

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

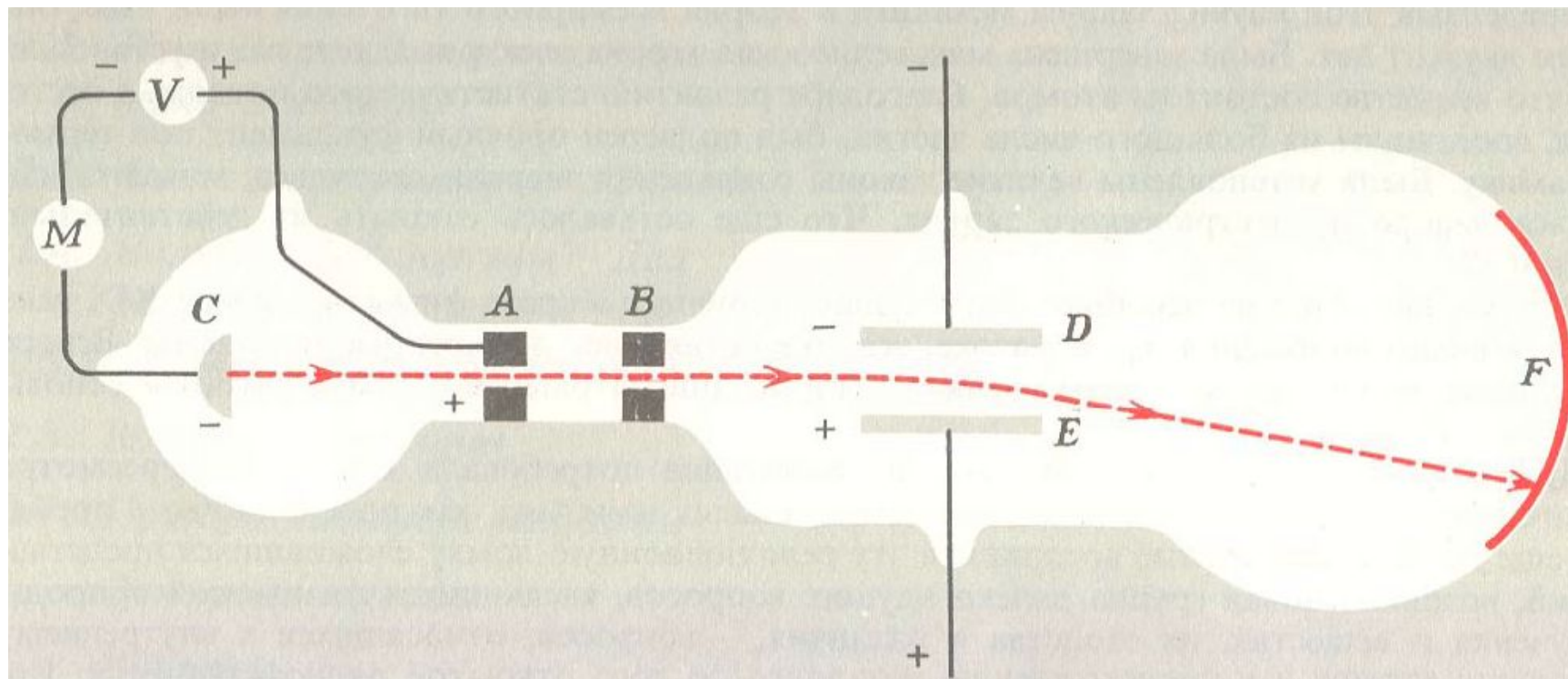
(раздельно частицы и взаимодействия !!).



Элементарные частицы

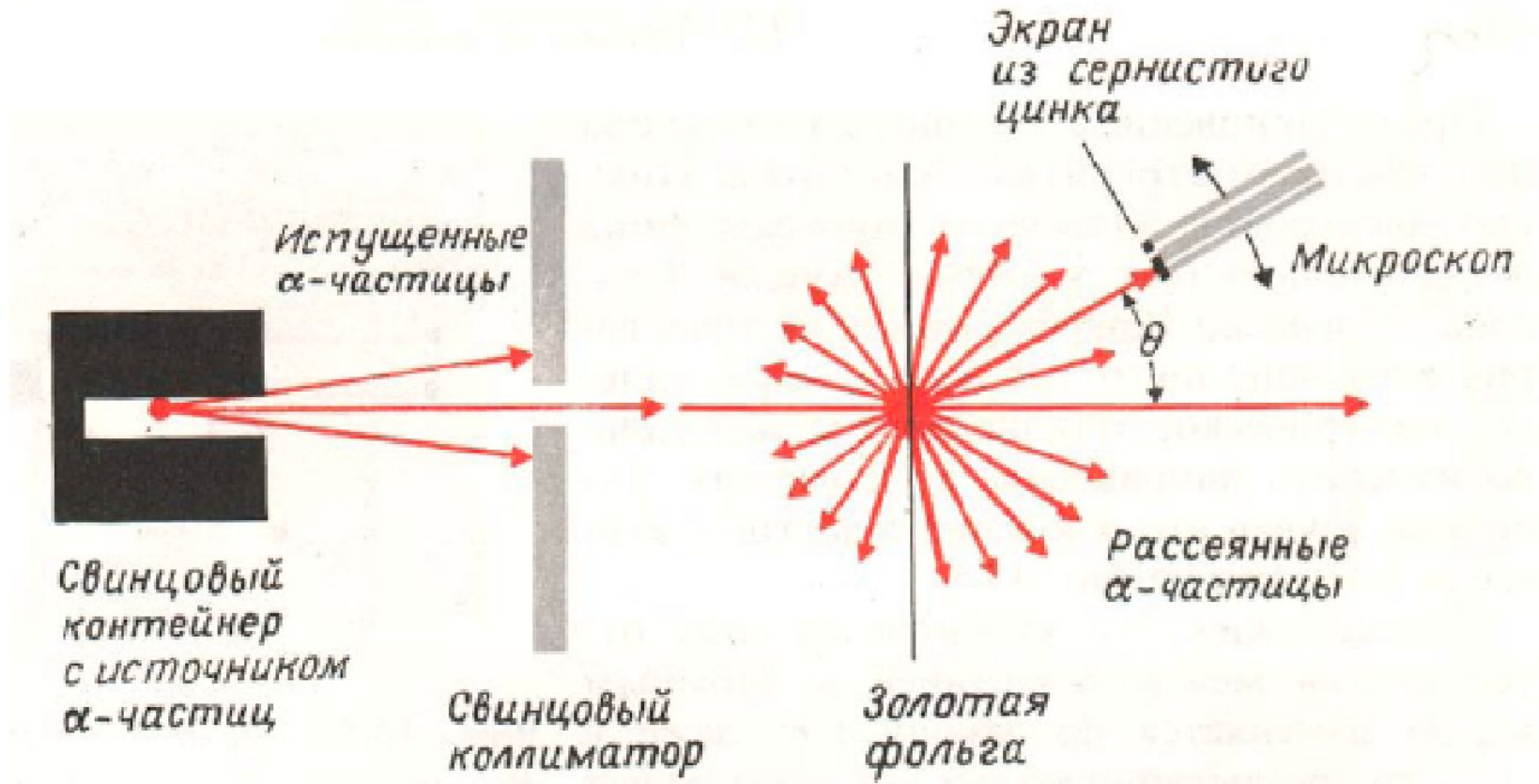
- Демокрит, Эпикур: нет ничего, кроме атомов и пустоты, в которой движутся атомы. Атомы - мельчайшие неделимые частицы, вечные и неизменные, пребывающие в постоянном движении и различающиеся формой и величиной.
- Аристотель, Платон, Сократ: вещество можно делить бесконечно.

Открытие электрона 1897 год, Дж.Дж. Томсон



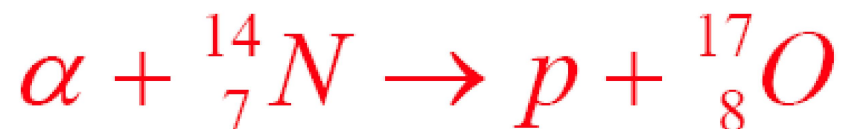
1904 г. : Дж. Дж. Томсон: атом - нейтральная система - из заряженного шара с зарядом $+Ze$, внутри Z отрицательно заряженных электронов.
Размер атома $\sim 10^{-8}$ см. **Нобелевская премия по физике 1906 г.**

Открытие ядра и протона 1919 г. Э. Резерфорд



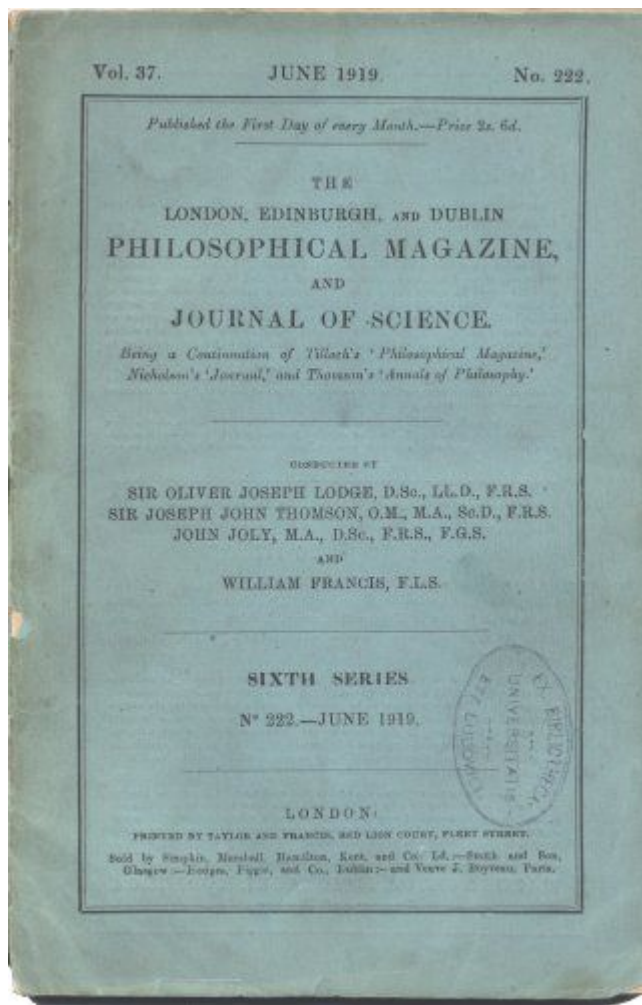
Нобелевская премия 1908 г.

