



*Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»*

*Институт ядерной физики и технологий*

*Лаборатория экспериментальной ядерной физики*

*<http://enpl.mephi.ru/>*

*А.И.Болоздыня*

# **Введение в ядерную физику**

**Лекция №13**

**Стандартная Модель**

2017

## *Лекция №13*

# *Стандартная Модель*

- 1. Законы сохранения**
- 2. Квантовая хромодинамика**
- 3. Электрослабые взаимодействия**
- 4. Стандартная модель**
- 5. Физика за пределами Стандартной модели**

# 1. Законы сохранения

Законы сохранения определяют правила отбора, согласно которым процессы с частицами, приводящие к нарушению законов сохранения, не могут осуществляться в определённых типах взаимодействий.

*Законы сохранения являются результатом обобщения экспериментальных наблюдений*

В каждом случае, когда физические законы инвариантны относительно какой-либо операции симметрии  $U$ , существует соответствующая ей сохраняющаяся физическая величина.

Характеристика	Взаимодействие		
	Сильное	Электромагнитное	Слабое
<b>Аддитивные законы сохранения</b>			
Электрический заряд, $Q$	+	+	+
Энергия, $E$	+	+	+
Импульс, $p$	+	+	+
Угловой момент, $J$	+	+	+
Барионный заряд, $B$	+	+	+
Лептонные заряды, $L_e, L_\mu, L_\tau$	+	+	+
Странность, $s$	+	+	-
Очарование, $c$	+	+	-
Красота, $b$	+	+	-
Истина, $t$	+	+	-
Изоспин, $I$	+	-	-
Проекция изоспина, $I_3$	+	+	-
<b>Мультипликативные законы сохранения</b>			
Пространственная четность, $P$	+	+	-
Зарядовая четность, $C$	+	+	-
Временная четность, $T$	+	+	-
Комбинированная четность, $CP$	+	+	-
CPT-четность	+	+	+
G-четность	+	-	-

$$\vec{J}_i = \vec{J}_f$$

$$\vec{J}_i = \vec{J}_A + \vec{J}_a + \vec{I}_a$$

$$\vec{J}_f = \vec{J}_B + \vec{J}_b + \vec{I}_b$$

$$\vec{I}_a + \vec{I}_A = \vec{I}_b + \vec{I}_B$$

$$P_A P_A (-1)^{I_A} = P_B P_B (-1)^{I_B}$$

# CPT-инвариантность

В рамках квантовой теории поля Людерсом и Паули была доказана фундаментальная теорема.

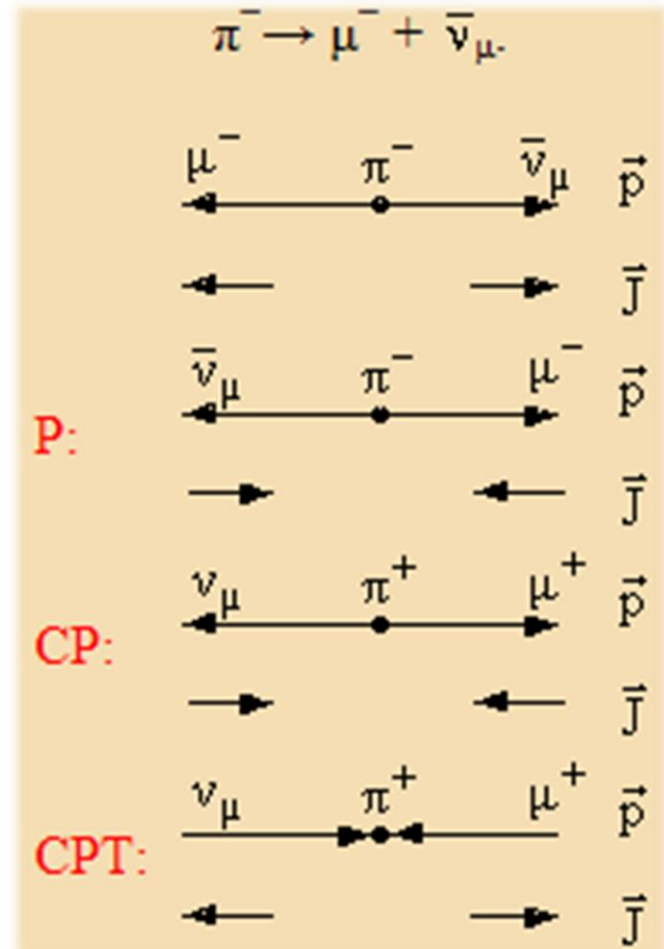
**Квантовые системы инвариантны относительно CPT- преобразования в любой последовательности**

