

# Частицы и взаимодействия; лептоны и кварки

# Элементарные частицы

Аристотель (384 – 322 гг. до н.э.) считал, что все вещество во Вселенной состоит из четырёх основных элементов – земли, воздуха, воды и огня, на которые действуют две силы: сила тяжести, влекущая землю и воду вниз, и сила лёгкости, под действием которой огонь и воздух устремляются вверх

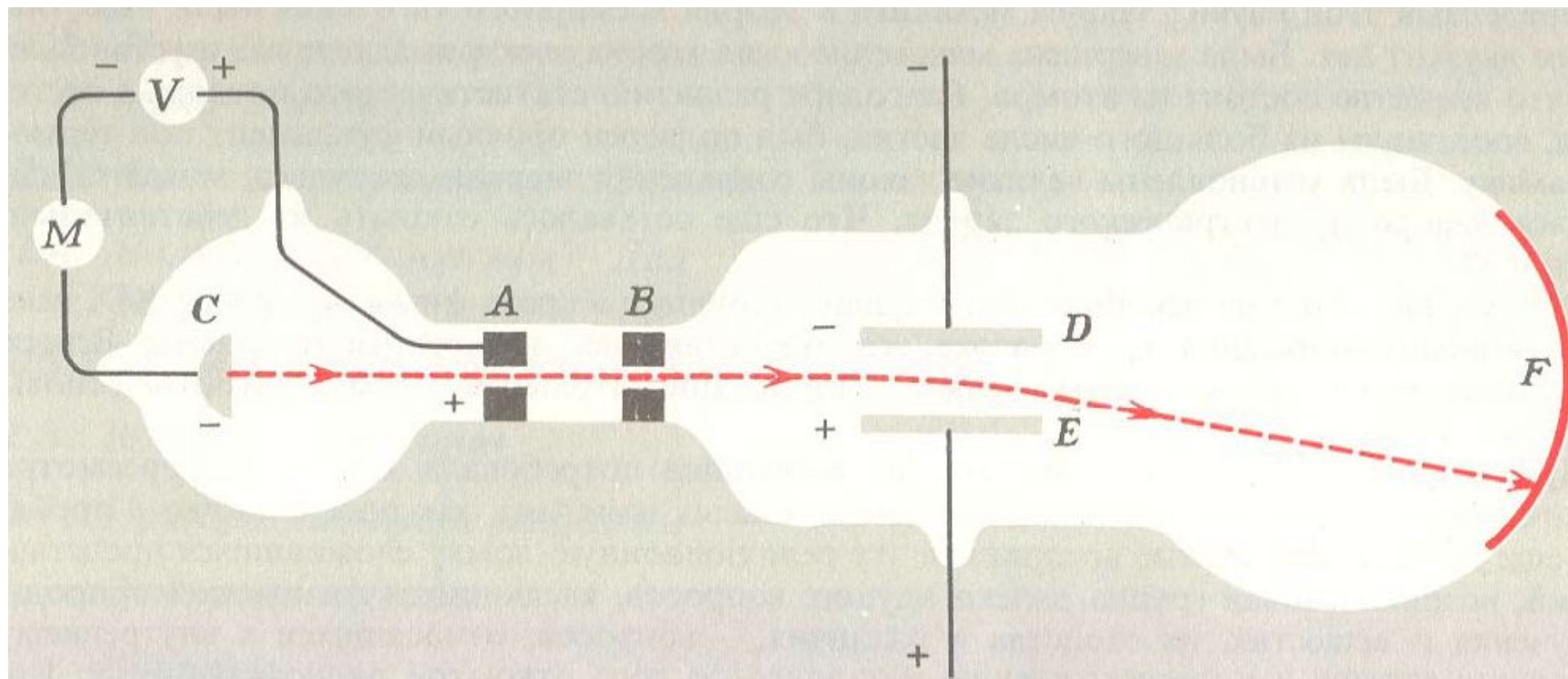
**(раздельно частицы и взаимодействия !!).**



# Элементарные частицы

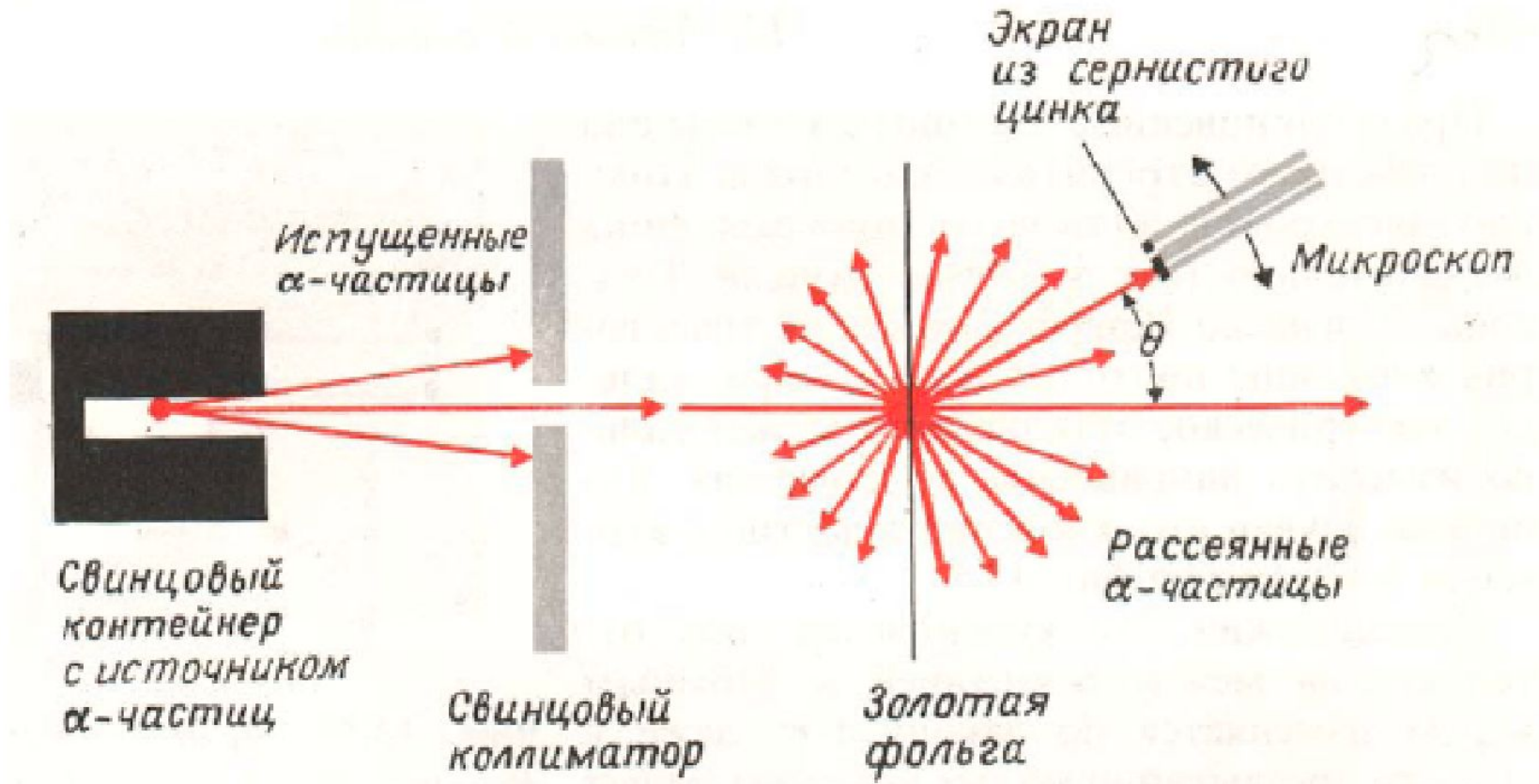
- Демокрит, Эпикур: нет ничего, кроме атомов и пустоты, в которой движутся атомы. Атомы - мельчайшие неделимые частицы, вечные и неизменные, пребывающие в постоянном движении и различающиеся формой и величиной.
- Аристотель, Платон, Сократ: вещество можно делить бесконечно.

# Открытие электрона 1897 год, Дж.Дж. Томсон



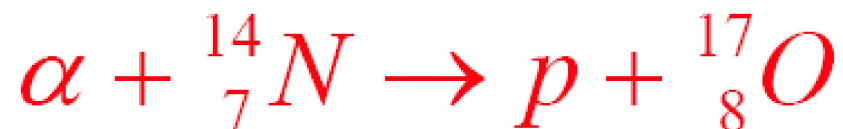
1904 г. : Дж. Дж. Томсон: атом - нейтральная система - из заряженного шара с зарядом  $+Ze$ , внутри  $Z$  отрицательно заряженных электронов.  
Размер атома  $\sim 10^{-8}$  см. **Нобелевская премия по физике 1906 г.**

# Открытие ядра и протона 1919 г. Э. Резерфорд



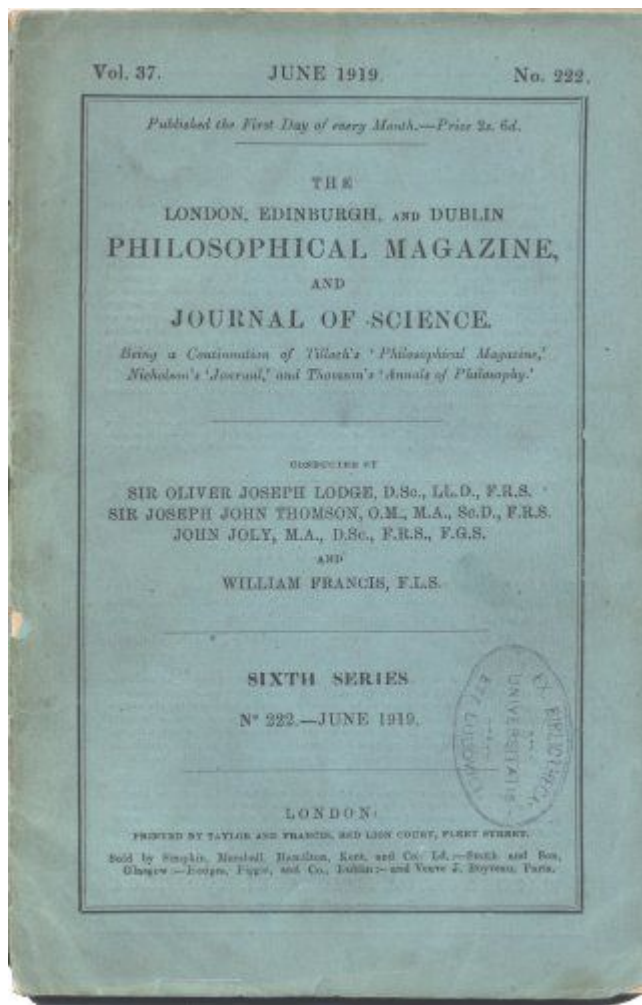
Нобелевская премия 1908 г.

# Открытие протона



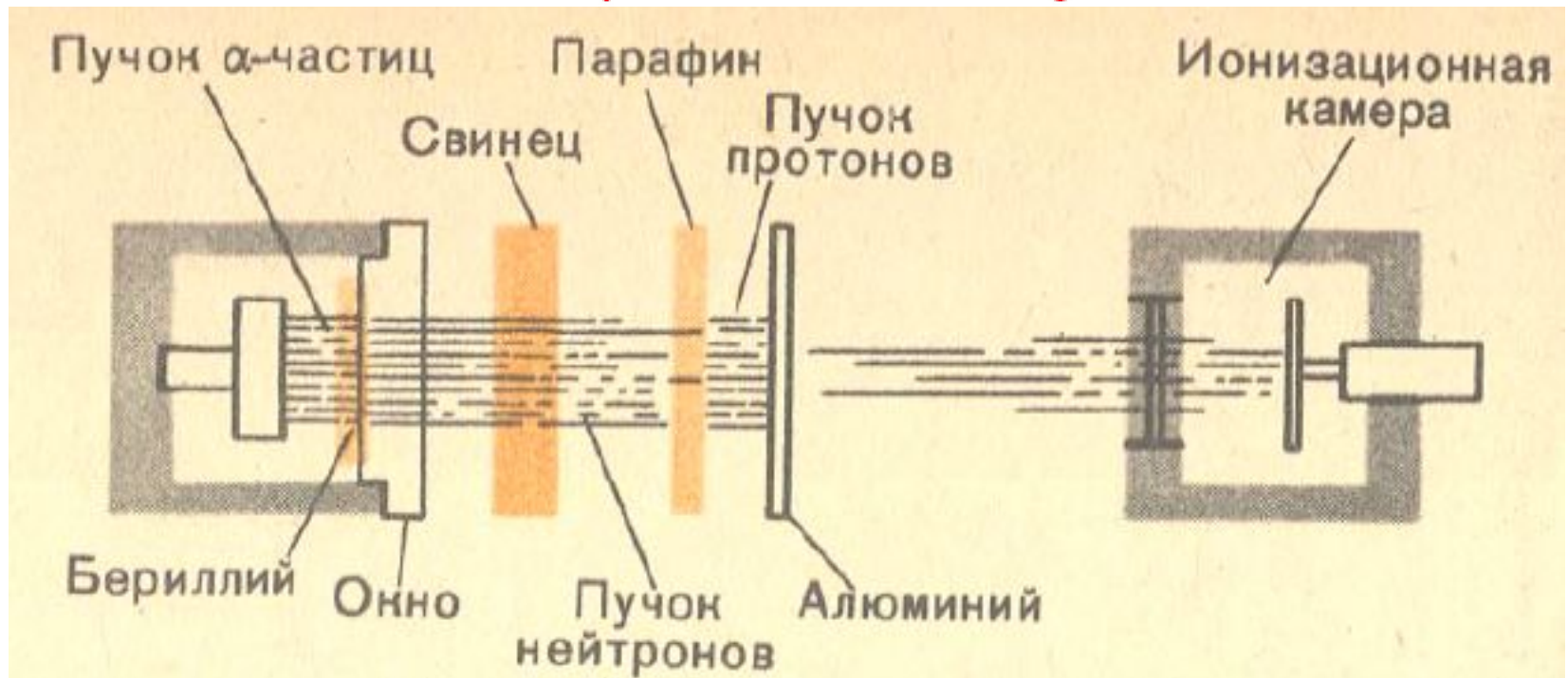
«Мы должны заключить, что атом азота распадается под воздействием значительных сил, развиваемых быстрой альфа-частицей при значительном сближении, и, что освобождающийся атом водорода является существенной составной частью ядра азота»