Открытие протона

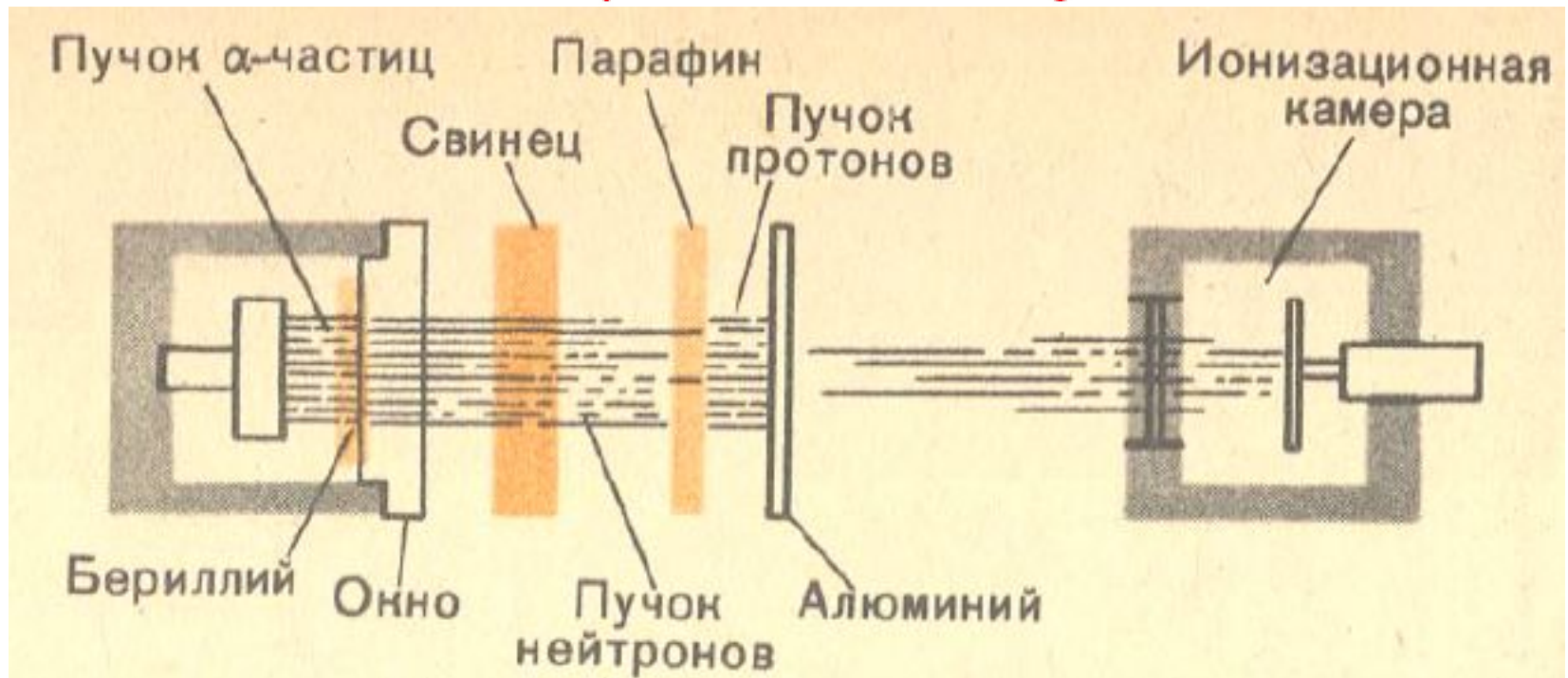


«Мы должны заключить, что атом азота распадается под воздействием значительных сил, развиваемых быстрой альфа-частицей при значительном сближении, и, что освобождающийся атом водорода является существенной составной частью ядра азота»

Ernest Rutherford



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



Нобелевская премия 1935 г.

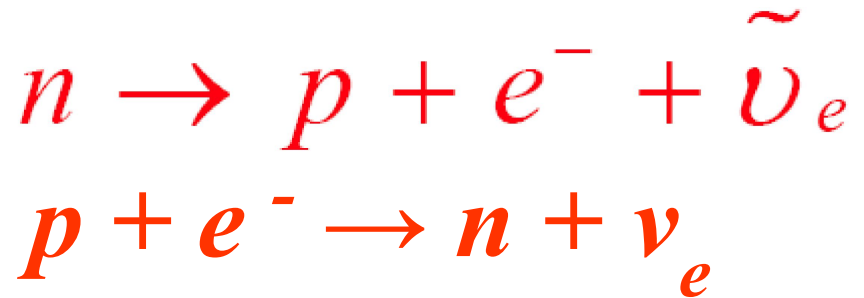
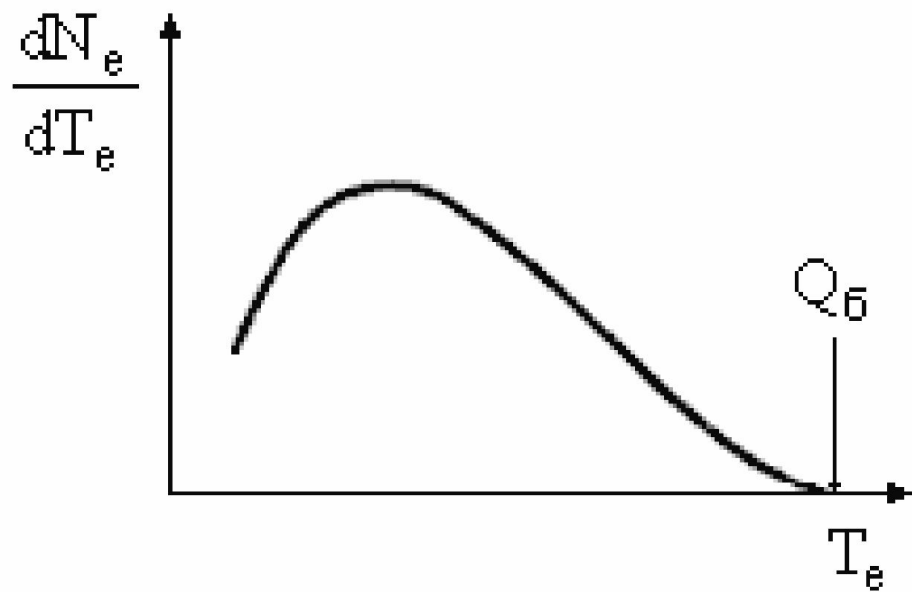
Протон – нейтронная модель ядра

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 β -распаде?

Нейтрино

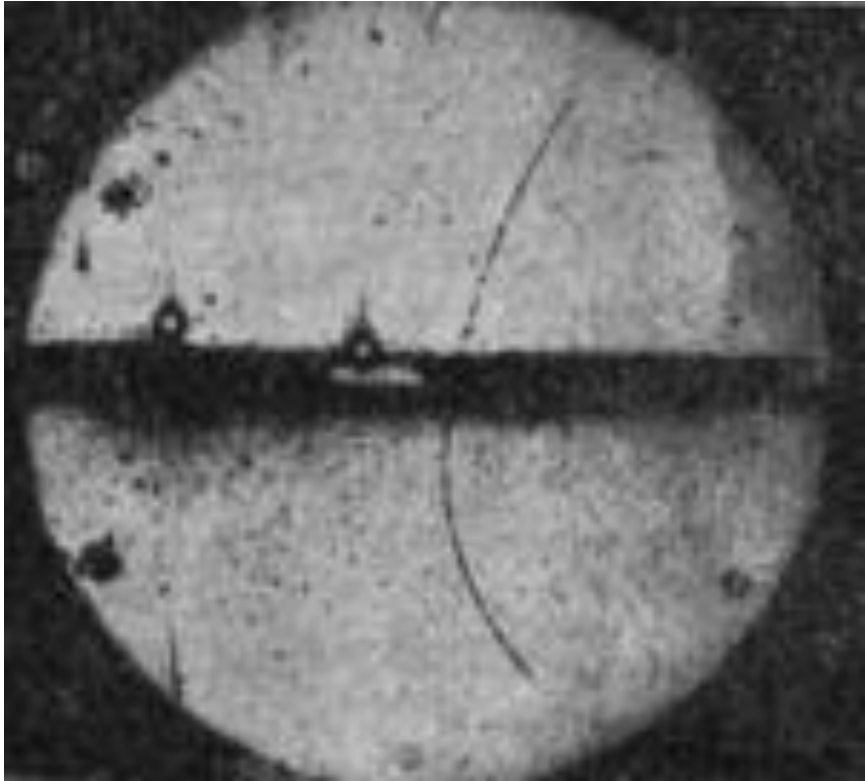
1931 г. В. Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино для объяснения спектра электронов β -распада



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: π^- , π^0 , π^+

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 → β – 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

