

24 Элементарные частицы

24.1 Введение

Def. Элементарные частицы - это субъядерные микрообъекты, которые нельзя разделить на составные части.

Важно понимать, что существует два типа элементарных частиц:

- **Фундаментальные частицы** — частицы, не обладающие внутренней структурой (бесструктурные), которые рассматриваются как первичные и неделимые (например, электрон, нейтрино, кварки).
- **Составные частицы** — частицы, состоящие из кварков и имеющие сложную внутреннюю структуру, но которые невозможно разделить на отдельные части (кварки) из-за явления конфайнмента (например, протоны и нейтроны).

Конфайнмент (от англ. confinement — удержание) — это фундаментальное явление в физике элементарных частиц, заключающееся в невозможности существования кварков в свободном состоянии.



На данный момент открыто более 350 элементарных частиц вместе с их античастицами. Из них стабильны только фотон, электронное и мюонное нейтрино, электрон, протон и их античастицы, в то время как остальные частицы самопроизвольно распадаются.

Элементарные частицы подчиняются двум важным принципам:

St. →

Принцип тождественности — все частицы одного вида во Вселенной полностью одинаковы по своим свойствам.

St. →

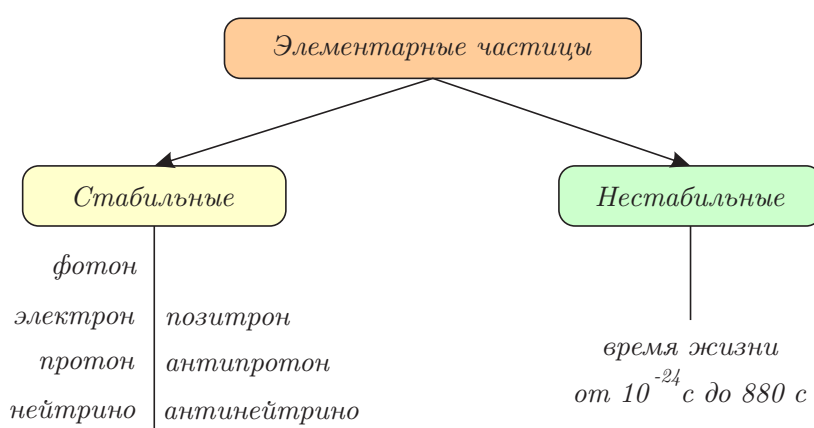
Принцип корпускулярно-волнового дуализма — каждой элементарной частице соответствует волна де Бройля.

Все элементарные частицы обладают свойством взаимопревращаемости, что является следствием их взаимодействий: сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного.

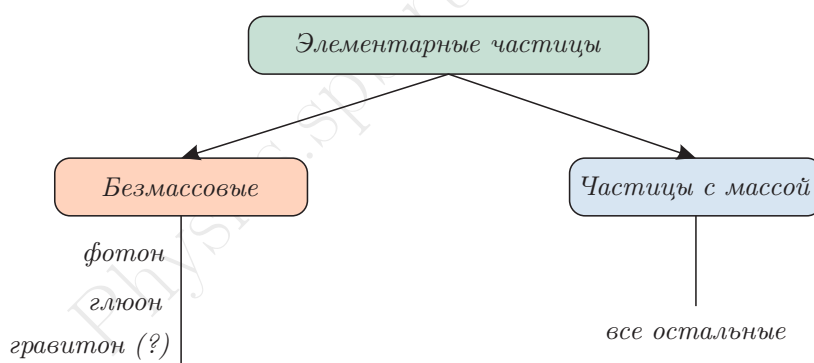
24.1.1 Характеристики элементарных частиц

Элементарные частицы обладают следующими *фундаментальными характеристиками*:

- **Время жизни** — это период, в течение которого вероятность обнаружить частицу в исходном состоянии уменьшается в e раз. Эта характеристика определяет скорость перехода частицы из одного состояния в другое.



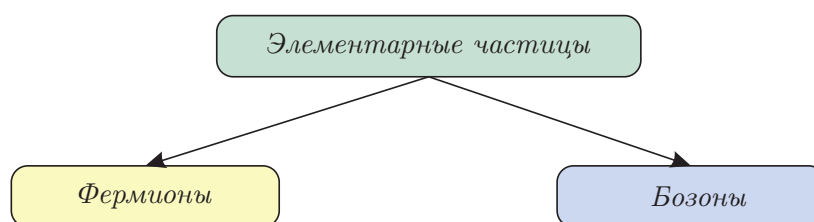
- **Масса** – инертная масса, связана с энергией формулой Эйнштейна $E = mc^2$, поэтому в физике элементарных частиц измеряется в электрон-вольтах(эВ). По массе частицы делят на те, которые не обладают массой покоя (фотон, глюон и гипотетический гравитон) и на те, которые обладают, а это все остальные.



