

# ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

## 1. Общие сведения об элементарных частицах

Дать строгое определение понятия *элементарных частиц* оказывается затруднительным. По смыслу, элементарными частицами следует называть микрочастицы, относительно которых нет доказательств, что они являются составными. В качестве первого приближения можно понимать под *элементарными частицами* такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц. Во всех наблюдавшихся до сих пор явлениях каждая такая частица ведёт себя как единое целое. Элементарные частицы могут превращаться друг в друга (протон в нейтрон и наоборот,  $\gamma$ -квант в  $e^-e^+$  и наоборот и т.д.).

В настоящее время общее число известных элементарных частиц (вместе с античастицами) приближается к 400. Пока мы встречались только с электроном  $e^-$  (позитроном  $e^+$ ), протоном  $p$ , нейтроном  $n$ , фотоном  $\gamma$  и электронным (анти) нейтрино  $\nu_e$  ( $\bar{\nu}_e$ ). Эти частицы стабильны или квазистабильны, и они существуют в природе в свободном или слабосвязанном состоянии. Так, квазистабильные нейтроны входят в состав атомных ядер, многие из которых являются абсолютно устойчивыми. Почти все остальные элементарные частицы крайне нестабильны и образуются во вторичном космическом излучении или получают в лаборатории с помощью ускорителей, а затем быстро распадаются, превращаясь в конечном итоге в стабильные частицы. Основные классы элементарных частиц и их наиболее важные представители рассмотрены ниже.

Для описания свойств отдельных элементарных частиц вводится целый ряд физических величин, значениями которых они и различаются. Наиболее известными среди них являются масса, среднее время жизни, спин, электрический заряд, магнитный момент. О других характеристиках частиц, в том числе о зарядах, отличных от электрического, будем говорить по ходу изложения.

Из соотношений неопределенности следует, что для выявления деталей структуры порядка  $\Delta r$  нужно иметь зондирующие частицы с импульсом ( $\Delta p > h/\Delta r$ ). Если принять  $\Delta p = E/c$ , то  $\Delta r = hc/E$ . Современные ускорители позволяют получать частицы с энергией до 1000 ГэВ  $\approx 10^{12}$  эВ. Следовательно, с их помощью можно проникнуть в глубь вещества на расстояние порядка

$$\Delta r \approx (10^{-34} \cdot 10^8) / (10^{12} \cdot 10^{-19}) \approx 10^{-19} \text{ м.}$$

Различают *три уровня микромира*:

- *молекулярно-атомный*:  $E = 1 - 10 \text{ эВ}$ ,  $\Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10} \text{ м.}$
- *ядерный*:  $E = 10^6 - 10^8 \text{ эВ}$ ,  $\Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м.}$
- *элементарные частицы*:  $E > 10^8 \text{ эВ}$ ,  $\Delta r < 10^{-15} \text{ м.}$

## 2. Фундаментальные взаимодействия

Известны *четыре вида взаимодействий* между элементарными частицами: *сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное* (они перечислены в порядке убывания интенсивности). *Интенсивность взаимодействия принято характеризовать так называемой константой взаимодействия  $\alpha$ , которая представляет собой безразмерный параметр, определяющий вероятность процессов, обусловленных данным видом взаимодействия.* Для электромагнитного взаимодействия константа:

$$\alpha = \frac{E}{m_0 c^2},$$

где  $E$  – энергия взаимодействия двух электронов, находящихся на расстоянии  $\lambda$ . Следовательно,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2 m_e c}{\hbar}.$$

Тогда характеристическое отношение имеет вид:

$$\alpha = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}.$$

Константа электромагнитных взаимодействий – безразмерная величина:

$$\alpha = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{ф} \cdot \text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{В}}{\text{Кл} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В}} = 1.$$

Константы других видов взаимодействий определяют относительно значения константы электромагнитного взаимодействия.

Отношение констант даёт относительную интенсивность соответствующих взаимодействий.

**Сильное взаимодействие.** Этот вид взаимодействия обеспечивает связь нуклонов в ядре. Константа сильного взаимодействия имеет величину порядка  $1 \div 10$ . Наибольшее расстояние, на котором проявляется

сильное взаимодействие (радиус действия), составляет примерно  $10^{-15}$  м.

**Электромагнитное взаимодействие.** Константа взаимодействия равна  $1/137 \approx 10^{-2}$  (константа тонкой структуры). Радиус действия не ограничен ( $r = \infty$ ).

