

# Мир атомных ядер

# Фундаментальные частицы

# 1897 г. Дж. Томсон. Открытие электрона

Характеристика	Численное значение
Спин $J$	$1/2$
Масса $m_e c^2$ , МэВ	$0.51099892 \pm 0.000000004$
Электрический заряд, Кулон	$-(1.60217653 \pm 0.000000014) \cdot 10^{-19}$
Магнитный момент, $e\hbar/2m_e c$	$1.001159652187 \pm 0.000000000000004$
Время жизни $\tau$ , лет	$> 4.6 \cdot 10^{26}$
Лептонное число $L_e$	$+1$
Лептонные числа $L_\mu, L_\tau$	$0$

# Лептоны

$$J = 1/2$$

$$e^{-}$$

0,511 МэВ

$$\mu^{-}$$

105,7 МэВ

$$\tau^{-}$$

1777 МэВ

$$\nu_e$$

< 3 эВ

$$\nu_\mu$$

< 0,19 МэВ

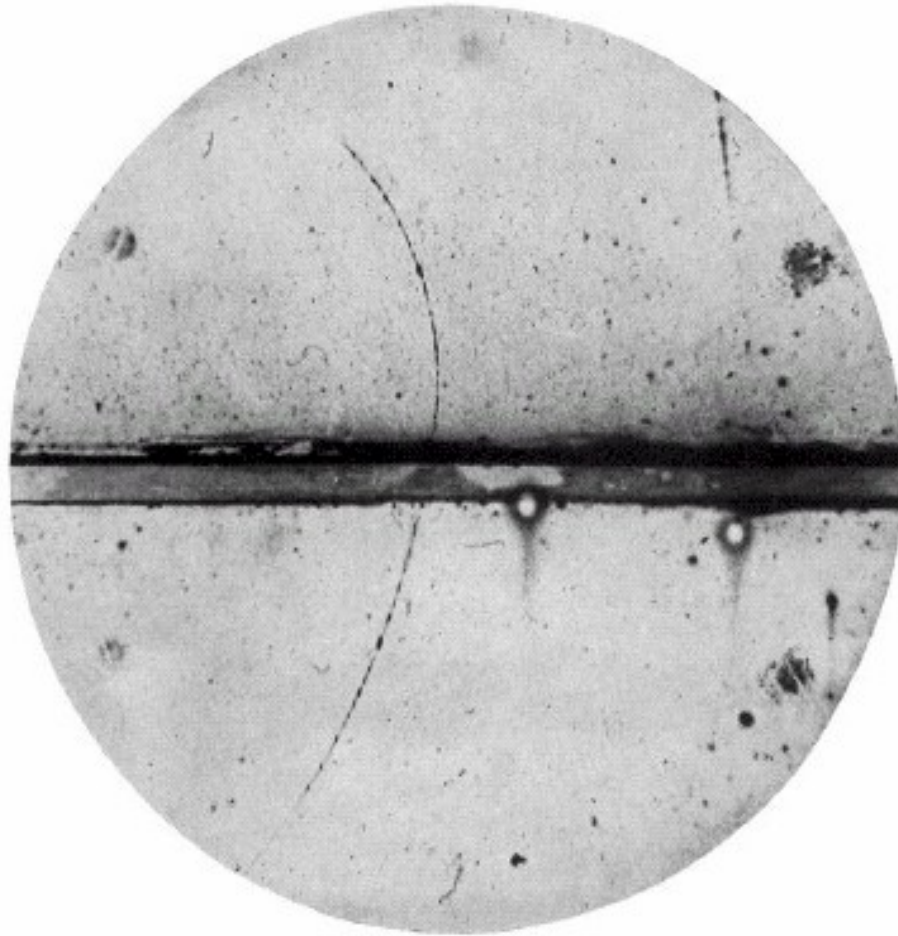
$$\nu_\tau$$

< 18,2 МэВ

Лептоны – класс фундаментальных частиц Стандартной Модели, не участвующих в сильных взаимодействиях. Заряженные лептоны участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях. Нейтрино — только в слабых.

Все лептоны обладают полуцелым спином  $J = 1/2$  и в соответствии с этим являются фермионами.

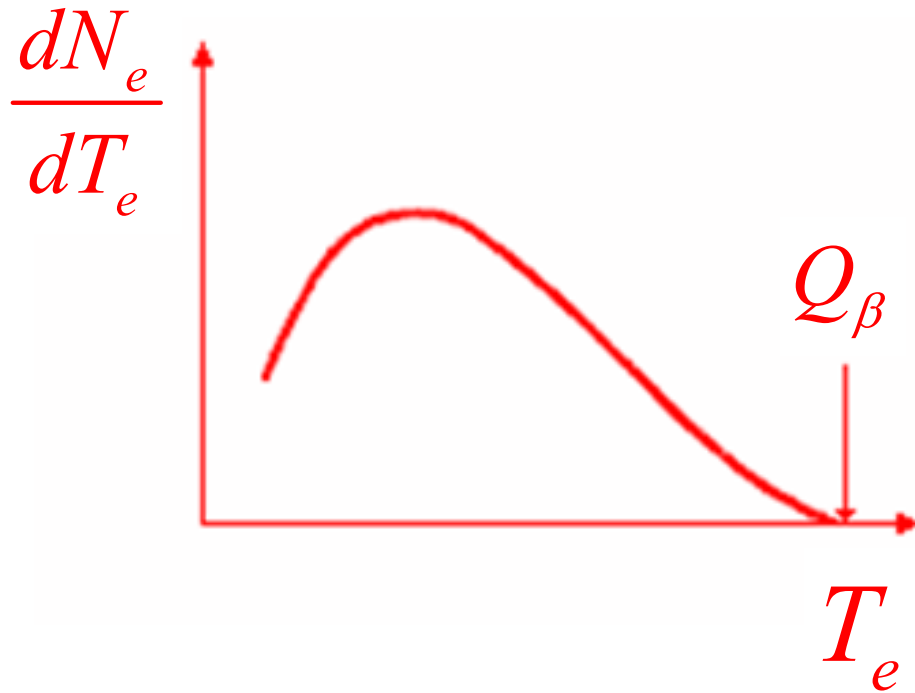
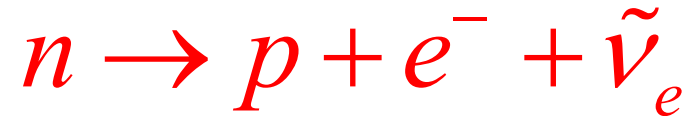
## 1932 г. Открытие позитрона