Ernest Rutherford





# Открытие нейтрона 1930, W. Bothe, H. Becker 1932, James Chadwick



**Нобелевская премия 1935 г.**

**Протон – нейтронная модель ядра**

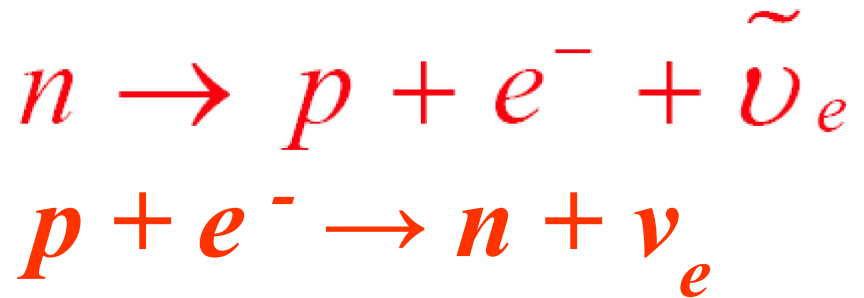
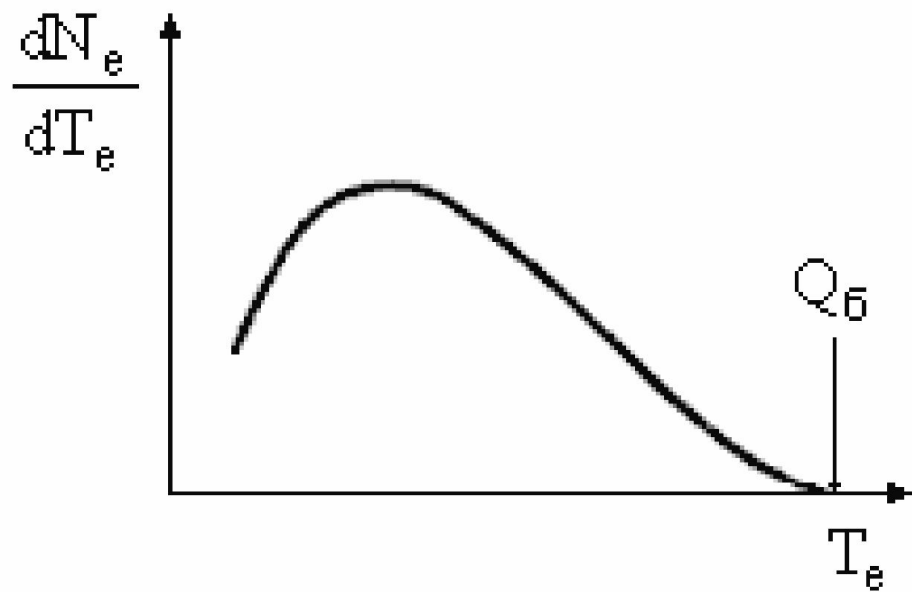
# Как устроен Мир. 30-е годы XX века

- В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц - электрона, протона и нейтрона.
- Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны.
- Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.
- Откуда берутся электроны при  $\beta$ -распаде?



# Нейтрино

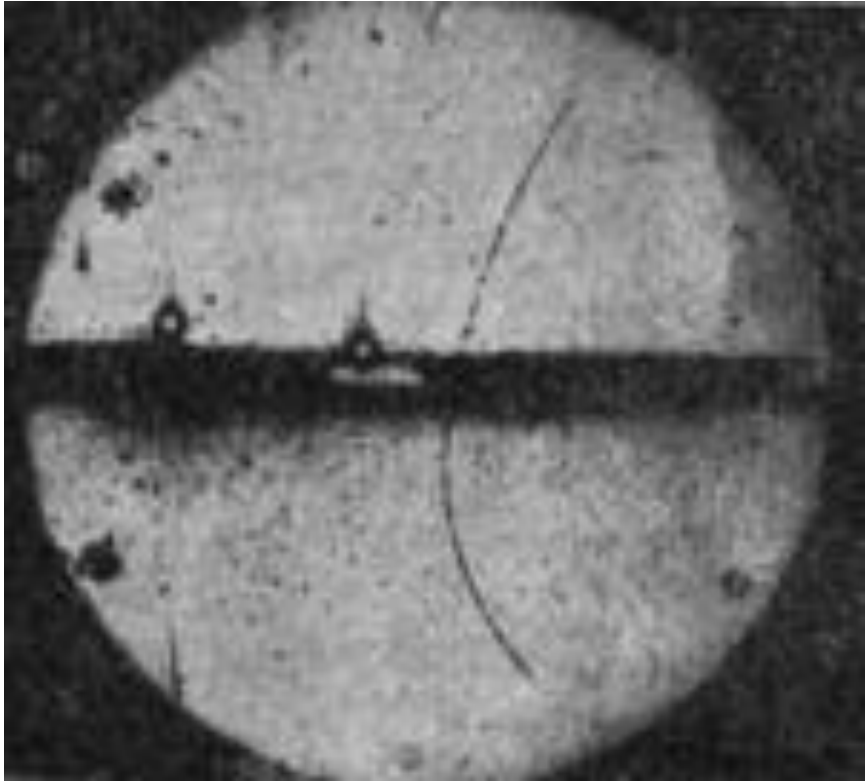
1931 г. В. Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов  $\beta$ -распада



1956 г. Ф. Райнес и К. Коуэн обнаружили нейтрино  
Нобелевская премия 1995 г.

# Позитрон

1928 г. П. Дирак, 1932 г. К. Андерсон



Нобелевская премия 1936 г.

# Мезоны

## 1935 г. Х. Юкава

- 1936 г. – мюон,
- 1947 г. – пион:  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^+$

Нобелевская премия 1949 г.

# Как устроен Мир. 50-е годы XX века

- протоны и нейтроны → атомные ядра;
- пионы → связывание протонов и нейтронов;
- электроны → построение атомов;
- фотоны → переходы в атомах;
- нейтрино →  $\beta$  – распад,
- Зачем нужен мюон?
- Частицы и античастицы?

# Странные частицы, 1947 г.

- рождаются парами, но не являются частицей и античастицей!



- большое время жизни –  $10^{-10}$  сек;
- 1953 г. М. Гелл-Манн и К. Нишиджима: новое квантовое число – странность сохраняется в сильных взаимодействиях, но не сохраняется в слабых.

## Резонансы, 1952 г.

$$m c^2 = (E^2 - c^2 p^2)^{1/2}$$

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar \quad 100 \text{ МэВ} \rightarrow 10^{-23} \text{ сек.}$$



	масса	ширина распада
$\Delta^{++} (\mathbf{uuu})$	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^+ (\mathbf{uud})$	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^0 (\mathbf{udd})$	1232 МэВ	120 МэВ
$\Delta^- (\mathbf{ddd})$	1232 МэВ	120 МэВ
$\Sigma^+ (\mathbf{uus})$	1382 МэВ	85 МэВ
$\Xi^- (\mathbf{dds})$	1535 МэВ	9.9 МэВ

# Лептоны

**1897** – Д. Томсон

$e^-$

**1937** – К. Андерсон

$\mu^-$

**1956** – Ф. Райнес, К. Козн

$\tilde{\nu}_e$

**1962** – Л. Ледерман

$\nu_\mu$

**1975** – М. Перл

$\tau^-$

**2000** – Лаб. Э. Ферми

$\nu_\tau$

$e^-$ (0.511МэВ)	$\mu^-$ (106 МэВ)	$\tau^-$ (1770МэВ)
$\nu_e$ (<3 эВ)	$\nu_\mu$ (<0.17МэВ)	$\nu_\tau$ (<18 эВ)

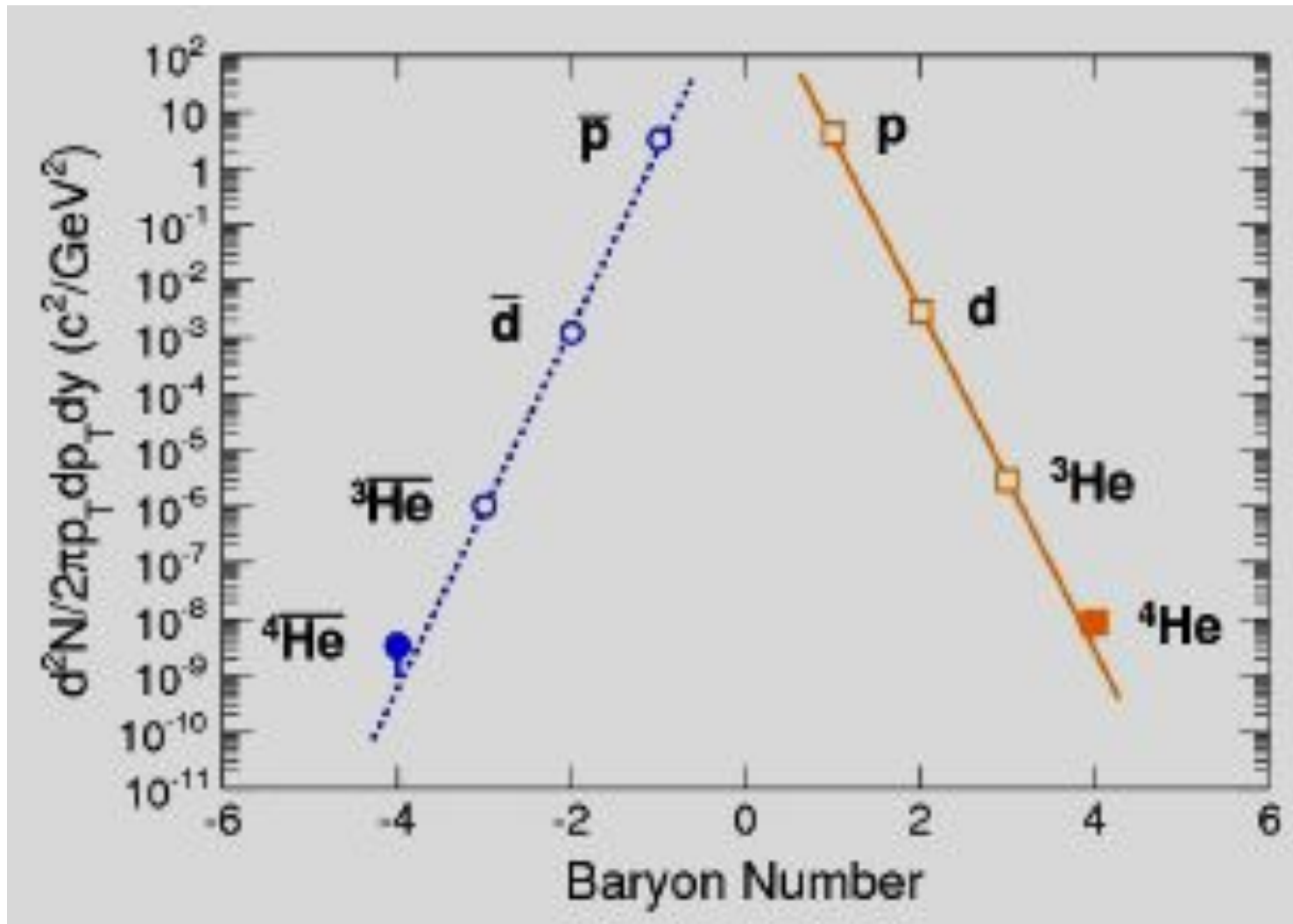


# Античастицы

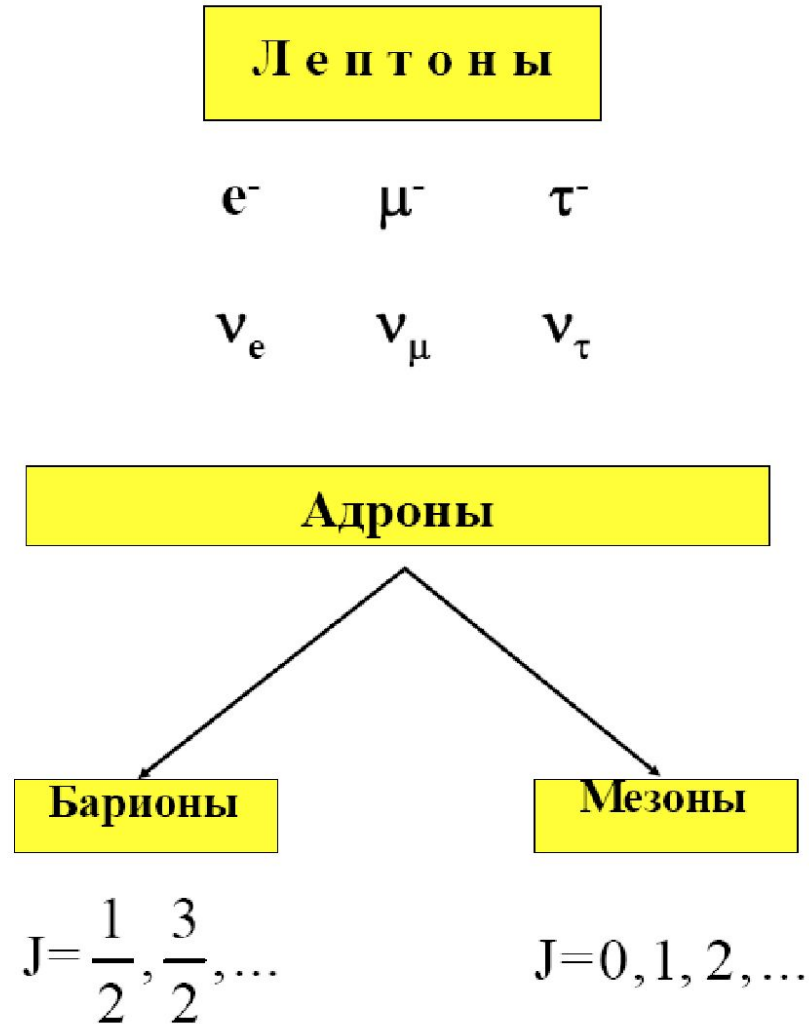
Античастица обладает рядом характеристик, имеющих те же численные значения что и частица, и некоторые характеристики с противоположным знаком.