**Слабое взаимодействие.** Это взаимодействие ответственно за все виды  $\beta$ -распада ядер (включая  $e$ -захваты), за распады элементарных частиц, а также за все процессы взаимодействия нейтрона с веществом. Константа взаимодействия равна величине порядка  $10^{-10} \div 10^{-14}$ . Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим.

**Гравитационное взаимодействие.** Константа взаимодействия имеет значение порядка  $10^{-38}$ . Радиус действия не ограничен ( $r = \infty$ ). Гравитационное взаимодействие является универсальным, ему подвержены все без исключения элементарные частицы. Однако в процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет. В табл. 1 приведены значения константы разных видов взаимодействия, а также среднее время жизни частиц, распадающихся за счёт данного вида взаимодействия (время распада).

Таблица 1

Тип взаимодействий	Механизм обмена	Интенсивность, $\alpha$	Радиус, $r$ , м	Характерное время жизни, $\tau$ , с
Сильное	глюонами	$\approx 1$	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромагнитное	фотонами	$\approx \frac{1}{137}$	$\infty$	$\approx 10^{-18}$
Слабое	промежуточн. бозонами	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
Гравитационное	гравитонами	$\approx 10^{-38}$	$\infty$	?

### 3. Краткая классификация и свойства частиц

Для того чтобы объяснить свойства и поведение элементарных частиц, их приходится наделять, кроме массы, электрического заряда и типа, рядом дополнительных, характерных для них величин (квантовых чисел), о которых мы поговорим ниже.

**Бозоны и фермионы.** Все частицы (включая и неэлементарные и так называемые квазичастицы) подразделяются на *бозоны* и *фермионы*. Бозоны – это частицы с нулевым или целочисленным спином (фотон,

мезоны и др.). Фермионы – это частицы с полуцелым спином (электрон, мюон, таон, нейтрино, протон, нейтрон и др.).

**Время жизни  $\tau$ .** Практически все элементарные частицы являются нестабильными, распадаясь на другие частицы. По времени жизни различают *стабильные, квазистабильные и так называемые резонансы*. Резонансами называют частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия с временем жизни  $\sim 10^{-23}$  с. Нестабильные частицы с временем жизни, превышающем  $10^{-20}$  с, распадаются за счет электромагнитного или слабого взаимодействия. По сравнению с характерным ядерным временем ( $10^{-23}$  с) время  $10^{-20}$  с следует считать большим. По этой причине их называют квазистабильными. Стабильные частицы ( $\tau \rightarrow \infty$ ) являются только фотон, электрон, протон, нейтрон.

**Переносчики взаимодействия.** Это группа частиц, в которую входят фотоны (переносчики электромагнитного взаимодействия), родственные им W- и Z-бозоны - (переносчики слабого взаимодействия), глюоны - (переносчики сильного взаимодействия) и гипотетические гравитоны (экспериментально эти частицы ещё не обнаружены) – (переносчики гравитационного взаимодействия). Все остальные частицы подразделяют по характеру взаимодействий, в которых они участвуют, на *лептоны и адроны*.

Дадим краткую характеристику четырем классам элементарных частиц.

К одному из них относится только одна частица – *фотон*.

**Фотоны**,  $\gamma$  (кванты электромагнитного поля), участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействием.

Второй класс образуют *лептоны*, третий – *адроны* и, наконец, четвертый – *калибровочные бозоны*