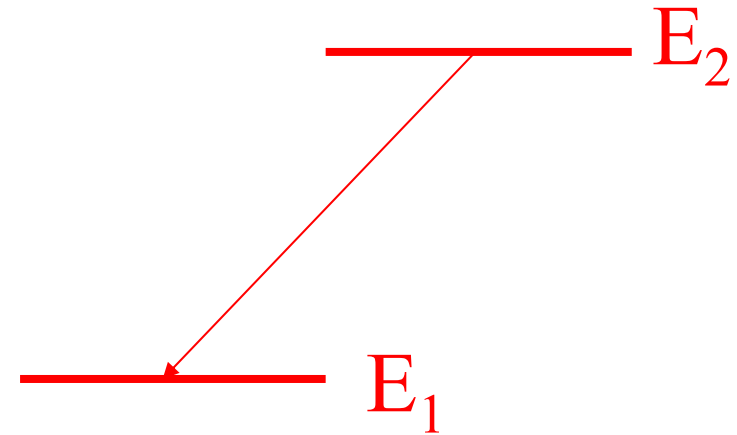
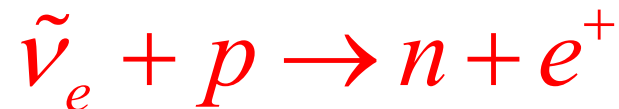
**Позитрон, зарегистрированный в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.**

# Нейтрино $\nu$

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



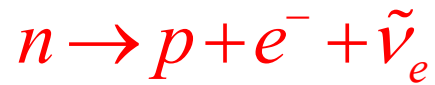
Алгебра частиц-античастиц



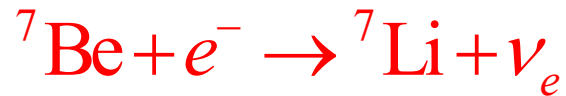
1956 г. Ф. Райнес, К. Козн зарегистрировали антинейтрино.

# Электронное антинейтрино

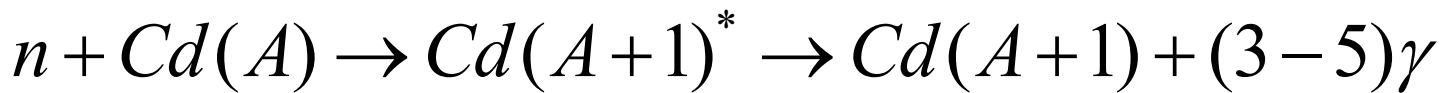
1953–1956. Ф. Райнес, К. Козн



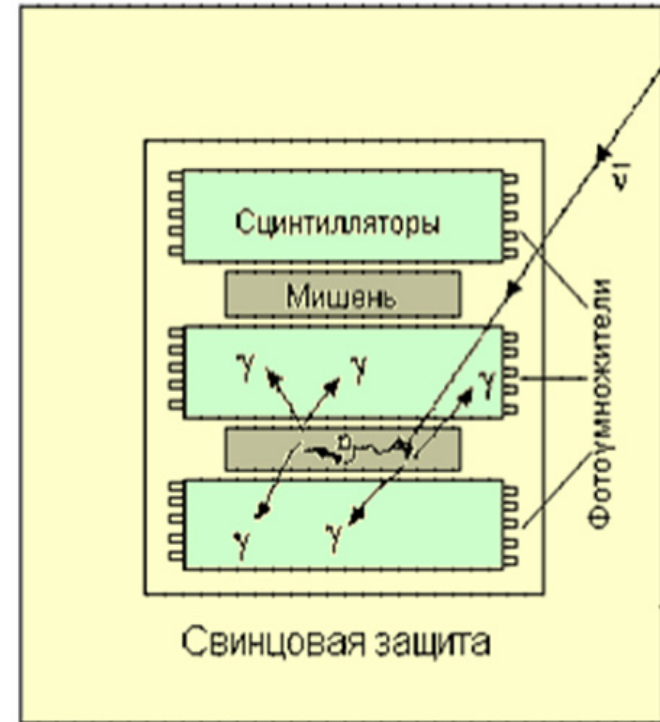
Первое свидетельство существования



Источник антинейтрино – ядерный  
реактор



$$\sigma(\tilde{\nu} p) = 10^{-43} \text{ см}^2 \quad t = 200 \text{ часов. } N = 567. \text{ Фон} = 209$$



Нобелевская премия по физике

1995 г. – Ф. Райнес.

За детектирование нейтрино

# Пример

Определить длину  $L$  и время  $t$  свободного пробега реакторного нейтрино в воде,  
 $\sigma \approx 10^{-43} \text{ см}^2$ .

Число нейтрино прошедших через слой вещества толщиной  $x$ ,

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

$n$  — количество ядер вещества в единице объема.

$L$  — длина, на которой поток антинейтрино уменьшается в  $e$  раз, то есть  $L = 1/n\sigma$ .

$n = \rho N_A / A$ ,  $N_A$  — число Авогадро,  $\rho$  — плотность вещества,  $A$  — молярная масса.

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

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

$$t = \frac{L}{c} = \frac{3 \cdot 10^{15} \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \text{ км/с}} = 10^{10} \text{ с} \approx 320 \text{ лет},$$

(1 год  $\approx 3,156 \cdot 10^7 \text{ с}$ ).



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

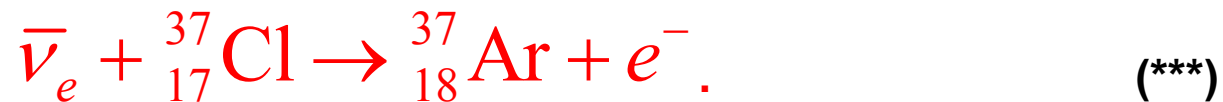
Если  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  являются тождественными частицами, то должна наблюдаться реакция



Это следует из того, что наблюдается реакция



Обе реакции ((\*) и (\*\*)) при тождественности  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$  должны иметь одинаковые, характерные для нейтрино (антинейтрино) сечения  $\approx 10^{-43}$  см<sup>2</sup>.



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. Регистрируя радиоактивность изотопа  ${}^{37}\text{Ar}$ , можно судить о возможности протекания реакции (\*).

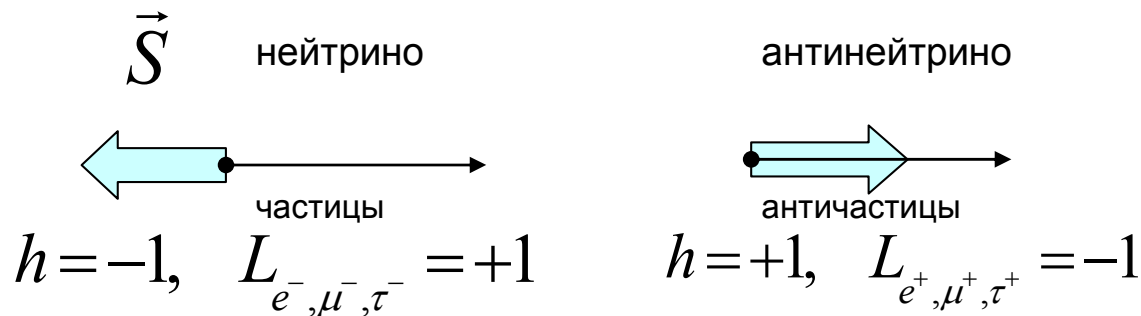
**Образование изотопа  ${}^{37}\text{Ar}$  не было обнаружено.**

$\sigma < 2 \cdot 10^{-45}$  см<sup>2</sup>.  $M$ (детектор) = 4000 литров

# Спиральность

$$h = \frac{\vec{S} \cdot \vec{p}}{|\vec{S}| \cdot |\vec{p}|}.$$

Правополяризованная частица имеет положительную спиральность ( $h = +1$ ), левополяризованная — отрицательную ( $h = -1$ ).



