распространёнными частицами во Вселенной. Их приблизительно в 10^9 раз больше, чем протонов и нейтронов вместе взятых).

К лептонам относятся электронное и мюонное нейтрино, электрон, мюон и открытый в 1975 г. тяжёлый лептон — τ -лептон, или таон, с массой примерно **3487 m_e** , а также соответствующие им античастицы. Название лептонов (от греч. «лептос» — лёгкий) связано с тем, что массы первых известных лептонов были меньше масс всех других частиц. К лептонам относится также таонное нейтрино, существование которого в последнее время также установлено.

Всего вместе с античастицами известно 12 лептонов.

- электрон e ,

- мюон μ ,

- тау-лептон τ ,

- электронное нейтрино ν_e

- мюонное нейтрино ν_μ

- тау-нейтрино ν_τ .

- **адроны** (от греч. «адрос» — крупный, сильный. Это частицы, имеющие внутреннюю структуру и состоящие из кварков).

Класс адронов самый многочисленный, он насчитывает более 300 частиц вместе с античастицами.

Адроны делятся на два вида:

- **мезоны** (состоят из двух кварков, имеют целочисленный спин равный нулю и поэтому являются **бозонами**)

- **барионы** (состоят из трёх кварков, имеют полуцелый спин равный $\frac{1}{2}\hbar$ и поэтому являются

фермионами)

Адроны участвуют во всех видах фундаментальных взаимодействий. Характерным признаком сильных взаимодействий является зарядовая независимость ядерных сил, то есть силы, действующие между парами $p - p$, $n - n$ или $p - n$, оказываются одинаковыми. Поэтому

если бы в ядре осуществлялось только сильное взаимодействие, то зарядовая независимость ядерных сил привела бы к одинаковым значениям масс нуклонов (протонов и нейтронов) и всех π -мезонов. Различие в массах нуклонов и соответственно π -мезонов обусловлено ещё и электромагнитным взаимодействием: энергии взаимодействующих заряженных и нейтральных частиц различны, поэтому и массы заряженных и нейтральных частиц оказываются неодинаковыми.

Зарядовая независимость в сильных взаимодействиях позволяет близкие по массе частицы рассматривать как различные зарядовые состояния одной и той же частицы. Так, нуклон образует **дублет** (нейтрон, протон), π -мезоны — **триплет** (π^+ , π^- , π^0) и т. д. Подобные группы «похожих» элементарных частиц, одинаковым образом участвующих в сильном взаимодействии, имеющие близкие массы и отличающиеся зарядами, называют **изотопическими мультиплетами**. Каждый изотопический мультиплет характеризуют изотопическим спином (**изоспином I**) — одной из внутренних характеристик адронов, определяющей число n частиц в изотопическом мультиплете: $n=2I+1$. Тогда изоспин нуклона $I=1/2$ (число членов в изотопическом мультиплете нуклона равно двум), изоспин пиона $I=1$ (в пионном мультиплете $n=3$) и т. д. Изотопический спин характеризует только число членов в изотопическом мультиплете и никакого отношения к рассматриваемому ранее спину не имеет.

Исследования показали, что во всех процессах, связанных с превращениями элементарных частиц, обусловленных зарядово-независимыми сильными взаимодействиями, выполняется **закон сохранения изотопического спина**. Для электромагнитных и слабых взаимодействий этот закон не выполняется. Так как электрон, позитрон, фотон, мюоны, нейтрино и антинейтрино в сильных взаимодействиях участия не принимают, то им изотопический спин не приписывается.

Обилие открытых и вновь открываемых адронов навела ученых на мысль, что все они построены из каких-то других более фундаментальных частиц. В 1964 г. американским физиком М. Гелл-Маном была выдвинута гипотеза, подтвержденная последующими исследованиями, что все тяжелые фундаментальные частицы – адроны – построены из более фундаментальных частиц, названных **кварками**. На основе кварковой гипотезы не только была понята структура уже известных адронов, но и предсказано существование новых. Теория Гелл-Мана предполагала существование трех кварков и трех антикварков, соединяющихся между собой в различных комбинациях. Так, каждый барион состоит из трех кварков, антибарион – из трех антикварков. Мезоны состоят из пар кварк–антикварк.

С принятием гипотезы кварков удалось создать стройную систему элементарных частиц. Однако предсказанные свойства этих гипотетических частиц оказались довольно неожиданными. Электрический заряд кварков должен выражаться дробными числами,

равными $\frac{2}{3}e$ и $\frac{1}{3}e$ элементарного заряда.

Многочисленные поиски кварков в свободном состоянии, производившиеся на ускорителях высоких энергий и в космических лучах, оказались безуспешными. Ученые считают, что одной из причин ненаблюдаемости свободных кварков являются их очень большие массы. Это препятствует рождению кварков при тех энергиях, которые достигаются на современных ускорителях. Тем не менее, большинство специалистов сейчас уверены в том, что кварки существуют внутри тяжелых частиц – адронов.

Таким образом, по современным представлениям:

- мезоны состоят из двух кварков (пары кварк-антикварк).
- барионы состоят из трёх кварков.

В таблице 17.2 представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более 10^{-20} с. Из многих свойств, характеризующих элементарную частицу, в таблице указаны только **масса частицы** (в электронных массах), **электрический заряд** (в единицах элементарного заряда), **момент импульса** (так называемый спин) в единицах постоянной Дирака $\hbar = h / 2\pi$, а также **среднее время жизни частицы τ** .

Таблица 17.2

Основные типы и характеристики элементарных частиц

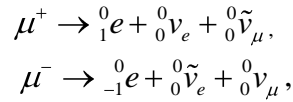
Группа	Название частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)	
		Частица	Античастица					
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно	
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно	
	Электрон	e^-	e^+	1	-1 1	1/2	Стабилен	
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	-1 1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
Адроны	Мезоны	π^0		264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$	
		π^+	π^-	273,1	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	
		K^+	K^-	966,4	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$	
			K^0	\bar{K}^0	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
		Эта-нуль-мезон	η^0		1074	0	0	$\approx 10^{-18}$
	Барions	Протон	p	\bar{p}	1836,1	1 -1	1/2	Стабилен
		Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
		Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$

17.5.1 Мюоны и их свойства

Японский физик Х. Юкава (1907—1981), изучая природу ядерных сил и развивая идеи отечественных ученых И. Е. Тамма и Д. Д. Иваненко об их обменном характере, выдвинул в 1935 г. гипотезу о существовании частиц с массой в 200—300 раз превышающей массу электрона. Эти частицы должны, согласно Юкаве, выполнять роль носителей ядерного взаимодействия, подобно тому, как фотоны являются носителями электромагнитного взаимодействия. К. Андерсон и С. Неддермейер, изучая поглощение жесткого компонента вторичного космического излучения в свинцовых фильтрах с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, обнаружили в 1936 г. частицы массой, близкой к ожидаемой ($207 m_e$). Они были названы впоследствии **мюонами**. Доказано, что жесткий компонент вторичного космического излучения состоит в основном из мюонов, которые, как будет показано ниже, образуются вследствие распада более тяжелых заряженных частиц (π - и K -мезонов). Так как масса мюонов большая, то радиационные потери для них пренебрежимо малы, а поэтому жесткий компонент вторичного излучения обладает большой проникающей способностью.

Существуют положительный (μ^+) и отрицательный (μ^-) мюоны. Заряд мюонов равен элементарному заряду e . Масса мюонов (оценивается по производимому ими ионизационному действию) равна **206,8 m_e** , время жизни μ^+ - и μ^- -мюонов одинаково и равно $2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Исследования изменения интенсивности жесткого компонента вторичного космического излучения с высотой показали, что на меньших высотах потоки мюонов менее интенсивны. Это говорит о том, что мюоны претерпевают самопроизвольный распад, являясь, таким образом, нестабильными частицами.

Распад мюонов происходит по следующим схемам:



где ${}^0_0\nu_\mu$, и ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu$ -соответственно мюонные нейтрино и антинейтрино.

Существование ${}^0_0\nu_\mu$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu$ следует из законов сохранения энергии и импульса.