Следствием **CPT**-инвариантности является равенство масс и времён жизни частицы и античастицы.

**P** (чётность) -преобразование меняет координаты на противоположные, знак любого полярного вектора – на противоположный, **аксиальные вектора не меняются ( $L=p \times r$ ):**  
 $x, y, z \rightarrow -x, -y, -z$       $\vec{p} \xrightarrow{P} -\vec{p}$

**CP**-преобразование заменяет **частицу на античастицу** и изменяет **знак импульса**.

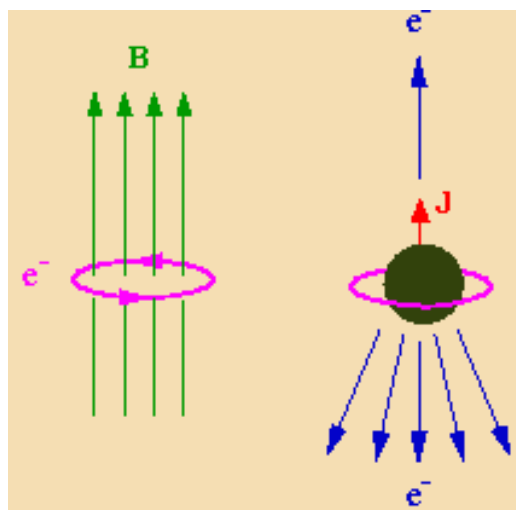
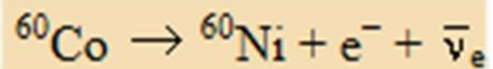
**T**-преобразование меняет местами начальное и конечное состояния и изменяет направления импульсов и спинов.



На опыте не обнаружено ни одного случая нарушения **CPT**-инвариантности.

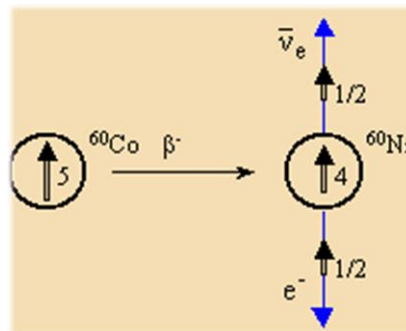
# Опыт м-м Ву

1957 г.



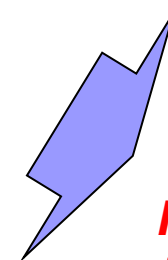
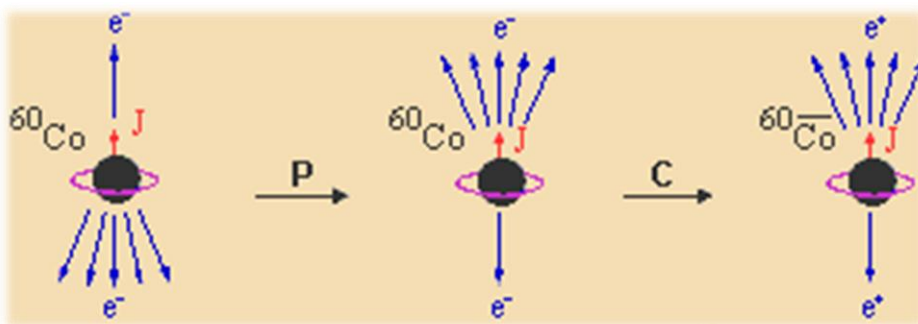
$P \neq 1$