- 1932 – позитрон,
- 1955 – антипротон,
- 1956 – антинейтрон,
- 1966 – антидейтерий,
- 1998 – антиводород,
- 2002 – антигелий-3,
- 2011 – антигелий-4,
- истинно нейтральные частицы.
- Антиматерия?**

# Открытие анти-гелия-4 (preprint 22.03.2011)



# Как устроен Мир. 60-е годы XX века

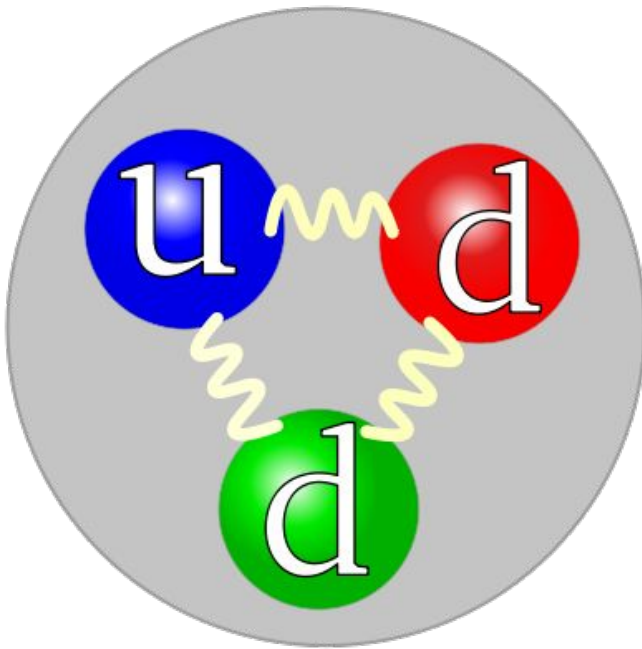


# Адроны

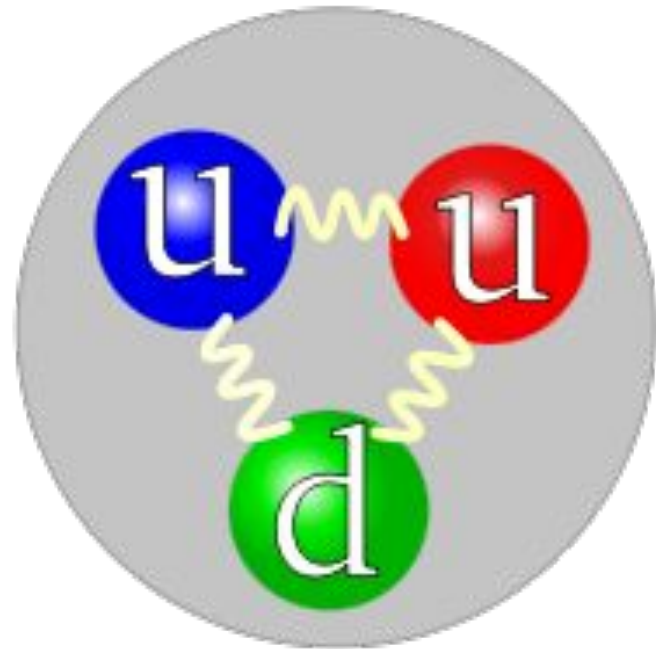
- частицы, сильно взаимодействующие друг с другом, (протон и нейтрон);
- различаются массой, величиной электрического заряда, спином;
- Барионный заряд;
- Барионы – это адроны с отличным от нуля барионным зарядом и полуцелым спином;
- Мезоны – адроны с нулевым барионным зарядом и целым спином.
- Адроны имеют внутреннюю структуру.

# Кварки, 1963 г.

М. Гелл-Манн и Г. Цвейг предложили кварковую модель адронов. Барионы “конструировались” из трёх кварков, мезоны – из кварка и антикварка.



нейтрон: 1up 2down

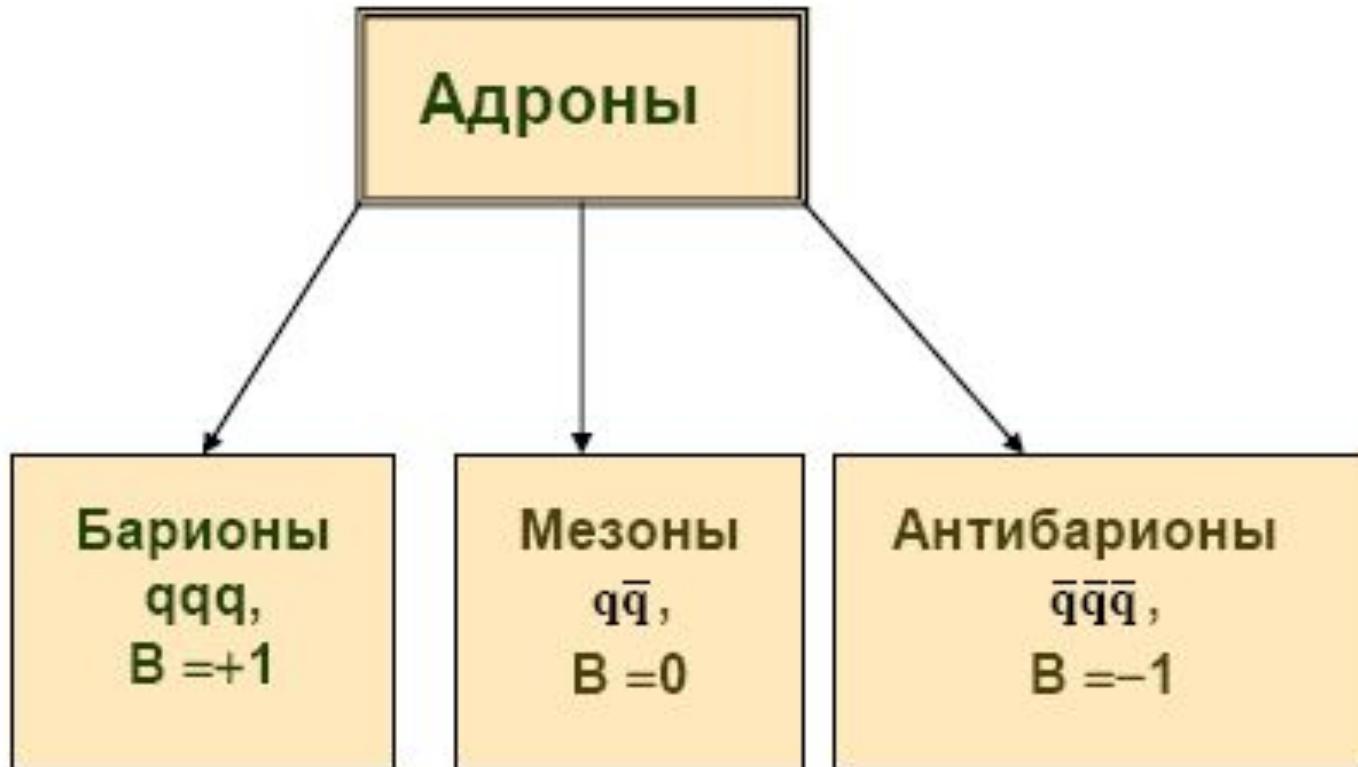


протон: 2up 1down

Нобелевская премия 1969 г.

# Адроны

- СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ КВАРКОВ



# Барионы – связанные состояния трёх кварков

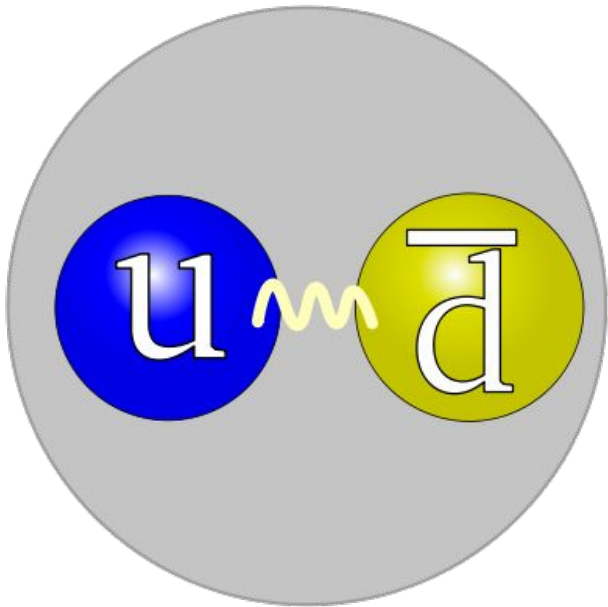
Частица	Кварковый состав	Масса, $m c^2$ (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
n	udd	939.565	$885.7 \pm 0.8$	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
$\Lambda$	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
$\Sigma^+$	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
$\Sigma^0$	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
$\Sigma^-$	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
$\Xi^0$	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
$\Xi^-$	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
$\Omega^-$	sss	1672.4	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
$\Delta^{++}$ $\Delta^+$ $\Delta^0$ $\Delta^-$	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(1/2)$	$(p, n) \pi^{0,\pm}$



# Мезоны

## 1935 г. Х. Юкава

- 1936 г. – мюон,
- 1947 г. – пион:  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^+$



$\pi^-$  : 1 down, 1 anti-up ,  
 $\pi^0$  : 1 down, 1 anti-down  
or 1 up, 1 anti-up,  
 $\pi^+$  : 1 up, 1 anti-down

# Мезоны – связанные состояния кварка-антикварка

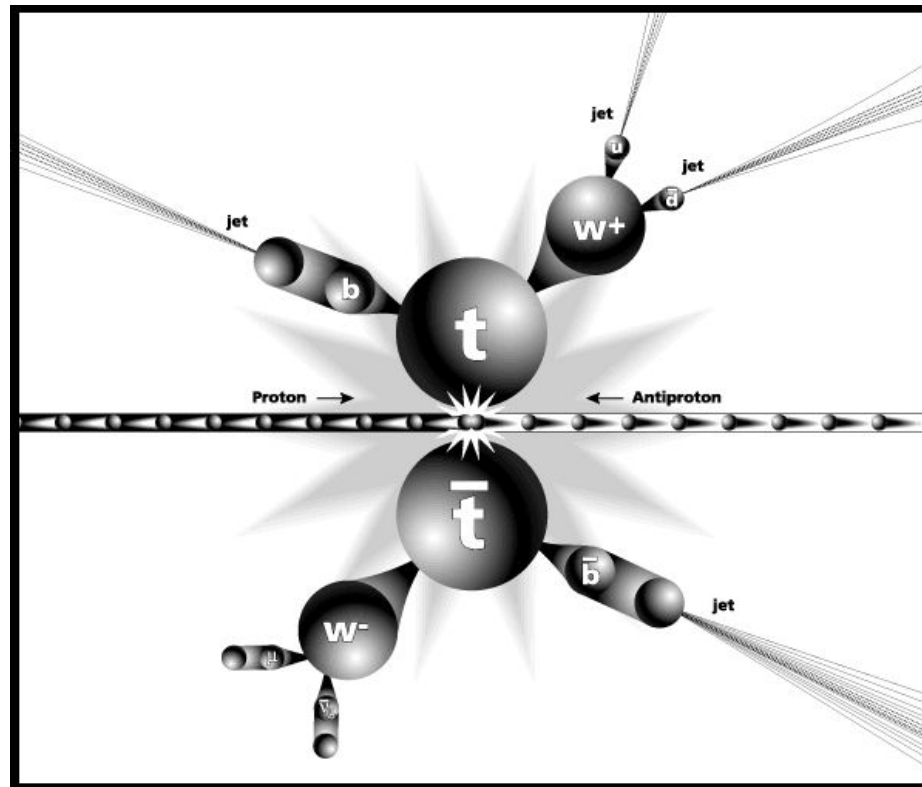
Частица	Кварковая структура	Масса $mc^2$ , МэВ	Время жизни $\tau$ [с] или ширина $\Gamma$	Спин-четность, изоспин $J P (I)$	Основные моды распада
$\pi^+$	$u\bar{d}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\mu\nu^+$
$\pi^-$	$d\bar{u}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\mu^-$
$\pi^0$	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134,98	$8,4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	$2\gamma$
$K^+$	$u\bar{s}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\mu\nu^+$ , $\pi^0\pi^+$
$K^-$	$s\bar{u}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\mu^-$ , $\pi^0\pi^-$
$\rho^+\rho^-$ $\rho^0$	$u\bar{d} \ d\bar{u}$ $u\bar{u} - d\bar{d}$	769	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
$\omega$	$u\bar{u} + d\bar{d}$	783	8,4 МэВ	$1^-(0)$	$3\pi$
$D^+$ $D^-$	$c\bar{d}$ $d\bar{c}$	1869	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$K + \text{другие}$ , $e + \text{другие}$ , $\mu + \text{другие}$
$J/\Psi$	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	$1^-(0)$	адроны, $2e$ , $2\mu$
$\Upsilon$	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	$1^-(0)$	$\tau^+\tau^-$ , $\mu^+\mu^-$ , $e^+e^-$

# Кварки

- Кварки должны иметь дробный электрический заряд  $\frac{2}{3}$  или  $-\frac{1}{3}$ .
- Барионы состоят из трёх кварков.
- Мезоны состоят из кварка и антикварка.
- До 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов -  $u$ ,  $d$ ,  $s$ .
- 1974 г. открытие  $J/\psi$ -мезона  $\rightarrow c$  – кварк, (скрытое очарование).
- 1977 г. открытие  $Y$ -мезона  $\rightarrow b$  – кварк (скрытая красота).

# 1995 г. $t$ - кварк

Две группы по 450 человек!



# Как устроен Мир. Конец XX века

## ФЕРМИОНЫ

КОМПОНЕНТЫ ВЕЩЕСТВА (СПИН =  $\frac{1}{2}$ )

Лептоны (спин = $\frac{1}{2}$ )			
Аромат		Масса, ГэВ/c <sup>2</sup>	Электрический заряд
$\nu_e$	электронное нейтрино	$< 1 \times 10^{-8}$	0
$e$	электрон	0,000511	-1
$\nu_\mu$	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	0
$\mu$	мюон	0,106	-1
$\nu_\tau$	тау-нейтрино	$< 0,02$	0
$\tau$	тау	1,7771	-1

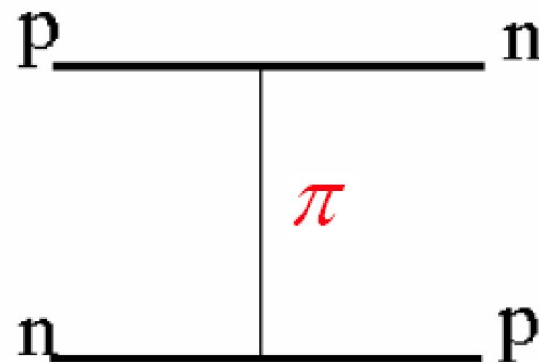
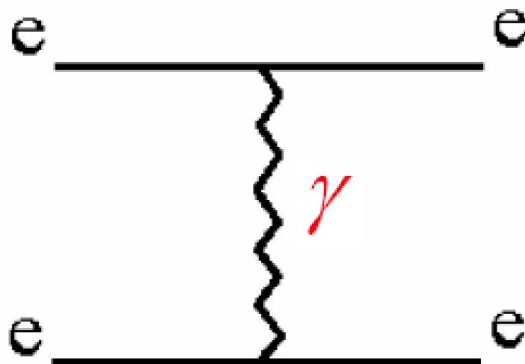
Кварки (спин = $\frac{1}{2}$ )			
Аромат		Прибл. масса, ГэВ/c <sup>2</sup>	Электрический заряд
$u$	up	0,003	2/3
$d$	down	0,006	-1/3
$c$	charm	1,3	2/3
$s$	strange	0,1	-1/3
$t$	top	175	2/3
$b$	bottom	4,3	-1/3

# Квантовая теория поля

- В классической физике два фундаментальных объекта – частицы и поля.
- В квантовой теории поля взаимодействие между электрическими зарядами описывается как испускание и поглощение зарядами квантов электромагнитного поля – фотонов.