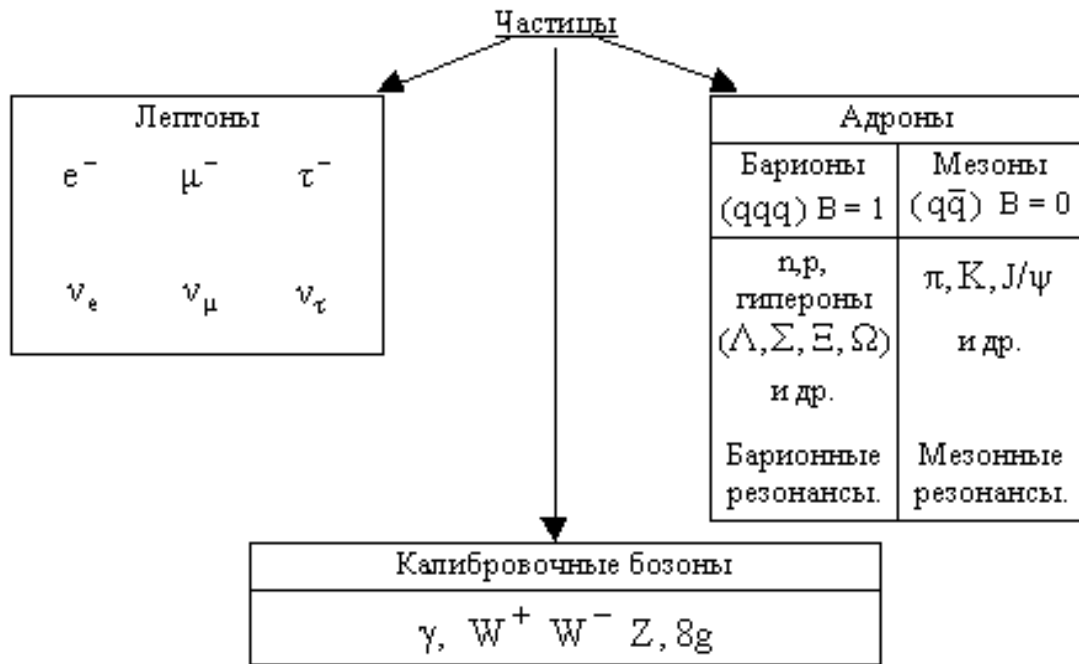


Рис. 10.2

**Лептоны** (греч. «лептос» – лёгкий) – частицы, участвующие в электромагнитных и слабых взаимодействиях. К ним относятся частицы, не обладающие сильным взаимодействием: электроны ( $e^-, e^+$ ), мюоны ( $\mu^-, \mu^+$ ), таоны ( $\tau^-, \tau^+$ ), а также электронные нейтрино ( $\nu_e, \tilde{\nu}_e$ ), мюонные нейтрино ( $\nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu$ ) и тау-нейтрино ( $\nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau$ ). Все лептоны имеют спины, равные  $1/2\hbar$ , и следовательно, являются **фермионами**. Все лептоны обладают слабым взаимодействием. Те из них, которые имеют электрический заряд (т.е. мюоны и электроны), обладают также и электромагнитным взаимодействием. Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях.

**Адроны** (греч. «адрос» – крупный, массивный) – частицы, участвующие в сильных, электромагнитных и слабых взаимодействиях. Сегодня известно свыше сотни адронов и их подразделяют на **барионы** и **мезоны**.

**Барионы** – адроны, состоящие из трёх кварков ( $qqq$ ) и имеющие барионное число  $B = 1$ .

Класс барионов объединяет в себе нуклоны ( $p, n$ ) и нестабильные частицы с массой большей массы нуклонов, получившие название **гиперонов** ( $\Lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^0, \Xi^-, \Omega^-$ ). Все гипероны обладают сильным взаимодействием, и следовательно активно взаимодействуют с атомными ядрами. Спин всех барионов равен  $1/2\hbar$ , так что барионы являются **фермионами**. За исключением протона, все барионы нестабильны. При

распаде бариона, наряду с другими частицами, обязательно образуется барион. Эта закономерность является одним из *проявлений закона сохранения барионного заряда*. К барионам относятся все нуклоны (протоны и нейтроны), гипероны и множество барионных резонансов. За исключением протона все барионы нестабильны.

Нестабильные барионы с массами, большими массы протона и большим временем жизни называют *гиперонами*. Это гипероны  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ,  $\Omega$ . Все гипероны имеют спин  $\frac{1}{2}$  за исключением  $\Omega$ , спин которого  $\frac{3}{2}$ . За время  $\tau \sim 10^{-10} - 10^{-19}$  с они распадаются на нуклоны и легкие частицы ( $\pi$  – мезоны, электроны, нейтрино,  $\gamma$ - кванты).