Безмассовые частицы всегда движутся со скоростью света в вакууме, не могут находиться в состоянии покоя. Рождаются в момент излучения и уничтожаются, в момент поглощения. При этом безмассовые частицы участвуют в гравитационном взаимодействии, например их траектория искривляется в сильном гравитационном поле.

- **Электрический заряд** – характеризует способность частицы к электромагнитному взаимодействию, в физике элементарных частиц является безразмерной величиной, т.е. приведен к величине элементарного заряда. Например заряд протона будет равен 1, заряд нейтрона равен 0 и заряд электрона равен -1.
- **Спин** – собственный момент импульса. В отличие от механики, здесь собственный момент импульса не связан с движением частицы в пространстве. Это внутреннее свойство частицы, такое же, как масса или заряд. Еще одно отличие от классической механики, заключается в том, что спин может принимать строго определенные значения – целые или полуцелые числа в единицах приведенной постоянной Планка.

В зависимости от величины спина все элементарные частицы делятся на два класса:



Фермионы – это частицы с полуцелым спином, подчиняются принципу Паули и описываются статистикой Ферми-Дирака. Из фермионов состоит вещество Вселенной. К фермионам относятся протоны, нейтроны, электроны, нейтрино, кварки.

Статистика Ферми-Дирака определяет вероятность заполнения фермионами различных энергетических уровней в системе, находящейся в термодинамическом равновесии. Разработана в 1926 г. Энрико Ферми и Полем Дираком

NB!

Бозоны – это частицы с целым спином, не подчиняются принципу Паули и описываются статистикой Бозе-Эйнштейна. Бозоны являются переносчиками взаимодействия или формируют поля. К бозонам относятся фотоны, глюоны, бозон Хигса и гипотетический гравитон.

Статистика Бозе-Эйнштейна определяет среднее число бозонов, занимающих квантовое состояние с заданной энергией в термодинамическом равновесии. Разработана в 1924 г. Шатьендранатом Бозе для фотонов, затем обобщена Альбертом Эйнштейном на все бозоны (1924–1925 гг.).

NB!

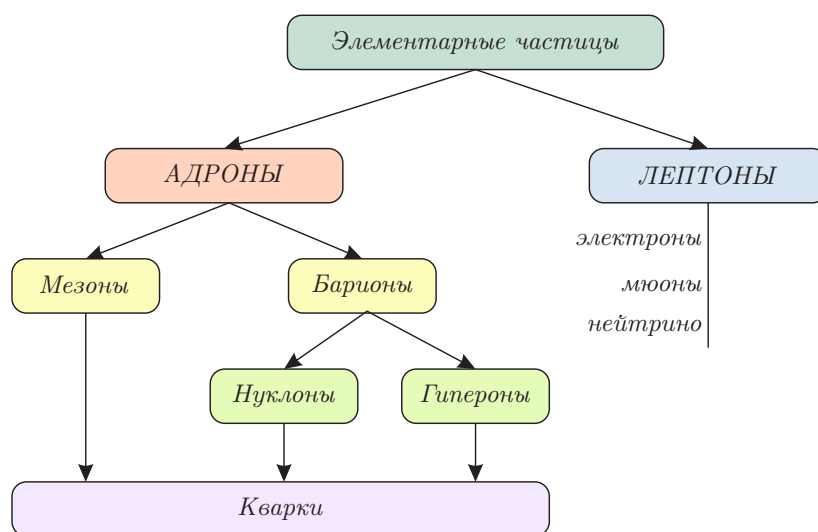
- **Барионный заряд** - если частица относится к барионам, то её барионный заряд равен 1, если нет, то 0. У антибарионов барионный заряд равен -1.
- **Лептонный заряд** - если частица относится к лептонам, то её лептонный заряд равен 1, если нет, то 0. У антилептонов лептонный заряд равен -1.

24.1.2 Классификация по участию в сильном взаимодействии

Классификация элементарных частиц по участию в сильном взаимодействии основана на их способности участвовать в этом типе фундаментального взаимодействия. Сильное взаимодействие – самое интенсивное из четырёх фундаментальных взаимодействий, оно действует на очень коротких расстояниях (порядка 10^{-15} м) и отвечает за связывание кварков в адроны, а также за притяжение между нуклонами в атомных ядрах.

По участию в сильном взаимодействии частицы делятся на две основные группы:

Адроны – частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии. Название происходит от греческого слова *hadros* («большой», «сильный»). Все адроны – составные частицы, состоящие из кварков или антикварков.