$\sim 0.01^\circ\text{K}$



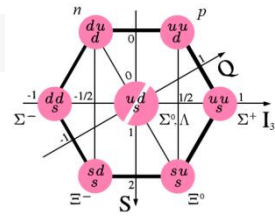
Ву Цзяньсюн  
(1912-1997)

$CP = 1$



**Н.п. 1957**  
**Ли и Янг**

## 2. Квантовая хромодинамика

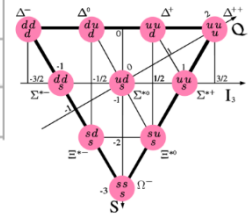


В 1963 году Мюррей Гелл-Манн и, независимо от него, Джордж Цвейг высказали предположение, что структура  $SU(3)$ -мультиплетов может быть объяснена существованием более элементарных структурных элементов внутри адронов.

Эти частицы были названы **кварками**:

$d$	нижний	<i>down</i>	$-1/3$	$4,8 \pm 0,5 \pm 0.3 \text{ МэВ}/c^2$
$u$	верхний	<i>up</i>	$+2/3$	$2,3 \pm 0,7 \pm 0.5 \text{ МэВ}/c^2$
$s$	странный	<i>strange</i>	$-1/3$	$95 \pm 5 \text{ МэВ}/c^2$

Все обнаруженные до 1974 г. **адроны**, можно было описать комбинацией кварков  **$u, d, s$** .



В 1974 году две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы  **$J/\psi$**  с массой  $\sim 3.1 \text{ ГэВ}$  и временем жизни почти в 1000 раз больше, чем у известных частиц такой массы. Детальные исследования показали, что новые частицы содержат новый  **$c$ -кварк**, названный **очарованным** (*charm*). Было высказано предположение, что  **$J/\psi$**  - это мезон со скрытым очарованием (состоит из  **$c$ -** и **анти- $c$ -** кварков)

В 1977 году были открыты нейтральные  **$\Upsilon$ -мезоны** с массами около 10 ГэВ в реакции образования мюонных пар в протон-ядерных столкновениях и на электронно-позитронных коллайдерах с шириной распада 53 кэВ.

Это означало открытие пятого кварка  **$b$**  (от *beauty* или *преlestный*).

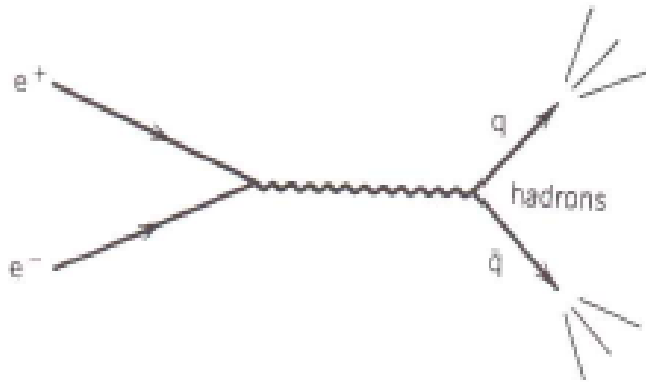
В 1995 году был открыт шестой, самый "тяжёлый"  **$t$ -кварк**.

Каждый тип кварка имеет ещё одно квантовое число - цвет, которое может принимать три значения - **красный, синий и зелёный**. Введение цветовой степени свободы кварков было необходимо, чтобы сохранить **принцип Паули** для кварков, которые имеют спин  **$1/2$** .