μ^-

1956 – Ф. Райнес, К. Козэн

$\tilde{\nu}_e$

1962 – Л. Ледерман

ν_μ

1975 – М. Перл

τ^-

2000 – Лаб. Э. Ферми

ν_τ

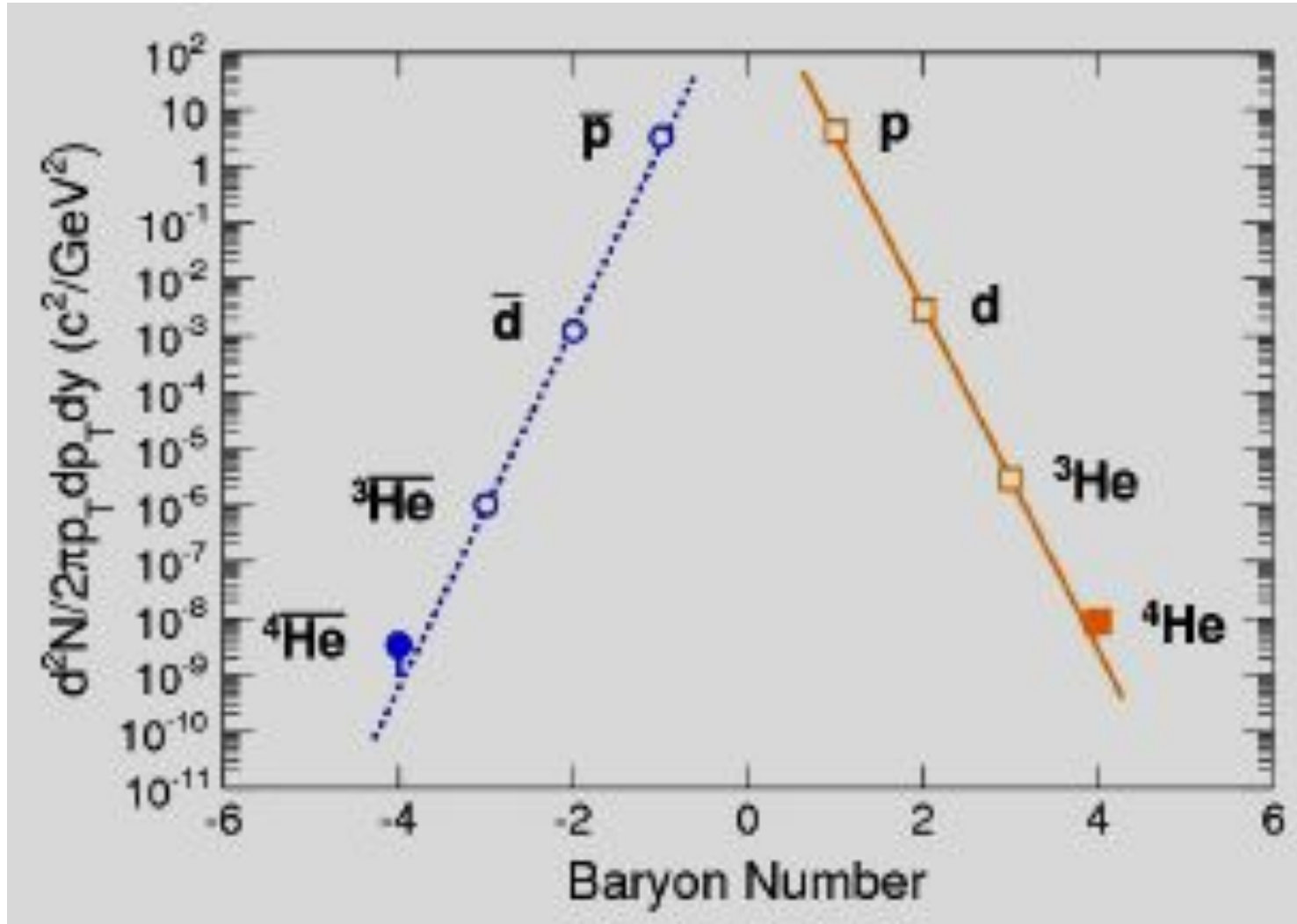
e^- (0.511МэВ)	μ^- (106 МэВ)	τ^- (1770МэВ)
ν_e (<3 эВ)	ν_μ (<0.17МэВ)	ν_τ (<18 эВ)

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.
- Антивещество?**

Открытие анти-гелия-4 (preprint 22.03.2011)



Как устроен Мир. 60-е годы XX века

Лептоны

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

Адроны

Барионы

$J = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$

Мезоны

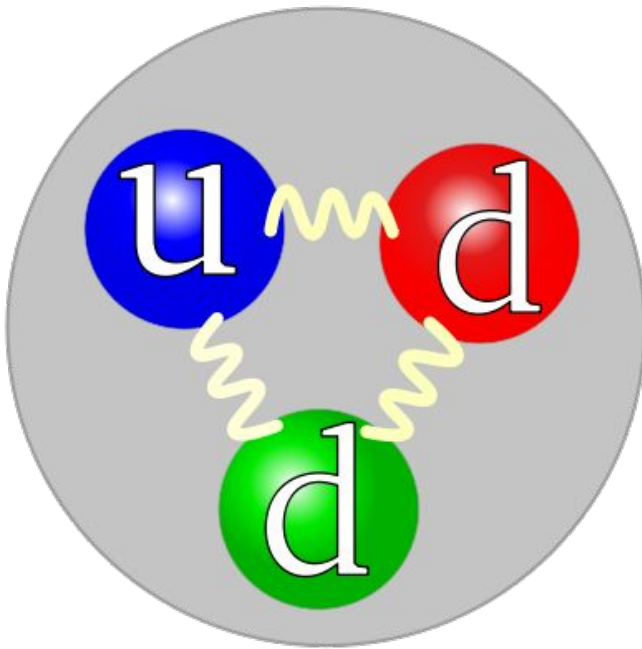
$J = 0, 1, 2, \dots$

Адроны

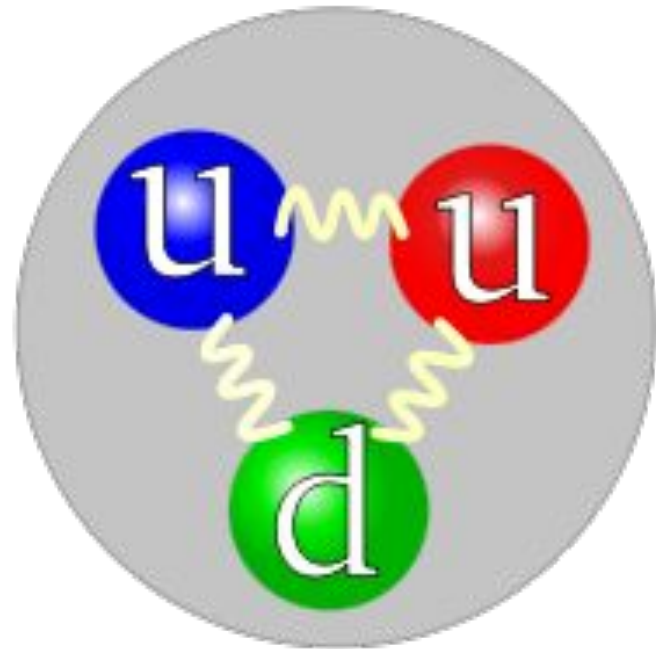
- частицы, сильно взаимодействующие друг с другом, (протон и нейтрон);
- различаются массой, величиной электрического заряда, спином;
- Барионный заряд;
- Барионы – это адроны с отличным от нуля барионным зарядом и полуцелым спином;
- Мезоны – адроны с нулевым барионным зарядом и целым спином.
- Адроны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

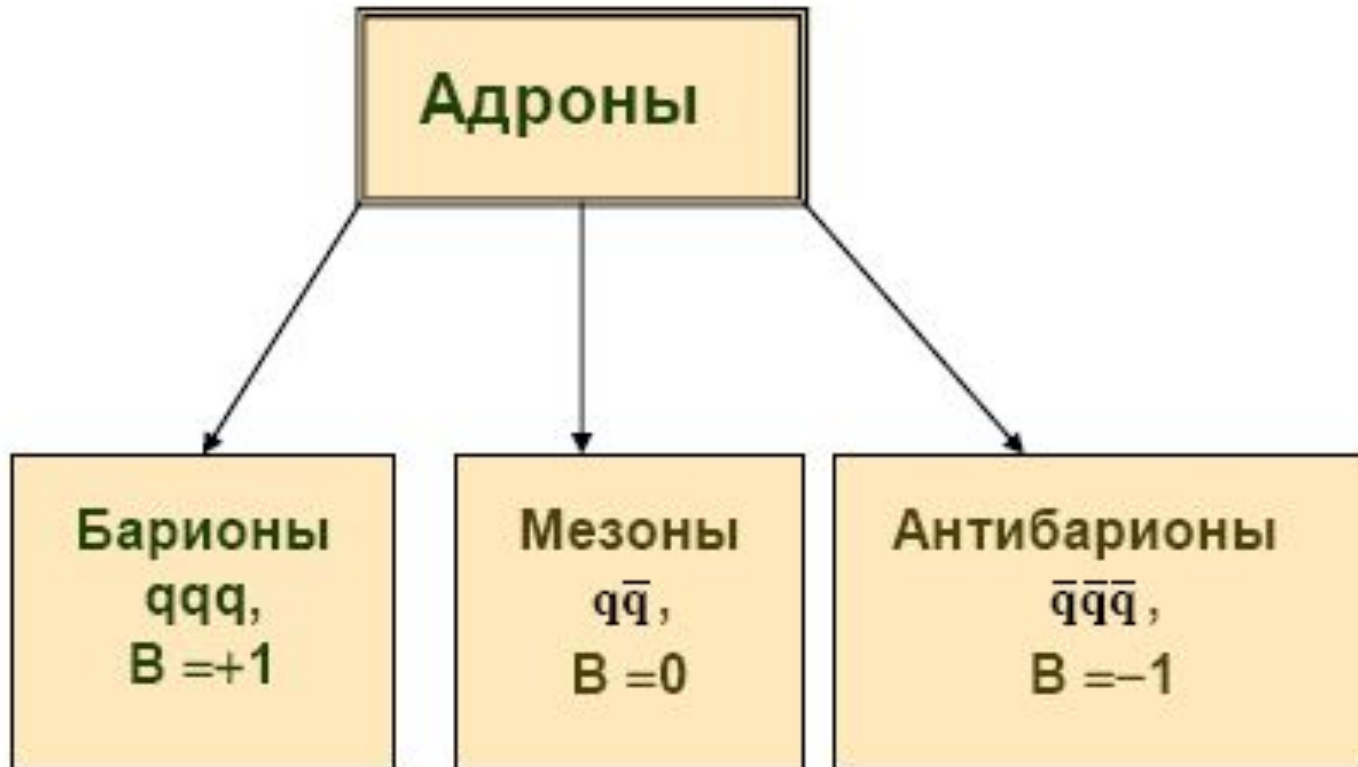


протон: 2up 1down

Нобелевская премия 1969 г.