Лептоны — частицы, которые не участвуют в сильном взаимодействии. Название происходит от греческого слова leptos («маленький», «лёгкий»). Лептоны считаются фундаментальными (бесструктурными) частицами.

24.2 Лептоны

К лептонам относятся электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие им нейтрино (электронное, мюонное, тау-нейтрино). У каждого лептона есть античастица.

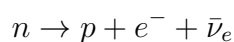
Особенности лептонов:

- не участвуют в сильном взаимодействии, но участвуют в гравитационном, слабом и (для заряженных лептонов) электромагнитном взаимодействиях;
- являются фундаментальными частицами с полуцелым спином (спин 1/2);
- образуют три поколения: первое (электрон и электронное нейтрино), второе (мюон и мюонное нейтрино), третье (тау-лептон и тау-нейтрино).

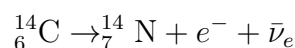
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ										
ЧАСТИЦА		Символ	Масса		Время жизни, с	Спин, ħ	Заряды			Странность
			МэВ	m_e			q	L	B	
ЛЕПТОНЫ	Нейтрино	ν $\bar{\nu}$	0	0	∞	1/2	0	+1	0	-
	Электрон	e^- e^+	0,511	1	∞	1/2	-1	+1	0	-
	Мюон	μ^- μ^+	105,66	206,77	$2,2 \cdot 10^{-6}$	1/2	-1	+1	0	-
	Тау-лептон	τ^- τ^+	1782	3490	$3,5 \cdot 10^{-12}$	1/2	-1	+1	0	-

Лептоны участвуют в электромагнитном (заряженные лептоны) и слабом (все лептоны, включая нейтрино) взаимодействиях. Ниже — типичные примеры реакций.

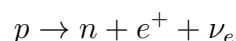
а) **Бета-минус распад** (нейтрон \rightarrow протон):



В ядре свободный нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино. Примером является распад свободного нейтрона или радиоактивных ядер.



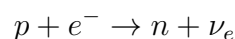
б) Бета-плюс распад (протон \rightarrow нейтрон):



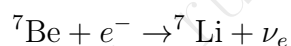
Происходит в ядрах, где протон превращается в нейтрон, позитрон и электронное нейтрино.



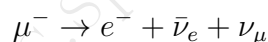
в) Электронный захват (протон + электрон \rightarrow нейтрон):



Протон ядра захватывает орбитальный электрон, превращаясь в нейтрон и испуская нейтрино.



Мюонный распад (мюон \rightarrow электрон):



Отрицательный мюон распадается на электрон, электронное антинейтрино и мюонное нейтрино. Время жизни мюона: $\sim 2,2 \cdot 10^{-6}$ с.

24.3 Кварки

Кварки — фундаментальные частицы, являющиеся элементарными составляющими всех адронов (барионов и мезонов). Они обладают дробным электрическим зарядом, спином 1/2 и участвуют во всех четырёх фундаментальных взаимодействиях: сильном, электромагнитном, слабом и гравитационном.

Идея о существовании кварков возникла в 1960-х годах в контексте попыток систематизировать многочисленные адроны, которые открывались в экспериментах. В 1964 году американский физик Мюррей Гелл-Манн и, независимо от него, Джордж Цвейг предложили кварковую модель. Гелл-Манн ввёл термин «кварки», позаимствовав его из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану».

Первоначальная модель включала три типа кварков: верхний (u), нижний (d) и странный (s). Она позволяла объяснить свойства многих адронов, но в то время не имела прямых экспериментальных подтверждений.

Ключевым экспериментом, который предоставил первые косвенные доказательства существования кварков, стали исследования по глубоко неупругому рассеянию электронов высокой энергии на протонах, проведённые в 1968 году в Стэнфордском центре линейных ускорителей (SLAC). Физики обнаружили, что протон содержит точечные объекты, что указывало на его неэлементарную природу.

Кварки классифицируются по аромату — специфическому квантовому числу, определяющему тип кварка. Известно шесть ароматов кварков:

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ					
КВАРКИ	Символ	Заряды		Спин, \hbar	Странность, S
		q	B		
Верхний (<i>up</i>)	$u \quad \bar{u}$	+2/3	+1/3	1/2	0
Нижний (<i>down</i>)	$d \quad \bar{d}$	-1/3	+1/3	1/2	0
Странный (<i>strange</i>)	$s \quad \bar{s}$	-1/3	+1/3	1/2	-1
Очарованный (<i>charm</i>)	$c \quad \bar{c}$	+2/3	+1/3	1/2	-1
Прелестный (<i>beauty</i>)	$b \quad \bar{b}$	-1/3	+1/3	1/2	0
Истинный (<i>truth</i>)	$t \quad \bar{t}$	+2/3	+1/3	1/2	0

Для каждого аромата кварка существует соответствующая антикварка с противоположными квантовыми числами (заряд, барионное число и т. д.).