Дальнейшие эксперименты привели к выводу, что мюоны не взаимодействуют или взаимодействуют весьма слабо с атомными ядрами, иными словами, являются ядерно-неактивными частицами. Мюоны, с одной стороны, из-за ядерной пассивности не могут рождаться при взаимодействии первичного компонента космического излучения с ядрами атомов атмосферы, а с другой — из-за нестабильности не могут находиться в составе первичного космического излучения. Следовательно, отождествить мюоны с частицами, которые, согласно Х. Юкаве, являлись бы носителями ядерного взаимодействия, не удалось, так как такие частицы должны интенсивно взаимодействовать с ядрами. Эти рассуждения и накопленный впоследствии экспериментальный материал привели к выводу о том, что должны существовать какие-то ядерно-активные частицы, распад которых и приводит к образованию мюонов. Действительно, в 1947 г. была обнаружена частица, обладающая свойствами, предсказанными Юкавой, которая распадается на мюон и нейтрино. Этой частицей оказался π -мезон.

17.5.2 Мезоны и их свойства

Английский физик С. Пауэлл (1903—1969) с сотрудниками, подвергая на большой высоте ядерные фотоэмульсии действию космических лучей (1947 г.), обнаружили ядерно-активные частицы — так называемые π -мезоны (от греч. «мезос» — средний), или пионы. В том же году пионы были получены искусственно в лабораторных условиях при бомбардировке мишеней из Be , C и Si α -частицами, ускоренными в синхроциклотроне до 300 МэВ. π -мезоны сильно взаимодействуют с нуклонами и атомными ядрами и, по современным представлениям, обуславливают существование ядерных сил.

Существуют положительный (π^+), отрицательный (π^-) (их заряд равен элементарному заряду электрона) и нейтральный (π^0) мезоны. Масса π^+ - и π^- - мезонов одинакова и равна **273,1 m_e** , масса π^0 -мезона равна **264,1 m_e** . Все пионы нестабильны: время жизни соответственно для заряженных и нейтрального π -мезонов составляет $2,6 \cdot 10^{-8}$ с и $0,8 \cdot 10^{-16}$ с.

Распад заряженных пионов с вероятностью 99,9877 % происходит по схемам:



где мюоны испытывают дальнейший распад по рассмотренным выше схемам. Из схем распада (17.1) и (17.2) следует, что спины заряженных π -мезонов должны быть либо целыми (в единицах \hbar), либо равны нулю. Спины заряженных π -мезонов, по ряду других экспериментальных данных, оказались равными нулю.

Следующим по вероятности каналом распада заряженных пионов является сильно подавленный (с вероятностью 0,0123 %, то есть один распад из 7000 распадов) на электрон или позитрон и соответствующие нейтрино:

- для положительного пиона: $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$,

- для отрицательного пиона: $\pi^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e$.

Причиной подавления электронных распадов по сравнению с мюонными служит сохранение *спиральности* для ультрарелятивистских частиц: кинетическая энергия как электрона, так и нейтрино в этом распаде значительно больше их масс, поэтому их спиральность с хорошей точностью сохраняется.

Нейтральный пион с вероятностью 98,798 % распадается на два γ -кванта:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Распад нейтрального пиона обусловлен электромагнитным взаимодействием, тогда как заряженные пионы распадаются посредством слабого взаимодействия, константа связи которого значительно меньше. Поэтому периоды полураспадов нейтрального и заряженного пионов существенно различаются. Спин π^0 -мезона, так же как и спин π^\pm -мезона, равен нулю.

Исследования в космических лучах методом фотоэмульсий (1949 г.) и изучение реакций с участием частиц высоких энергий, полученных на ускорителях, привели к открытию **K**-мезонов, или каонов, — частиц с нулевым спином и с массами, приблизительно равными **970 m_e**. В настоящее время известно четыре типа каонов: положительно заряженный (**K⁺**), отрицательно заряженный (**K⁻**) и два нейтральных (**K_S⁰** и **K_L⁰**). Время жизни **K**-мезонов лежит в пределах (10^{-8} — 10^{-10}) с в зависимости от их типа.

Существует несколько схем распада **K**-мезонов. Распад заряженных **K**-мезонов происходит преимущественно по схемам

$$\begin{aligned} K^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & K^- &\rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \\ K^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 & K^- &\rightarrow \pi^- + \pi^0, \\ K^+ &\rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e & K^- &\rightarrow e^- + \pi^0 + \nu_e. \end{aligned}$$

Распад нейтральных **K**-мезонов в основном происходит по следующим схемам (в порядке убывания вероятности распада):

для короткоживущих (**K_S⁰**)

$$\begin{cases} K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \\ K_S^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0, \end{cases}$$

для долгоживущих (**K_L⁰**)

$$\begin{cases} K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \nu_e, \\ K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e, \\ K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \mu^- + \nu_\mu, \\ K_L^0 \rightarrow \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu, \\ K_L^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0, \\ K_L^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0. \end{cases}$$

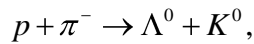
17.5.3 Гипероны. Странность и четность элементарных частиц

В ядерных фотоэмульсиях (конец 40-х годов 20 века) и на ускорителях заряженных частиц (50-е годы 20 века) обнаружены тяжелые нестабильные элементарные частицы массой, большей массы нуклона, названные *гиперонами* (от греч. hyper — сверх, выше). Известно несколько типов гиперонов: лямбда (**Λ⁰**), сигма (**Σ⁰**, **Σ⁺**, **Σ⁻**), кси (**Ξ⁺**, **Ξ⁻**) и омега (**Ω⁻**).

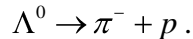
Существование **Ω⁻**-гиперона следовало из предложенной (1961) М. Гелл-Манном (американский физик, Нобелевская премия 1969 г.) схемы для классификации сильно взаимодействующих элементарных частиц. Все известные в то время частицы укладывались в эту схему, но в ней оставалось одно незаполненное место, которое должна была занять отрицательно заряженная частица массой, равной примерно **3284 m_e**. В результате специально

поставленного эксперимента был действительно обнаружен Ω^- -гиперон массой $3273 m_e$. Гипероны имеют массы в пределах (2183—3273) m_e , их спин равен $\frac{1}{2}$ (только спин Ω^- -гиперона равен $\frac{3}{2}$), время жизни приблизительно 10^{-10} с (для Σ^0 -гиперона время жизни равно приблизительно 10^{-20} с). Они участвуют в сильных взаимодействиях, т. е. принадлежат к группе адронов. Гипероны распадаются на нуклоны и легкие частицы (π -мезоны, электроны, нейтрино и γ -кванты).

Детальное исследование рождения и превращения гиперонов привело к установлению новой квантовой характеристики элементарных частиц — так называемой **странности**. Её введение оказалось необходимым для объяснения ряда парадоксальных (с точки зрения существовавших представлений) свойств этих частиц. Дело в том, что гипероны должны были, как представлялось, обладать временем жизни примерно 10^{-23} с, что в 10^{13} раз (!) меньше установленного на опыте. Подобные времена жизни можно объяснить лишь тем, что распад гиперонов происходит в результате слабого взаимодействия. Кроме того, оказалось, что всякий раз гипероны рождаются в паре с K -мезоном. Например, в реакции



с Λ^0 -гипероном всегда рождается K^0 -мезон, в поведении которого обнаруживаются те же особенности, что и у гиперона. Распад же Λ^0 -гиперона происходит по схеме



Особенности поведения гиперонов и K -мезонов были объяснены в 1955 г. М. Гелл-Манном с помощью квантового числа — странности S , которая сохраняется в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий. Если приписать каонам $S = 1$, а Λ^0 и Σ гиперонам $S = -1$ и считать, что у нуклонов и K -мезонов $S = 0$, то сохранение суммарной странности частиц в сильном взаимодействии объясняет как совместное рождение Λ^0 -гиперона с K^0 -мезоном, так и невозможность распада частиц с не равной нулю странностью за счет сильного взаимодействия на частицы, странность которых равна нулю. Ξ -гиперонам, которые рождаются совместно с двумя каонами, приписывают $S = -2$, Ω -гиперонам — $S = -3$.

Из закона сохранения странности следовало существование частиц, таких, как K^0 -мезон, Σ^0 -, Ξ^0 -гипероны, которые впоследствии были обнаружены экспериментально. Каждый гиперон имеет свою античастицу.

Элементарным частицам приписывают еще одну квантово-механическую величину — **чётность** P - квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции элементарной частицы (или системы элементарных частиц) относительно зеркального отражения. Если при зеркальном отражении волновая функция частицы не меняет знака, то чётность частицы $P = +1$ (чётность положительная), если меняет знак, то чётность частицы $P = -1$ (отрицательная).