Адроны

- СИСТЕМЫ СВЯЗАННЫХ КВАРКОВ



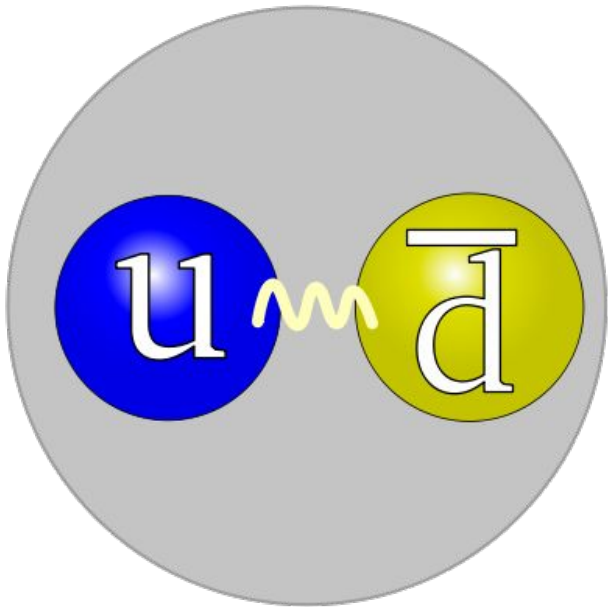
Барионы – связанные состояния трёх кварков

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 ± 0.8	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
Λ	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
Σ^+	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
Σ^0	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
Σ^-	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
Ξ^0	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ξ^-	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
Ω^-	sss	1672.4	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	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: π^- , π^0 , π^+



π^- : 1 down, 1 anti-up ,
 π^0 : 1 down, 1 anti-down
or 1 up, 1 anti-up,
 π^+ : 1 up, 1 anti-down

Мезоны – связанные состояния кварка-антикварка

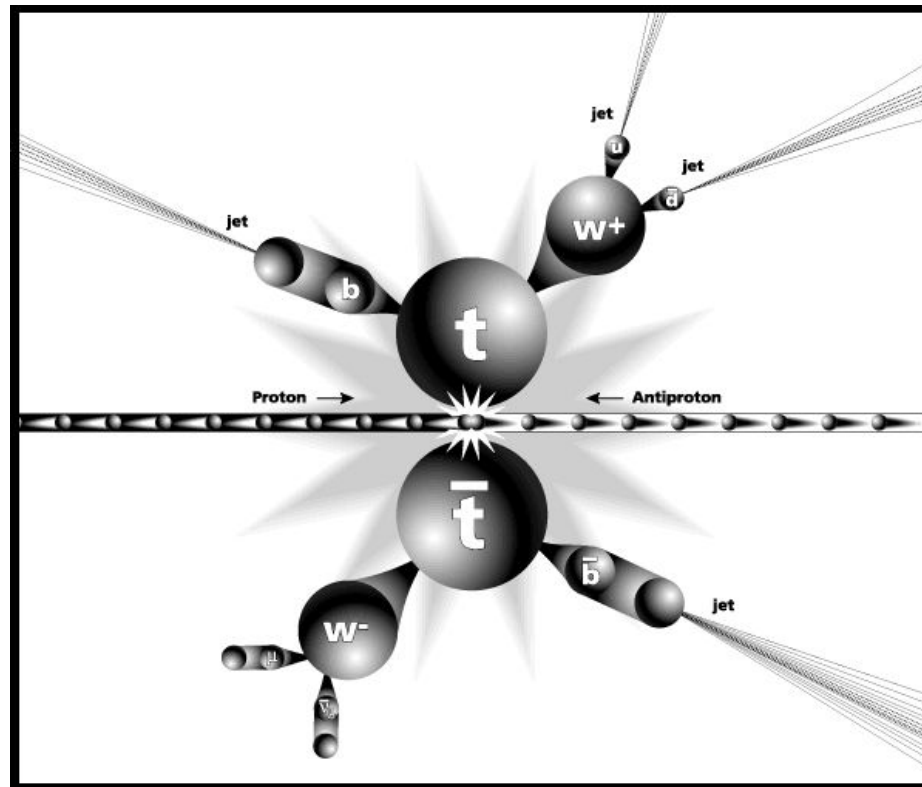
Частица	Кварковая структура	Масса mc^2 , МэВ	Время жизни τ [с] или ширина Γ	Спин-четность, изоспин $J P (I)$	Основные моды распада
π^+	$u\bar{d}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\mu\nu^+$
π^-	$d\bar{u}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	μ^-
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134,98	$8,4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	2γ
K^+	$u\bar{s}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\mu\nu^+$, $\pi^0\pi^+$
K^-	$s\bar{u}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	μ^- , $\pi^0\pi^-$
$\rho^+\rho^-$ ρ^0	$u\bar{d} \ d\bar{u}$ $u\bar{u} - d\bar{d}$	769	150 МэВ	$1^-(1)$	$\pi\pi$
ω	$u\bar{u} + d\bar{d}$	783	8,4 МэВ	$1^-(0)$	3π
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/Ψ	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	$1^-(0)$	адроны, $2e$, 2μ
Υ	$b\bar{b}$	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/ψ-мезона → c – кварк, (скрытое очарование).
- 1977 г. открытие Υ-мезона → b – кварк (скрытая красота).

1995 г. t - кварк

Две группы по 450 человек!



Как устроен Мир. Конец XX века

ФЕРМИОНЫ

КОМПОНЕНТЫ ВЕЩЕСТВА (СПИН = 1/2)

Лептоны (спин = 1/2)			
Аромат		Масса, ГэВ/c ²	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$< 1 \times 10^{-8}$	0
e	электрон	0,000511	-1
ν_μ	мюонное нейтрино	$< 0,0002$	0
μ	мюон	0,106	-1
ν_τ	тау-нейтрино	$< 0,02$	0
τ	тау	1,7771	-1

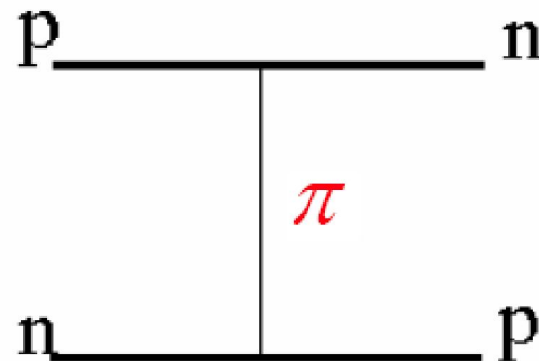
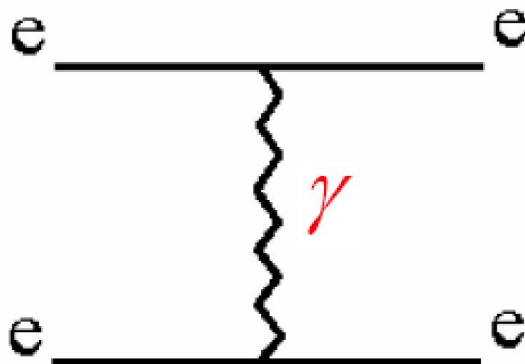
Кварки (спин = 1/2)			
Аромат		Прибл. масса, ГэВ/c ²	Электрический заряд
u	up	0,003	2/3
d	down	0,006	-1/3
c	charm	1,3	2/3
s	strange	0,1	-1/3
t	top	175	2/3
b	bottom	4,3	-1/3

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^- , μ^- , τ^- , ν_e , ν_μ , ν_τ) 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