Экспериментально показано, что спиральность нейтрино всегда отрицательна ( $h_\nu = -1$ ), а спиральность антинейтрино всегда положительна ( $h_{\bar{\nu}} = +1$ ). Нейтрино рождаются только в процессах слабого взаимодействия. Во всех наблюдаемых в природе слабых процессах с участием нейтрино участвуют только левополяризованные нейтрино. Правополяризованные нейтрино в наблюдаемых процессах не проявляются. Появление частиц с определенным значением поляризации обусловлено природой слабого взаимодействия.

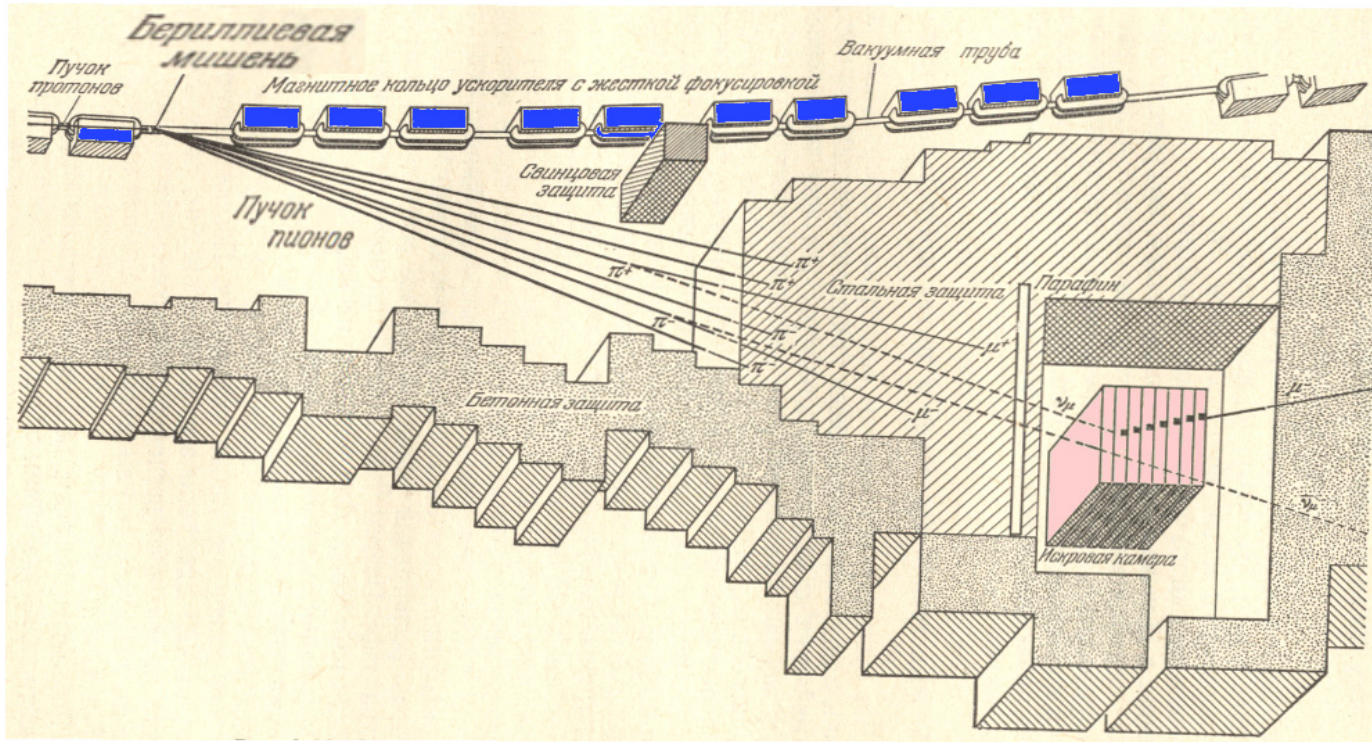
# 1937 г. Открытие мюона

Характеристика	Численное значение
Спин $J$	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±0.00000000007
Время жизни, сек	$(2.19703\pm 0.00004)\cdot 10^{-6}$
Лептонное число $L_\mu$	+1
Лептонные числа $L_e, L_\tau$	0



$\mu^-$  и  $\mu^+$  соответственно частица и античастица

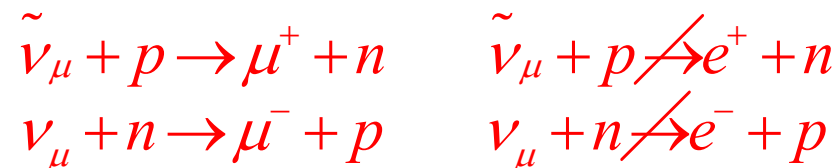
# Мюонное нейтрино



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



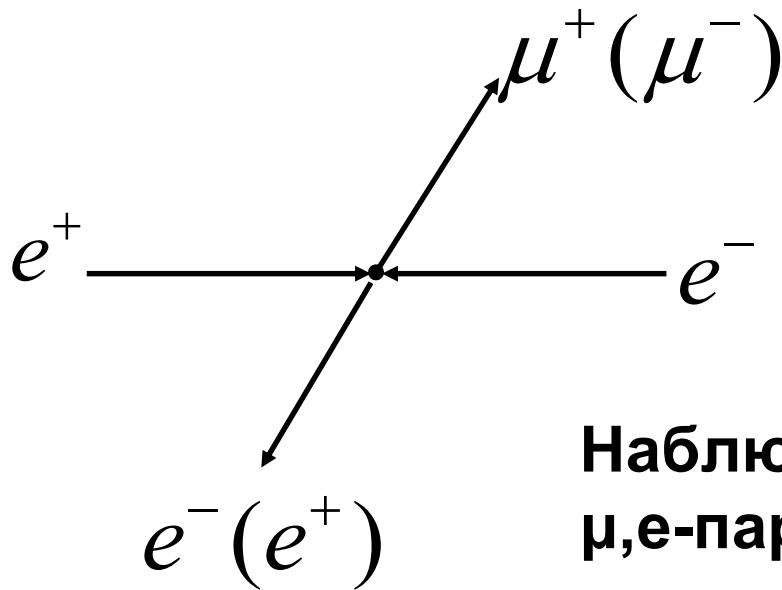
Мюонные нейтрино детектировались в искровых камерах по результатам их взаимодействия с протонами и нейтронами вещества искровых камер.



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

# 1975 г. Открытие $\tau$ -лептона

$\tau$ -лептон и  $\tau$ -нейтрино образуют  
третье поколение лептонов



Наблюдались события образования  $\mu, e$ -пары с противоположными знаками заряженных частиц

**Нобелевская премия по физике**

1995 г. – М, Перл.