# Диаграммы Фейнмана

- Для описания различных процессов с участием частиц используют диаграммы Фейнмана.
- Линиям со свободными концами отвечают реальные частицы или ядра,
- Внутренним линиям – виртуальные частицы.
- Точка, в которой рождается и поглощается виртуальная частица, называется узлом диаграммы.
- Узлы диаграммы содержат основную информацию о процессе – типе фундаментального взаимодействия и его вероятности.





# Стандартная модель

Фундаментальными частицами стандартной модели являются:

- 6 лептонов ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) и
- 6 кварков ( $u$ ,  $d$ ,  $c$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $b$ ).
- Каждый из 6 типов кварков может находиться в трёх цветовых состояниях (**красный**, **зеленый**, синий).
- Кварки и лептоны являются фермионами и имеют спин  $-\frac{1}{2}$ .
- 12 фундаментальным фермионам соответствуют 12 антифермионов.

# Фундаментальные взаимодействия

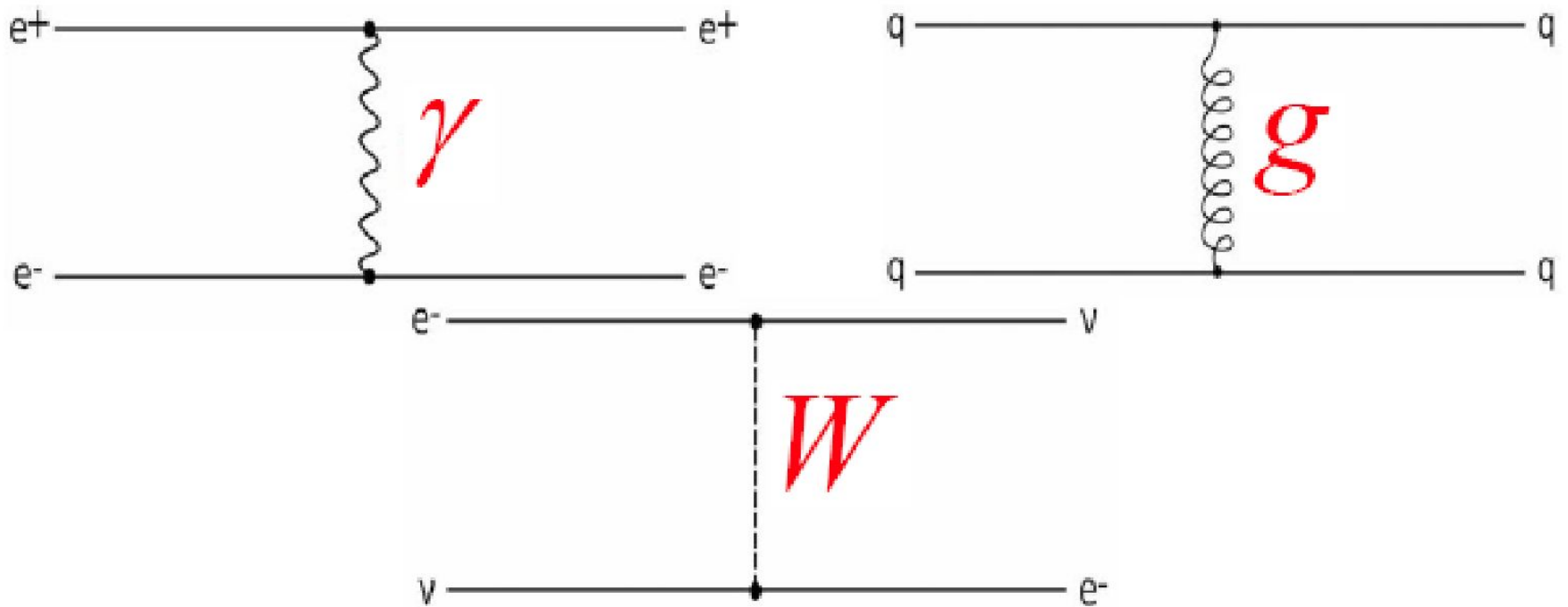
Взаимодействие	Характерная константа
Сильное	1
Электромагнитное	$10^{-2}$
Слабое	$10^{-6}$
Гравитационное	$10^{-38}$

Взаимодействия фундаментальных фермионов осуществляются за счет обмена переносчиками взаимодействия – фундаментальными (или калибровочными) бозонами.

# Фундаментальные взаимодействия

- Взаимодействие частиц, имеющих электрический заряд, происходит посредством обмена квантами электромагнитного поля - фотонами или  $\gamma$ -квантами. Фотон электрически нейтрален.
- Сильное взаимодействие осуществляется за счет обмена глюонами  $g$  - электрически нейтральными безмассовыми переносчиками сильного взаимодействия. Глюоны переносят цветовой заряд.
- Переносчиками слабого взаимодействия являются массивные  $W$ - и  $Z$ -бозоны. Существуют положительные  $W^+$ -бозоны и отрицательные  $W^-$ -бозоны, являющиеся античастицами по отношению друг к другу.  $Z$ -бозон электрически нейтрален.

# Перенос взаимодействий



# Калибровочные бозоны

переносчики взаимодействий (спин = 1)

Объединенное и электрослабое взаимодействие (спин = 1)		
Название	Масса, ГэВ/c <sup>2</sup>	Электрический заряд
$\gamma$ фотон	0	0
$W^-$	80,4	-1
$W^+$	80,4	+1
$Z$	91,187	0

Сильное (цветное) взаимодействие (спин = 1)		
Название	Масса, ГэВ/c <sup>2</sup>	Электрический заряд
$g$ глюон	0	0

# Сильное взаимодействие

- Константа сильного взаимодействия, характеризующая интенсивность этого взаимодействия определяется взаимодействием кварков и переносчиков сильного взаимодействия – глюонов.
- Частицы, участвующие в сильном взаимодействии называются адронами.
- Характерный радиус действия сил, обусловленных сильным взаимодействием  $\sim 10^{-13}$  см.
- Частицы, распадающиеся в результате сильного взаимодействия, имеют характерное время жизни  $\sim 10^{-20} - 10^{-23}$  с, что соответствует характерным ширинам резонансов  $\Gamma > 10\text{МэВ}$ .

# Электромагнитное взаимодействие.

- Константа электромагнитного взаимодействия  
$$\sqrt{\alpha} = \sqrt{e^2 / \hbar c} = \sqrt{1/137} \quad (\alpha - \text{постоянная тонкой структуры}).$$
- Переносчик электромагнитного взаимодействия - фотон. То обстоятельство, что масса фотона равна нулю, определяет бесконечный радиус электромагнитного взаимодействия.
- Константа электромагнитного взаимодействия определяет вероятность испускания или поглощения фотона частицей с зарядом  $e^\pm$ .
- Характерное время распада частиц в результате электромагнитного взаимодействия  $> 10^{-18}$  с.

# Слабое взаимодействие

- Константа слабого взаимодействия  $\sim 10^{-6}$ .
- Переносчиками слабого взаимодействия являются промежуточные бозоны  $W^{\pm}$ - и  $Z$ -бозоны – массивные частицы ( $m(W^{\pm})= 80$  Гэв,  $m(Z)= 91$  Гэв.).
- Большая масса промежуточных бозонов обуславливает характерную величину радиуса слабого взаимодействия  $\sim 10^{-16}$  см.
- Частицы, распадающиеся в результате слабого взаимодействия имеют времена жизни  $> 10^{-12}$  с.
- Единственные частицы, которые участвуют только в слабых и гравитационных взаимодействиях - нейтрино.



# Гравитационное взаимодействие

- Сила гравитационного взаимодействия определяется соотношением

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$  – гравитационная постоянная
- Радиус действия гравитационного взаимодействия бесконечен.
- В гравитационном взаимодействии участвуют все частицы.
- для протонов на расстоянии  $10^{-13}$  см:
- гравитоны – гипотетические частицы.

$$\frac{F_{\text{грав}}}{F_{\text{эл. магн}}} \sim 10^{-36}$$

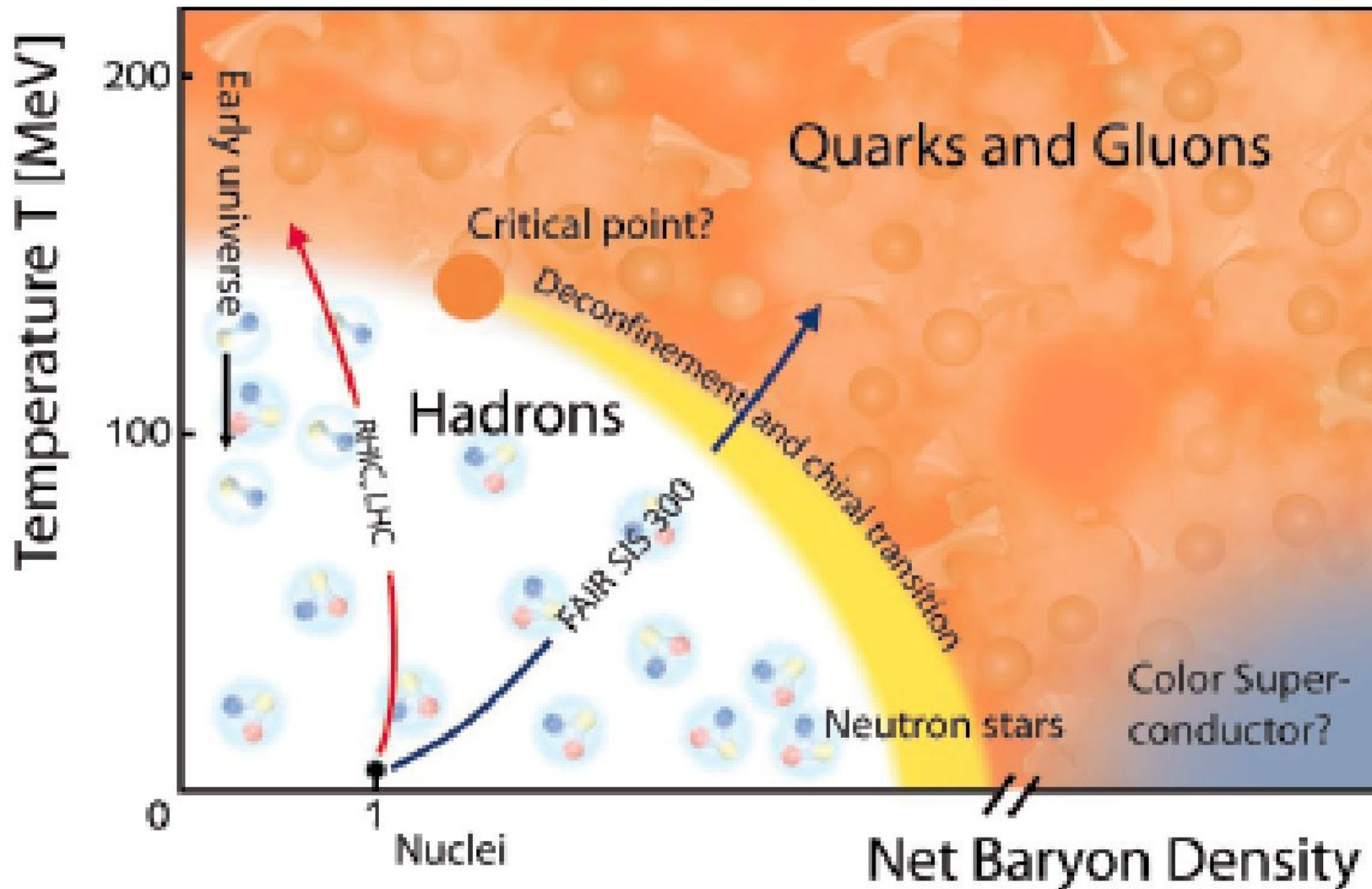
# Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, спин $J = 1$ , безмассовые.	$1 \Phi_M = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, спин $J = 1$ , безмассовый.	$\infty$	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+$ , $W^-$ , $Z$ , спин $J = 1$ , $m(W^\pm) = 80$ Гэв, $m(Z) = 91$ Гэв.	$10^{-2} \Phi_M = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$

# Законы сохранения

Характеристика		Взаимодействие		
		сильное	электро магнитное	слабое
Аддитивные законы сохранения				
Электрический заряд	$Q$	+	+	+
Энергия	$E$	+	+	+
Импульс		+	+	+
Момент количества движения		+	+	+
Барийонный заряд	$B$	+	+	+
Лептонные заряды	$L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность	$s$	+	+	-
Очарование (charm)	$c$	+	+	-
Bottom	$b$	+	+	-
Top	$t$	+	+	-
Изоспин	$I$	+	-	-
Проекция изоспина	$I_3$	+	+	-
Мультипликативные законы сохранения				
Пространственная чётность	$P$	+	+	-
Зарядовая чётность	$C$	+	+	-
Комбинированная чётность	$CP$	+	+	-
Обращение времени	$T$	+	+	-
СРТ-инвариантность		+	+	+

# Диаграмма состояния ядерной материи



# **Фундаментальные частицы Стандартной модели.**

# Фундаментальные частицы Стандартной Модели

$e^-$        $\mu^-$        $\tau^-$

$\nu_e$        $\nu_\mu$        $\nu_\tau$

$u$        $c$        $t$

$d$        $s$        $b$

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

**Бозоны Хиггса ?**

# Тёмная материя

## 1933 г. Ф. Цвики

- Тёмная материя — вещество неизвестной природы, которое взаимодействует с обычными веществами посредством сил тяготения.
- Оно не излучает свет.
- Движение галактик в скоплениях можно описать, если предположить, что суммарная масса скопления в 10 раз больше суммарной массы составляющих его галактик.
- Устойчивое вращение звезд по орбитам в рукавах спиральных галактик требует большей массы галактик.
- Для описания температуры межгалактического газа требуется гравитационный потенциал и, следовательно, масса галактик гораздо больше наблюдаемой оптическими методами.
- Микролинзирование удаленных галактик позволяет оценить распределение вещества в галактиках и их скоплениях. Его также оказывается на порядок больше наблюдаемого.



galaxy cluster CL0024+17

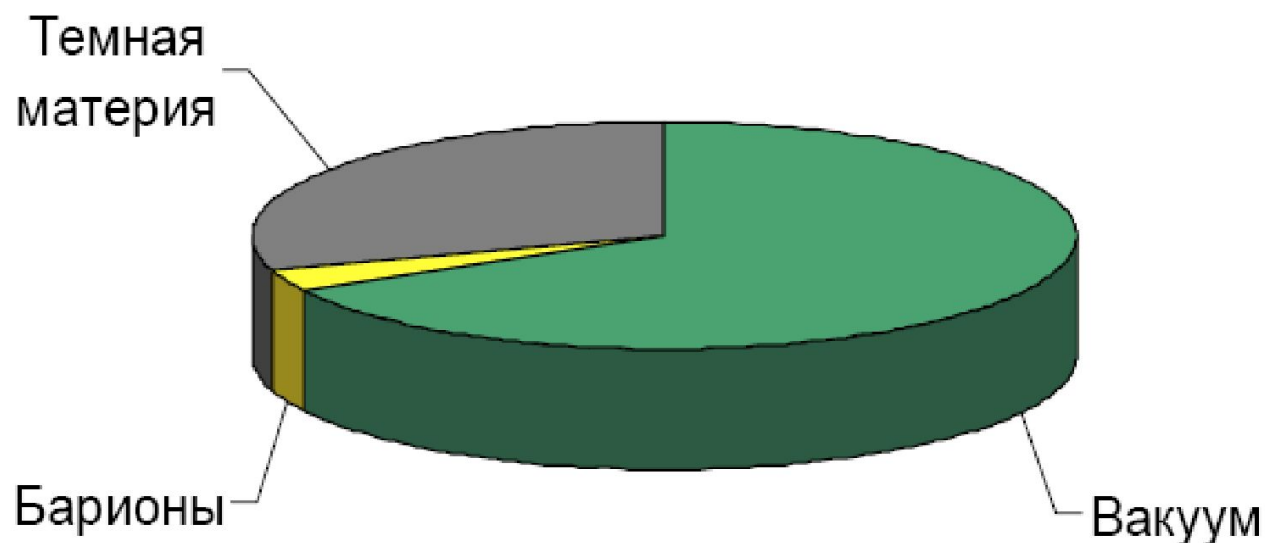
# Тёмная энергия

- В начале 1998 г. было сделано открытие. Оказалось, что последние  $5 \cdot 10^9$  лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого Взрыва, а ускорялось.
- Этот вывод получен в результате анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5-10 млрд световых лет.
- Таким образом было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму.
- 2008 – тёмный поток.