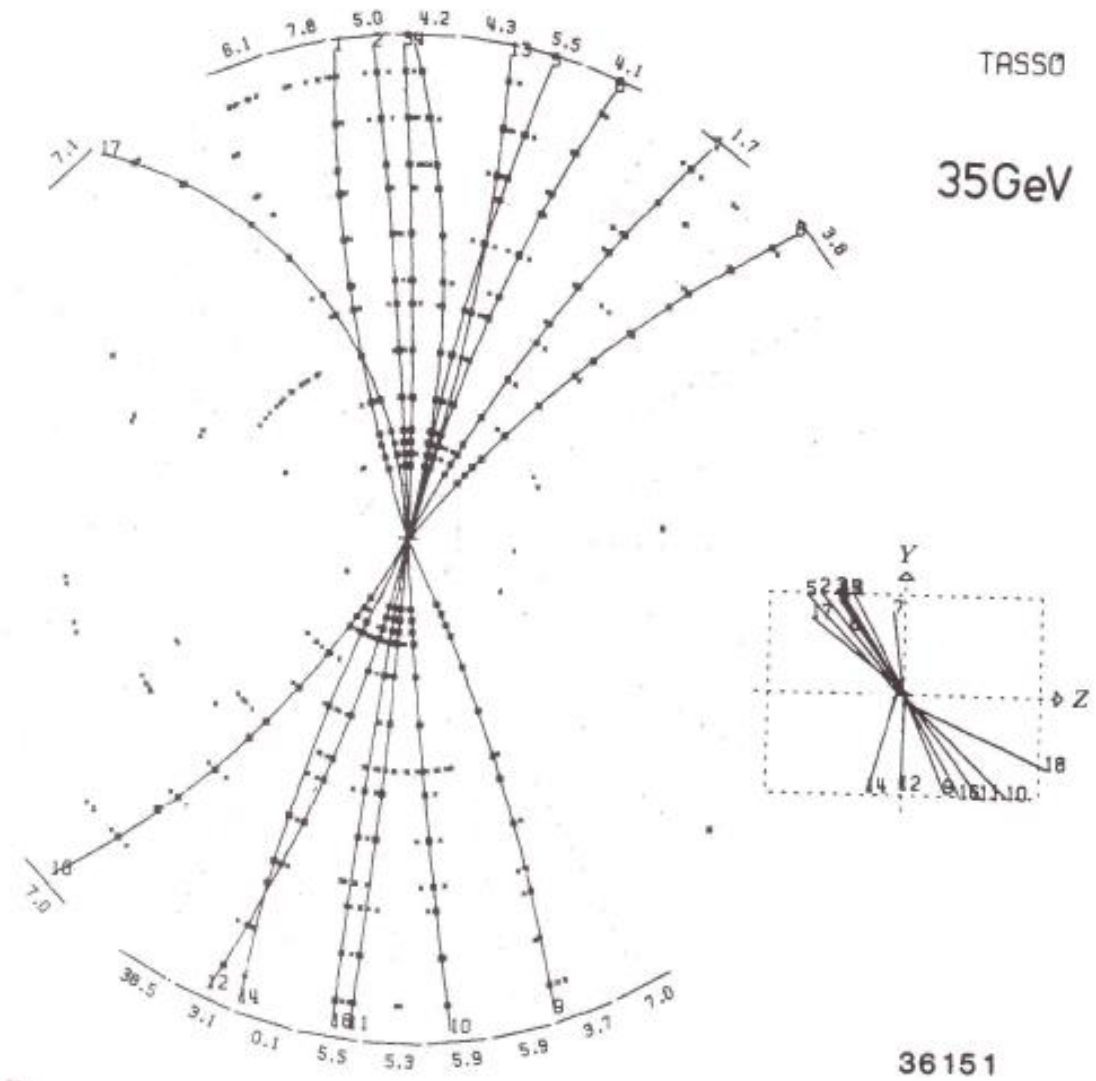
## Кварки - частицы, из которых состоят адроны