За открытие тау-лептона

# $\tau$ -ЛЕПТОН

Характеристика	Численное значение
Спин $J$	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

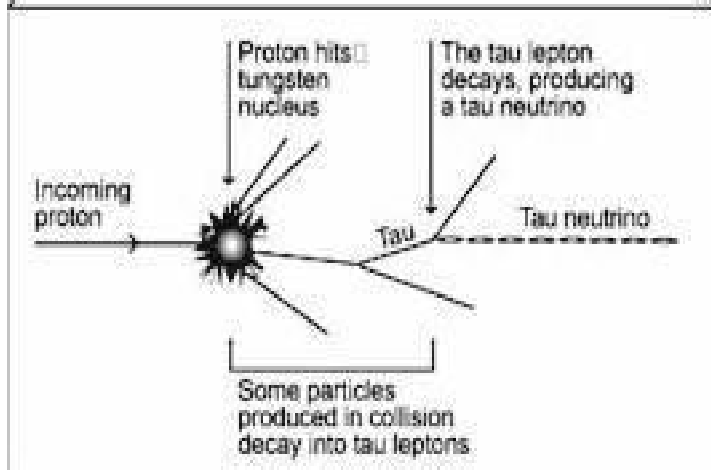
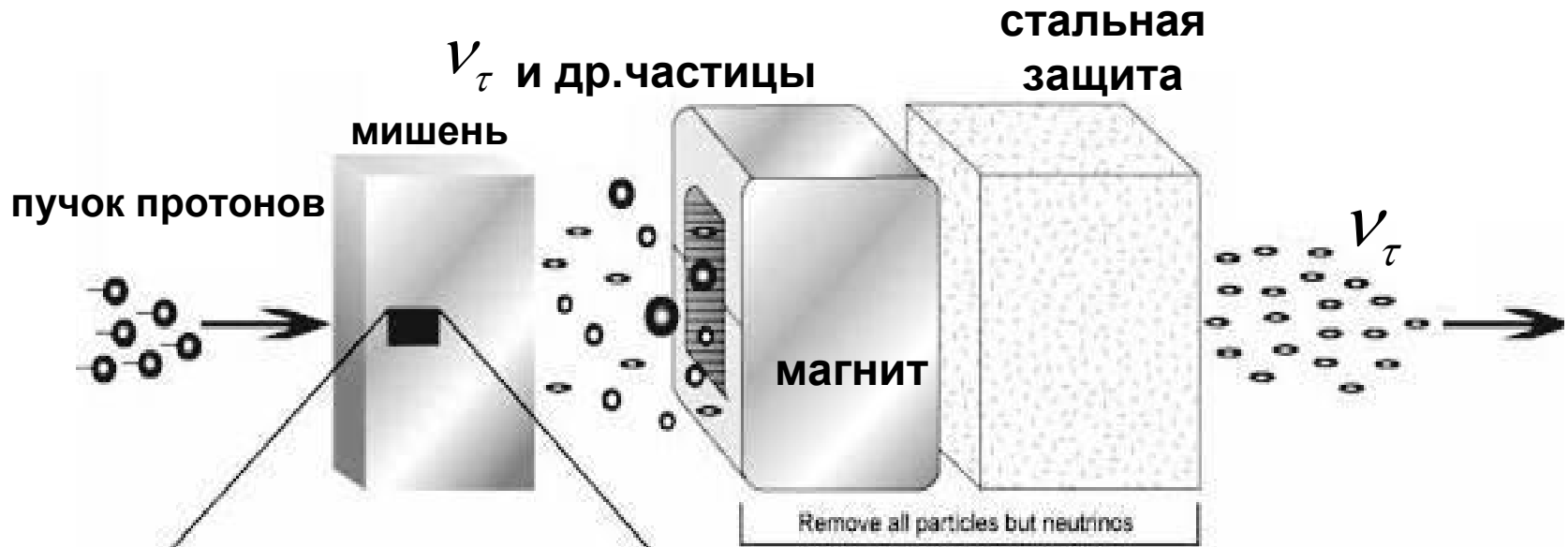
$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad 17.84\%$$

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

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

# $\tau$ - нейтрино

DONUT (Direct Observation of the  $\nu$  Tau)



# $\tau$ - нейтрино

DONUT (**D**irect **O**bservation of the **NU** Tau)





# Лептонные числа

Каждому поколению лептонов следует приписать свой лептонный заряд, соответственно  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$ . Этот заряд, как и обычный электрический заряд, является **сохраняющимся** и **аддитивным**, т. е. заряд системы лептонов равняется сумме лептонных зарядов отдельных лептонов и должен быть одинаковым до и после завершения любого процесса.

## Закон сохранения $L_e$ , $L_\mu$ , $L_\tau$

В процессах, происходящих в замкнутой системе в результате сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий, каждое лептонное число  $L_e$ ,  $L_\mu$ ,  $L_\tau$  сохраняется порознь.

# 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**

$$\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

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

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

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

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

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

**не наблюдаются процессы**

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$$

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

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

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-11},$$

$$w(\mu^- \rightarrow e^- + e^- + e^+ \gamma) / w(\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu) < 10^{-12},$$

$$w(\tau^- \rightarrow e^- + \gamma) / w(\tau^- \rightarrow \text{все моды распада}) < 3 \cdot 10^{-6},$$

$$w(\tau^- \rightarrow \mu^- + \gamma) / w(\tau^- \rightarrow \text{все моды распада}) < 10^{-6}.$$

# Кварки

1963 г. М. Гелл-Манн, Г. Цвейг

*u*

*d*      *s*

Все обнаруженные до 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов — *u*, *d*, *s*. Каждой комбинации кварков соответствовала экспериментально наблюдаемая частица

Наблюдались только связанные состояния кварка в адронах. Возникла проблема — **отсутствие кварков в свободном состоянии.**

# Кварковая структура адронов

$p$  ( $uud$ )

$n$  ( $udd$ )

$\Lambda$  ( $uds$ )

$\Xi^0$  ( $uss$ )

$\Xi^-$  ( $dss$ )