# Характеристики Вселенной

<b>БАРИОНЫ</b>		0.02-0.05
в том числе:	- звёзды	0.002-0.003
<b>ФОТОНЫ</b>		$4.9 \cdot 10^{-5}$
<b>НЕЙТРИНО</b>		$3.3 \cdot 10^{-5}$
<b>ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ</b>		0.96
в том числе:	- неизвестные массивные частицы (не барионы)	0.2-0.4
	- вакуум	0.6-0.8
<b>ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ</b>		$1.02 \pm 0.02$



# Лептоны

# ЛЕПТОНЫ

(Л. Розенфельд, 1948 г.)

Лептоны участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях.

3 заряженных лептона:

- электрон  $e^-$ ,
- мюон  $\mu^-$ ,
- таон  $\tau^-$ .

3 нейтральные частицы:

- электронное нейтрино  $\nu_e$ ,
- мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ ,
- тау-нейтрино  $\nu_\tau$ .

- Лептонам приписывают лептонный заряд  $L$ ,
- $L = +1$  для лептонов,
- $L = -1$  для антилептонов,
- $L = 0$  – для остальных частиц.
- закон сохранения лептонного заряда никогда не нарушается.

Почему их 3, а не 4? 5? ...

# Лептоны $J=1/2$

- Лептоны – класс фундаментальных частиц Стандартной модели, не участвующих в сильных взаимодействиях.
- Заряженные лептоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях.
- Нейтрино - только в слабых.
- Массы лептонов  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ :

$$m_e c^2 = 0.511 \text{ МэВ}, \quad m_\mu c^2 = 105.7 \text{ МэВ}$$

$$m_\tau c^2 = 1777 \text{ МэВ}$$

- Массы нейтрино не измерены - известны только их верхние пределы.

$$m_{\nu_e} c^2 < 3 \text{ эВ}, \quad m_{\nu_\mu} c^2 < 0.19 \text{ МэВ}$$

$$m_{\nu_\tau} c^2 < 18.2 \text{ МэВ}$$

# Основные характеристики электрона

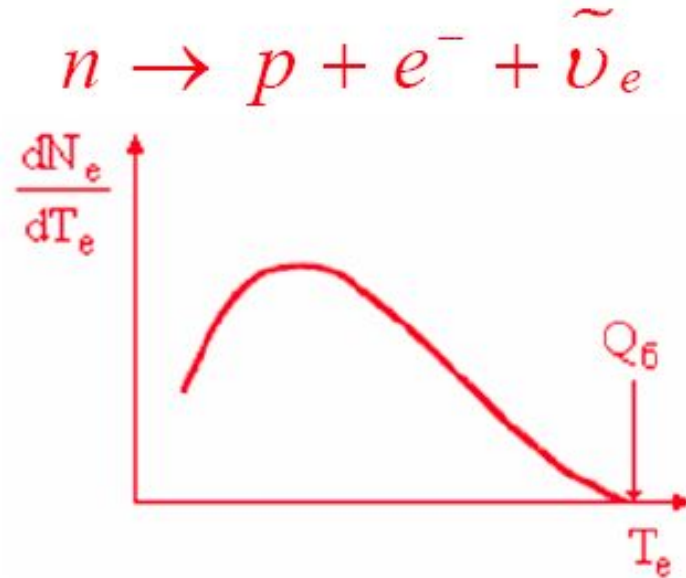
Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_e c^2$ , МэВ	$0.51099892 \pm 0.00000004$
Электрический заряд, Кулон	$-(1.60217653 \pm 0.00000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$1.001159652187 \pm 0.0000000000004$
Время жизни $\tau$ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число $L_e$	+1
Лептонные числа $L_\mu, L_\tau$	0

# и позитрона

Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_e c^2$ , МэВ	$0.51099892 \pm 0.00000004$
Электрический заряд, Кулон	$(1.60217653 \pm 0.00000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$1.001159652187 \pm 0.0000000000004$
Время жизни $\tau$ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число $L_e$	-1
Лептонные числа $L_\mu, L_\tau$	0

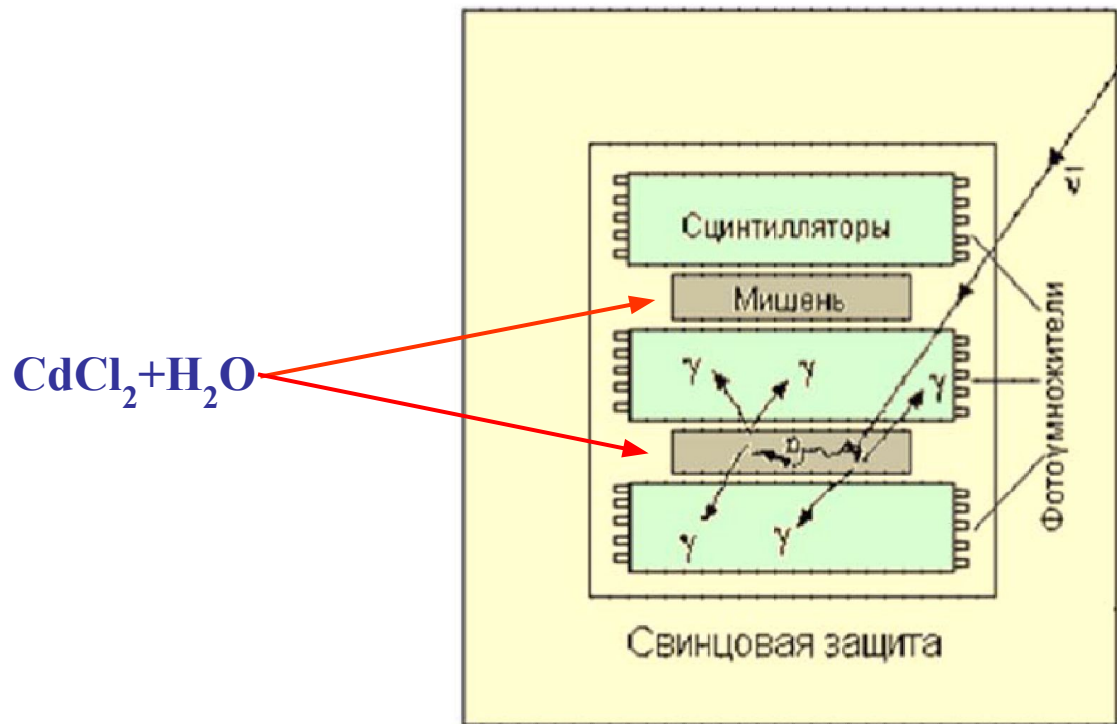
# Нейтрино

В 1931 г. В. Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов  $\beta$ -распада

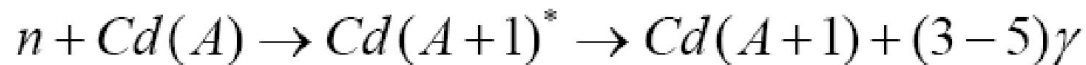


В 1956 г. Ф. Райнес и К. Коэн зарегистрировали антинейтрино

# Электронное антинейтрино



Источник антинейтрино – ядерный реактор



$$\sigma(\tilde{\nu}p) = 10^{-43} \text{ см}^2$$

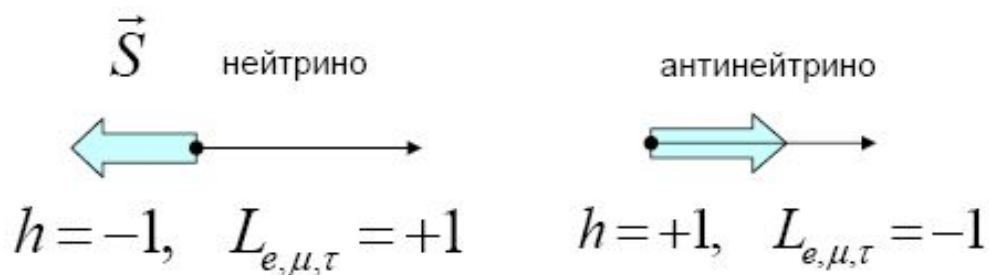
# Тождественны ли $\nu_e$ и $\tilde{\nu}_e$ ?

- Для выяснения вопроса являются ли  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  тождественными частицами, был поставлен эксперимент по регистрации реакции  $\tilde{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$
- Если они являются тождественными частицами, то реакция должна наблюдаться. Это следует из того, что имеют место реакции  $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$   $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$
- В 1946г. Б. Понтекорво предложил использовать для этой цели реакцию:  $\bar{\nu}_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
- Если процесс возможен, то под действием потока антинейтрино от реактора один из нейтронов, входящих в состав ядра  ${}^{37}\text{Cl}$ , должен превращаться в протон, что приводит к образованию радиоактивного изотопа  ${}^{37}\text{Ar}$  с периодом полураспада 35.04 суток.
- $\sigma_{\text{эксп}} < 0.25 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2 \rightarrow \nu_e \not\equiv \tilde{\nu}_e$



# Спиральность

- В зависимости от того, как направлен спин частицы относительно её импульса для продольно поляризованных частиц различают *правую* и *левую* поляризации.
- *Правополяризованной* считается частица, спин которой направлен по импульсу, *левополяризованной* – частица, спин которой направлен против импульса.
- Спиральностью  $h$  называют величину  $h = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}}{|\vec{S}| \cdot |\vec{p}|}$ .
- Правополяризованная частица имеет положительную спиральность ( $h=+1$ ), левополяризованная - ( $h=-1$ ).



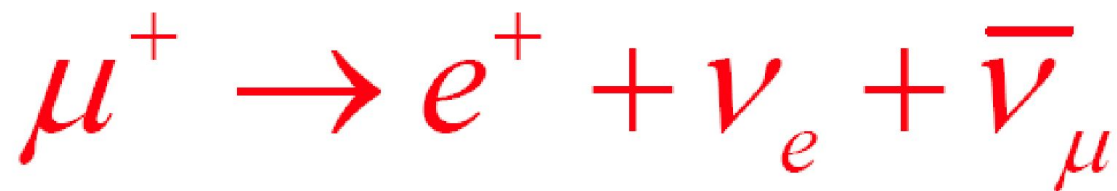
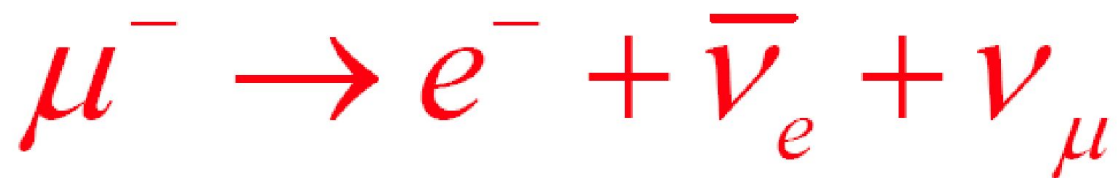
# Спиральность

- Экспериментально показано, что спиральность нейтрино всегда отрицательна ( $h = -1$ ), а спиральность антинейтрино всегда положительна ( $h = +1$ ).
- Это означает, что во всех наблюдаемых в природе слабых процессах с участием нейтрино участвуют только левополяризованные нейтрино.
- Право-поляризованные нейтрино в наблюдаемых процессах не проявляются.
- Аналогично, наблюдаются только процессы с участием правополяризованных антинейтрино.
- Появление частиц с определенным значением поляризации обусловлено природой слабого взаимодействия.
- Массы нейтрино?
- Стерильные нейтрино?