Из квантовой механики вытекает закон сохранения чётности, согласно которому при всех превращениях, претерпеваемых системой частиц, чётность состояния не изменяется. Сохранение чётности связано со свойством зеркальной симметрии пространства и указывает на инвариантность законов природы по отношению к замене правого левым, и наоборот.

Однако исследования распадов K -мезонов привели американских физиков Т. Ли и Ч. Янга (1956 г.; Нобелевская премия 1957 г.) к выводу о том, что в слабых взаимодействиях закон сохранения чётности может нарушаться. Целый ряд опытов подтвердили это предсказание. Таким образом, закон сохранения чётности, как и закон сохранения странности, выполняется только при сильных и электромагнитных взаимодействиях.

17.5.4 Частицы и античастицы

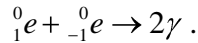
Гипотеза об античастице впервые возникла в 1928 г., когда П. Дирак на основе релятивистского волнового уравнения предсказал существование позитрона, обнаруженного спустя четыре года К. Андерсоном в составе космического излучения. Электрон и позитрон не являются единственной парой частица - античастица. На основе релятивистской квантовой

теории пришли к заключению, что для каждой элементарной частицы должна существовать античастица (принцип зарядового сопряжения).

Эксперименты показывают, что за немногим исключением (например, фотона и π^0 мезона), действительно, каждой частице соответствует античастица.

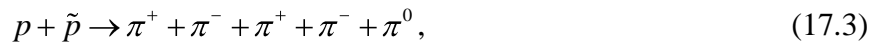
Из общих положений квантовой теории следует, что частицы и античастицы должны иметь одинаковые массы, одинаковые времена жизни в вакууме, одинаковые по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды и магнитные моменты, одинаковые спины и изотопические спины, а также одинаковые остальные квантовые числа, приписываемые элементарным частицам для описания закономерностей их взаимодействия (лептонное число, барионное число, странность, очарование и т. д.). До 1956 г. считалось, что имеется полная симметрия между частицами и античастицами, т. е. если какой-то процесс идет между частицами, то должен существовать точно такой же (с теми же характеристиками) процесс между античастицами. Однако в 1956 г. доказано, что подобная симметрия характерна только для сильного и электромагнитного взаимодействий и нарушается для слабого.

Согласно теории Дирака, столкновение частицы и античастицы должно приводить к их взаимной *аннигиляции*, в результате которой возникают другие элементарные частицы или фотоны. Примером тому является реакция аннигиляции пары электрон — позитрон:



После того как предсказанное теоретически существование позитрона было подтверждено экспериментально, возник вопрос о существовании антипротона и антинейтрона. Расчеты показывают, что для создания пары частица — античастица надо затратить энергию, превышающую удвоенную энергию покоя пары, поскольку частицам необходимо сообщить весьма значительную кинетическую энергию. Для создания $p + \tilde{p}$ -пары необходима энергия примерно 4,4 ГэВ. Антипротон был действительно обнаружен экспериментально (1955) при рассеянии протонов (ускоренных на крупнейшем в то время синхрофазотроне Калифорнийского университета) на нуклонах ядер мишени (мишенью служила медь), в результате которого рождалась пара $p + \tilde{p}$.

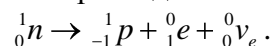
Антипротон отличается от протона знаками электрического заряда и собственного магнитного момента. Антипротон может аннигилировать не только с протоном, но и с нейтроном:



Годом позже (1956) на том же ускорителе удалось получить антинейтрон и осуществить его аннигиляцию. Антинейтроны возникали в результате перезарядки антипротонов при их движении через вещество. Реакция перезарядки протона p состоит в обмене зарядов между нуклоном и антинуклоном и может протекать по схемам



Антинейтрон отличается от нейтрона n знаком собственного магнитного момента. Если антипротоны — стабильные частицы, то свободный антинейтрон, если он не испытывает аннигиляции, в конце концов претерпевает распад по схеме



Античастицы были найдены также для π^+ -мезона, каонов и гиперонов. Однако существуют частицы, которые античастиц не имеют, — это так называемые *истинно нейтральные частицы*. К ним относятся фотон, π^0 -мезон и η^0 -мезон (его масса равна $1074 m_e$, время жизни $7 \cdot 10^{-19}$ с; распадается с образованием π -мезонов и γ -квантов). Истинно нейтральные частицы не способны к аннигиляции, но испытывают взаимные превращения, являющиеся фундаментальным свойством всех элементарных частиц. Можно сказать, что каждая из истинно нейтральных частиц тождественна со своей античастицей.

Большой интерес и серьёзные трудности представляли доказательство существования антинейтрино и ответ на вопрос, являются ли нейтрино и антинейтрино тождественными или различными частицами. Используя мощные потоки антинейтрино, получаемые в реакторах (осколки деления тяжелых ядер испытывают β -распад и испускают антинейтрино). Американские физики Ф. Рейнес и К. Коуэн (1956) надежно зафиксировали реакцию захвата электронного антинейтрино протоном:

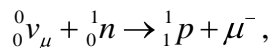


Аналогично зафиксирована реакция захвата электронного нейтрино нейтроном:



Таким образом, реакции (17.8) и (17.9) явились, с одной стороны, бесспорным доказательством того, что ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ — реальные частицы, а не фиктивные понятия, введенные лишь для объяснения β -распада, а с другой — подтвердили вывод о том, что ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ — различные частицы.

В дальнейшем эксперименты по рождению и поглощению мюонных нейтрино показали, что и ${}^0_0\nu_\mu$, и ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu$ — различные частицы. Также доказано, что пара ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\nu_\mu$ — различные частицы, а пара ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ не тождественна паре ${}^0_0\nu_\mu$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu$. Согласно идее Б. М. Понтекорво, осуществлялась реакция захвата мюонного нейтрино (получались при распаде $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) нейтронами и наблюдались возникающие частицы. Оказалось, что захват происходит по схеме



то есть вместо электронов в реакции рождались μ^- -мюоны. Это и подтверждало различие между ${}^0_0\nu_e$, и ${}^0_0\nu_\mu$.

По современным представлениям, нейтрино и антинейтрино отличаются друг от друга одной из квантовых характеристик состояния элементарной частицы — спиральностью, определяемой как проекция спина частицы на направление ее движения (на импульс). Для объяснения экспериментальных данных предполагают, что у нейтрино спин s ориентирован антипараллельно импульсу p , т. е. направления p и s образуют левый винт и нейтрино обладает левой спиральностью (рис. 17.4). У антинейтрино направления p и s образуют правый винт, т. е. антинейтрино обладает правой спиральностью (рис. 17.4). Это свойство справедливо в равной мере как для электронного, так и для мюонного нейтрино (антинейтрино).

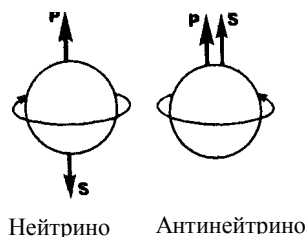


Рис. 17.4

Для того чтобы спиральность могла быть использована в качестве характеристики нейтрино (антинейтрино), масса нейтрино должна приниматься равной нулю. Введение спиральности позволило объяснить, например, нарушение закона сохранения чётности при слабых взаимодействиях, вызывающих распад элементарных частиц и β -распад. Так, μ^+ -мюону приписывают правую спиральность, μ^- -мюону — левую.

После открытия столь большого числа античастиц возникла новая задача — найти антиядра, иными словами, доказать существование антивещества, которое построено из античастиц, так же как вещество из частиц. Антиядра действительно были обнаружены. Первое антиядро — антинейтрон (связанное состояние \tilde{p} и \tilde{n}) — было получено в 1965 г. группой американских физиков под руководством Л. Ледермана. Впоследствии на Серпуховском ускорителе были синтезированы ядра антигелия (1970) и антитрития (1973). Следует, однако, отметить, что возможность аннигиляции при встрече с частицами не позволяет античастицам

длительное время существовать среди частиц. Поэтому для устойчивого состояния антивещества оно должно быть от вещества изолировано. Если бы вблизи известной нам части Вселенной существовало скопление антивещества, то должно было бы наблюдаться мощное аннигиляционное излучение (взрывы с выделением огромных количеств энергии). Однако пока астрофизики ничего подобного не зарегистрировали. Исследования, проводимые для поиска антиядер (в конечном счёте антиматерии), и достигнутые в этом направлении первые успехи имеют фундаментальное значение для дальнейшего познания строения вещества.