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

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

Кварки должны иметь дробный электрический заряд

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

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

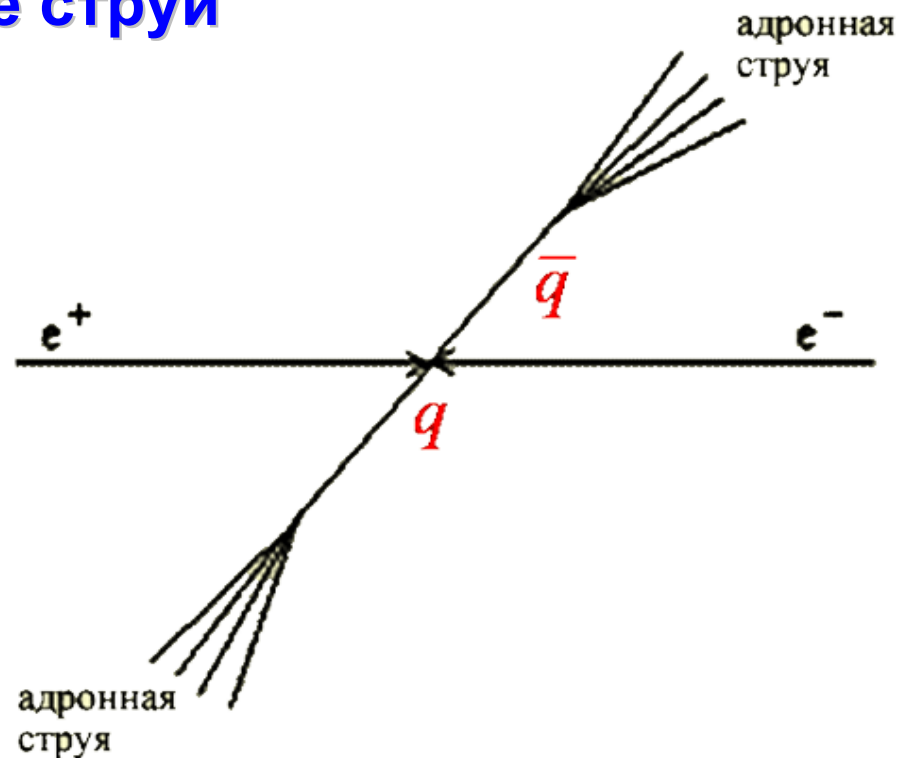
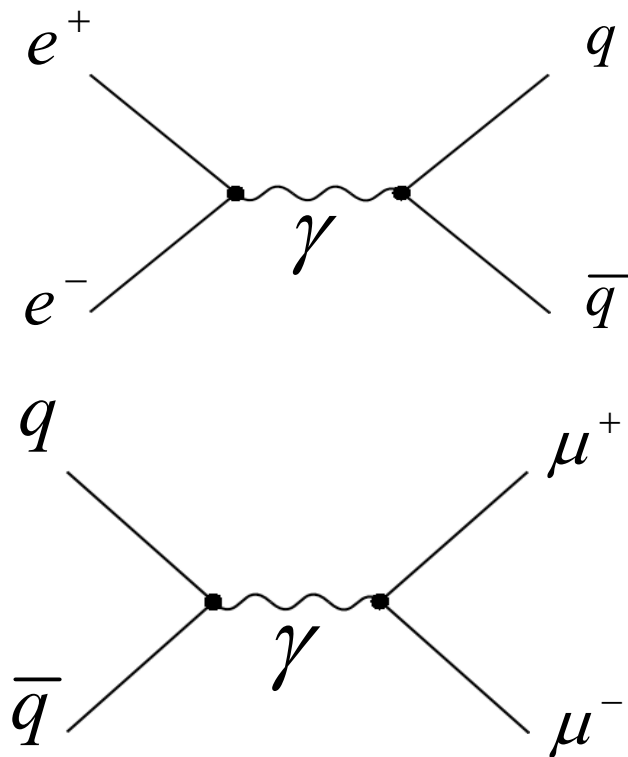
$\pi^-$  ( $\bar{u}d$ )

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

Кварки имеют спин

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

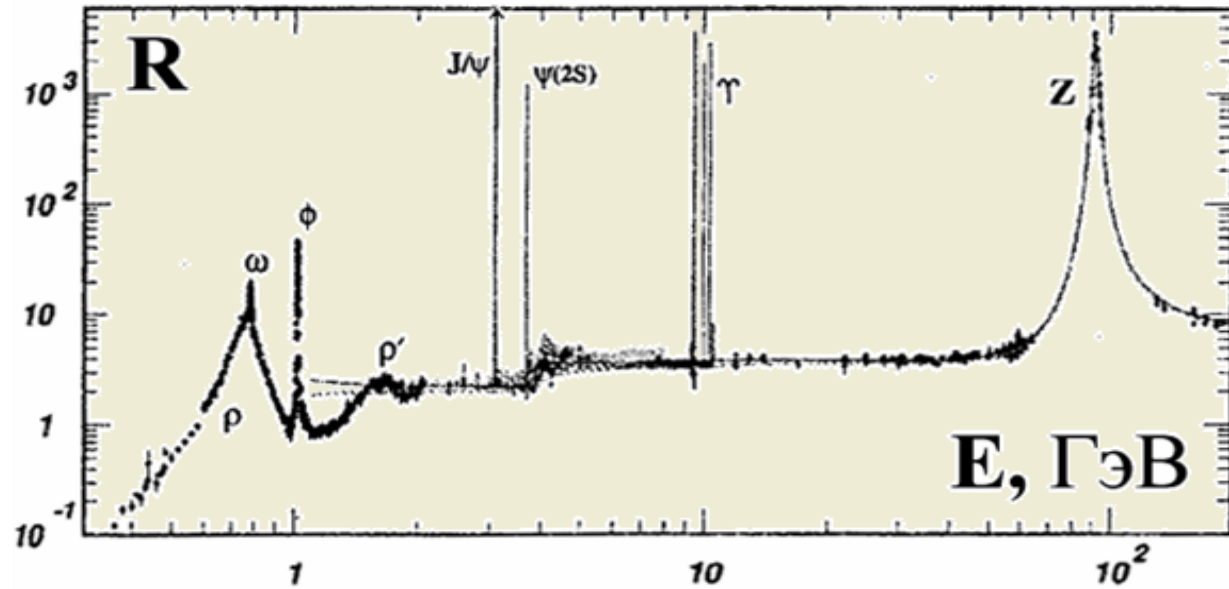
# Как открывают кварки. Адронные струи



Кварки являются реальными частицами, т.к. имеются наблюдаемые эффекты их существования на малых расстояниях. Один из таких эффектов проявляется в образовании адронных струй.

**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.

1974 г. с-кварк  
1977 г. b-кварк



Одновременно две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы.

- $p + Be \rightarrow e^+ e^- + \text{остальные частицы}$ .

Резонанс в спектре  $e^+ e^-$  был назван J-частицей.

- $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$ ,  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$ ,  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

Резонанс был назван  $\psi$ -частицей.

Наиболее интересным свойством новой частицы, окончательно названной  **$J/\psi$ -частицей**, является узкая ширина резонанса  $\Gamma = 91$  КэВ.  $E = 3,1$  ГэВ.

**Нобелевская премия по физике**

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг.