# Основные характеристики мюона

Открыт в 1937 г. в космических лучах

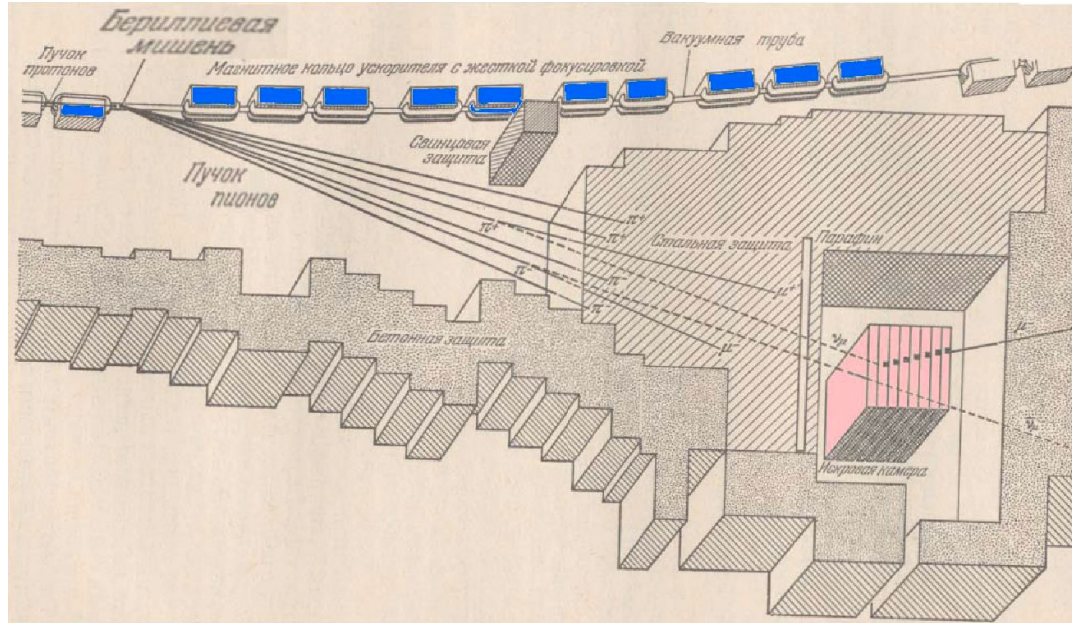
Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_\mu c^2$ , МэВ	105.6583692±0.00000094
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\mu c$	1.0011659203±0.0000000007
Время жизни, сек	$(2.19703\pm 0.000004)\cdot 10^{-6}$
Лептонное число $L_\mu$	+1
Лептонные числа $L_e, L_\tau$	0



# Мюон

- Мюон имеет полное сходство с электроном, за исключением его массы - в 200 раз больше массы электрона.
- Отрицательно заряженный мюон может образовывать связанные состояния с протоном. При этом образуется связанная система подобная атому водорода - мезоатом.
- Энергия связи в мезоатоме оказывается в 200 раз больше, а радиус основного состояния такого атома оказывается в 200 раз меньше.
- Мезоводород может присоединить ещё один протон и образовать мюонный положительный ион молекулы водорода.
- В этой молекуле может произойти реакция синтеза (мюонный катализ).
- Практическая реализация этой возможности сильно ограничена малым временем жизни мюона  $\approx 10^{-6}$  с.

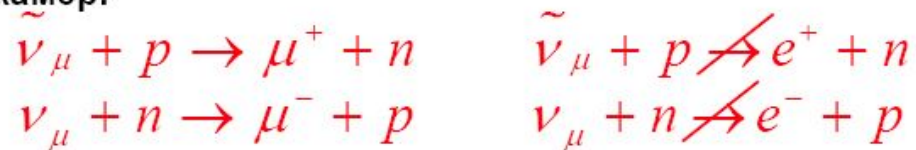
# Мюонное нейтрино



Мюонные нейтрино образовывались в результате распада  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  - мезонов.



Мюонные нейтрино детектировались в искровых камерах по результатам их взаимодействия с протонами и нейтронами вещества искровых камер.



В искровых камерах наблюдались только положительно и отрицательно заряженные мюоны. Не было зарегистрировано ни одного случая образования электронов или позитронов.

# Мюонное нейтрино

Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_{\nu_\mu} c^2$ , МэВ	$< 0.19$
Электрический заряд	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$< 6.8 \cdot 10^{-10}$
Время жизни/Масса, сек/эВ	$> 15.4$
Лептонное число $L_\mu$	+1
Лептонные числа $L_e, L_\tau$	0

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\nu_\mu \neq \nu_e \quad \tilde{\nu}_\mu \neq \tilde{\nu}_e$$



# Основные характеристики $\tau$ -лептона

открыт в 1975 г.

Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_\tau c^2$ , МэВ	1776.99±0.28
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\tau c$	1±0.06
Время жизни, сек	$(2.906\pm 0.011)\cdot 10^{-13}$
Лептонное число $L_\tau$	+1
Лептонные числа $L_e, L_\mu$	0

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

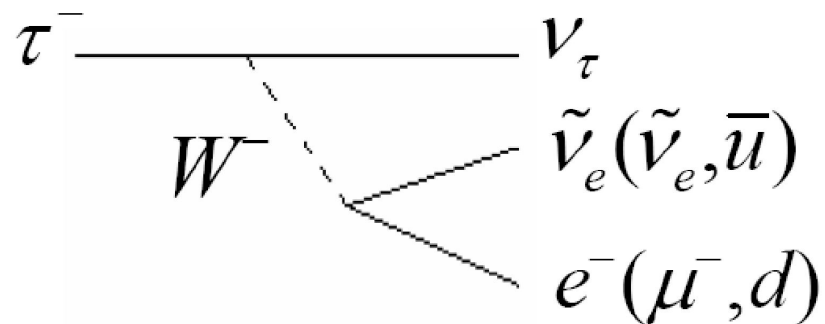
17.84%

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

17.36%

$$\tau^- \rightarrow \text{адроны} + \nu_\tau$$

63%



# Наблюдение $\tau$ -лептона

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad 17.84\%$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \quad 17.36\%$$

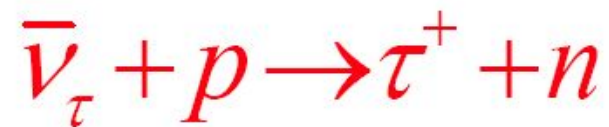
$$\tau^- \rightarrow \text{адроны} + \nu_\tau \quad 63\%$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \begin{cases} \tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \text{ или } \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \\ \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau \text{ или } \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau \end{cases}$$



# $\tau$ -нейтрино

- Тау-нейтрино и соответствующее антинейтрино были впервые зарегистрированы в 2000 г. на нейтринном детекторе DONUT (Direct Observation of the NU Tau) в реакциях:



# Основные характеристики $\tau$ -нейтрино

Характеристика	Численное значение
Спин $J, \hbar$	1/2
Масса $m_{\nu_\tau} c^2, \text{ МэВ}$	$< 18.2$
Электрический заряд	0
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$< 3.9 \cdot 10^{-7}$
Время жизни	не измерено
Лептонное число $L_\tau$	+1
Лептонные числа $L_e, L_\mu$	0

# Лептонные числа

	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e^-$	+1	0	0
$\nu_e$	+1	0	0
$e^+$	-1	0	0
$\tilde{\nu}_e$	-1	0	0
$\mu^-$	0	+1	0
$\nu_\mu$	0	+1	0
$\mu^+$	0	-1	0
$\tilde{\nu}_\mu$	0	-1	0
$\tau^-$	0	0	+1
$\nu_\tau$	0	0	+1
$\tau^+$	0	0	-1
$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	-1

# Лептонные числа $L_e, L_\mu, L_\tau$

Во всех процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий лептонные числа  $L_e, L_\mu, L_\tau$  сохраняются порознь. Поэтому:

**Наблюдаются процессы:**

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$$
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$
$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$
$$\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$$
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

**Не наблюдаются процессы:**

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$
$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$
$$\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$$

# Кварки

# Адроны - элементарные частицы?

- К середине шестидесятых годов число обнаруженных сильновзаимодействующих элементарных частиц – адронов перевалило за 100.

$n$  (939.6 МэВ)  $\pi^+$  (139 МэВ)

$p$  (938.3 МэВ)  $\pi^-$  (139 МэВ)

$\Lambda$  (1116 МэВ)  $\pi^0$  (134 МэВ)

$\Sigma^+$  (1189 МэВ)  $K^+$  (494 МэВ)

$\Sigma^-$  (1197 МэВ)  $K^-$  (494 МэВ)

$\Sigma^0$  (1193 МэВ)

$\Xi^0$  (1315 МэВ)

$\Xi^-$  (1321 МэВ)

# **Кварки – частицы из которых состоят адроны**

- Эксперименты по рассеянию электронов на нуклонах показали, что нейтрон и протон имеют сложную структуру.
- В 1964 году независимо друг от друга М. Гелл-Манн и Д. Цвейг предложили модель кварков - частиц, из которых могут состоять адроны.
- Кварки должны иметь дробный электрический заряд  $+2/3$  или  $-1/3$ .
- В 1969 году Р. Фейнман предложил партонную модель.
- Барионы «конструировались» из трех кварков, мезоны - из кварка и антикварка.

# Кварки

- Все обнаруженные до 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов -  $u$ ,  $d$ ,  $s$ .
- Расщепить частицы на отдельные кварки оказалось невозможно. Наблюдались только связанные состояния кварка в адронах.
- Возникла проблема - отсутствие кварков в свободном состоянии.

$u$

$$Q(u) = +\frac{2}{3}e$$

$d$        $s$

$$Q(d,s) = -\frac{1}{3}e$$



# Кварковая структура адронов

$p$  ( $uud$ )

$n$  ( $udd$ )

$\Lambda$  ( $uds$ )

$\Xi^0$  ( $uss$ )

$\Xi^-$  ( $dss$ )

$\pi^+$  ( $u\bar{d}$ )

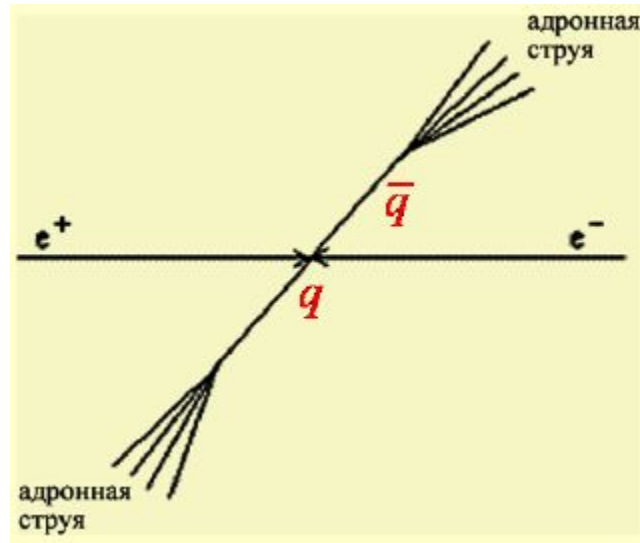
$\pi^-$  ( $\bar{u}d$ )

$K^+$  ( $u\bar{s}$ )

$K^-$  ( $\bar{u}s$ )

# Адронные струи

- Адронная струя — это совокупность адронов, летящих в одном направлении.
- Если бы кварки реально не существовали, то адроны, рождающиеся в  $e^+e^-$ -столкновениях, разлетались бы равномерно по всем направлениям.



# C - кварк

- В 1974 году одновременно две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы. Группа Тинга обнаружила узкий резонанс  $3.1 \text{ ГэВ}/c^2$  в спектре масс  $e^+e^-$  пар, образующихся в реакции соударения протонов с ядрами бериллия.
- Практически в тот же день группа Рихтера обнаружила узкий резонанс в сечениях реакций, при том же значении энергии  $3.1 \text{ ГэВ}$ . Резонанс был назван  $\psi$ -частицей.

*u*      *c*

*d*      *s*

# **b - кварк**

- В 1977 году было открыто несколько мезонов с массами в районе  $10 \text{ ГэВ}/c^2$ . Они получили название  $\Upsilon$ -мезонов.
- Это были долгоживущие частицы с шириной распада  $52 \text{ кэВ}$ .
- Это означало открытие пятого кварка – **b** (beauty).
- В состав  $\Upsilon$ - мезона входят **b**-кварк и **b**-антикварк, поэтому он обладает скрытой красотой.

$$Q = +2/3$$

*u*

*c*

$$Q = -1/3$$

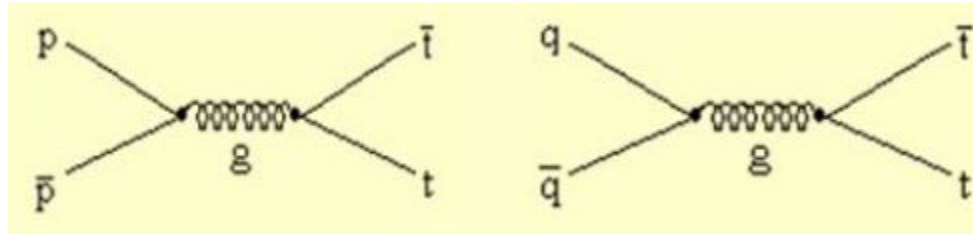
*d*

*s*

*b*

# t - кварк

- Симметрия в мире кварков и лептонов указывает на то, что в природе существует три семейства кварков и лептонов.
- Должен существовать шестой кварк с зарядом  $Q=+2/3$
- t-кварк был открыт в 1995 г. в столкновении пучков протонов и антипротонов (Теватрон, Фермилаб, США)



*u*    *c*    *t*  
*d*    *s*    *b*

# Кварки 2000

- Все адроны состоят из различных комбинаций этих шести кварков.  $qqq, q\bar{q}, \bar{q}\bar{q}\bar{q}$
- Есть достаточно серьезные основания считать что число кварков не должно быть больше шести.
- Кварки являются фундаментальными частицами из которых состоят все сильновзаимодействующие частицы.
- Кварки не существуют в свободном состоянии. Они заключены в адронах.
- Силы, связывающие кварки в адронах, растут с увеличением расстояния между кварками. Это называют удержанием кварков в адронах или конфайнментом.

# Ароматы (типы) кварков

- Каждый из шести кварков обладает своим ароматом, который совпадает с названием кварков – u, d, s, c, b, t.
- Для идентификации «ароматных» свойств легчайших кварков u и d используется квантовое число I – изоспин.
- Ароматы s, c, b, t задаются специальными аддитивными квантовыми числами. Их названия: странность (s), очарование или шарм (c), боттом (b) и топ (t).
- У кварков s, c, b, t эти квантовые числа имеют значения:  
 $s(s) = -1, \quad c(c) = +1, \quad b(b) = -1, \quad t(t) = +1$
- у антикварков соответственно  
 $s(\bar{s}) = +1, \quad c(\bar{c}) = -1, \quad b(\bar{b}) = +1, \quad t(\bar{t}) = -1$
- Условились считать знаки ароматов s, c, b, t совпадающими со знаками электрических зарядов кварков.
- Изоспин I и квантовые числа s, c, b, t являются приблизительно сохраняющимися квантовыми числами. Они сохраняются только в сильных взаимодействиях.

# Электрический заряд кварков $Q(e)$

$$\begin{array}{cccc} u & c & t & + \frac{2}{3} \\ d & s & b & - \frac{1}{3} \end{array}$$

Для средних по событиям электрических зарядов адронных струй, образующихся в передней полусфере под действием пучка нейтрино (антинейтрино) получены величины:  $Q(u) = 0.65 \pm 0.12$ ,  $Q(d) = -0.33 \pm 0.09$ , что убедительно согласуется с предсказанными значениями  $Q(u)=+2/3$  и  $Q(d)=-1/3$ .