Особенности кварков:

- Размер: на современном уровне знаний кварки считаются бесструктурными точечными частицами, их размер не более 10^{-17} см;
- У всех кварков спин равен $1/2$, поэтому кварки относятся к фермионам;
- Масса: сильно различается у разных ароматов. Самый лёгкий — u -кварк (несколько МэВ/ c^2), самый тяжёлый — t -кварк (около 174 ГэВ/ c^2);
- Одной из особенностей кварков является конфайнмент (удержание) — невозможность существования кварков в свободном состоянии. Сильное взаимодействие не позволяет кваркам отделяться друг от друга: при попытке «выбить» кварк из адрона возникает новая частица (например, мезон), так как кварки «порождаются» парами из вакуума;
- Связь кварков в адронах осуществляется за счёт обмена глюонами — безмассовыми частицами, являющимися переносчиками сильного взаимодействия.

24.4 Адроны-барионы

Def. Адроны (от др.-греч. «сильный») — класс составных частиц, подверженных сильному взаимодействию.

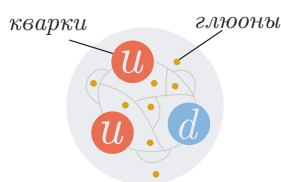
Термин предложен советским физиком Л. Б. Окунем в 1962 году.

Барионы — состоят из **трёх кварков** (qqq) трёх цветов, образующих бесцветную комбинацию. Спин барионов полуцелый ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$ и т. д.) — фермионы, барионное число соответственно $B = +1$ (для антибарионов $B = -1$).

24.4.1 Нуклоны

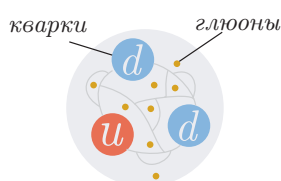
Def. Нуклоны (от лат. *nucleus* — «ядро») — общее название для протонов и нейтронов, частиц, из которых состоят атомные ядра.

Протон (p) состоит из трёх кварков: двух верхних (u) и одного нижнего (d). Таким образом, кварковый состав можно записать, как uud .



$$\begin{aligned} \text{Электрический заряд: } & +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1e \\ \text{Барионное число: } & \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1 \end{aligned}$$

Нейтрон (n) также состоит из трёх кварков: одного верхнего (u) и двух нижних (d). Кварковый состав: udd .



$$\begin{aligned} \text{Электрический заряд: } & +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 \\ \text{Барионное число: } & \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 1 \end{aligned}$$

В нуклонах, кварки в нейтроне удерживаются сильным взаимодействием через обмен глюонами.

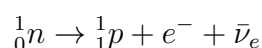


Время жизни свободного нейтрона: $879,4 \pm 0,6$ с (по данным на 2022–2023 г.). Период полураспада: ≈ 611 с.

В составе стабильного атомного ядра нейтрон не распадается — распад энергетически невыгоден и запрещён законами сохранения.

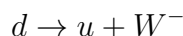


Основная реакция распада свободного нейтрона:

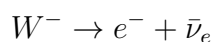


Механизм распада на уровне кварков: нейтрон ($n = udd$) и протон ($p = uud$) отличаются одним кварком. Распад происходит за счёт превращения нижнего кварка (d) в верхний кварк (u):

1. Один из двух нижних кварков (d) нейтрона испускает виртуальный W^- -бозон (переносчик слабого взаимодействия) и превращается в верхний кварк (u):



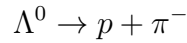
2. Виртуальный W^- -бозон практически мгновенно распадается на электрон и антинейтрино:



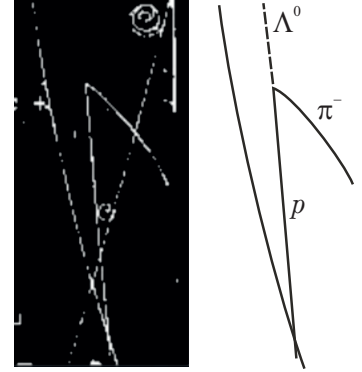
24.4.2 Гипероны

Гипероны были впервые обнаружены в 1947 году Батлером и Рочестером при изучении космических лучей, но их существование было окончательно доказано только в 1951 году.