За открытие тяжелой элементарной частицы нового типа

# **t – кварк. 1995 г.**

**b-кварк нарушил симметрию в семействе кварков**

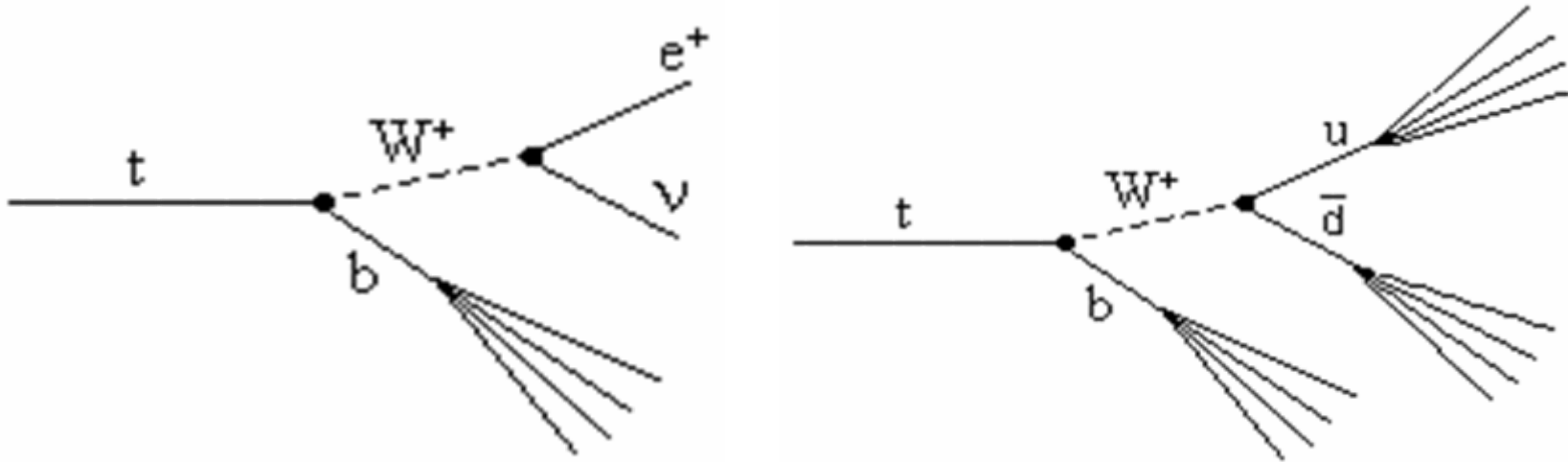
$$\begin{array}{l} Q = +2/3 \quad u \quad c \\ Q = -1/3 \quad d \quad s \quad b \end{array}$$

Казалось вполне естественным существование шестого кварка с зарядом  $Q = +2/3$ . Уверенность в этом возросла после наблюдения  $\tau$ -лептона (1975 г.). Симметрия в мире кварков и лептонов служит указанием на то, что в природе существует три семейства кварков и лептонов.

**Недостающий кварк был назван t-кварком.**

Начались активные попытки обнаружить t-кварк.

# Распад t-кварка



Основными каналами распада  $t$ -кварка и  $\bar{t}$ -антикварка должны быть распады в результате слабого взаимодействия.

$$t \rightarrow W^+ + b \quad u \quad \bar{t} \rightarrow W^- + \bar{b}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow e^+ \nu_e (\mu^+ \nu_\mu) \\ \rightarrow u, \bar{d} \end{array} \right| \quad \left. \begin{array}{l} \rightarrow e^- \bar{\nu}_e (\mu^- \bar{\nu}_\mu) \\ \rightarrow \bar{u}, d \end{array} \right|$$

При распаде  $t$ -кварков должны образовываться либо два лептона  $e^+ \nu_e (\mu^+ \nu_\mu)$  и одна адронная струя, вызванная  $b$ -кварком, либо три адронные струи вызванные  $b$ -,  $u$ - и  $\bar{d}$ -кварками.



# t-кварк

Масса, $mc^2$	$171.2 \pm 2.1$ ГэВ
Электрический заряд, $e$	$+2/3$
Барионное число $B$	$+1/3$
Спин	$+1/2$
Квантовое число $t$	$+1$
Изоспин и квантовые числа $s, c, b$	$0$

$t$ -кварк имеет время жизни  $\tau \approx 10^{-25}$  с, поэтому он не успевает образовать семейства адронов, содержащих этот кварк. Столь малое время жизни  $t$ -кварка обусловлено большим энерговыделением  $Q$  при распаде  $t$ -кварка.

Среднее время жизни частицы, распадающейся в результате слабого взаимодействия, обратно пропорционально энергии распада  $Q$  в пятой степени:

$$\tau \sim Q^{-5}$$

# Кварки. 2015

*u*    *c*    *t*

*d*    *s*    *b*

На современном этапе развития наших представлений о структуре материи на первый план выходят «новые элементарные частицы» — кварки. Все адроны состоят из различных комбинаций  $qqq, q\bar{q}, \bar{q}q\bar{q}$  этих шести кварков.

**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.

# Спин кварков $J$

Кварки являются фермионами

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

$$J(\bar{q}) = \frac{1}{2}$$

# Электрические заряды кварков $Q (e)$

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

**Так же, как в случае лептонов, известно  
3 поколения кварков**

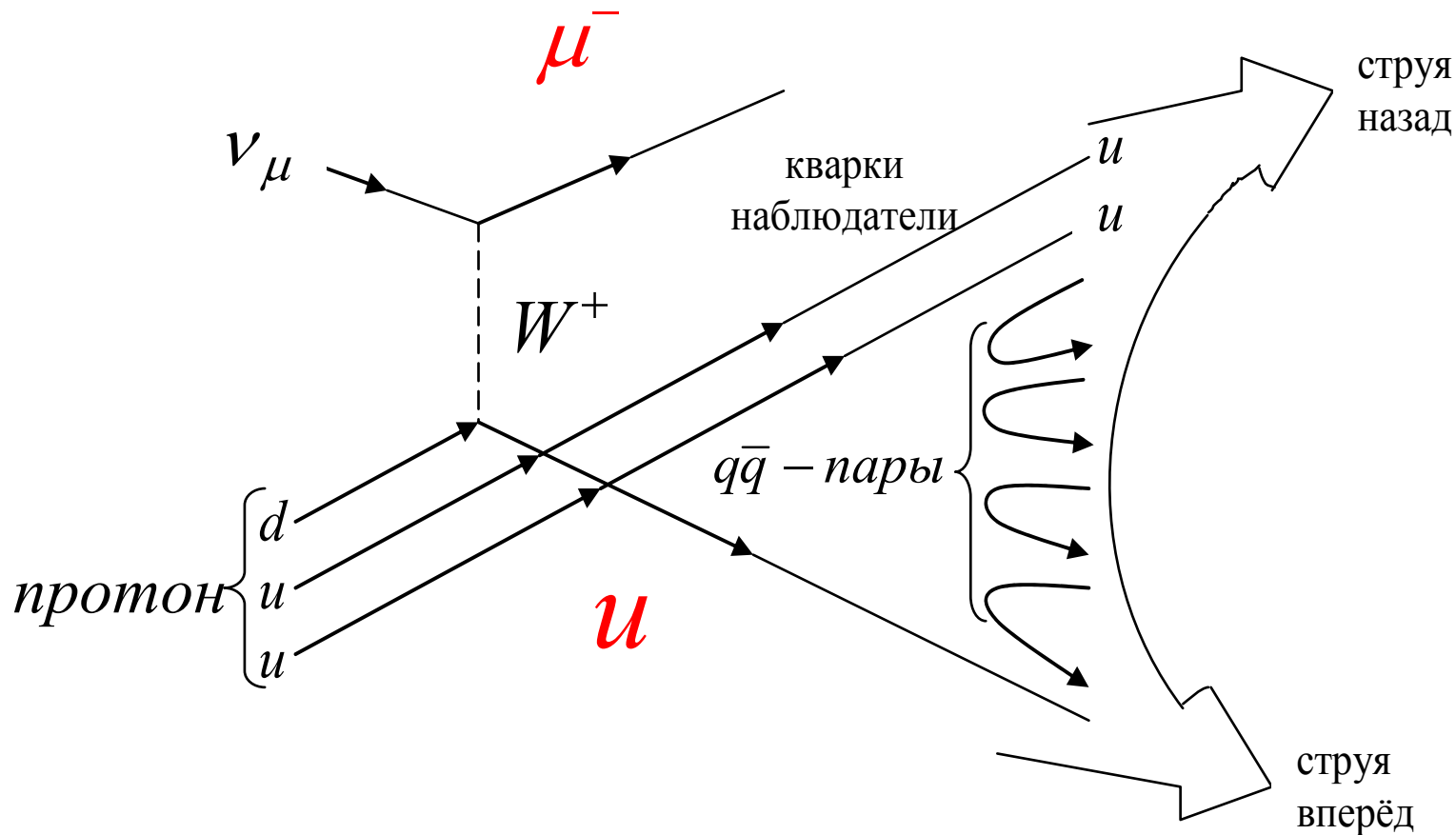
$u, c, t$  кварки имеют электрический заряд  $+2/3$