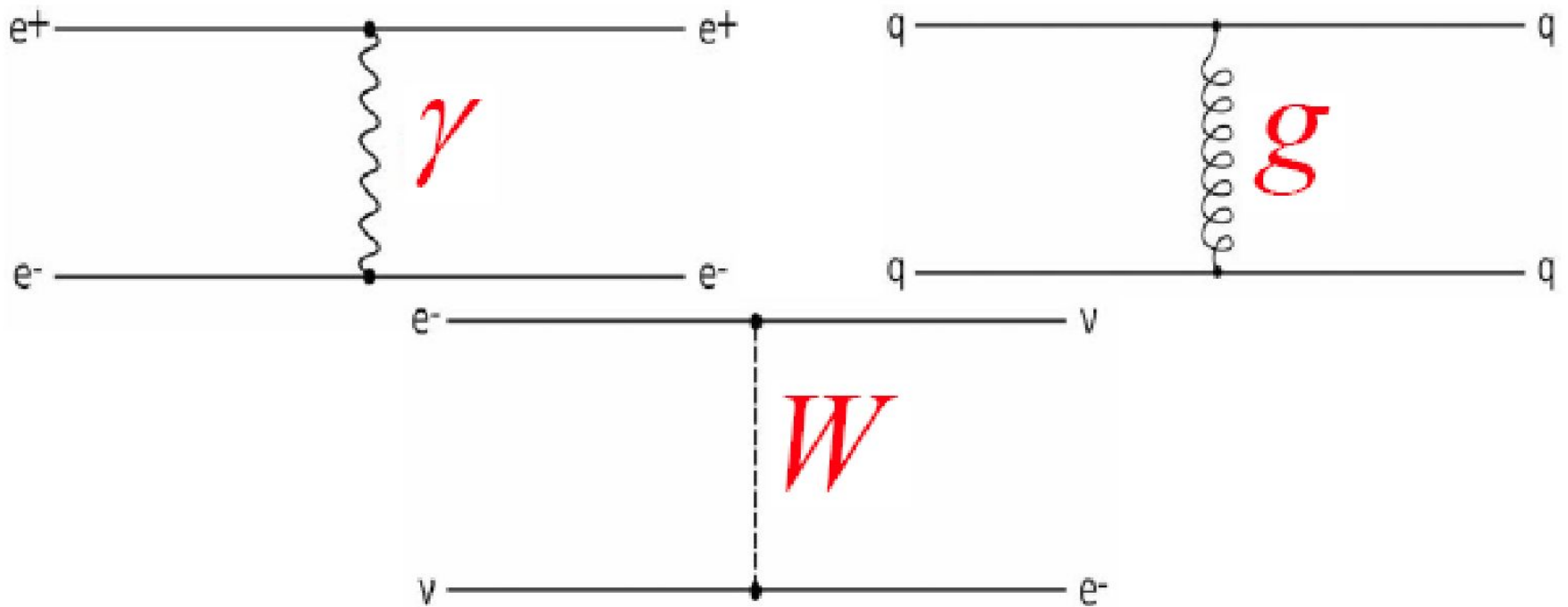
Взаимодействие	Характерная константа
Сильное	1
Электромагнитное	10^{-2}
Слабое	10^{-6}
Гравитационное	10^{-38}

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 γ -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 ²	Электрический заряд
γ фотон	0	0
W^-	80,4	-1
W^+	80,4	+1
Z	91,187	0

Сильное (цветное) взаимодействие (спин = 1)		
Название	Масса, ГэВ/c ²	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.

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

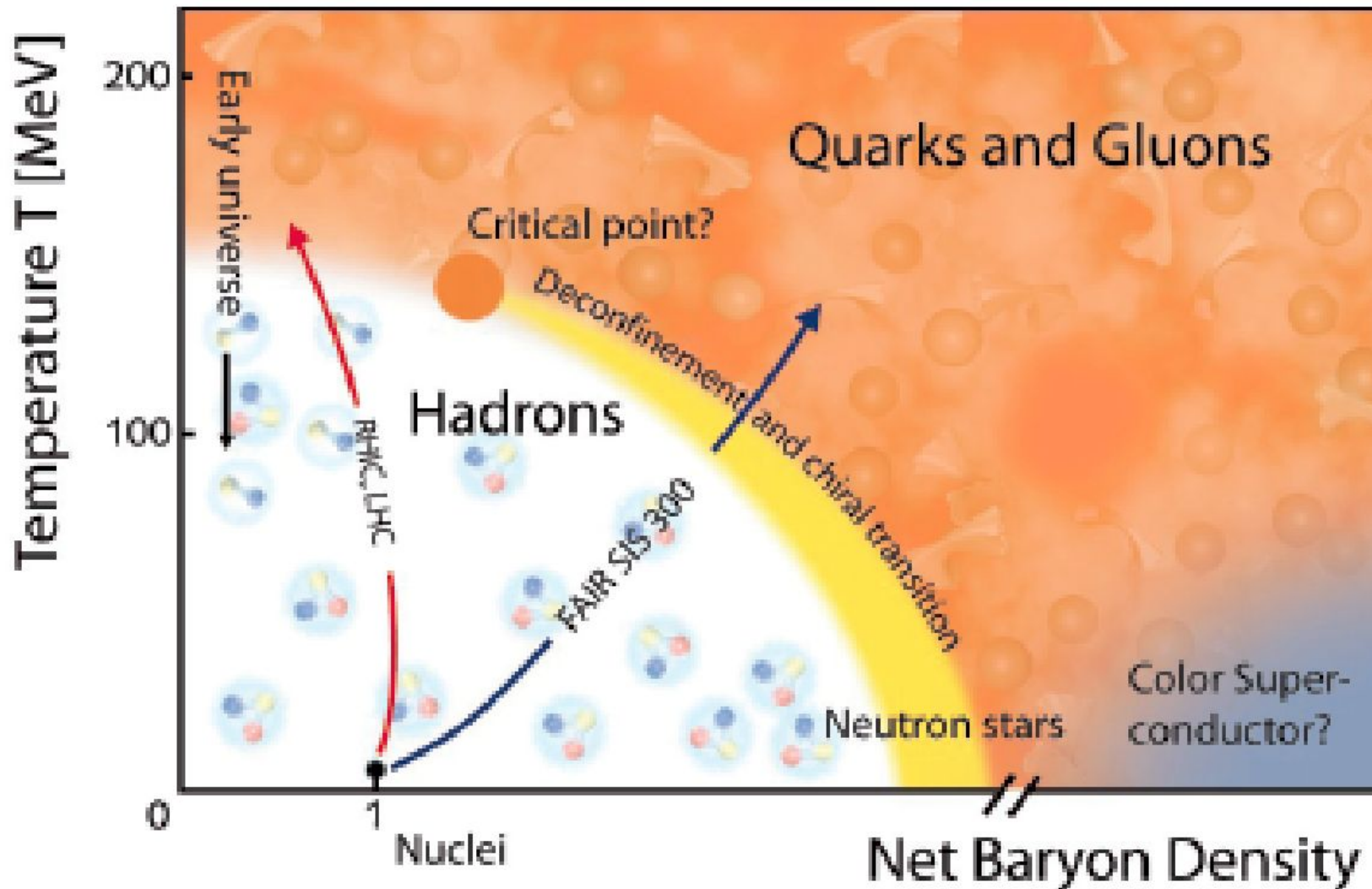
Фундаментальные взаимодействия

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.	∞	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	∞	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_μ, L_τ	+	+	+
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	+	+	-
CPT -инвариантность		+	+	+

Диаграмма состояния ядерной материи



Фундаментальные частицы Стандартной модели.

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

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.



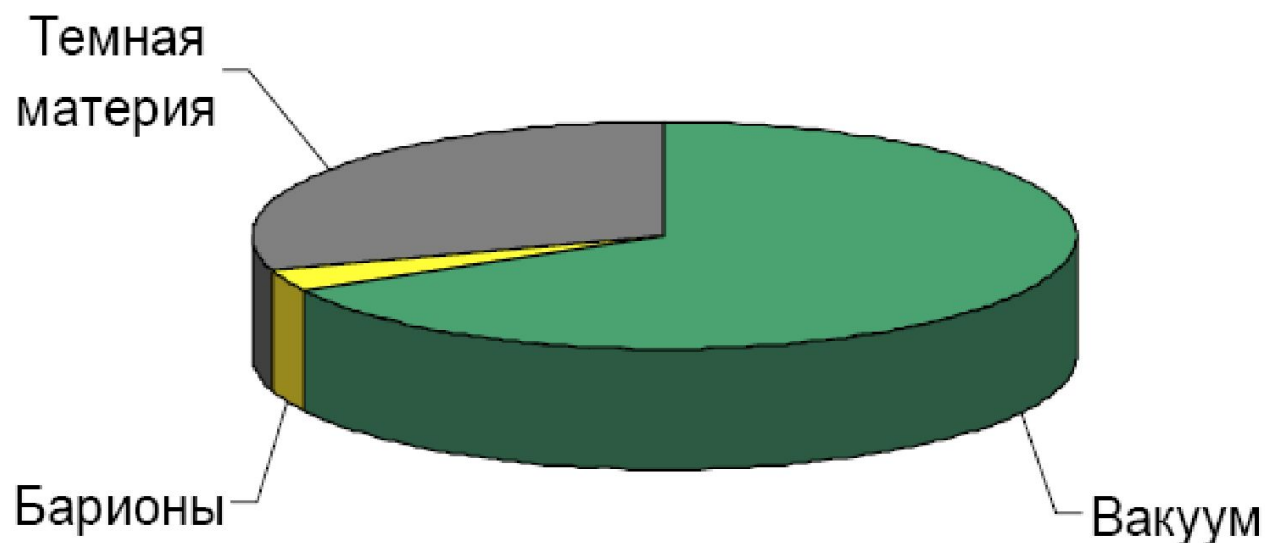
galaxy cluster CL0024+17

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

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



Лептоны

Лептоны

(Л. Розенфельд, 1948 г.)

Лептоны участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях.

3 заряженных лептона:

- электрон e^- ,
- мюон μ^- ,
- таон τ^- .

3 нейтральные частицы:

- электронное нейтрино ν_e ,
- мюонное нейтрино ν_μ ,
- тау-нейтрино ν_τ .