Первые обнаруженные гипероны назвали лямбда-частицами (Λ), потому что при распаде они давали «вилку» треков (протон + заряженный пион), напоминающую букву Λ :



- сам Λ -гиперон нейтрален, поэтому его трек не виден;
- видны только треки продуктов распада — заряженных частиц;
- точка распада смещена относительно точки рождения, что указывает на относительно долгое время жизни ($2,6 \cdot 10^{-10}$ с).

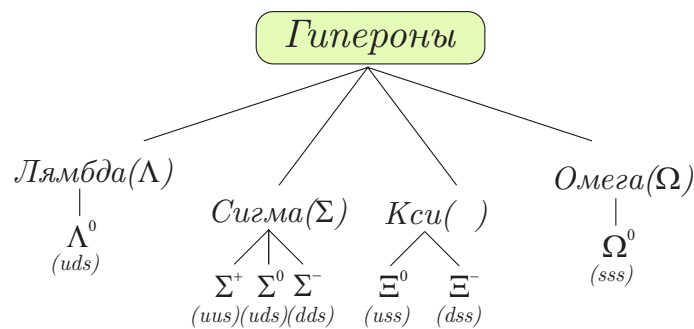


Парадокс заключался в том, что: гипероны рождались в реакциях сильного взаимодействия (следовательно, должны были быстро распадаться, за $< 10^{-20}$ с), но на самом деле жили гораздо дольше.

Объяснение было найдено с введением нового квантового числа — **странности** (S), которая сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но может меняться в слабых. Поэтому распад гиперонов идёт через слабые взаимодействия, что и объясняет их относительно долгое время жизни.

Def. Гиперон – это барион, содержащий один или более странных s -кварков.

Гипероны классифицируются по количеству s -кварков в составе и обозначаются греческими буквами:



Лямбда-гипероны (Λ): состоят из двух легких кварков u и d и содержат один s -кварк. Время жизни: $2,63 \cdot 10^{-10}$ с. Электрический заряд $+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$.

Сигма-гипероны (Σ): также, как и Λ содержит один s -кварк. Время жизни $7,4 \cdot 10^{-20}$ с. Есть три состояния с разными электрическими зарядами:

- $\Sigma^+ = uus$ ($Q = +1$);
- $\Sigma^0 = uds$ ($Q = 0$);

- $\Sigma^- = dds$ ($Q = -1$);

Σ^0 распадается электромагнитно:

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$$

Кси-гипероны (или «каскадные» гипероны, Ξ): содержат два s -кварка и один лёгкий кварк.

Есть два состояния:

- $\Xi^0 = uss$ ($Q = 0$);
- $\Xi^- = dss$ ($Q = -1$);

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$$

Омега-гипероны (Ω): состоят из трех s -кварков. Электрический заряд $-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = -1$

$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$$

Открыты в 1964 году в Брукхейвенской национальной лаборатории. Распад идёт через слабые взаимодействия в несколько этапов.

24.4.3 Краткий итог по барионам.

Барионы — трёхкварковые адроны с барионным числом $B=+1$. Самый известный класс барионов — нуклоны (протоны и нейтроны), образующие ядра атомов. Помимо нуклонов, существуют гипероны, очарованные/прелестные барионы и резонансные состояния. Свойства барионов определяются кварковым составом, спином и квантовыми числами (странность, очарование, прелесть и т. д.).

Единственный стабильный барион — протон; остальные распадаются через слабые или сильные взаимодействия.

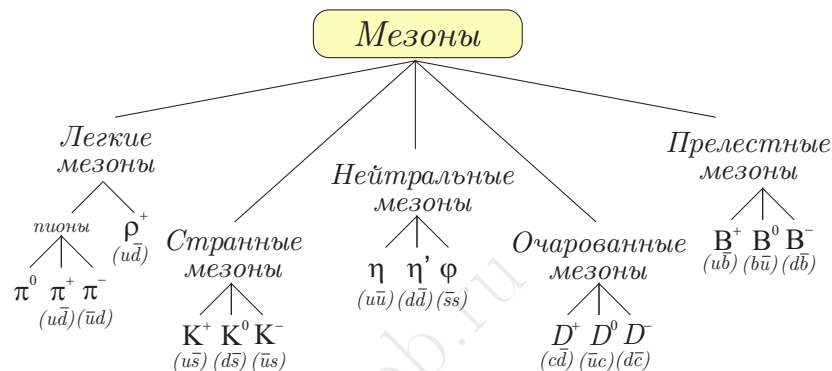
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ											
ЧАСТИЦА			Символ	Масса		Время жизни, с	Спин, \hbar	Заряды			Странность
				МэВ	m_e			q	L	B	
А Д Р О Н Ы	Н У К Л О Н Ы	Протон	p	938,26	1836,1	∞	1/2	+1	0	+1	0
		Нейтрон	n	939,55	1838,6	$\sim 10^8$	1/2	0	0	+1	0
	Г И П Е Р О Н Ы	Лямбда-гиперон	Λ^0	1115	2182	$2,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1	-1
		Сигма-гиперон	Σ^-	1189	2328	$0,8 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	-1
			Σ^0	1179	2342	$1,6 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	-1
	Σ^+		1192	2333	$< 10^{-14}$	1/2	+1	0	+1	-1	
	Кси-гиперон	Ξ^0	1321	2585	$1,7 \cdot 10^{-10}$	1/2	0	0	+1	-2	
		Ξ^-	1314	2572	$3,0 \cdot 10^{-10}$	1/2	-1	0	+1	-2	
	Омега-гиперон	Ω^-	1675	3273	$\sim 10^{-10}$	3/2	-1	0	+1	-3	