$d, s, b$  кварки имеют электрический заряд  $-1/3$

$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$  антикварки имеют электрический заряд  $-2/3$

$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$  антикварки имеют электрический заряд  $+1/3$

# Электрические заряды кварков

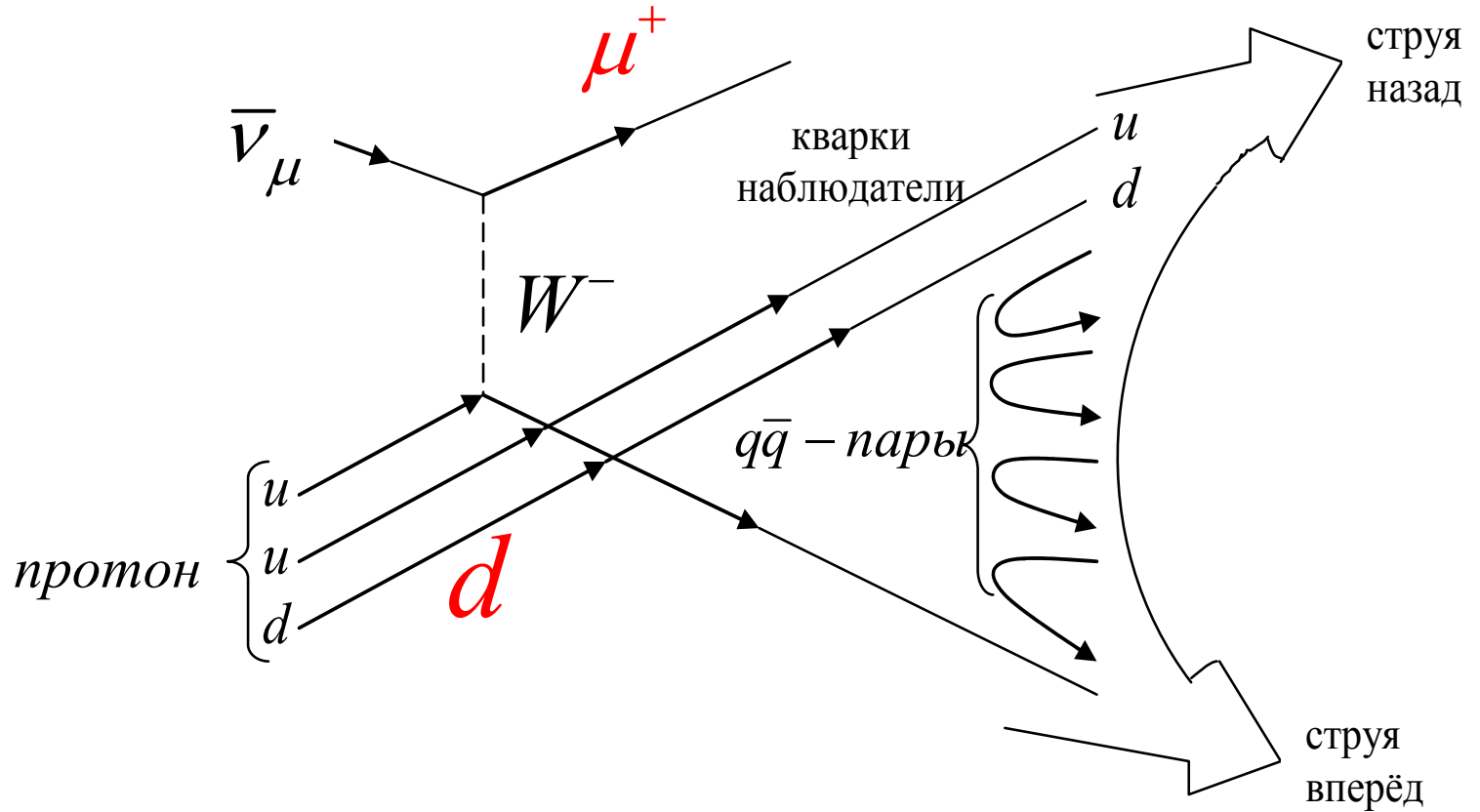


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

$$\nu_\mu + d \rightarrow \mu^- + u$$

$$Q(u) = 0.65 \pm 0.12$$

# Электрические заряды кварков



$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \text{струи адронов}$$

$$\bar{\nu}_\mu + u \rightarrow \mu^+ + d$$

$$Q(d) = -0.33 \pm 0.09$$

# Барионный заряд кварков $B$

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  $B(q)=+1/3$ . Барионный заряд антикварков  $B(\bar{q})=-1/3$ . Барионный заряд является аддитивным сохраняющимся квантовым числом. Не обнаружено каких-либо указаний на его несохранение.

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 барионный заряд  $B = -1/3 + (-1/3) + (-1/3) = -1$ .

Мезоны, состоящие из одного кварка и одного антикварка, имеют барионный заряд  $B = +1/3 + (-1/3) = 0$ .