**Мезоны** – адроны, состоящие из кварка и антикварка ( $q\bar{q}$ ) и имеющие барионное число  $B = 0$ .

Мезоны – сильно взаимодействующие нестабильные частицы, не несущие так называемого барионного заряда. К их числу принадлежат  $\pi$ -мезоны или пионы ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ), К-мезоны или каоны ( $K^+$ ,  $K^-$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ ) и  $\eta$ -мезоны. Массы  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов одинакова и равна  $273,1 m_e$ ,  $m_{\pi^0} \approx 264,1 m_e$  время жизни, соответственно,  $2,6 \cdot 10^{-8}$  и  $0,8 \cdot 10^{-16}$  с. Масса К-мезонов составляет  $970 m_e$ . Время жизни К-мезонов имеет величину порядка  $10^{-8}$  с. Масса эта-мезонов  $1074 m_e$ , время жизни порядка  $10^{-19}$  с. В отличие от лептонов, мезоны обладают не только слабым (и если они заряжены, электромагнитным), но также и сильным взаимодействием, проявляющимся при взаимодействии их между собой, а также при взаимодействии между мезонами и барионами. Спин всех мезонов равен нулю, так что они являются *бозонами*.

**Калибровочные бозоны** – частицы, осуществляющие взаимодействие между фундаментальными фермионами (кварками и лептонами). Это частицы  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  и восемь типов глюонов  $g$ . Сюда же можно отнести и фотон  $\gamma$ .

Сведем для наглядности основную систематику элементарных частиц в таблицу.

Фотоны	Лептоны	Адроны		
		Мезоны	Барионы	
			Нуклоны	Гипероны
$\gamma$	$e, \mu, \tau, \nu$	$\pi, K, \eta$ и резонансы	$p, n$	$\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ и резонансы

### **Частицы и античастицы**

**Частицы и античастицы.** Существование античастиц является универсальным свойством элементарных частиц. Каждой частице соответствует своя античастица: например, электрону  $e^-$  - позитрон  $e^+$ , протону  $p^-$  - антипротон  $p^+$ , нейтрону  $n$  - антинейтрон  $\bar{n}$  и т.д. Позитрон и антипротон отличаются от электрона и протона прежде всего знаком электрического заряда. Антинейтрон отличается от нейтрона знаком магнитного момента.

В общем случае античастица отличается от частицы только так называемых зарядов (электрического, барионного, лептонного, странности), с которыми связаны определенные законы сохранения. Такие характеристики как **масса, спин, время жизни у них одинаковы.**

В некоторых случаях античастица совпадает со своей частицей, т.е. все свойства частицы и античастицы совпадают. Такие частицы называются истинно нейтральными. К ним относятся, например, фотон  $\gamma$ ,  $\pi^0$  - мезон и  $\eta^0$  - мезон.

Понятия частица и античастица относительны. Условились электрон и протон считать частицами, а далее с помощью законов сохранения можно однозначно установить, чем является каждая элементарная частица – частицей или античастицей.

**Аннигиляция и рождение пар.** При встрече любая частица аннигилирует со своей античастицей. Например, при встрече электрона и позитрона происходит их аннигиляция, т.е. превращение их в  $\gamma$ -кванты  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ . *Обратим внимание, что по закону сохранения импульса при этом излучается два  $\gamma$  кванта.*

При аннигиляции тяжелых частиц и античастиц возникают преимущественно  $\pi$ -мезоны (доля  $\gamma$ -квантов мала). Это обусловлено проявлением различных типов взаимодействий: аннигиляция электрона с позитроном вызывается электромагнитным взаимодействием, а аннигиляция тяжелых частиц – адронов – сильным взаимодействием.

Существует процесс, обратный аннигиляции, - рождение пар:  $\gamma$ -квант может породить пару  $e^+e^-$ . Для этого необходимо, чтобы энергия  $\gamma$ -кванта была не меньше собственной энергии пары  $2mc^2$ . Этот процесс может происходить только в поле атомного ядра, иначе будет нарушаться закон сохранения импульса.

Таблица элементарных частиц

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

### Свойства элементарных частиц

Каждая частица описывается набором физических величин – квантовых чисел, определяющих её свойства. Наиболее часто употребляемые характеристики частиц следующие.

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

**Время жизни,  $\tau$ .** В зависимости от времени жизни частицы делятся на *стабильные частицы*, имеющие относительно большое время жизни, и *нестабильные*.

К *стабильным частицам* относят частицы, распадающиеся по слабому или электромагнитному взаимодействию. Деление частиц на стабильные и нестабильные условно. Поэтому к стабильным частицам принадлежат такие частицы, как электрон, протон, для которых в насто-



ящее время распада не обнаружены, так и  $\pi^0$ -мезон, имеющий время жизни  $\tau = 0.8 \cdot 10^{-16}$  с.