- 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 , μ , τ :

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

$$m_\tau c^2 = 1777 \text{ МэВ}$$

- 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

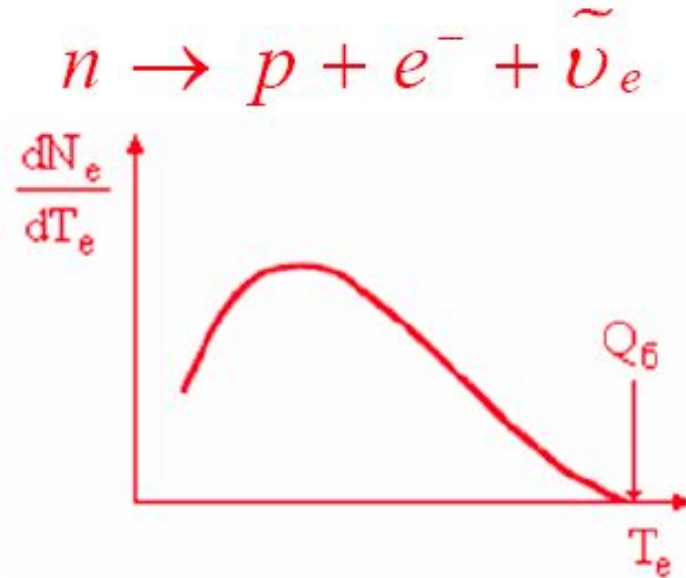
Характеристика	Численное значение
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_e c^2$, МэВ	$0.51099892 \pm 0.00000004$
Электрический заряд, Кулон	$-(1.60217653 \pm 0.00000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$1.001159652187 \pm 0.0000000000004$
Время жизни τ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число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

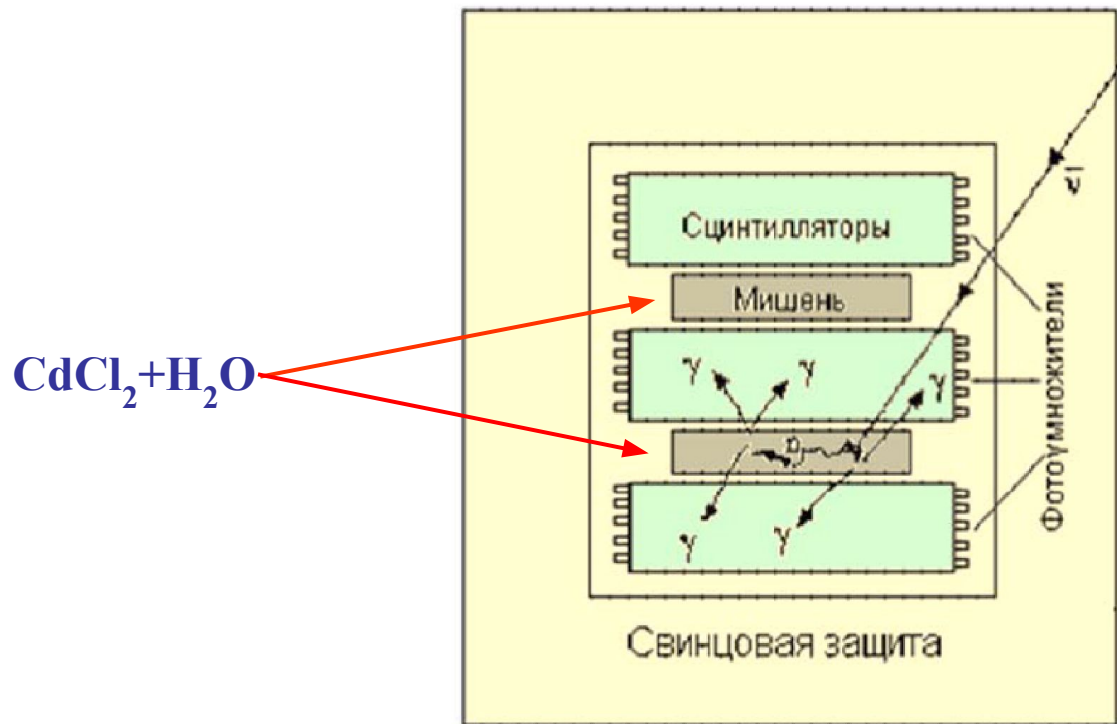
Нейтрино

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

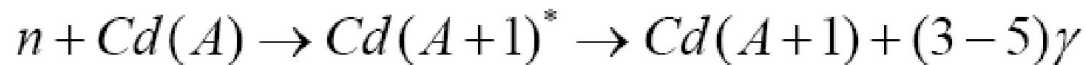


В 1956 г. Ф. Райнес и К. Коэн зарегистрировали антинейтрино

Электронное антинейтрино



Источник антинейтрино – ядерный реактор



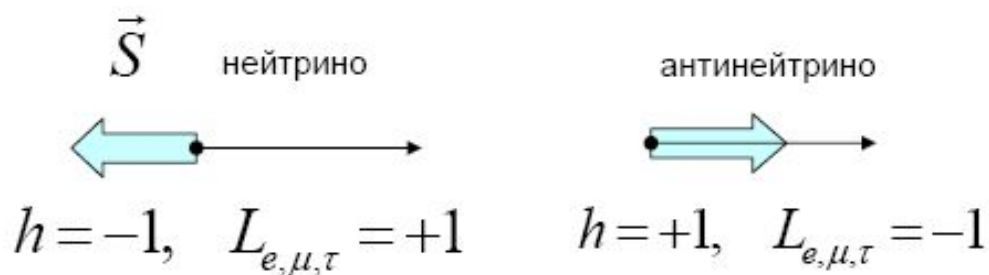
$$\sigma(\bar{\nu}p) = 10^{-43} \text{ см}^2$$

Тождественны ли ν_e и $\tilde{\nu}_e$?

- Для выяснения вопроса являются ли ν_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 - ($h=-1$).



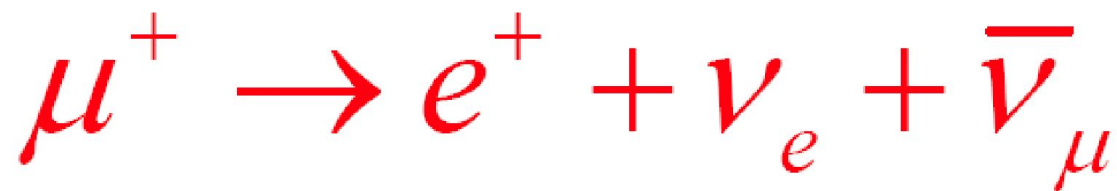
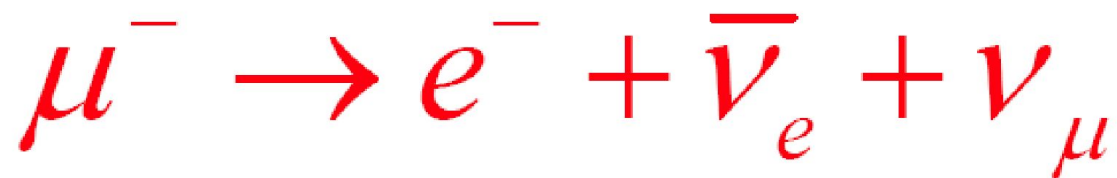
Спиральность

- 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

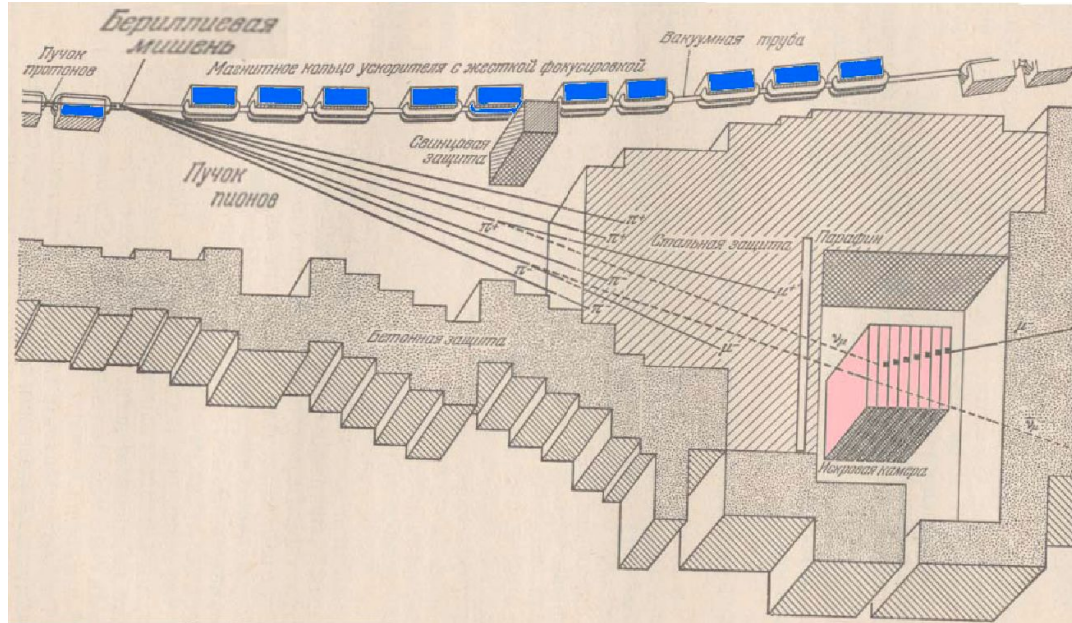
Характеристика	Численное значение
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_\mu c^2$, МэВ	105.6583692±0.00000094
Электрический заряд	Равен заряду электрона
Магнитный момент, $e\hbar/2m_\mu c$	1.0011659203±0.0000000007
Время жизни, сек	$(2.19703\pm 0.000004)\cdot 10^{-6}$
Лептонное число L_μ	+1
Лептонные числа L_e,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

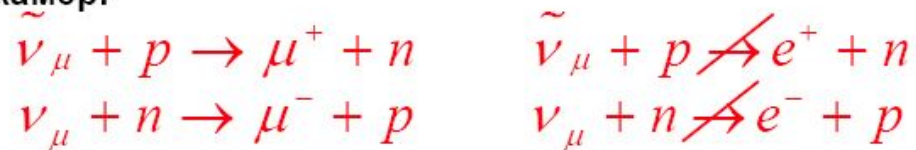
Мюонное нейтрино



Мюонные нейтрино образовывались в результате распада π^+ , π^- - 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_μ	+1
Лептонные числа L_e, L_τ	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 τ -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_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