17.5.5 Фундаментальные элементарные частицы. Кварки

К фундаментальным частицам относятся лептоны и кварки, которые по современным представлениям не имеют внутренней структуры. В таблице 17.3 приведены некоторые их свойства.

Таблица 17.3

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

Каждый тип кварка имеет еще одно квантовое число - **цвет**, которое может принимать три значения - **красный**, **синий** и **зеленый**. Это чисто условные названия. Главное, что каждый кварк имеет ещё три дополнительных квантовых числа. Гипотеза о существовании цвета у кварков, впервые высказанная в 1965 году независимо Н. Боголюбовым, Б. Струминским, А. Тавхелидзе и М. Ханом, Й. Намбу, была впоследствии подтверждена в большом количестве экспериментов.

Цвет кварков подобен электрическому заряду. Как и электрические заряды, одноимённые цвета отталкиваются, разноимённые притягиваются. Когда три кварка или кварк и антикварк объединяются в адрон, суммарная комбинация цветовых зарядов в нём такова, что адрон в целом обладает цветовой нейтральностью. На малых расстояниях кварки перестают влиять друг на друга и ведут себя как свободные частицы. Но как только расстояние между кварками начинает увеличиваться, сила взаимодействия нарастает. Для разделения двух частиц с цветовыми зарядами понадобилась бы бесконечно большая энергия. Лишь в первые моменты после Большого взрыва существовавшие тогда огромные температуры позволяли свободное существование кварков.

Все фундаментальные частицы группируют в три поколения, каждое из которых состоит из четырех членов:

- в первом поколении – "верхний" и "нижний" кварки, электрон и электронное нейтрино;
- во втором поколении – "очарованный" и "странный" кварки, мюон и мюонное нейтрино;
- в третьем поколении – "истинный" и "прелестный" кварки и тау-частицы со своим нейтрино.

Все обычное вещество состоит из частиц первого поколения. Предполагается, что остальные поколения можно создать искусственно на ускорителях заряженных частиц.

На основе кварковой модели физики разработали простое и изящное решение проблемы строения атомов. Каждый атом состоит из тяжелого ядра (сильно связанных глюонными полями протонов и нейтронов) и электронной оболочки. Число протонов в ядре совпадает с порядковым номером элемента в периодической системе Д.И. Менделеева.

Протон имеет положительный электрический заряд, массу в 1836 раз больше массы электрона, размеры порядка 10^{-15} м. Электрический заряд нейтрона равен нулю. Протон, согласно кварковой гипотезе, состоит из двух "верхних" кварков и одного "нижнего", а нейтрон – из одного "верхнего" и двух "нижних" кварков. Их нельзя представить в виде твердого шарика, скорее, они напоминают облако с размытыми границами, состоящее из рождающихся и исчезающих виртуальных частиц.

§ 17.6 Основные положения составной модели адронов - модели кварков

- все сильновзаимодействующие частицы состоят из кварков, кварки являются фермионами, по современным представлениям они бесструктурны,
- кварки имеют внутренние квантовые числа: электрический заряд q , спин $1/2$, четность P , барионное число B , изоспин I , проекцию изоспина I_3 , странность s , очарование c , красоту b , тяжесть t (совокупность этих внутренних квантовых чисел, характеризующих определенный тип кварка, называется также "ароматом" кварка), цвет,
- квантовые числа кварков определяют характеристики адронов,
- барионы (фермионы с барионным числом $B = 1$) строятся из трех кварков,
- антибарионы (фермионы с барионным числом $B = -1$) строятся из трех антикварков,
- мезоны (бозоны с барионным числом $B = 0$) строятся из кварка и антикварка,
- число цветов кварков равно трем - красный, зеленый, синий,
- известные барионы и мезоны – бесцветны,
- кварки в адронах связаны глюонами,
- кварки участвуют в электромагнитных взаимодействиях, излучая или поглощая γ -квант, при этом не изменяется ни цвет, ни тип (аромат) кварков,
- кварки участвуют в слабых взаимодействиях, излучая или поглощая W^\pm или Z -бозоны, при этом может изменяться тип (аромат) кварка, но цвет кварка при этом остается без изменения,
- кварки участвуют в сильных взаимодействиях, излучая или поглощая глюон g , при этом изменяется цвет кварка, а его тип (аромат) остается неизменным

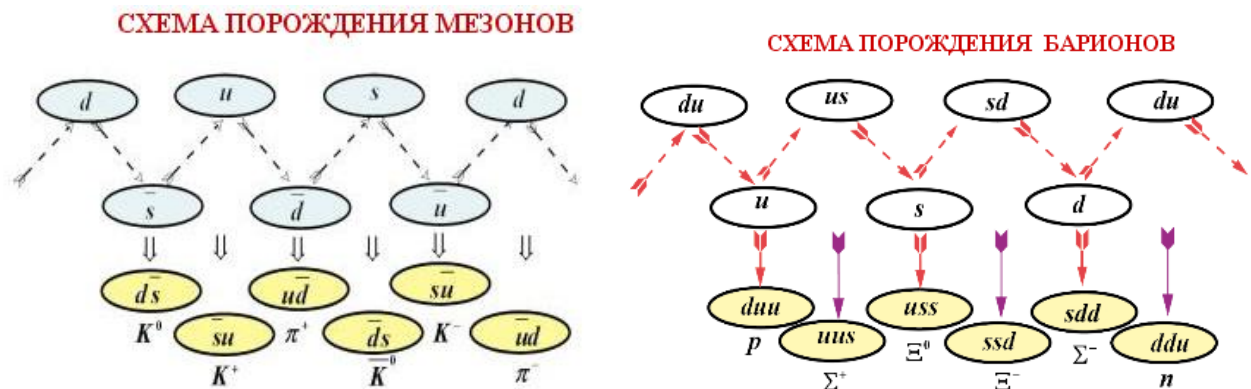


Рис. 17.5

§ 17.7 Причина стабильности некоторых элементарных частиц

То, что фотон и нейтрино стабильны, понять не сложно. Они легче лёгкого. Их масса покоя уже равна нулю, и на более лёгкие частицы они распадаться не могут. Все другие частицы, казалось бы, должны распадаться на фотоны и нейтрино. Закону сохранения энергии это не противоречит. Однако две частицы — электрон и протон — избегают саморазрушения. Почему? Только из-за особых законов сохранения.

Мы не знаем, почему электрический заряд в природе сохраняется. Но зная, что он сохраняется, мы можем понять причину стабильности электронов. Электрон — самая лёгкая из заряженных частиц и по этой причине не может распадаться. Более легкие частицы фотон и нейтрино не заряжены. Распад электрона поэтому неминуемо приводил бы к нарушению закона сохранения заряда. Обеспечение стабильности электрона — самая, пожалуй, большая заслуга этого закона сохранения. Протон не распадается, несмотря на очень большой избыток энергии покоя по сравнению с лёгкими частицами и разнообразные возможности распада на мезоны и лептоны, только потому, что он является самым лёгким из барионов. Стабильность ядер, а значит и всей Вселенной, держится на законе сохранения числа барионов. Этот закон является мощным тормозом для распада протона на другие частицы. Страшно подумать, что было бы без законов сохранения электрического и барионного зарядов. Мир представлял бы собой безрадостное скопище фотонов и нейтрино. Тогда о всём многообразии окружающего нас мира, включая и самого человека, можно было бы забыть!!!

§ 17.8 Типы фундаментальных взаимодействий элементарных частиц

Процессы, в которых участвуют различные элементарные частицы, сильно различаются по характерным временам их протекания и энергиям. Согласно современным представлениям, в природе осуществляется четыре типа взаимодействий, которые не могут быть сведены к другим, более простым видам взаимодействий: *сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное*. Эти типы взаимодействий называют *фундаментальными*.

- **Сильное (или ядерное) взаимодействие** — это наиболее интенсивное из всех видов взаимодействий. Оно обуславливает исключительно прочную связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов, которая лежит в основе существования атомных ядер. Если сильное взаимодействие исчезнет, то произойдёт распад атомных ядер, а, следовательно, и всех атомов и молекул.