К *нестабильным частицам* относят частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия. Их обычно называют *резонансами*. Характерное время жизни резонансов –  $10^{-23}$ – $10^{-24}$  с.

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

**Электрический заряд  $q$ .** Электрический заряд является целой кратной величиной от  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, называемой элементарным электрическим зарядом. Частицы могут иметь заряды 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ .

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

Наряду с общими для всех частиц характеристиками, используют также квантовые числа, которые приписывают только отдельным группам частиц.

**Квантовые числа:** барионное число  $B$ , странность  $s$ , очарование (*charm*)  $c$ , красота (*bottomness* или *beauty*)  $b$ , верхний (*topness*)  $t$ , изотопический спин  $I$  приписывают только сильновзаимодействующим частицам – адронам.

**Лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .** Лептонные числа приписывают частицам, образующим группу лептонов. Лептоны  $e, \mu$  и  $\tau$  участвуют только в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Лептоны  $\nu_e, \nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  участвуют только в слабых взаимодействиях. Лептонные числа имеют значения  $L_e, L_\mu, L_\tau = 0, +1, -1$ . Например,  $e^-$ , электронное нейтрино  $\nu_e$  имеют  $L_e = +1$ ;  $e_\mu^+, \tilde{\nu}_e$  имеют  $L_e = -1$ . Все адроны имеют  $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$ .

**Барионное число  $B$ .** Барионное число имеет значение  $B = 0, +1, -1$ . Барионы, например,  $n, p, \Lambda, \Sigma$  нуклонные резонансы имеют барионное число  $B = +1$ . Мезоны, мезонные резонансы имеют  $B = 0$ , антибарионы имеют  $B = -1$ .

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

**Charm**  $c$ . Квантовое число  $c$  может принимать значения  $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ . В настоящее время обнаружены частицы, имеющие  $c = 0, +1$  и  $-1$ . Например, барион  $\Lambda^+$  имеет  $c = +1$ .

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

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

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

$G$  – **четность** – это квантовое число, соответствующее симметрии относительно одновременной операции зарядового сопряжения  $c$  и изменения знака третьего компонента  $I$  изоспина.  $G$ -четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

## 4. Странные частицы

В начале 50-х годов XX в. было обнаружено, что некоторые из недавно открытых частиц, а именно  $K, \Lambda, \Sigma$ , ведут себя странно в двух отношениях.

- Во-первых, они всегда рождаются парами. Например, реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$  проходит с вероятностью, близкой к 1, а реакция  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$  никогда не наблюдалась. Это казалось тем более странным, что вторая реакция не нарушала ни одного из известных законов сохранения и для её осуществления было достаточно энергии.

- Во-вторых, хотя рождение **странных** частиц (как их стали называть) было обусловлено сильным взаимодействием (т.е. происходило с большой вероятностью), их распады не имели характерного для сильного взаимодействия времени жизни, хотя они и распадались на сильно-взаимодействующие частицы (например  $K \rightarrow 2\pi, \Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$ ). Вместо величин порядка  $10^{-23}$  с, как следовало ожидать для частиц, распадаю-

щихся за счёт сильного взаимодействия, их время жизни оказалось в пределах от  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$  с, что характерно для слабого взаимодействия.

Для объединения этих фактов были введены новое квантовое число **странность** и **новый закон сохранения (странности)**. Так вот в первой реакции странность частиц до реакции совпадает со странностью частиц после реакции, а во второй реакции странность не сохраняется и поэтому эта реакция не идет.

Для объяснения особенностей распада странных частиц предполагается, что странность сохраняется в сильном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии. Следовательно, хотя закон сохранения запрещает распад странных частиц на более лёгкие, нестранные частицы, за счёт сильного взаимодействия, такие распады происходят и за счёт слабого взаимодействия. Но слабые распады происходят гораздо медленнее, что соответствует большим временам жизни.

Сохранение странности оказалось первым примером «частично сохраняющейся величины», странность сохраняется в сильном и не сохраняется в слабом взаимодействии.

## 5. Кварки и очарование

Почти все наблюдаемые частицы принадлежат одному из двух семейств: **лептонам** и **адронам**. Основное различие между ними состоит в том, что адроны не участвуют в сильном взаимодействии, а лептоны участвуют. Другое важное различие состоит в том, что в 60-х годах были известны четыре лептона ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ) и их античастицы и более сотни адронов.