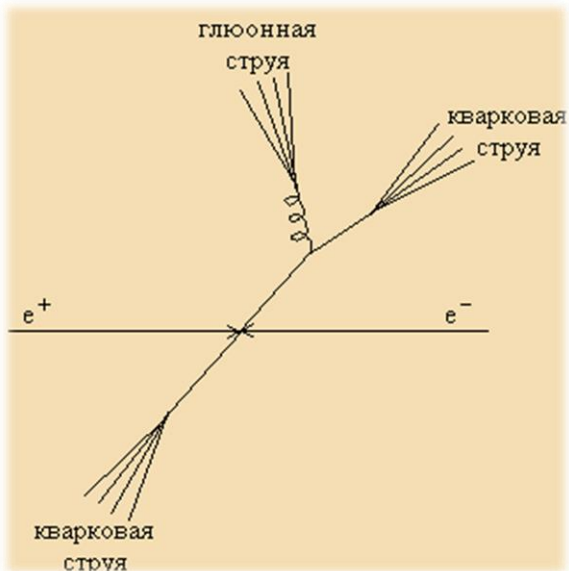
Характеристика	Тип (аромат) кварка					
	d	u	s	c	b	t
Электрический заряд Q	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Барионное число B	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Спин J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Четность P	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Изоспин I	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекция изоспина I <sub>3</sub>	-1/2	+1/2	0	0	0	0
Странность s	0	0	-1	0	0	0
Очарование (charm) c	0	0	0	+1	0	0
Красота (bottomness или beauty) b	0	0	0	0	-1	0
Верхний (topness) t	0	0	0	0	0	+1
Масса конститuentного кварка, ГэВ	0.33	0.33	0.51	1.8	5	180
Масса токового кварка, ГэВ	0.004-0.008	0.0015-0.004	0.08-0.13	1.1-1.4	4.1-4.9	174±5