В сильном взаимодействии могут принимать участие только тяжелые частицы — адроны (мезоны и барионы). Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях порядка 10^{-15} м, поэтому его называют короткодействующим.

- **Электромагнитное взаимодействие.** В этом виде взаимодействия могут принимать участие любые электрически заряженные частицы. Электромагнитное взаимодействие ответственно, в частности, за существование атомов и молекул. Оно определяет многие свойства вещества в твёрдом, жидком и газообразном состояниях. Кулоновское отталкивание протонов приводит к неустойчивости ядер с большими массовыми числами. Электромагнитное взаимодействие обуславливает процессы поглощения и излучения фотонов атомами и молекулами вещества и многие другие процессы физики микро- и макромира.

Электромагнитную природу имеют фотоэффект, явления ионизации и возбуждения атомов среды быстро движущимися заряженными частицами, процессы расщепления ядер фотонами, реакции фоторождения мезонов, радиационные (с испусканием фотонов) распады элементарных частиц и возбуждённых состояний ядер, упругое и неупругое рассеяние электронов и мюонов на ядерных мишенях и т. п.

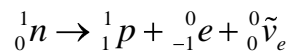
В силу дальнего действия электромагнитное взаимодействие может заметно проявляться и на макроскопическом уровне. К электромагнитному взаимодействию фактически сводится большинство наблюдаемых физических сил: силы упругости в твёрдых телах, силы трения, силы поверхностного натяжения в жидкостях и др. Свойства различных агрегатных состояний вещества, химические превращения веществ также определяются электромагнитным взаимодействием. Это взаимодействие лежит в основе всех наблюдаемых электрических,

магнитных и оптических явлений. Различные проявления электромагнитного взаимодействия широко используются в электротехнике, радиотехнике, электронике.

Интенсивность (или *эффективное сечение*) электромагнитных процессов в микромире определяется безразмерным параметром $a = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$, называемая *постоянной тонкой структуры*. Среди других типов взаимодействий элементарных частиц электромагнитное взаимодействие занимает промежуточное положение как по "силе", так и по числу законов сохранения, которые выполняются при электромагнитных взаимодействиях. Так, характерные времена радиационных распадов элементарных частиц и возбужденных состояний ядер ($10^{-12} - 10^{-20}$ с) значительно превосходят "ядерные" времена (10^{-23} с) и много меньше времён распадов, обусловленных слабым взаимодействием ($10^{-3} - 10^{-13}$ с).

- **Слабое взаимодействие** – наиболее медленное из всех взаимодействий, протекающих в микромире. К слабым взаимодействиям обычно относят все процессы с участием нейтрино или антинейтрино (например, β -распад, μ -распад) и все безнейтринные взаимодействия, меняющие квантовое число — странность. Эти процессы распада, характеризуются довольно большим временем жизни распадающейся частицы ($\tau \geq 10^{-10}$ с).

Слабое взаимодействие ответственно, например, за β -распад нейтрона



Слабое взаимодействие простирается на расстояние порядка $10^{-15} - 10^{-22}$ см и связано главным образом с распадом частиц, например, с происходящими в атомном ядре превращениями нейтрона в протон, электрон и антинейтрино. В соответствии с современным уровнем знаний большинство частиц нестабильны именно благодаря слабому взаимодействию.

В слабом взаимодействии могут принимать участие любые элементарные частицы, кроме фотонов.

- **Гравитационное взаимодействие** присуще всем без исключения частицам, однако из-за малости масс элементарных частиц силы гравитационного взаимодействия между ними пренебрежимо малы и в процессах микромира их роль несущественна.

Гравитационное взаимодействие – самое слабое, не учитываемое в теории элементарных частиц, поскольку на характерных для них расстояниях порядка 10^{-13} см оно дает чрезвычайно малые эффекты. Однако на ультрамалых расстояниях (порядка 10^{-33} см) и при ультрабольших энергиях гравитация вновь приобретает существенное значение. Здесь начинают проявляться необычные свойства физического вакуума. Сверхтяжелые виртуальные частицы создают вокруг себя заметное гравитационное поле, которое начинает искажать геометрию пространства. Гравитационные силы играют решающую роль при взаимодействии космических объектов (звезды, планеты и т. п.) с их огромными массами.

Сильное взаимодействие примерно в 100 раз по интенсивности превосходит электромагнитное и в 10^{14} раз — слабое. Чем сильнее взаимодействие, тем с большей интенсивностью протекают процессы. Так, время жизни частиц, называемых резонансами, распад которых описывается сильным взаимодействием, составляет примерно 10^{-23} с; время жизни π^0 -мезона, за распад которого ответственно электромагнитное взаимодействие, составляет 10^{-16} с; для распадов, за которые ответственно слабое взаимодействие, характерны времена жизни $10^{-10} - 10^{-8}$ с. Как сильное, так и слабое взаимодействия — короткодействующие. Радиус действия сильного взаимодействия составляет примерно 10^{-15} м, слабого — не превышает 10^{-18} м. Радиус действия электромагнитного и гравитационного взаимодействий практически не ограничен.

От силы взаимодействия зависит время, в течение которого совершается превращение элементарных частиц. Ядерные реакции, связанные с сильными взаимодействиями, происходят в течение $10^{-24} - 10^{-23}$ с. Это приблизительно тот кратчайший интервал времени, за который частица, ускоренная до высоких энергий, до скорости, близкой к скорости света, проходит через элементарную частицу размером порядка 10^{-13} см. Изменения, обусловленные

электромагнитными взаимодействиями, осуществляются в течение 10^{-16} - 10^{-19} с, а слабыми (например, распад элементарных частиц) – в основном за 10^{-10} с. По времени различных превращений можно судить о силе связанных с ними взаимодействий.

Без сильных взаимодействий не существовали бы атомные ядра, а звезды и Солнце не могли бы генерировать за счет ядерной энергии теплоту и свет. Без электромагнитных взаимодействий не было бы ни атомов, ни молекул, ни макроскопических объектов, а также тепла и света. Без слабых взаимодействий не были бы возможны ядерные реакции в недрах Солнца и звезд, не происходили бы вспышки сверхновых звезд и необходимые для жизни тяжелые элементы не могли бы распространиться во Вселенной. Без гравитационного взаимодействия не только не было бы галактик, звезд, планет, но и вся Вселенная не могла бы эволюционировать, поскольку гравитация является объединяющим фактором, обеспечивающим единство Вселенной как целого и её эволюцию.

Современная физика пришла к выводу, что все четыре фундаментальных взаимодействия, необходимые для создания из элементарных частиц сложного и разнообразного материального мира, можно получить из одного фундаментального взаимодействия – суперсилы. Наиболее ярким достижением стало доказательство того, что при очень высоких температурах (или энергиях) все четыре взаимодействия объединяются в одно. При энергии в 100 ГэВ (100 млрд. электрон-вольт) объединяются электромагнитное и слабое взаимодействия. Такая температура соответствует температуре Вселенной через 10^{-10} с после Большого взрыва. При энергии 10^{15} ГэВ к ним присоединяется сильное взаимодействие, а при энергии 10^{19} ГэВ происходит объединение всех четырех взаимодействий. Это предположение носит теоретический характер, поскольку экспериментальным путем его проверить невозможно. Косвенно эти идеи подтверждаются астрофизическими данными, которые можно рассматривать как экспериментальный материал, накопленный Вселенной.

В таблице 17.4 приводятся основные свойства фундаментальных взаимодействий.

Таблица 17.4

Основные свойства фундаментальных взаимодействий

Вид взаимодействия	сильное	электромагнитное	слабое	гравитационное
Взаимодействующие частицы	Кварки, нуклоны	Частицы с электрическим зарядом	Кварки, лептоны	Все частицы
Радиус действия	10^{-15} м	∞	10^{-18} м	∞
Относительная интенсивность взаимодействия	10^{38}	10^{36}	10^{26}	1
Частицы-переносчики взаимодействия	Глюоны, Пи-мезоны	фотоны	Промежуточные бозоны	гравитоны

§ 17.9 Обменный характер взаимодействий

В 30-е годы XX века возникла гипотеза о том, что в мире элементарных частиц взаимодействия осуществляются посредством обмена квантами какого-либо поля. Эта гипотеза первоначально была выдвинута нашими соотечественниками И. Е. Таммом и Д. Д. Иваненко. Они предположили, что фундаментальные взаимодействия возникают в результате обмена частицами, подобно тому, как ковалентная химическая связь атомов возникает при обмене валентными электронами, которые объединяются на незаполненных электронных оболочках.