24.5 Адроны-мезоны

Def. Мезоны — класс адронов, состоящих из одного кварка и одного антикварка.

Мезоны относятся к бозонам (имеют целый спин: 0, 1, 2 и т. д.) и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Участвуют в сильном взаимодействии, как и все адроны. Барионное число: $B = 0$ (не являются барионной материей). Все мезоны нестабильны, время жизни варьируется от 10^{-8} с (долгоживущие) до 10^{-23} с (резонансы).

Мезоны группируются по составу кварков следующим образом:



24.5.1 Пионы

Рассмотрим π -мезоны, которые принято называть *пионы*. Пионы — это мезоны с наименьшей массой. В 1930-х гг. стало ясно, что электромагнитное и гравитационное взаимодействия не могут объяснить, как нуклоны удерживаются в ядре. В 1935 г. японский физик Хидэки Юкава предложил теорию согласно которой нуклоны взаимодействуют посредством обмена новыми частицами с массой 100-200 МэВ/с².

В 1947 г. группа С. Пауэлла обнаружила пионы в космических лучах с помощью фотоэмульсий. В 1948 г. пионы были получены искусственно на ускорителях.

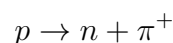
Существует три типа пионов:

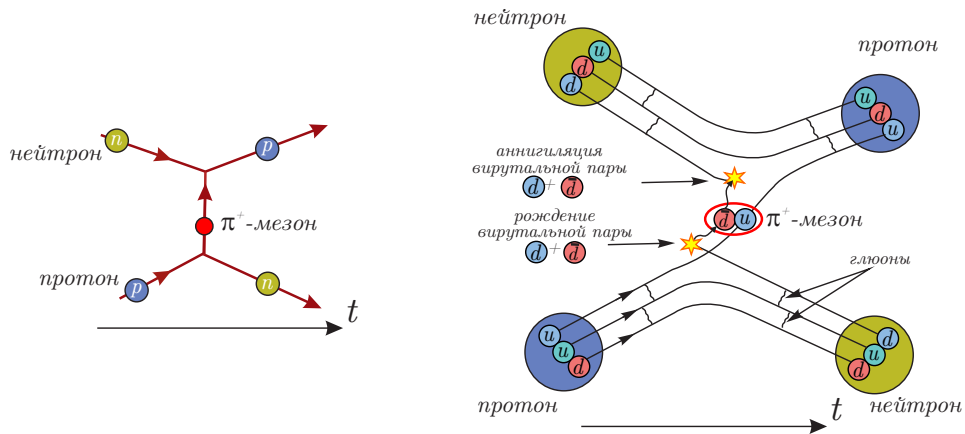
- π^+ — положительный пион: $u\bar{d}$ (верхний кварк + антинижний антикварк);
- π^- — отрицательный пион: $d\bar{u}$ (нижний кварк + антиверхний антикварк);
- π^0 — нейтральный пион: квантовая суперпозиция $\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ (смесь верхнего кварка-антикварка и нижнего кварка-антикварка).

Пионы являются переносчиками остаточного сильного взаимодействия между нуклонами (протонами и нейтронами) в атомном ядре (модель Юкавы) и обеспечивают ядерные силы, удерживающие ядро от распада.

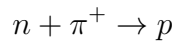
Обмен нуклонов пионами создаёт притяжение между нуклонами на расстояниях 1-2 фм, что объясняет короткодействующий характер ядерных сил.