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

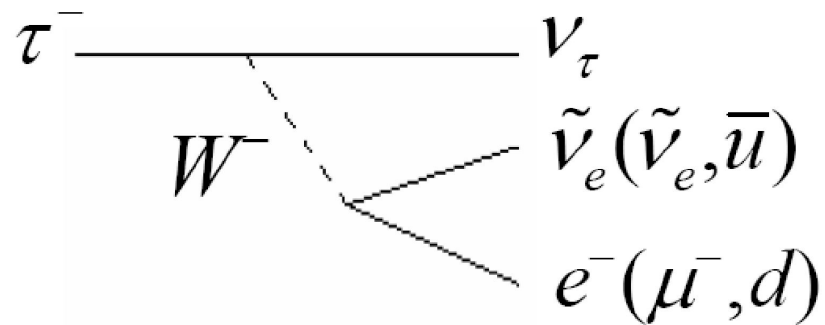
17.84%

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

17.36%

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

63%



Наблюдение τ -лептона

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

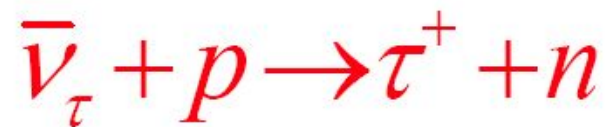
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau \quad 17.36\%$$

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

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

τ -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 τ -нейтрино

Характеристика	Численное значение
Спин J, \hbar	1/2
Масса $m_{\nu_\tau} c^2$, 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_τ	+1
Лептонные числа L_e, L_μ	0

Лептонные числа

	L_e	L_μ	L_τ
e^-	+1	0	0
ν_e	+1	0	0
e^+	-1	0	0
$\tilde{\nu}_e$	-1	0	0
μ^-	0	+1	0
ν_μ	0	+1	0
μ^+	0	-1	0
$\tilde{\nu}_\mu$	0	-1	0
τ^-	0	0	+1
ν_τ	0	0	+1
τ^+	0	0	-1
$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	-1

Лептонные числа L_e , L_μ , L_τ

Во всех процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий лептонные числа L_e , L_μ , L_τ 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) π^+ (139 МэВ)

p (938.3 МэВ) π^- (139 МэВ)

Λ (1116 МэВ) π^0 (134 МэВ)

Σ^+ (1189 МэВ) K^+ (494 МэВ)

Σ^- (1197 МэВ) K^- (494 МэВ)

Σ^0 (1193 МэВ)

Ξ^0 (1315 МэВ)

Ξ^- (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)

Λ (uds)

Ξ^0 (uss)

Ξ^- (dss)

π^+ ($u\bar{d}$)

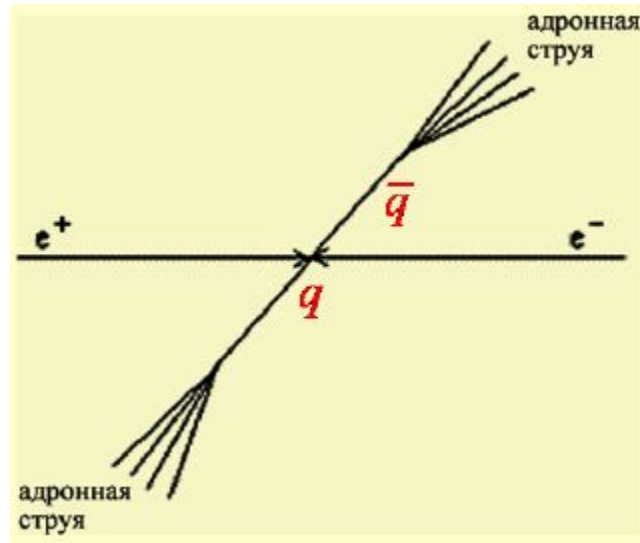
π^- ($\bar{u}d$)

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 ГэВ . Резонанс был назван ψ -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 Υ -мезонов.
- Это были долгоживущие частицы с шириной распада 52 кэВ .
- Это означало открытие пятого кварка – **b** (beauty).
- В состав Υ - мезона входят **b**-кварк и **b**-антикварк, поэтому он обладает скрытой красотой.

$$Q = +2/3$$

u

c

$$Q = -1/3$$

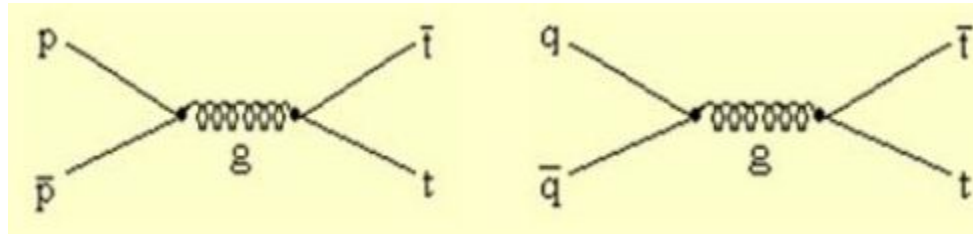
d

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:
 $s(s) = -1$, $c(c) = +1$, $b(b) = -1$, $t(t) = +1$
- у антикварков соответственно
 $s(\bar{s}) = +1$, $c(\bar{c}) = -1$, $b(\bar{b}) = +1$, $t(\bar{t}) = -1$
- 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_μ , L_τ .
- 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

- Δ^{++} -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 Δ^{++} -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

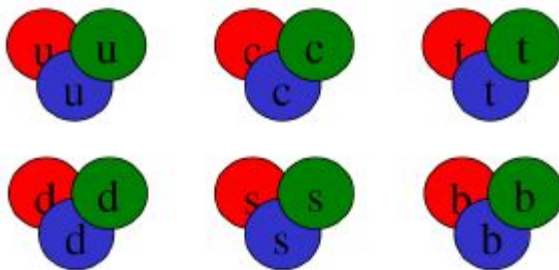
- **Силы взаимодействия между кварками называют цветными.**
- **Кварки имеют цветные заряды и объединяются в адроны так, что получаются бесцветные комбинации.**
- **В природе допустимы только бесцветные состояния составных систем из кварков и глюонов.**
- **Поэтому мы не видим отдельные цветные кварки, 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_3	-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

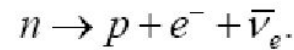
Вопросы

- 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,

ρ — плотность вещества, A — молярная масса.

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

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

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

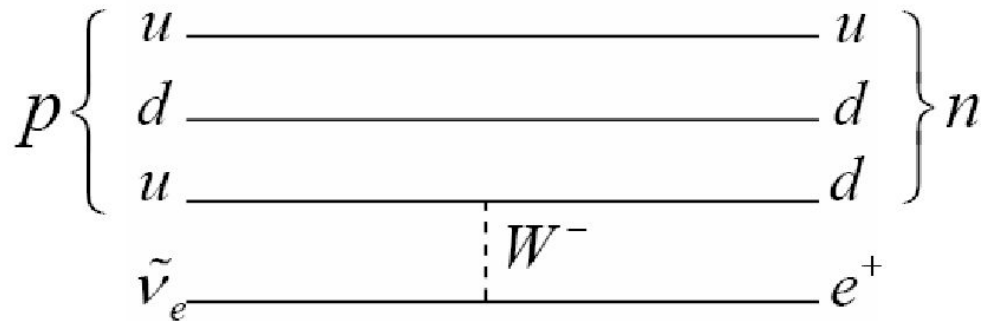
Пример

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

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

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

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



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**

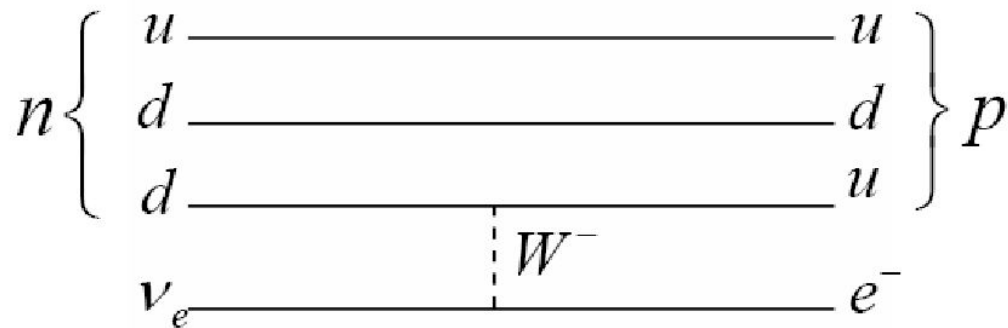
Пример

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

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

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

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



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**

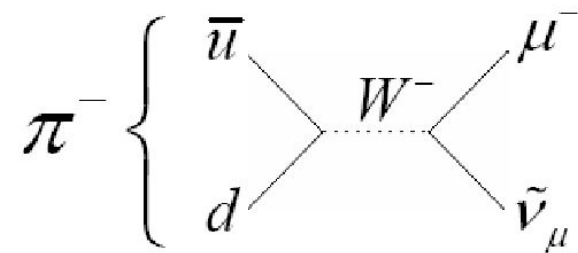
Пример

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

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

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

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

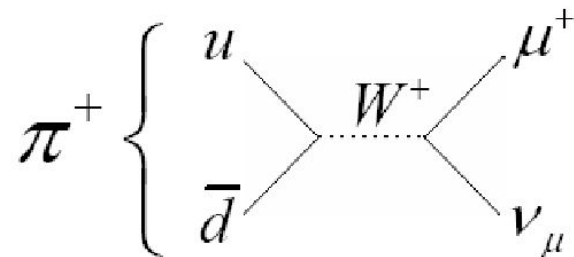


$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

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

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

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



Пример

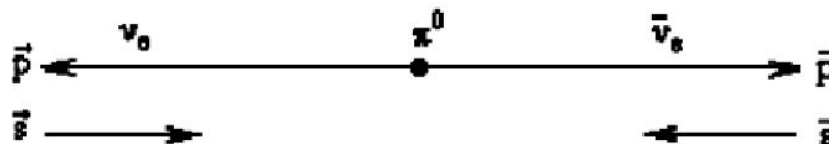
Возможен ли распад $\pi^0 \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$ для нейтрино с нулевой массой?