Лептоны считаются элементарными частицами, т.к. они, насколько известно, не распадаются на составные части, не обнаруживают никакой внутренней структуры и не имеют определённого размера. (Попытки определить размеры лептонов показали, что верхний предел составляет  $10^{-18}$  м). С другой стороны, адроны оказались более сложными частицами. Эксперименты показали, что адроны обладают внутренней структурой, и их обилие наводит на мысль, что адроны совсем не элементарны. Для решения этой проблемы М. Гелл-Манн и Г. Цвейг в 1963 г. Независимо друг от друга высказали идею, согласно которой все известные адроны не элементарны, а построены из трёх более фундаментальных точечных объектов, называемых **кварками**. Подобно лептонам кварки представляют собой **истинно элементарные частицы**. Три «сорта» кварков были обозначены буквами

u (up – вверх),

d (down – вниз),  
s (strange – странный).

Предполагается, что кварки имеют дробный электрический заряд (равный  $1/3$  или  $2/3$  заряда электрона, т.е. меньше заряда, который раньше считался минимальным). Все известные в то время адроны теоретически можно было построить из кварков трёх видов: u, d, s. Мезоны состоят из сочетания кварк-антикварк. Например,  $\pi^+$ -мезон представляет собой пару ud. Барионы состоят из трёх кварков. Например, нейтрон  $n = ddu$ , а антипротон  $\bar{p} = uud$ .

Вскоре после появления гипотезы кварков физики занялись поиском этих частиц с дробным знаком. Хотя имеются новейшие экспериментальные доказательства их существования, непосредственно обнаружить кварки не удалось. Было высказано предположение, что кварки очень сильно связаны и не существуют в свободном состоянии (заключены в адронах).

В 1964 г. ряд физиков высказали предположение о существовании четвертого кварка. Они основывались на глубокой симметрии природы, включая связь кварков и лептонов. Если существуют (как считали в 60-х годах) четыре лептона, то и кварков должно быть четыре.

Четвертый кварк получил название **очарованный**. Его электрический заряд должен быть равен  $2/3e$ . Кроме того, этот кварк должен обладать ещё одним свойством, отличающим его от трёх остальных кварков. Это новое свойство, или квантовое число, было названо **очарованием**. Предполагалось, что очарование ведёт себя подобно странности: сохраняется в сильном и электромагнитном взаимодействии и не сохраняется в слабом взаимодействии. У нового очарованного кварка  $c = +1$ , у его антикварка  $c = -1$ .

Между тем до 1974 г. необходимости в очарованном кварке не возникало. В этом году был открыт тяжёлый  $J/\Psi$ -мезон: его масса 3100 МэВ. Для объяснения существования этого тяжёлого мезона и других тяжёлых мезонов, которые были открыты позже, и понадобился очарованный кварк.

После открытия (экспериментального)  $\tau$ -лептона с массой 178 МэВ и соответствующего  $\nu_\tau$ -семейства лептонов стало насчитываться шесть частиц (и шесть античастиц). Исходя из закона предположили существование ещё двух кварков: b-кварки (*bottom* – низ или *beauty* – красивый) и t-кварки (*top* – верх или *truth* – истинное). Соответственно, новые свойства (квантовые числа), отличающие новые кварки от ранее известных, называются t и b-свойствами или **истиной** и **красотой**.

Вскоре после возникновения модели кварков было выдвинуто предположение, что кварки обладают ещё одним свойством (или качеством), которое получило название *цвет*. Различие между пятью и шестью кварками  $u, d, s, c, b, t$  стали называть *ароматом*. Согласно существующим представлениям, каждый из ароматов кварка может иметь три цвета, обычно обозначаемых как *красный*, *зеленый* и *синий*. Цвета антикварков называются, соответственно антикрасный, антизеленый и антисиний. Барионы содержат три кварка – по одному каждого цвета; мезоны состоят из пары кварк-антикварк определенного цвета и соответствующего антицвета, поэтому и барионы, и мезоны оказываются «белыми» или «бесцветными».