# Барионный заряд кварков

- Стандартная Модель приписывает лептонам три лептонных заряда  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$ .
- Аналогичной характеристикой кварков, но одной и той же для всех кварков является барионный заряд  $B$ .
- Барионный заряд кварков =  $+1/3$ .
- Барионный заряд антикварков =  $-1/3$ .
- Барионный заряд является аддитивным сохраняющимся квантовым числом.
- Не обнаружено каких-либо указаний на несохранение барионного заряда.

$$B(q) = +\frac{1}{3} \quad B(\bar{q}) = -\frac{1}{3}$$

# Барионный заряд кварков

- Адроны, состоящие из трех кварков, имеют барионный заряд  $B=1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$  и называются барионами.
- Антибарионы, состоящие из трех антикварков, имеют  $B=-1/3 + (-1/3) + (-1/3) = -1$ .
- Мезоны, состоящие из одного кварка и одного антикварка, имеют  $B = +1/3 + (-1/3) = 0$ .

# Изоспин кварков

- Для идентификации «ароматных» свойств легчайших кварков  $u$  и  $d$  используется квантовое число  $I$  – изоспин.
- Изоспин  $I$  - характеристика специфической симметрии сильного взаимодействия – изоспиновой симметрии.
- Операторы изоспина и его проекции действуют в пространстве кварков, меняя тип кварка:  $u \leftrightarrow d$ .
- По своим формальным свойствам изоспин  $I$  и его проекция тождественны спину  $J$  и его проекции на ось квантования  $z$ .
- $u$ - и  $d$ -кварки – это два различных состояния одной частицы в изоспиновом пространстве.
- При перевороте изоспина кварка электрический заряд кварка изменяется на единицу.
- Изоспин системы кварков вычисляется по правилам, аналогичным правилам сложения угловых моментов.
- Изоспин системы кварков может принимать целые или полуцелые значения:  $I=0, 1/2, 1, 3/2$

# Изоспин $u$ - и $d$ - кварков

- $u$ - и  $d$ - кваркам приписывается изоспин  $I = \frac{1}{2}$  с проекциями  $I_3$  на ось квантования в изоспиновом пространстве, равными соответственно  $+\frac{1}{2}$  (изоспин направлен вверх) и  $-\frac{1}{2}$  (изоспин направлен вниз):

$$u \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = +\frac{1}{2}$$

$$d \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = -\frac{1}{2}$$

- Изоспины антикварков.

$$\bar{u} \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = -\frac{1}{2}$$

$$\bar{d} \rightarrow I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = +\frac{1}{2}$$

# Изоспин s, c, b, t кварков

- Изоспин s, c, b, t кварков равен нулю.

$$I(s, c, b, t) = 0$$

# Изоспиновые мультиплеты

- Кварковые системы, обладающие определенным изоспином  $I$ , также вырождены по проекции  $I_3$  и, следовательно, по массе.
- Эти системы частиц называются изоспиновыми мультиплетами.
- Частицы в изоспиновом мультиплете отличаются проекцией  $I_3$  изоспина, поэтому число  $n$  частиц в мультиплете определяется величиной изоспина  $I$ :  
 **$n=2I+1$ .**
- Каждой проекции изоспина соответствует одна частица изоспинового мультиплета

# Гиперзаряд $Y$

- Для адронов справедливо соотношение М. Гелл-Манна и К. Нишиджимы. Оно было установлено в 1953 г. для адронов, состоящих из лёгких кварков ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ):

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

$Q$  — электрический заряд/

$I_3$  — проекция изоспина кварка.

$Y$  — гиперзаряд.

$$Y = B + s$$

$B$  — барионное число

$s$  — странность кварка.

- С появлением других ароматов кварков  $c$ ,  $b$  и  $t$  используют обобщённый гиперзаряд:

$$Y = B + s + c + b + t$$

# Проблема цвета

$$\Omega^- (sss) \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Omega^-) = 1672 \text{ МэВ}$

$$\Delta^{++} (uuu) \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^{++}) = 1232 \text{ МэВ}$

$$\Delta^- (ddd) \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^-) = 1232 \text{ МэВ}$



# Проблема цвета

- $\Delta^{++}, \Delta^-, \Omega^-$  состоят из трех тождественных кварков:  $\Delta^{++} - (uuu), \Delta^- - (ddd), \Omega^- - (sss)$ . У всех частиц  $J^P = 3/2^+$ .
- Без введения квантового числа «цвет», принимающего три значения, кварковая структура  $\Delta^{++}, \Delta^-, \Omega^-$  противоречит принципу Паули.
- Чтобы выполнялся принцип Паули, необходимо ввести для кварков ещё одно квантовое число – «цвет», который должен принимать три разных значения.

$$\Omega^- (sss) \begin{array}{c} \uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3}{2}^+, I = \frac{3}{2}$$

# Цвет

- $\Delta^{++}$ -резонанс, можно представить как комбинацию трех u-кварков в разных цветовых состояниях:  $\Delta^{++} = u_{\text{к}} u_{\text{з}} u_{\text{с}}$ .
- **Проблема:** если  $u_{\text{к}} u_{\text{з}} u_{\text{с}}$  – это единственный вариант  $\Delta^{++}$ -резонанса, то для протона можно предложить несколько вариантов, не нарушая принципа Паули:  $u_{\text{к}} u_{\text{з}} d_{\text{с}}$ ,  $u_{\text{к}} u_{\text{з}} d_{\text{з}}$ ,  $u_{\text{с}} u_{\text{к}} d_{\text{к}}$  и т. д.
- Но в природе существует только одно протонное состояние.
- **Выход:** принятие постулата о бесцветности наблюдаемых квантовых состояний адронов.
- Бесцветность адронов означает, что кварки разного цвета представлены с равными весами. О таких бесцветных состояниях говорят как о цветовых синглетах.

# Цвет

- Цвет кварков – это условное название внутренней степени свободы каждого из шести кварков.
- Цвет принимает три значения, и выполняет роль заряда сильного взаимодействия.
- Обычно используют три цвета – красный (к), зеленый (з) и синий (с).
- Существование цвета означает, что кварков не шесть (u, d, s, c, b, t), а восемнадцать – кварки каждого аромата утраиваются:

$$\begin{aligned} u &\rightarrow u, u, u & c &\rightarrow c, c, c & t &\rightarrow t, t, t \\ d &\rightarrow d, d, d & s &\rightarrow s, s, s & b &\rightarrow b, b, b \end{aligned}$$

- Цвет является аддитивным сохраняющимся квантовым числом.
- Антикварки характеризуются антицветом :

$$\begin{aligned} \bar{u} &\rightarrow \bar{u}, \bar{u}, \bar{u} & \bar{c} &\rightarrow \bar{c}, \bar{c}, \bar{c} & \bar{t} &\rightarrow \bar{t}, \bar{t}, \bar{t} \\ \bar{d} &\rightarrow \bar{d}, \bar{d}, \bar{d} & \bar{s} &\rightarrow \bar{s}, \bar{s}, \bar{s} & \bar{b} &\rightarrow \bar{b}, \bar{b}, \bar{b} \end{aligned}$$

# Цвет

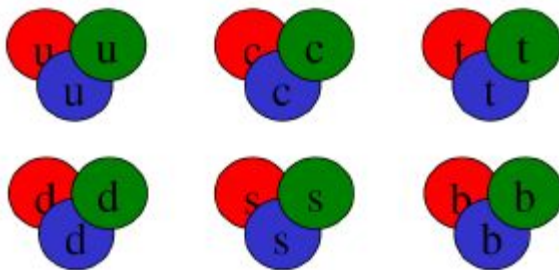
- **Силы взаимодействия между кварками называют цветными.**
- **Кварки имеют цветные заряды и объединяются в адроны так, что получаются бесцветные комбинации.**
- **В природе допустимы только бесцветные состояния составных систем из кварков и глюонов.**
- **Поэтому мы не видим отдельные цветные кварки, а видим только их бесцветные комбинации в виде адронов.**

# Конфайнмент

- **Конфайнмент - удержание цветных кварков и глюонов внутри бесцветных адронов.**
- **Ни в природе, ни в экспериментах при высоких энергиях кварки и глюоны в свободном состоянии в виде цветных объектов не обнаружены.**
- **Гипотеза конфайнмента состоит в том, что кварки и глюоны могут существовать только в связанном состоянии внутри адрона.**
- **Для того чтобы не дать возможности кваркам покинуть адрон, силы связывающие кварки в адроне должны возрасти с увеличением расстояния между кварками.**
- **Известно, что между адронами не действуют такие силы, т.к. адроны существуют изолированно друг от друга.**
- **Структурные составляющие адрона принципиально невозможно выделить в свободном состоянии.**

# Кварки

- Кварки не существуют в свободном состоянии
- Кварки заключены в кварковых системах – адронах.
- Кварки не могут освободиться от взаимодействий с находящимися в том же объеме другими кварками и глюонами.
- Конституэнтные кварки—это «эффективные» кварки в адронах, движение и взаимодействие которых, формирует адрон.
- Токовые кварки – кварки, не испытывающие взаимодействия.



# Кварки

Характеристика	Тип кварка (аромат)					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q, в единицах e	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3	+1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I <sub>3</sub>	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Очарование (charm) c	0	0	0	+1	0	0
Bottom b	0	0	0	0	-1	0
Top t	0	0	0	0	0	+1
Масса конститuentного кварка $m c^2$ , ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	180
Масса токового кварка	4–8 МэВ	1.5–4 МэВ	80–130 МэВ	1.1-1.4 ГэВ	4.1–4.9 ГэВ	174±5 ГэВ

# Вопросы

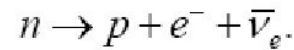
- Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
- Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
- Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
- Экзотические состояния: тетра- и пентакварки?



# Пример

Определить длину  $L$  и время  $t$  пробега реакторного нейтрино в воде, воспользовавшись данными эксперимента Райнеса и Коуэна (1956 - 1959 г.г.), получившими для сечения взаимодействия антинейтрино с веществом  $\sigma \approx 10^{-43} \text{ см}^2$ .

Антинейтрино в реакторе рождается в реакции распада нейтрона



Число нейтрино прошедших через слой вещества толщиной  $x$ ,

$$N(x) = N(0) \exp(-n\sigma x),$$

$n$  — количество ядер вещества в единице объема.

Определим  $L$  как длину, на которой поток антинейтрино уменьшается в  $e$  раз, то есть  $L = 1/ns$ .

В свою очередь  $n = \rho N_A / A$ ,  $N_A$  — число Авогадро,

$\rho$  — плотность вещества,  $A$  — молярная масса.

Для воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $A(\text{H}_2\text{O}) = 18$ . Откуда

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{ns} = \frac{A}{\rho N_A \sigma} = \frac{18}{1 \text{ г/см}^3 \times 6 \cdot 10^{23} \times 10^{-43} \text{ см}^2} = \\ &= 3 \cdot 10^{20} \text{ см} = 3 \cdot 10^{15} \text{ км}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{L}{c} = \frac{3 \cdot 10^{15} \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 10^{10} \text{ с} \approx 320 \text{ лет}, \\ &\quad (1 \text{ год} \approx 3,156 \cdot 10^7 \text{ с}). \end{aligned}$$

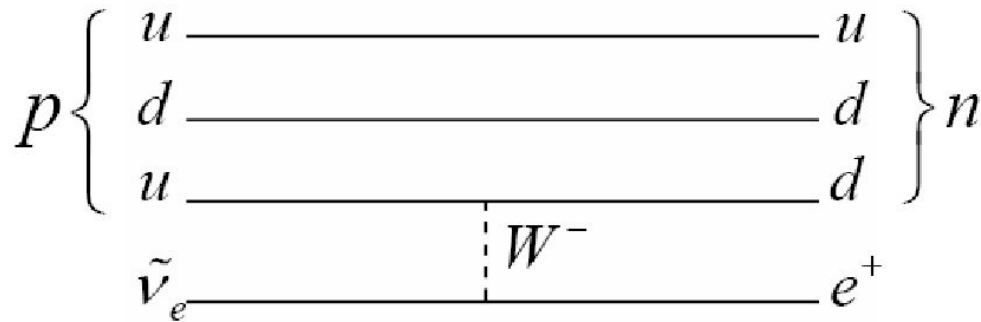
## Пример

$$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$L_e \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad -1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$



Процесс разрешён

$$\tilde{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$L_e \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Процесс **запрещён**

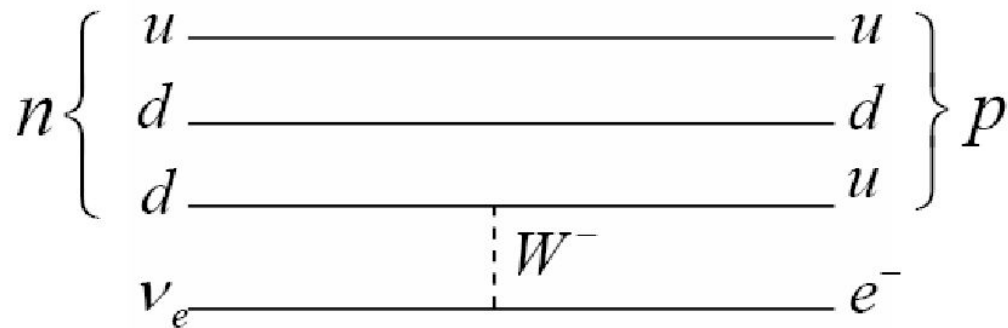
# Пример

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$L_e \quad +1 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$



Процесс разрешён

$$\nu_e + p \rightarrow n + e^+$$

$$L_e \quad +1 \quad 0 \quad 0 \quad -1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Процесс **запрещён**

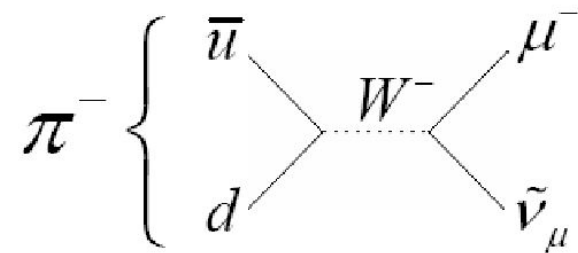
# Пример

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\mu \quad 0 \quad +1 \quad -1$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

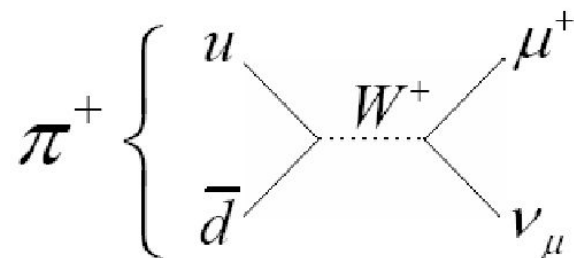


$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\mu \quad 0 \quad -1 \quad +1$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0$$



# Пример

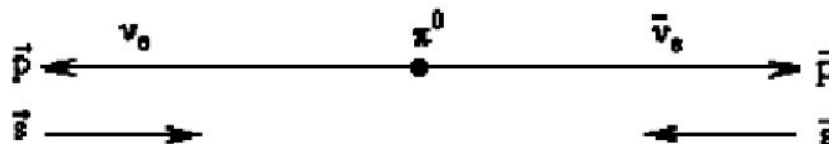
Возможен ли распад  $\pi^0 \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$  для нейтрино с нулевой массой?