Протон \leftrightarrow Нейтрон: протон испускает π^+ и становится нейтроном

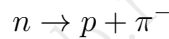




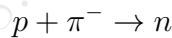
нейтрон поглощает π^+ и становится протоном



Нейтрон \leftrightarrow Протон: нейтрон испускает π^- и становится протоном



протон поглощает π^- и становится нейтроном



Однотипные нуклоны: обмен π^0 между двумя протонами или двумя нейтронами.

24.5.2 Применение пионов

В физике высоких энергий пионы используются для создания пионных пучков на ускорителях, которые применяются для: изучения структуры нуклонов; производства мюонов и нейтрино; медицинских применений (пионная терапия опухолей).

В астрофизике пионы образуются при взаимодействии космических лучей с межзвёздным веществом, порождая гамма-излучение и нейтрино высоких энергий.

В ядерной физике изучение пион-ядерных взаимодействий помогает понять структуру ядер и природу ядерных сил.

24.6 Краткий итог по мезонам

Мезоны играют важную роль в ядерных реакциях и взаимодействиях между нуклонами. Мезоны также играют важную роль в распадах частиц. Например, нейтральный пион π^0 распадается на два фотона (?-кванта), а положительный и отрицательный пионы π^+ и π^- могут распадаться на мюон и мюонное нейтрино или на электрон и электронное антинейтрино. Эти распады являются важными источниками информации о структуре и свойствах мезонов.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ											
ЧАСТИЦА		Символ	Масса		Время жизни, с	Спин, \hbar	Заряды			Странность	
			МэВ	m_e			q	L	B		
А Д Р О Н Ы	М Е З О Н Ы	Пи-мезоны	π^+	139,6	273,2	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	0
			π^-								
			π^0	135	264,2	$8,4 \cdot 10^{-17}$	0	0	0	0	0
		Ка-мезоны	K^+	493,7	966,1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0	+1	0	0	+1
			K^-								
			K^0	497,6	973,8	$8,9 \cdot 10^{-11}$	0	0	0	0	+1
		D-мезоны	D^+	1869,6	3658	$1,0 \cdot 10^{-12}$	0	+1	0	0	0
			D^0	1864,8	3649	$4,1 \cdot 10^{-13}$	0	0	0	0	0
		B-мезоны	B^+	5279,3	10331	$1,6 \cdot 10^{-12}$	0	+1	0	0	0
			B^-								
			B^0	5279,6	10331	$1,5 \cdot 10^{-12}$	0	-1	0	0	0
		Фи-мезон	ϕ^0	1019,5	1995,1	$1,5 \cdot 10^{-22}$	1	0	0	0	0
		Эта-мезон	η^0	547,9	1072,2	$5,0 \cdot 10^{-19}$	0	0	0	0	0

Исследование мезонов и их взаимодействий имеет большое значение для понимания структуры атомных ядер и механизмов ядерных взаимодействий. Эти исследования проводятся в различных областях физики, включая ядерную физику, физику элементарных частиц и физику высоких энергий. Изучение мезонов позволяет ученым лучше понять фундаментальные законы природы и свойства материи на микроскопическом уровне.

24.7 Бозоны - переносчики взаимодействий

Def. Бозоны-переносчики (калибровочные бозоны) — фундаментальные частицы с целым спином, которые являются посредниками фундаментальных взаимодействий между материальными частицами (фермионами). Обмен калибровочными бозонами создаёт силы, управляющие поведением материи на квантовом уровне.

В природе существуют четыре фундаментальных взаимодействия, каждое из которых имеет свой бозон-переносчик.

БОЗОНЫ-ПЕРЕНОСЧИКИ				
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	Бозон	Символ	Масса, МэВ/ c^2	Спин, \hbar
Электромагнитное	фотон	γ	0	1
Слабое	W-бозоны Z-бозоны	W^{+-} Z^0	80,4 91,2	1
Сильное	глюоны	g	0	1
Гравитационное	гравитон ?	?	0	2

Общие свойства калибровочных бозонов:

Все бозоны имеют спин 1 (кроме гипотетического гравитона — спин 2). Принцип неопределённости: виртуальные бозоны могут существовать короткое время $\Delta t \sim \hbar/\Delta E$, что позволяет им переносить силы на конечные расстояния. Безмассовые переносчики (γ , g) \rightarrow бесконечный/большой диапазон действия; массивные переносчики (W , Z) \rightarrow короткий диапазон действия:

Механизм передачи взаимодействия.

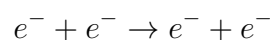
Процесс передачи силы через обмен бозоном можно описать так:

1. Частица-источник испускает виртуальный бозон.
2. Бозон распространяется в пространстве (время жизни ограничено принципом неопределённости).
3. Другая частица поглощает бозон.
4. В результате обмена импульсом и энергией между частицами возникает сила.