Первоначально цвета кварков были введены для того, чтобы удовлетворить принципу Паули для частиц со спинами  $1/2$  (или любым полужелым спином, например,  $3/2, 5/2$  и т. д.), таким как электрон или нуклон. Т.к. спин кварков равен  $1/2$ , они должны подчиняться принципу Паули. Но у трёх барионов  $uud, ddd, sss$  все три кварка имели бы одинаковые квантовые числа и по крайней мере у двух из них спины имели бы одинаковое направление (т.к. существует только два возможных направления спина  $+1/2$  и  $-1/2$ ). Это означало бы нарушение принципа Паули. Но если бы кварки обладали дополнительным числом (цветом), которое у каждого кварка принимало своё значение, то кварки могли бы различаться этим квантовым числом и принцип Паули не нарушался бы. Хотя цвет кварков и связанное с ним (троекратное) увеличение числа кварков были введены искусственно, это позволило улучшить согласие теории с экспериментом и, в частности, предсказать правильное время жизни  $\pi^0$ -мезона. Кроме того, представление в цвете вскоре стало центральным моментом теории, поскольку именно с цветом стали связывать взаимодействие, удерживающее кварки в адроне. Каждому кварку приписывается *цветовой заряд*, аналогичный электрическому заряду, сильное взаимодействие между кварками часто называют *цветовым взаимодействием*. Новая теория сильного взаимодействия получила название *квантовой хромодинамики* («хрома» – цвет).

Считается, что сильное взаимодействие адронов сводится к взаимодействию составляющих его кварков. Частицы, переносящие взаимодействие, называются *глюонами* (от англ. glue – клей). Согласно теории существует восемь глюонов – все с нулевой массой покоя, часть из них имеют цветовой заряд. Таким образом, глюоны пришли на смену мезонам в качестве частиц, переносящих сильное взаимодействие (цветовое). Переносчиками слабого взаимодействия являются  $W^\pm$ – и  $Z^0$ –

частицы. Это взаимодействие обусловлено слабым зарядом, которым обладает каждая частица.

*Таким образом, у каждой элементарной частицы есть электрический заряд, слабый заряд, цветовой заряд и гравитационная масса* (хотя одна или даже несколько из этих характеристик могут быть равны нулю). Например, цветовой заряд всех лептонов равен нулю, поэтому они не участвуют в сильном взаимодействии.

Резюмируя все выше изложенное, можно сделать вывод, что в современных теориях истинно элементарными частицами являются фотоны, лептоны, кварки, глюоны,  $W^{\pm}$  – и  $Z^0$  – частицы. До сих пор наблюдались только комбинации кварков (барионы, мезоны). Весьма вероятно, что кварки не существуют в свободном состоянии. С другой стороны, некоторые физики считают, что лептоны и кварки не являются фундаментальными частицами, а состоят из ещё более фундаментальных частиц.

В 1968 г. эксперименты с глубоко неупругим рассеянием частиц на [Стэнфордском линейном ускорителе](#) (SLAC) показали, что протон состоит из каких-то точечноподобных объектов и потому не является элементарной (неразложимой на части) частицей.

Существование магнитного момента у нейтрона – частицы, не имеющей электрического заряда, – также указывает на то, что эта частица вряд ли элементарна и, скорее всего, построена из других частиц, в том числе и из имеющих электрический заряд.

Большое число элементарных частиц и в особенности адронов уже в начале 1950-х годов побудило физиков заняться поиском закономерностей в распределении их масс и других квантовых чисел. Эти поиски привели американского физика М. Гелл-Мана к гипотезе, что все адроны являются комбинациями кварков.

По современным представлениям кварки — гипотетические материальные объекты, из которых состоят все адроны. Андрон (от [греч.](#) hadros – тяжёлый), класс [элементарных частиц](#), подверженных [сильному взаимодействию](#), и не являющихся истинно элементарными. К ним относятся все мезоны и барионы, а также многочисленные нестабильные (резонансные) элементарные частицы. Согласно новой гипотезе, мезоны состоят из кварка и антикварка, барионы (тяжелые частицы, такие, как **протон, нейтрон** и им подобные) — из трех кварков. Гипотеза кварков стала необходимой для объяснения динамики различных процессов, в которых участвуют адроны.

Кварки имеют электрический заряд, спин и массу и являются в стандартной теории единственными частицами, участвующими во всех известных фундаментальных взаимодействиях, включая [электромагнитное](#), [слабое](#), [сильное](#) и [гравитационное](#) взаимодействия. При этом обычная гравитация ввиду её малой величины, по сравнению с другими силами в теории частиц, практически не рассматривается.