Нейтрино всегда имеет отрицательную спиральность, а антинейтрино всегда имеет положительную спиральность.

Спин нейтрино  $s_\nu$  равен  $1/2$ , и направление его вектора противоположно направлению движения частицы. Спин антинейтрино  $s_{\bar{\nu}}$  также равен  $1/2$ , но направление его вектора совпадает с направлением движения частицы.

При распаде, исходя из закона сохранения импульса, нейтрино должны разлетаться строго в противоположные стороны. Момент количества движения  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$   $\vec{J} = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = \vec{1}$ . Однако, спин  $\pi^0$ -мезона равен 0, то есть данный распад невозможен из-за нарушения закона сохранения момента количества движения

$$J_i = J_\pi, \quad J_f = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = 1$$



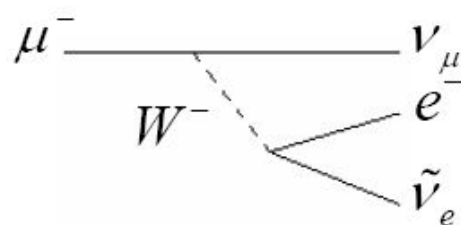
## Пример

$$\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$L_e \quad 0 \quad +1 \quad -1 \quad 0$$

$$L_\mu \quad +1 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$



Распад разрешён

$$\mu^- \not\rightarrow e^- + \gamma$$

$$L_e \quad 0 \quad +1 \quad 0$$

$$L_\mu \quad +1 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Распад **запрещён**.

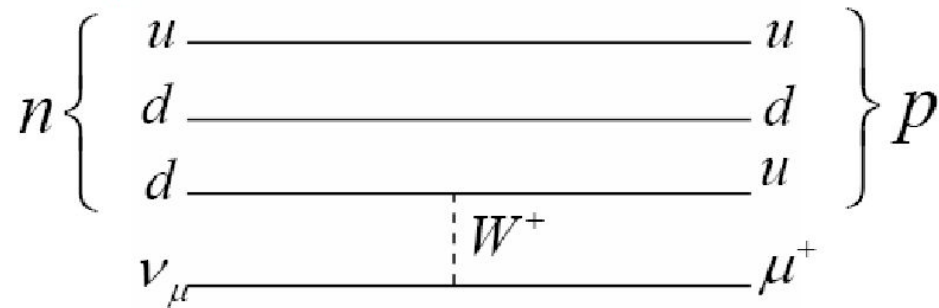
# Пример

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_{\mu} \quad +1 \quad 0 \quad +1 \quad 0$$

$$L_{\tau} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$



Процесс разрешён

$$\nu_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_{\mu} \quad +1 \quad 0 \quad -1 \quad 0$$

$$L_{\tau} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Процесс **запрещён**

# Пример

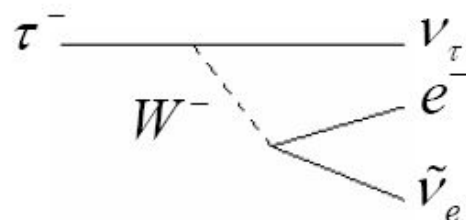
$$\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$L_e \quad 0 \quad +1 \quad -1 \quad 0$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad +1 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

Распад разрешён



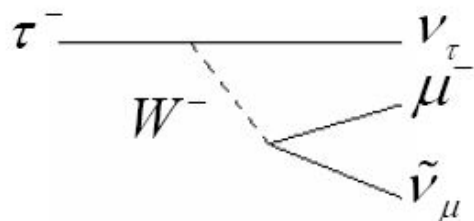
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\mu \quad 0 \quad +1 \quad -1 \quad 0$$

$$L_\tau \quad +1 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

Распад разрешён





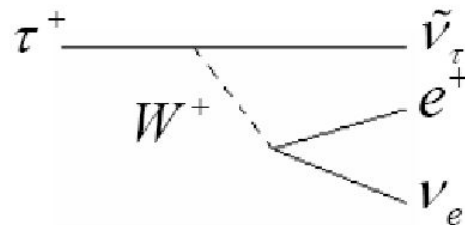
# Пример

$$\tau^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\tau + \nu_e$$

$$L_e \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad +1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

$$L_\tau \quad -1 \quad 0 \quad -1 \quad 0$$



Распад разрешён

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad -1 \quad +1 \quad 0$$

$$L_\tau \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Распад **запрещён**

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \nu_e$$

$$L_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad +1$$

$$L_\mu \quad 0 \quad -1 \quad +1 \quad 0$$

$$L_\tau \quad -1 \quad 0 \quad 0 \quad 0$$

Распад **запрещён**

# Пример

## Изоспиновый триплет $I=1$

$$\pi^+ \quad (139.57 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = +1$$

$$\pi^0 \quad (134.98 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = 0$$

$$\pi^- \quad (139.57 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = -1$$

$$\pi^+ \quad (u\bar{d}) \quad I_3 = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

$$\pi^0 \quad (u\bar{u} - d\bar{d}) \quad I_3 = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

$$\pi^- \quad (\bar{u}d) \quad I_3 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -1$$

$$I=1 \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{ll} I_3 = +1 & \pi^+ \\ I_3 = 0 & \pi^0 \\ I_3 = -1 & \pi^- \end{array}$$

# Пример

## Изоспиновый дублет $I=1/2$

$$\begin{array}{lll} K^+ & (494 \text{ МэВ}) & I = \frac{1}{2} \quad I_3 = +\frac{1}{2} \\ K^- & (494 \text{ МэВ}) & I = \frac{1}{2} \quad I_3 = -\frac{1}{2} \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} K^+ & (u\bar{s}) & I_3 = +\frac{1}{2} + 0 = +\frac{1}{2} \\ K^- & (\bar{u}s) & I_3 = -\frac{1}{2} + 0 = -\frac{1}{2} \end{array}$$

$$I = \frac{1}{2} \rightarrow \begin{array}{ll} I_3 = +\frac{1}{2} & K^+ \\ I_3 = -\frac{1}{2} & K^- \end{array}$$

# Пример

## Изоспиновый синглет $I=0$

$$\Lambda \quad (1116 M\text{эВ}) \quad I = 0 \quad I_3 = 0$$

$$\Lambda \quad (uds) \quad I_3(u) = +\frac{1}{2} \quad I_3(d) = -\frac{1}{2}$$

## Изоспиновый триплет $I=1$

$$\Sigma^+ \quad (1189 M\text{эВ}) \quad I = 1 \quad I_3 = +1$$

$$\Sigma^0 \quad (1193 M\text{эВ}) \quad I = 1 \quad I_3 = 0$$

$$\Sigma^- \quad (1197 M\text{эВ}) \quad I = 1 \quad I_3 = -1$$

$$\Sigma^+ \quad (uus) \quad I_3 = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 0 = 1$$

$$\Sigma^0 \quad (uds) \quad I_3 = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + 0 = 0$$

$$\Sigma^- \quad (dds) \quad I_3 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + 0 = -1$$

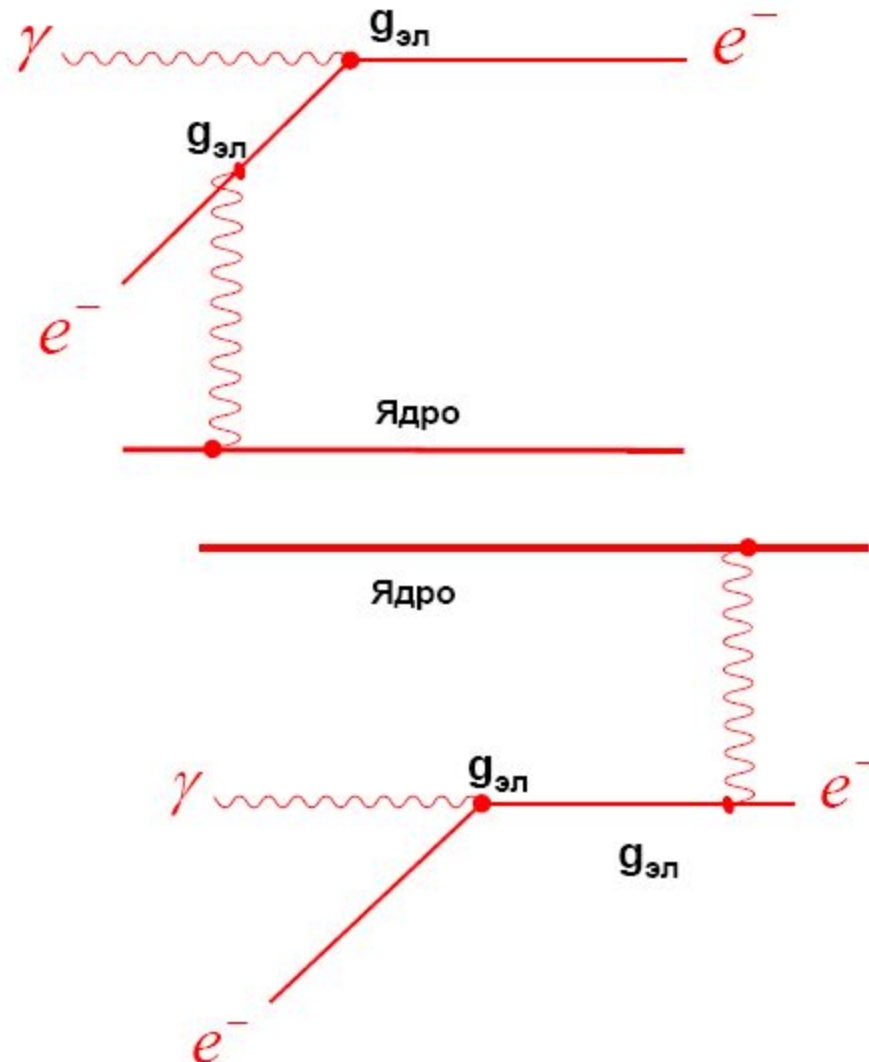
$$I_3 = +1 \quad \Sigma^+$$

$$I=1 \rightarrow I_3 = 0 \quad \Sigma^0$$

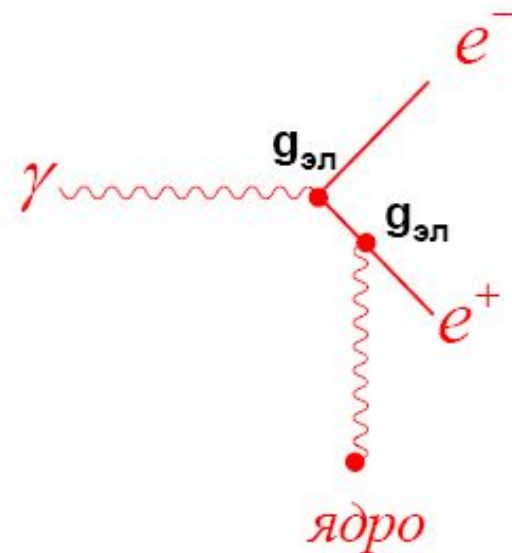
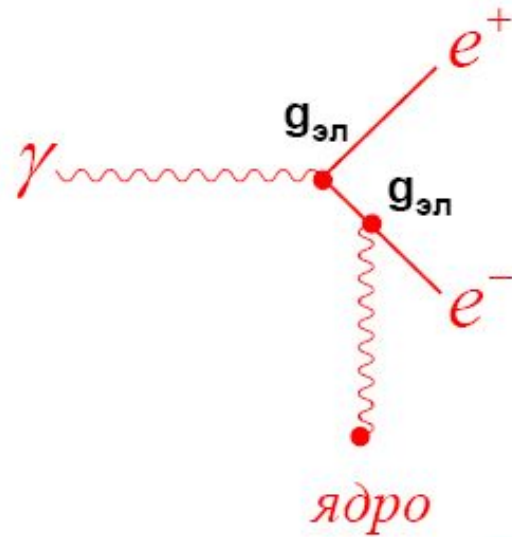
$$I_3 = -1 \quad \Sigma^-$$

# Пример. Фотоэффект

Поглощение  $\gamma$ -кванта атомом с вылетом одного из атомных электронов  $e^-$ .

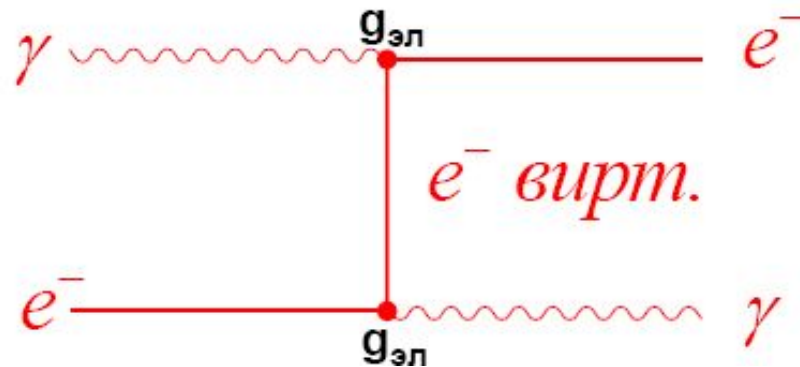


# Пример. Образование фотонем $e^+e^-$ пары в поле ядра



## Пример. Эффект Комптона

Рассеяние фотона на свободном электроне



# Пример

Из характеристик переносчиков слабого взаимодействия  $W^\pm$  - и  $Z$  -бозонов определить радиус слабых сил.

Массы  $W$ - и  $Z$ -бозонов:  $m_W \approx 80 \text{ ГэВ}/c^2$ ,  
 $m_Z \approx 90 \text{ ГэВ}/c^2$ . Радиус действия слабых сил  $a_W$  связан с массой переносчиков взаимодействия  $W$ - и  $Z$ -бозонов соотношением:

$$a_W \approx \frac{\hbar c}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar c}{m_Z c^2}, \quad (*)$$

следующими из соотношения неопределенности  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ . Действительно, нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E = m_W c^2 \approx m_Z c^2$  ненаблюдаемы в течение временных интервалов

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar}{m_Z c^2}.$$

Откуда следует (\*). Так как  $m_W \approx m_Z \approx 100 \text{ ГэВ}/c^2$ , имеем

$$a_W \approx \frac{0,2 \text{ ГэВ} \cdot \Phi_M}{100 \text{ ГэВ}} = 2 \cdot 10^{-3} \Phi_M.$$



## Задание на дом

1. Ширина резонанса  $\Gamma(J/\psi) = 91$  кэВ. Рассчитать время жизни  $J/\psi$ -частицы.
2. Используя соотношение Гелл-Манна и Нишиджимы определить величины электрических зарядов систем кварков:

$$(uid), (udd), (s\bar{b}), (\bar{s}d)$$

$$(usc), (\bar{u}\bar{s}\bar{c})$$