*в адроне!*



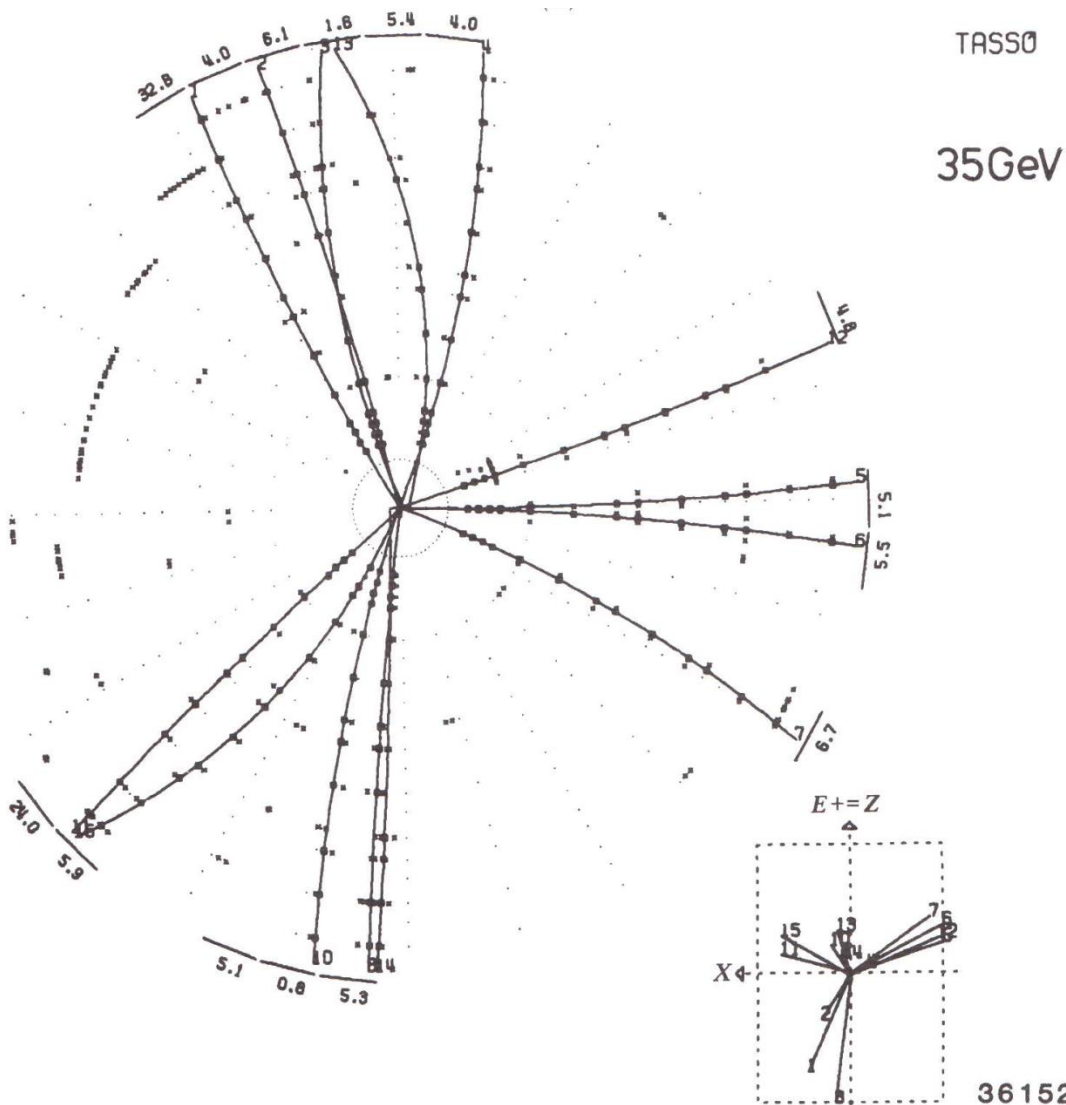
*Двухструйное событие*  
 как доказательство  
 существования кварков,  
 полученное на  
 электрон-позитронном  
 коллайдере DESY  
**Deutsches Elektronen-  
 Synchrotron**





*Трёх-струйное событие*, в котором один из кварков испустил глюон, который также создал адронный ливень.

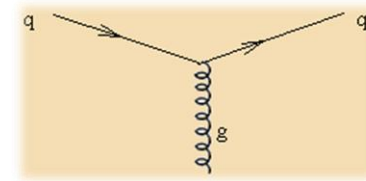
Треки заряженных частиц искривлены магнитным полем.



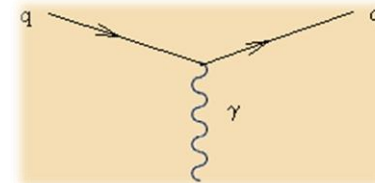
## Основные положения современной Квантовой Хромо-Динамики

1. Все сильно взаимодействующие частицы состоят из *кварков*; кварки являются фермионами и не имеют структуры.
2. Кварки имеют внутренние квантовые числа: электрический заряд  $Q$ , спин  $1/2$ , чётность  $P$ , барионное число  $B$ , изоспин  $I$ , проекцию изоспина  $I_3$ , странность  $s$ , очарование  $c$ , прелесть  $b$ , истинность  $t$ . *Совокупность* этих внутренних квантовых чисел, характеризующих тип кварка, называется также "*ароматом*" кварка.
3. Квантовые числа кварков определяют характеристики *адронов*.
4. *Барионы* (фермионы с барионным числом  $B = 1$ ) строятся из *трёх кварков*.
5. Антибарионы (фермионы с барионным числом  $B = -1$ ) строятся из трёх *антикварков*.
6. *Мезоны* (бозоны с барионным числом  $B = 0$ ) строятся из кварка и антикварка.
7. Квантовое число "*цвет*" приписывается *всем кваркам* независимо от типа (аромата). Цвет имеет три значения. Обычно их обозначают красный ( $K$ ), зеленый ( $З$ ), синий ( $С$ ). Кварк обладает единичным цветовым зарядом  $K$ ,  $З$  или  $С$ . Цвет соответствующего антикварка обозначается  $\bar{K}$  (антикрасный),  $\bar{З}$  (антизеленый),  $\bar{С}$  (антисиний).
8. Известные *барионы и мезоны – бесцветны*, т.е. все цвета смешаны равномерно (в барионах) или смешаны цвет-антицвет (в мезонах). Такие состояния, называемые цветовыми синглетами, они не меняются при вращении в трёхмерном цветовом пространстве.
9. Кварки в адронах связаны *глюонами*.