Взаимодействие, осуществляемое путем обмена частицами, получило в физике название **обменного взаимодействия**. Так, например, электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами, возникает вследствие обмена фотонами – квантами электромагнитного поля.

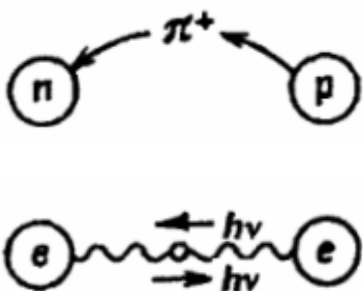
Теория обменного взаимодействия получила признание после того, как в 1935 г. японский физик Х. Юкава теоретически показал, что сильное взаимодействие между нуклонами в ядрах атомов может быть объяснено, если предположить, что нуклоны обмениваются гипотетическими частицами, получившими название мезонов. Х. Юкава вычислил массу этих частиц, которая оказалась приблизительно равной 300 электронным массам. Частицы с такой массой были впоследствии действительно обнаружены. Эти частицы получили название π -мезонов (пионов). В настоящее время известны три вида пионов: π^+ , π^- и π^0 .

В 1957 году было теоретически предсказано существование тяжелых частиц, так называемых векторных бозонов W^+ , W^- и Z^0 , обуславливающих обменный механизм слабого взаимодействия. Эти частицы были обнаружены в 1983 году в экспериментах на ускорителе на встречных пучках протонов и антипротонов с высокой энергией. Открытие векторных бозонов явилось очень важным достижением физики элементарных частиц. Это открытие ознаменовало успех теории, объединившей электромагнитное и слабое взаимодействия в единое так называемое электрослабое взаимодействие. Эта новая теория рассматривает электромагнитное поле и поле слабого взаимодействия как разные компоненты одного поля, в котором наряду с квантом электромагнитного поля участвуют векторные бозоны.

После этого открытия в современной физике значительно возросла уверенность в том, что все виды взаимодействия тесно связаны между собой и, по существу, являются различными проявлениями некоторого единого поля. Однако объединение всех взаимодействий остается пока лишь привлекательной научной гипотезой.

Физики-теоретики прилагают значительные усилия в попытках рассмотреть на единой основе не только электромагнитное и слабое, но и сильное взаимодействие. Эта теория получила название Великого объединения. Ученые предполагают, что и у гравитационного взаимодействия должен быть свой переносчик – гипотетическая частица, названная *гравитоном*. Однако эта частица до сих пор не обнаружена.

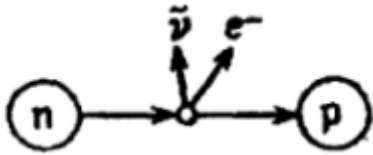
В настоящее время считается доказанным, что единое поле, объединяющее все виды взаимодействия, может существовать только при чрезвычайно больших энергиях частиц, недостижимых на современных ускорителях. Такими большими энергиями частицы могли обладать только на самых ранних этапах существования Вселенной, которая возникла в результате так называемого Большого взрыва (Big Bang). *Космология* – наука об эволюции Вселенной – предполагает, что Большой взрыв произошел 13.5 миллиардов лет тому назад. В стандартной модели эволюции Вселенной предполагается, что в первый период после взрыва температура могла достигать 10^{32} К, а энергия частиц $E = kT$ достигать значений 10^{19} ГэВ. В этот период материя существовала в форме кварков и нейтрино, при этом все виды взаимодействий были объединены в единое силовое поле. Постепенно по мере расширения Вселенной энергия частиц уменьшалась, и из единого поля взаимодействий сначала выделилось гравитационное взаимодействие (при энергиях частиц $\leq 10^{19}$ ГэВ), а затем сильное взаимодействие отделилось от электрослабого (при энергиях порядка 10^{14} ГэВ). При энергиях порядка 10^3 ГэВ все четыре вида фундаментальных взаимодействий оказались разделенными. Одновременно с этими процессами шло формирование более сложных форм материи – нуклонов, легких ядер, ионов, атомов и т. д. Космология в своей модели пытается проследить эволюцию Вселенной на разных этапах ее развития от Большого взрыва до наших дней, опираясь на законы физики элементарных частиц, а также ядерной и атомной физики.



Сильное взаимодействие проявляется между протонами и нейтронами атомных ядер, обеспечивая устойчивость ядра. Это взаимодействие обусловлено обменом *пи-мезонами*.

Истинно сильным взаимодействием является взаимодействие между кварками посредством обмена *глюонами*.

Электромагнитное взаимодействие проявляется между любыми заряженными частицами и телами посредством электромагнитного поля. Это взаимодействие обусловлено обменом *виртуальных фотонов*.



Слабое взаимодействие свойственно всем частицам и отвечает за распад элементарных частиц. Оно обусловлено обменом между частицами, так называемыми, *промежуточными бозонами*.



Гравитационное взаимодействие свойственно всем частицам и телам, но оно самое слабое из всех видов взаимодействий. Считается, что переносчиком гравитационного взаимодействия является *гравитон* – частица со спином равным 2. Экспериментально гравитон пока не обнаружен.

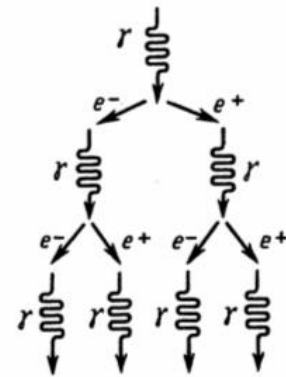
§ 7.10 Законы сохранения в мире элементарных частиц

Сохраняются не только электрический, барионный и лептонный заряды. Есть и другие квантовые числа, которые также сохраняются, но уже не всегда. Для всех типов взаимодействия элементарных частиц выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и электрического заряда. В случае сильного взаимодействия выполняются так же законы сохранения изотопического спина, странности, чётности и очарования.

§ 17.11 Космическое излучение

Космическим излучением называется поток атомных ядер и элементарных частиц высоких энергий, в основном протонов, идущих практически изотропно со всех направлений космического пространства на Землю, и образуемое ими в земной атмосфере вторичное излучение, в котором встречаются практически все известные в настоящее время элементарные частицы.

Обладая колоссальной энергией (в среднем около 10^{10} эВ), частицы космического излучения превосходят по своей проникающей способности все другие виды ядерных излучений. Поток первичного излучения на уровне моря составляет в среднем 175 частиц / $\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Интенсивность и состав космического излучения, а также превращения, испытываемые им в атмосфере, довольно хорошо изучены. Космические частицы, в первую очередь быстрые электроны, дали впервые возможность экспериментального исследования электромагнитных процессов при энергиях, превышающих миллиарды электрон-вольт. В космическом излучении впервые обнаружены многие элементарные частицы (позитроны, пионы, мюоны, К-мезоны и гипероны). Исследование этого весьма слабого по своей интенсивности излучения стимулировали развитие многих новых экспериментальных методов и привели к важнейшим открытиям, существенно расширившим наши представления о природе элементарных частиц, о свойствах космического пространства и процессах в звёздах, в которых генерируются космические лучи.



Космический ливень, образованный высокоэнергетическим γ -квантом

Рис. 17.6

Излучение, приходящее непосредственно из космоса, называют *первичным космическим излучением*. Исследование его состава показало, что первичное излучение представляет собой поток элементарных частиц высокой энергии, причем более 90% из них составляют протоны с энергией примерно 10^9 — 10^{13} эВ, около 7%— α -частицы и лишь небольшая доля (около 1%) приходится на ядра более тяжелых элементов ($Z > 20$). Считается, что ускорение частиц до столь высоких энергий может происходить при столкновении с движущимися межзвездными магнитными полями. Частицы с уникально большими энергиями $T = 10^{20}$ эВ имеют внегалактическое происхождение. Частицы с энергиями меньше $T = 10^{10}$ эВ рождаются

эпизодически на Солнце. Частицы промежуточных энергий рождаются, по-видимому, в нашей Галактике при вспышках сверхновых звёзд.