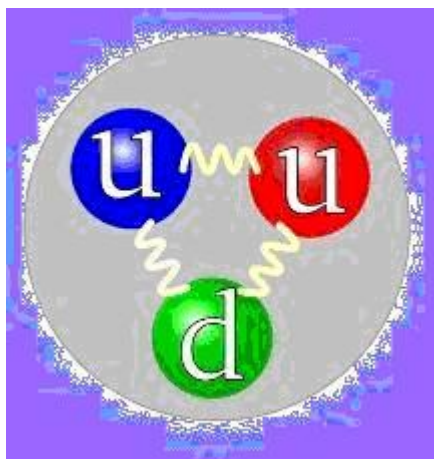
В настоящее время известно 6 видов кварков, для различия которых вводится такое понятие, как [«аромат»](#). Для краткости кваркам присвоены следующие имена: u-кварк, d-кварк, s-кварк, c-кварк, t-кварк, b-кварк. В зависимости от своего аромата

кварк может быть: верхний (u), нижний (d), очарованный (c), странный (s), истинный (t) и прелестный (b).

Кварки имеют дробную величину электрического заряда, либо  $-\frac{1}{3}$ , либо  $+\frac{2}{3}$  от значения элементарного заряда в зависимости от своего аромата. U-кварк, с-кварк и t-кварк, относящиеся к верхним кваркам, имеют электрический заряд  $+\frac{2}{3}$ . D-кварк, s-кварк и b-кварк, относящиеся к нижним кваркам, имеют электрический заряд  $-\frac{1}{3}$ .

Поскольку заряды элементарных частиц целые и должны равняться сумме зарядов кварков, это накладывает ограничение на комбинации составляющих частицы кварков. Например, нейтрон состоит из двух d-кварков и одного u-кварка, а протон с электрическим зарядом 1 (в единицах элементарного заряда) состоит из двух u-кварков и одного d-кварка.

Реальность кварков подтверждается хорошим совпадением теории с результатами физических экспериментов. Убедительное подтверждение кварковая модель получила в опытах по рассеянию электронов высоких энергий, которые, взаимодействуя с нуклонами, выявили наличие у них внутренней структуры.



*. Протон как структура из двух u-кварков и одного d-кварка*

## **6. Теория обменного взаимодействия**

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 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. Юкава вычислил массу этих частиц, которая оказалась приблизительно равной 300 электронным массам. Частицы с такой массой были впоследствии действительно обнаружены. Эти частицы получили название  $\pi$ -мезонов (пионов). Известны три вида пионов:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ .

В 1957 году было теоретически предсказано существование тяжелых частиц, так называемых векторных бозонов  $W^+$ ,  $W^-$ , 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 теория рассматривает электромагнитное поле и поле слабого взаимодействия как разные компоненты одного поля, в котором наряду с квантом электромагнитного поля участвуют векторные бозоны. Это открытие вселило 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 – частица, названная гравитоном, которая пока 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. Космология – наука об эволюции Вселенной – предполагает, что Большой взрыв произошел 13,7–13,8 миллиардов лет тому назад. В стандартной модели эволюции Вселенной предполагается, что в первый период после взрыва температура могла достигать 10<sup>32</sup> К, а энергия частиц  $E = k \cdot T$  достигать значений 10<sup>19</sup> 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, лёгких ядер, ионов, атомов и так далее. В первые пять минут после Большого Взрыва практически произошли события, определившие те свойства Вселенной, которые она имеет сегодня. Решающую роль в них играли протоны и нейтроны, которые, взаимодействуя с электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино, превращаются друг в друга. Но в каждый момент число протонов примерно равно числу нейтронов. Температура в это время была не менее ста миллиардов градусов. Но с течением времени температура вследствие расширения Вселенной уменьшается. При этом протонов становится больше, поскольку их масса меньше массы нейтронов, и создавать их энергетически выгоднее. Но эти реакции создания избытка протонов останавливаются из-за понижения температуры. И только после того, как температура падает до одного миллиарда градусов, начинают образовываться простейшие ядра (кроме самого протона, который является ядром атома водорода). К концу второго периода, то есть через 5 минут после Большого Взрыва, расширяющееся вещество состоит из ядер атома водорода – 70 % и ядер гелия – 30 %. На долю остальных элементов в настоящее время приходится не более 1 %.