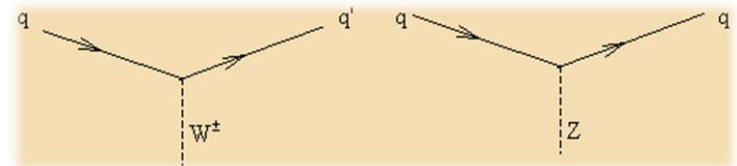
- Кварки участвуют в **сильных взаимодействиях**, излучая или поглощая глюон  $g$ , при этом тип (аромат) кварка остаётся неизменным, а цвет кварка может измениться



- Кварки участвуют в **электромагнитных взаимодействиях**, излучая или поглощая  $\gamma$ -квант, при этом не изменяется ни цвет, ни тип (аромат) кварков.



- Кварки участвуют в **слабых взаимодействиях**, излучая или поглощая  $W^\pm$  или  $Z$ -бозоны, при этом может изменяться тип (аромат) кварка, цвет кварка при этом остаётся без изменения



- Каждому адрону приписывается определённая **внутренняя чётность**. Внутреннюю чётность адрона можно получить, воспользовавшись следующими правилами:

**Правило 1:** Чётность кварка равна  $+1$  и не зависит от типа кварка.

**Правило 2:** Чётность антикварка равна  $-1$  и не зависит от типа кварка.

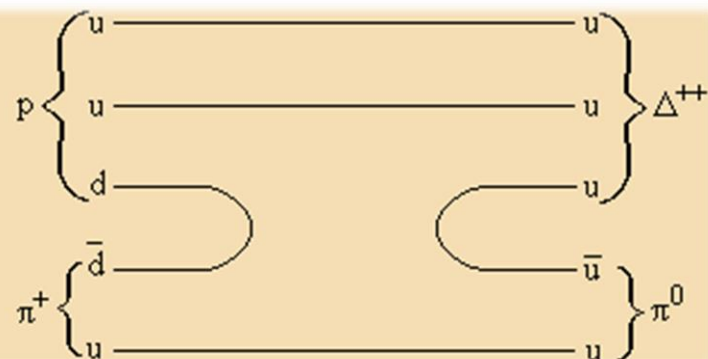
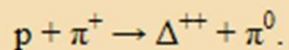
**Правило 3:** Внутренняя чётность адрона равна произведению чётностей входящих в его состав кварков, умноженному на

$$(-1)^{\sum L}$$

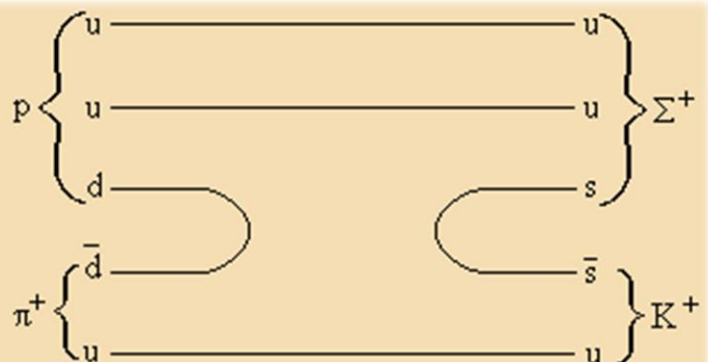
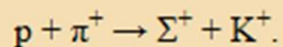
где  $L$ -орбитальные моменты кварков в составе адрона.