Гравитационное взаимодействие осуществляется гипотетическим безмассовым гравитоном. Несмотря на отсутствие экспериментальных подтверждений его существования, общая теория относительности предсказывает, что гравитон отвечает за гравитационное притяжение между материальными объектами, обладающими массой. Это взаимодействие является ключевым фактором в формировании крупномасштабной структуры Вселенной, включая галактики и их скопления, а также в динамике гравитационных волн.

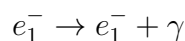
Электромагнитное взаимодействие передаётся безмассовым фотоном, который является квантом электромагнитного поля. Фотон обеспечивает взаимодействие между заряженными частицами и лежит в основе всех электромагнитных явлений, таких как видимый свет, радиоволны, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение. Фотон является центральным объектом квантовой электродинамики, а также играет ключевую роль в квантовой теории поля.

Пример: рассеяние электронов через обмен фотоном:

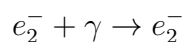


Взаимодействие осуществляется через обмен виртуальным фотоном (γ). Процесс можно описать в три шага:

Шаг 1. Один электрон испускает виртуальный фотон, изменяя свой импульс:



Шаг 2. Второй электрон поглощает этот виртуальный фотон, также изменяя импульс:

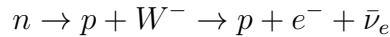


Шаг 3. В результате оба электрона отклоняются от первоначальных траекторий — происходит рассеяние.

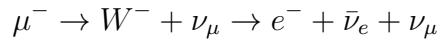
Слабое взаимодействие осуществляется массивными W - и Z -бозонами, которые несут электрический заряд и нейтральность соответственно. Эти бозоны играют фундаментальную роль в процессах нарушения симметрии между кварками и лептонами, таких как бета-распад и нейтринные осцилляции. Они критически важны для формирования структуры атомного ядра и свойств материи, а также для понимания нейтринной астрофизики.

Примеры реакций:

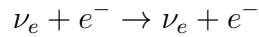
- бета-распад нейтрона:



- распад мюона:

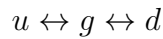


- рассеяние нейтрино:



Сильное взаимодействие переносится безмассовыми глюонами, которые обеспечивают взаимодействие между кварками и адронными частицами. Глюоны играют ключевую роль в формировании структуры адронов, таких как протоны и нейтроны, а также в обеспечении стабильности ядерных сил, что является основой существования атомных ядер и всей материи.

Пример: обмен глюонами между кварками внутри протона:



Бозоны-переносчики взаимодействий подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, что позволяет им занимать одно и то же квантовое состояние при определенных условиях. Это явление приводит к возможности формирования бозонных конденсатов, которые являются предметом интенсивного изучения в квантовой механике и физике конденсированных сред.

Исследование бозонов-переносчиков взаимодействий имеет первостепенное значение для фундаментальной физики, астрофизики, космологии и квантовой теории поля. Их свойства и взаимодействия играют решающую роль в формировании структуры атомного ядра, крупномасштабной структуры Вселенной и фундаментальных законов природы. Эти исследования углубляют понимание природы взаимодействий, лежащих в основе существования материи, и открывают новые возможности для научных исследований и технологических приложений.

24.7.1 Бозон Хигса

В 1964 году британский физик Питер Хиггс (совместно с другими учёными) предположил существование поля, которое заполняет Вселенную и придаёт массу элементарным частицам. Это поле позже назвали полем Хиггса. Теория предсказывала, что у поля должны быть свои кванты — бозоны.

Def. Бозон Хиггса — это элементарная частица, квант поля Хиггса, которое пронизывает Вселенную и придаёт массу фундаментальным частицам (электронам, кваркам и другим), взаимодействующим с ним.

Чем сильнее частица взаимодействует с полем Хиггса, тем больше её масса. Например, фотоны не взаимодействуют с этим полем и остаются безмассовыми, а W- и Z-бозоны сильно с ним взаимодействуют и обретают значительную массу.

4 июля 2012 года в ЦЕРНе (Европейский центр ядерных исследований) официально объявили об открытии новой частицы, которая по своим свойствам соответствовала теоретически предсказанному бозону Стандартной модели.

Открытие бозона Хиггса стало поворотной точкой в физике. Оно завершило Стандартную модель, сделав её наиболее полной и точной на тот момент теорией микромира. Однако Стандартная модель имеет ограничения: она не объясняет гравитацию, тёмную материю и тёмную

энергию, а также некоторые другие явления. Однако Стандартная модель имеет ограничения: она не объясняет гравитацию, тёмную материю и тёмную энергию, а также некоторые другие явления.

Physics.spb.ru