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

Спин нейтрино s_ν 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 ν_e и $\bar{\nu}_e$ $\vec{J} = \vec{s}_\nu + \vec{s}_{\bar{\nu}} = \vec{1}$. Однако, спин π^0 -мезона равен 0, то есть данный распад невозможен из-за нарушения закона сохранения момента количества движения

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



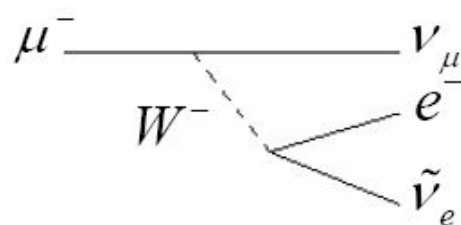
Пример

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

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

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

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



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**.

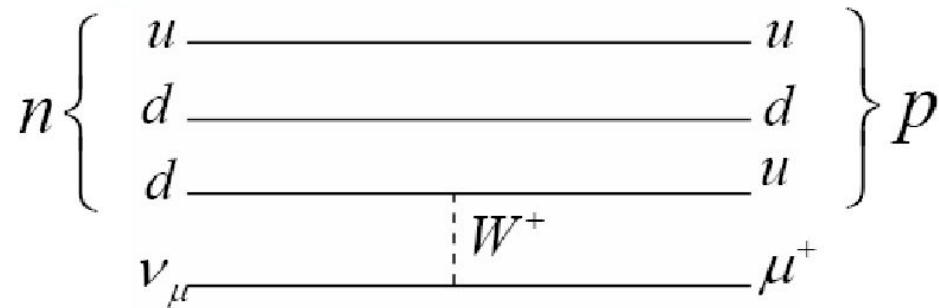
Пример

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

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

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

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



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

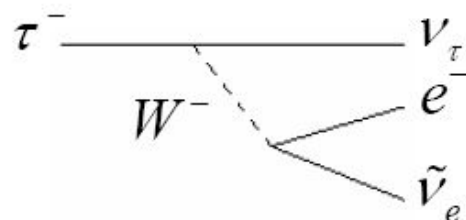
$$\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$$

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

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

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

Распад разрешён



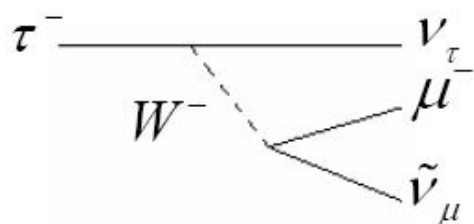
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

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

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

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

Распад разрешён



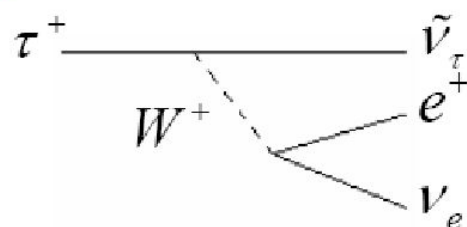
Пример

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

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

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

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



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 $I=1$

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

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

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

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

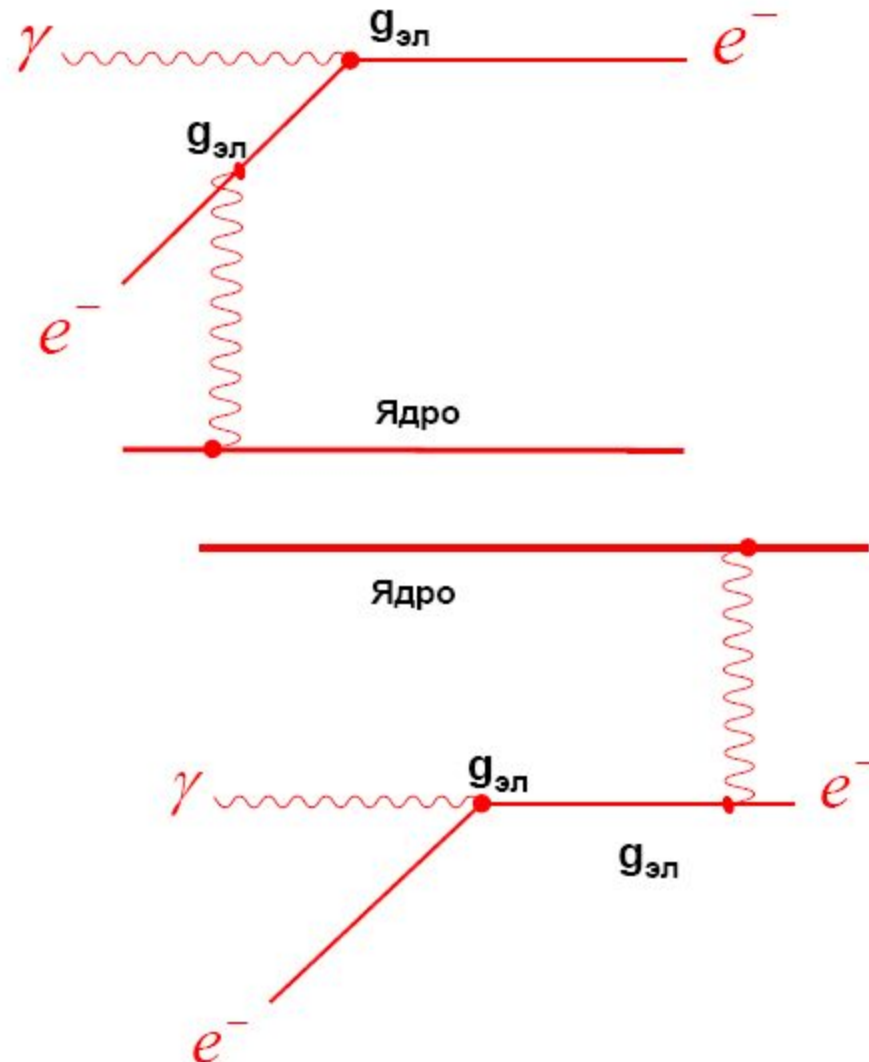
$$\Sigma^0 \quad (uds) \quad I_3 = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} + 0 = 0$$

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

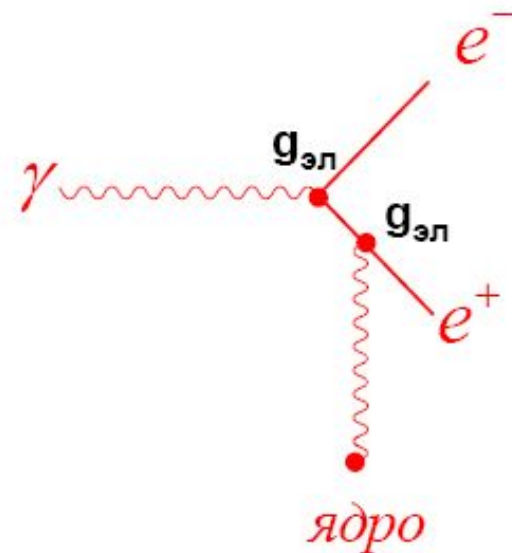
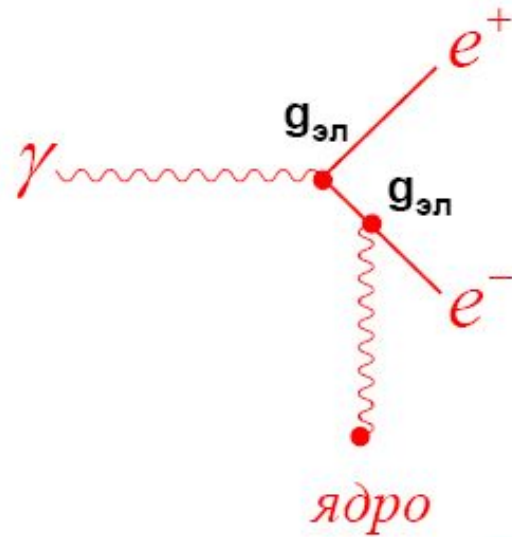
$$I=1 \rightarrow \begin{array}{ll} I_3 = +1 & \Sigma^+ \\ I_3 = 0 & \Sigma^0 \\ I_3 = -1 & \Sigma^- \end{array}$$

Пример. Фотоэффект

Поглощение γ -кванта атомом с вылетом одного из атомных электронов e^- .

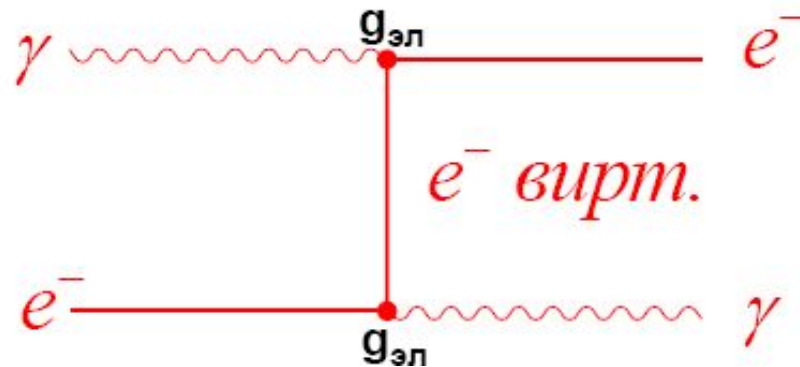


Пример. Образование фотоном e^+e^- пары в поле ядра



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/ψ -частицы.
2. Используя соотношение Гелл-Манна и Нишиджимы определить величины электрических зарядов систем кварков:

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

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