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

# 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

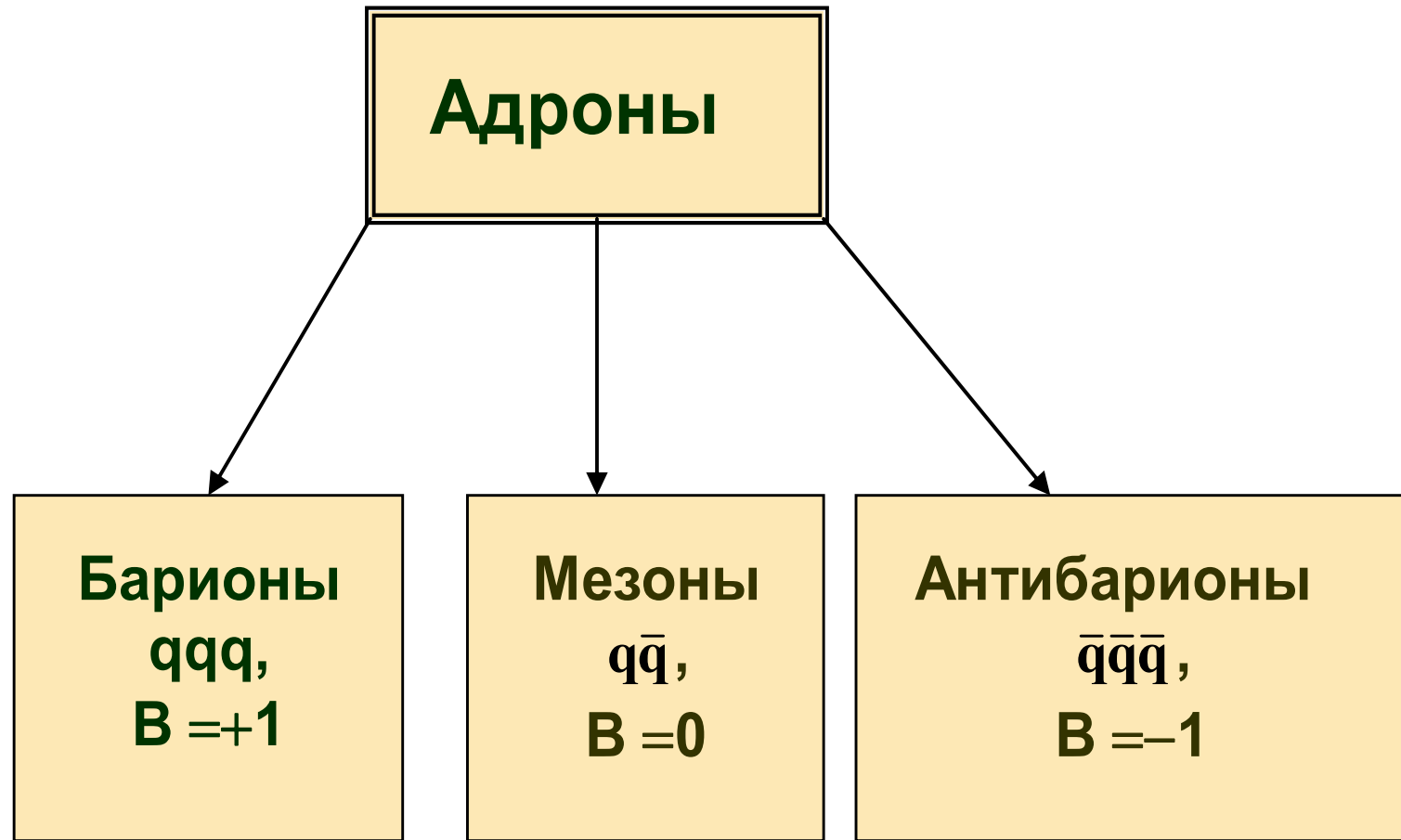
$$s(\bar{s}) = +1, \quad c(\bar{c}) = -1, \quad b(\bar{b}) = +1, \quad t(\bar{t}) = -1$$

Условились считать знаки ароматов *s, c, b, t* совпадающими со знаками электрических зарядов кварков.

Изоспин *I* и квантовые числа *s, c, b, t* сохраняются только в сильных взаимодействиях.



# Адроны – системы связанных кварков



Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

# Модель кварков

- Квантовые числа кварков, образующих адрон, определяют квантовые числа адронов. Адроны имеют определенные значения электрического заряда  $Q$ , спина  $J$ , чётности  $P$ , изоспина  $I$ . Квантовые числа  $s$  (странность),  $c$  (очарование или шарм),  $b$  (*bottom*) и  $t$  (*top*) разделяют адроны на обычные нестранные частицы ( $p, n, \pi, \dots$ ), странные частицы ( $K, \Lambda, \Sigma, \dots$ ), очарованные ( $D, \Lambda_c, \Sigma_c, \dots$ ) и боттом-частицы ( $B, \Lambda_B, \Xi_B$ ).
- $t$ -кварк имеет время жизни  $\approx 10^{-25}$  с, поэтому он не успевает образовать адрон.
- Всё многообразие адронов возникает в результате различных сочетаний  $u$ -,  $d$ -,  $s$ -,  $c$ -,  $b$ -кварков, образующих связанные состояния.
- барионы (фермионы с барионным числом  $B = 1$ ) строятся из трех кварков;
- мезоны (бозоны с барионным числом  $B = 0$ ) строятся из кварка и антикварка;
- квантовое число — цвет кварка — имеет три значения: красный, зеленый, синий;
- все известные адроны — бесцветны.

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

	u	$\bar{d}$	$\pi^+$
Q	+2/3	+1/3	+1
B	+1/3	-1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
$I_3$	+1/2	+1/2	+1
P	+1	-1	-1

$$M(\pi^+) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

$$J^P(I) = 0^-(1)$$

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

	$\bar{u}$	d	$\pi^-$
Q	-2/3	-1/3	-1
B	-1/3	+1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
$I_3$	-1/2	-1/2	-1
P	-1	1	-1

$$M(\pi^-) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^-) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

$$J^P(I) = 0^-(1)$$

# Мезоны

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)	$\mu^- \bar{\nu}$
$\pi^0$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	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)	$\mu^- \bar{\nu},$ $\pi^0 \pi^-$
$\rho^+ \rho^-$ $\rho^0$	$u\bar{d} \quad d\bar{u}$ $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$	769	150 МэВ	1-(1)	$\pi\pi$
$\omega$	$\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d})$	783	8,4 МэВ	1-(0)	$3\pi$
$D^+$	$c\bar{d}$	1869	$1,1 \cdot 10^{-12}$	0-(1/2)	$K + \text{другие},$ $e + \text{другие},$ $\mu + \text{другие}$
$D^-$	$d\bar{c}$				
$J/\Psi$	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	1-(0)	адроны, лептоны
$\Upsilon$	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	1-(0)	адроны, лептоны

# Пример

## Протон (uud)

$$M(P) = 938.272 \text{ МэВ}$$

$\tau(P)$  = стабильный

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left( \frac{1}{2} \right)$$

## Нейтрон (udd)

$$M(n) = 939.565 \text{ МэВ}$$

$$\tau(n) = 885.7 \pm 0.8 \text{ с}$$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left( \frac{1}{2} \right)$$

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

	u	u	d	p
Q	+2/3	+2/3	-1/3	+1
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I <sub>3</sub>	+1/2	+1/2	-1/2	+1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

	u	d	d	n
Q	+2/3	-1/3	-1/3	0
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I <sub>3</sub>	+1/2	-1/2	-1/2	-1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

# Кварковая структура барионов

Барионы — связанные состояния трёх кварков

Частица	Кварковый состав	Масса, $mc^2$ (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	$885.7 \pm 0.8$	$1/2^+(1/2)$	$pe^- \nu$
$\Lambda$	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	$0.81 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
$\Delta^{++}$ $\Delta^+$ $\Delta^0$ $\Delta^-$	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n)\pi^{0,\pm}$