Попадая в атмосферу, протоны первичного космического излучения вызывают образование вторичного космического излучения, которое в основном представляет собой γ - кванты и электроны.

γ - кванты в электрическом поле ядер атомов атмосферного воздуха рождают электрон-позитронные пары ($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$). Далее электрон и позитрон, сталкиваясь с новыми ядрами, образуют новые γ - кванты в результате «тормозного излучения»: $e^+ + Ze \rightarrow e^+ + Ze + \gamma$. Вторичные γ - кванты вновь генерируют e^+ и e^- - пары и так далее. В результате число таких пар и γ - кванты увеличивается в геометрической прогрессии. Возникает, так называемый, «ливень» частиц. Этот процесс прекращается, когда энергия отдельных γ - квантов становится меньше $2m_e c^2 \approx 1 \text{ МэВ}$ (например, если первоначальный γ - квант имеет энергию $T \approx 10^{14}$ эВ, то «ливень» может достичь поверхности Земли: всего успевает образоваться порядка $10^6 - 10^9$ пар e^+ и e^- и γ - квантов, распределённых по площади на поверхности Земли порядка $(100 - 1000) \text{ м}^2$. Ливни, образованные γ - квантами меньших энергий, не доходит до поверхности Земли).

В 1933 г. Были получены первые фотографии космических ливней, на которых были видны каскады электронов и позитронов.

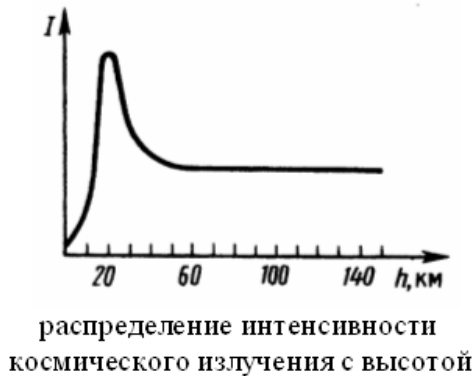


Рис. 17.7

Измерения интенсивности космического излучения, проводимые методами, аналогичными методам регистрации радиоактивных излучений и частиц, приводят к выводу, что его интенсивность быстро растет с высотой, достигает максимума на высоте $h \approx 20$ км, затем уменьшается и с $h \approx 50$ км остается практически постоянной.

При $h \geq 50$ км интенсивность космического излучения постоянна на этих высотах наблюдается лишь первичное излучение.

С приближением к Земле интенсивность космического излучения возрастает, что свидетельствует о появлении вторичного космического излучения,

которое образуется в результате взаимодействия первичного космического излучения с ядрами атомов земной атмосферы. Во вторичном космическом излучении встречаются практически все известные элементарные частицы. В составе вторичного космического излучения можно выделить два компонента: *мягкий* (сильно поглощается свинцом) и *жесткий* (обладает большой проникающей способностью).

Вопросы для самопроверки

1. Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц
2. Основные свойства и характеристики элементарных частиц
3. Классификация элементарных частиц: мюоны, мезоны, гипероны и их свойства.
4. Частицы и античастицы.
5. Фундаментальные элементарные частицы. Кварки
6. Основные положения составной модели адронов - модели кварков.
7. Причина стабильности некоторых элементарных частиц.
8. Космическое излучение, его основные свойства.
9. Типы фундаментальных взаимодействий элементарных частиц.
10. Обменный характер взаимодействий.
11. Законы сохранения в мире элементарных частиц.

§ 17.12 Примеры решения задач.

Задача 17.1 Какая энергия выделится при образовании 1 г гелия ${}^4_2\text{He}$ из протонов и нейтронов?

Решение:

Ядро атома гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Масса атома гелия $M_{\text{He}} = 4.00337 \text{ а.е.м.}$, масса нейтрона $m_n = 1.00897 \text{ а.е.м.}$,

масса протона $m_p = 1.00758 \text{ а.е.м.}$

При образовании атома гелия дефект массы составляет:

$$\Delta m = 2 m_p + m_n - M_{\text{He}} = 0.02923 \text{ а.е.м.}$$

Энергия, выделяющаяся при образовании одного атома гелия,

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931.44 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} = 27.126 \text{ МэВ.}$$

В 1 г гелия содержится атомов: $N = \frac{m}{A_{\text{He}}} N_A = \frac{6.02 \cdot 10^{23}}{4} = 1.504 \cdot 10^{23}$ атомов.

Следовательно, при образовании 1 г гелия выделится энергия

$$E = \Delta E \cdot N = 27.126 \cdot 1.504 \cdot 10^{23} = 40.797 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 65.275 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$$

Ответ: $E = 65.275 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$.

Задача 17.2 При соударении протона с ядром бериллия произошла ядерная реакция ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^6_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$. Найдите энергию этой реакции.

Решение:

Энергия ядерной реакции

$$\Delta E = c^2 \sum M_i - \sum M_k,$$

где $\sum M_i$ - сумма масс частиц, вступивших в реакцию, а $\sum M_k$ - сумма масс образовавшихся частиц.

В нашем случае $\Delta E = c^2 [m_{\text{Be}} + m_{\text{H}} - m_{\text{Li}} + m_{\text{He}}]$, $m_{\text{ядра}} = m_{\text{атома}} - Z m_{\text{электрона}}$,

где масса атома бериллия $m_{\text{Be}} = 8.00531 \text{ а.е.м.}$, масса атома лития $m_{\text{Li}} = 6.01513 \text{ а.е.м.}$,

масса альфа-частицы $m_{\text{He}} = 4.00260 \text{ а.е.м.}$, масса протона ${}^1_1\text{H} = 1.00758 \text{ а.е.м.}$,

масса электрона $m_e = 0.00055 \text{ а.е.м.}$, Z - зарядовое число ядра, $c^2 = 931.4 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}}$.

Подставив числовые значения величин, получим: $\Delta E = 8.6 \text{ МэВ}$

Ответ: $\Delta E = 8.6 \text{ МэВ}$

Задача 17.3 Найдите энергию, выделяющуюся при делении $m=1 \text{ кг}$ урана ${}^{235}_{92}\text{U}$, если при каждом делении ядра урана выделяется $E_0=200 \text{ МэВ}$ энергии.

Решение:

В 1 кг урана содержится ядер $N = \frac{m}{\mu} N_A$,

где $\mu = 235 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ - молярная масса урана, $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ - число Авогадро.

Тогда энергия, выделившаяся при делении 1 кг урана

$$\Delta E = N E_0 = \frac{m}{\mu} N_A E_0 = 5.13 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 8.2 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

Ответ: $\Delta E = 8.2 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$.

Задача 17.4 Найдите энергию, выделяющуюся при реакции термоядерного синтеза гелия из ядер дейтронов, если масса получившегося гелия равна 1 кг.

Решение:

Энергия ядерной реакции

$$\Delta E = c^2 \sum M_i - \sum M_k ,$$

где $\sum M_i$ - сумма масс частиц, вступивших в реакцию, а $\sum M_k$ - сумма масс образовавшихся частиц.

В нашем случае

$$\Delta E = c^2 (2m_d - m_{He}) .$$

Воспользовавшись уравнением термоядерной реакции, получим:

$$\Delta E = (2m_d - m_{He})c^2 \frac{m_{He}}{A_{He}} N_A = 32,4 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 54,72 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$$

Ответ: $\Delta E = 54,72 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$

Задача 17.5 Найти наименьшую энергию γ -кванта, достаточную для осуществления реакции разложения дейтерия γ -лучами ${}^2_1\text{H} + h\nu \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$.

Решение:

Количество теплоты, поглощаемое при реакции

$$Q = c^2 (m_{{}^2_1\text{H}} - (m_{{}^1_1\text{H}} + m_n)) = 9 \cdot 10^{16} (2,0141 - (1,00783 + 1,0086)) \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = -0,035 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} .$$

Для осуществления расщепления дейтерия необходимо, чтобы γ -квант имел энергию $h\nu \geq |Q|$.

В предельном случае, когда $h\nu = |Q|$ γ -квант расщепит ядро, но не сможет сообщить образовавшимся частицам кинетическую энергию. Следовательно,

$$h\nu_{\min} = 0,035 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 2,175 \text{ МэВ} .$$

Ответ: $h\nu_{\min} = 2,175 \text{ МэВ}$.

Задача 17.6 Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле с индукцией 500 мТл и движется по окружности радиусом 10 см. Скорость частицы $2,4 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. Найдите для этой частицы отношение её заряда к массе.

Решение:

В однородном магнитном поле на частицу действует сила Лоренца, которая равна

$$F_l = qvB . \quad (1)$$

Она сообщает частице центростремительное ускорение

$$a_n = \frac{v^2}{R} . \quad (2)$$

По второму закону Ньютона имеем

$$F_l = ma_n . \quad (3)$$

Подставляя (1) и (2) в (3) получим

$$qvB = m \frac{v^2}{R} \quad (4)$$

Из (4) имеем $\frac{q}{m} = \frac{v}{BR}$,

следовательно $\frac{q}{m} = \frac{2,4 \cdot 10^6 \frac{\text{М}}{\text{с}}}{0,3 \text{ Тл} \cdot 0,1 \text{ м}} = 4,8 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Ответ: $\frac{q}{m} = 4,8 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Задача 17.7 При столкновении нейтрона и антинейтрона происходит их аннигиляция, в результате чего возникают два γ -кванта, а энергия частиц переходит в энергию γ -квантов. Определите энергию каждого из возникших γ -квантов, принимая, что кинетическая энергия нейтрона и антинейтрона до их столкновения пренебрежимо мала.

Решение:

Согласно условию задачи уравнение реакции имеет вид: ${}^1_0n + {}^1_0\bar{n} \rightarrow 2\gamma$.

Запишем закон сохранения энергии для релятивистского случая: $T_n + T_{\bar{n}} + E_{0n} + E_{0\bar{n}} = 2E_\gamma$,

где T_n - кинетическая энергия нейтрона до столкновения, $T_{\bar{n}}$ - кинетическая энергия антинейтрона до столкновения, E_{0n} - энергия покоя нейтрона, $E_{0\bar{n}}$ - энергия покоя антинейтрона, E_γ - энергия γ -кванта.

С учётом того, что кинетическая энергия нейтрона и антинейтрона до их столкновения пренебрежимо мала, то есть $T_n = T_{\bar{n}} = 0$ и, учитывая, что $E_{0n} = E_{0\bar{n}} = m_n c^2$, имеем:

$$2m_n c^2 = 2E_\gamma, \text{ следовательно, } E_\gamma = m_n c^2.$$

Подставив табличные значения, получим

$$E_\gamma = m_n c^2 = 1,00866 \text{ а.е.м.} \cdot 931,5 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} = 942 \text{ МэВ}$$

Ответ: $E_\gamma = 942 \text{ МэВ}$.

Задача 17.8 Принимая, что энергия релятивистских мюонов в космическом излучении составляет 1 ГэВ, определите расстояние, проходимое мюонами за время их жизни, если собственное время жизни мюона 2.2 мкс, а энергия покоя 100 МэВ.

Решение:

Увеличение времени жизни релятивистских мюонов в космическом излучении найдём

согласно релятивистской механики по формуле
$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1)$$

А энергию релятивистских мюонов выразим по формуле
$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Из сравнения уравнений (1) и (2) имеем, что $t = t_0 \frac{E}{E_0}$.

Из (2) можно определить скорость релятивистских мюонов в космическом излучении

$$v = c \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}}.$$

Тогда путь, пройденный ими в атмосфере Земли равен
$$l = vt = c \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}} \cdot t_0 \frac{E}{E_0}. \quad (3)$$

Подставив в (3) числовые значения получим $l = 19.8 \text{ км}$.

Ответ: $l = 19.8 \text{ км}$.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 17.1 Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные 0,24 МэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определите энергию ε фотона и соответствующую ему длину волны λ . **Ответ:** $\varepsilon = 0.75 \text{ МэВ}$; $\lambda = 1.65 \text{ нм}$.

Задача 17.2 Нейтральный π -мезон (π^0), распадаясь, превращается в два одинаковых γ -фотона. Определите энергию ε фотона. Кинетической энергией и импульсом мезона пренебречь. **Ответ:** $\varepsilon = 67.5 \text{ МэВ}$.

Задача 17.3 Радиоактивный изотоп ^{2211}Na излучает γ -кванты энергией 1,28 МэВ. Определите энергию W , излучаемую за время 5 мин изотопом натрия массой 5 г. Считать, что при каждом акте распада излучается один γ -фотон с указанной энергией.

Ответ: $W = 70.6 \text{ кДж}$.

Задача 17.4 Определите интенсивность I гамма-излучения на расстоянии 5 см от точечного изотропного радиоактивного источника, имеющего активность 148 ГБк. Считать, что при каждом акте распада излучается в среднем 1,8 γ -фотонов с энергией 0,51 МэВ каждый.

Ответ: $I = 0.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Задача 17.5 Заряженная частица влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0.5 Тл и движется по окружности радиусом 10 см. Скорость частицы 2400 км/с. Найдите для этой частицы отношение её заряда к массе. **Ответ:** $\frac{q}{m} = 4.8 \cdot 10^7 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

Задача 17.6 Позитрон и электрон соединяются, образуя два фотона. Найдите энергию каждого из фотонов, считая, что начальная энергия частиц ничтожно мала. Какова длина волны этих фотонов? **Ответ:** $E = 0.51 \text{ МэВ}$; $\lambda = 2.4 \text{ пм}$.

Задача 17.7 Интенсивность узкого пучка гамма-излучения после прохождения через слой свинца толщиной 4 см уменьшилась в 8 раз. Определите энергию гамма-фотонов и толщину слоя половинного ослабления. **Ответ:** $E_1 = 2 \text{ МэВ}$; $E_2 = 6.2 \text{ МэВ}$; $x_1 = 1.33 \text{ см}$.

Задача 17.8 Вычислите толщину слоя половинного ослабления параллельного пучка гамма-излучения для воды, если линейный коэффициент ослабления равен 0.047 см^{-1} .

Ответ: $x_1 = 14.7 \text{ см}$.

Задача 17.9 Свободный нейтрон радиоактивен. Выбрасывая электрон и антинейтрино, он превращается в протон. Определите суммарную кинетическую энергию всех частиц, возникающих в процессе распада. Принять, что кинетическая энергия нейтрона равна нулю и что масса покоя антинейтрино пренебрежимо мала. **Ответ:** $E = 0.78 \text{ МэВ}$.

Задача 17.10 Определите число слоёв половинного ослабления, уменьшающих интенсивность узкого пучка гамма-излучения в 100 раз. **Ответ:** $N = 6.6$ слоёв.

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Ускорение свободного падения на Земле		$g = 10 \text{ м/с}^2$
Гравитационная постоянная		$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Плотность:	дерево	$\rho = 400 \text{ кг/м}^3$
	воды	$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$
Масса Земли		$M = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Универсальная газовая постоянная		$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Постоянная Больцмана		$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Число Авогадро		$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$
Молярная масса:	азота	$28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	аргона	$40 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	водорода	$2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	воды	$18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	гелия	$4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	кислорода	$32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
	неона	$20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$
Температура кипения воды при нормальном давлении		100°C
Температура плавления льда при нормальном давлении		0°C
Удельная теплоемкость:	воды	$4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$
	льда	$2100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$
Удельная теплота плавления льда		335 кДж/кг
Удельная теплота парообразования воды		2256 кДж/кг
Скорость света в вакууме		$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Коэффициент пропорциональности в законе Кулона		$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
Постоянная Планка		$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Заряд электрона		$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса частиц:	электрона	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \approx 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
	протона	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1,007 \text{ а.е.м.}$
	нейтрона	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1,008 \text{ а.е.м.}$
Энергия покоя:	электрона	$0,5 \text{ МэВ}$
	нейтрона	$939,6 \text{ МэВ}$
	протона	$938,3 \text{ МэВ}$
	ядра бора	$9327,1 \text{ МэВ}$
	ядра дейтерия	$1876,1 \text{ МэВ}$
	ядра трития	$2808,9 \text{ МэВ}$
	ядра бериллия	$8394,9 \text{ МэВ}$
	ядра лития	$6535,4 \text{ МэВ}$
	ядра гелия	$3728,4 \text{ МэВ}$
ядра гелия	$2808,4 \text{ МэВ}$	
1 атомная единица массы эквивалентна		$931,5 \text{ МэВ}$
1 эВ		$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$