## Примеры кварковых схем

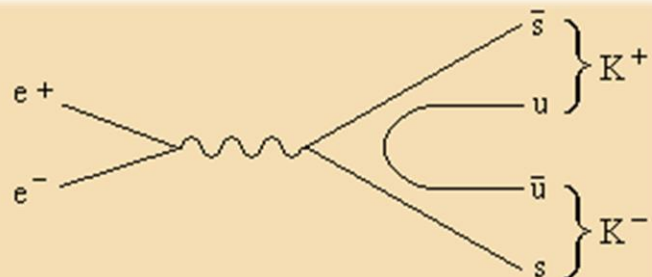
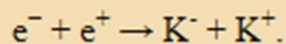
Рождение  $\Delta^{++}(1232)$ -резонанса. Реакция происходит в результате сильного взаимодействия



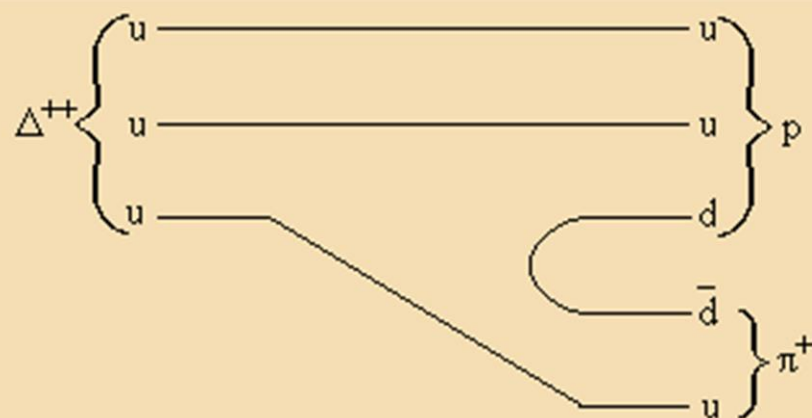
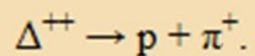
Рождение странных частиц. Реакция происходит в результате сильного взаимодействия



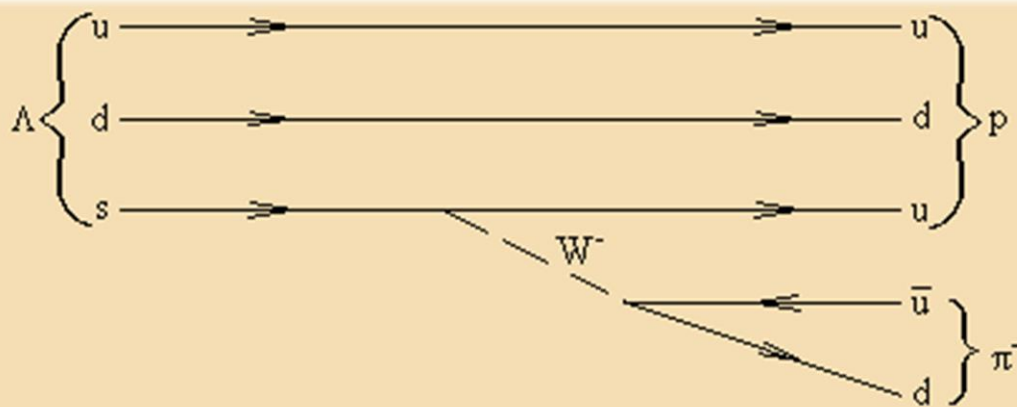
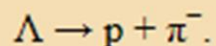
Рождение  $K^+K^-$  при  $e^+e^-$  аннигиляции. Реакция происходит в результате электромагнитного взаимодействия

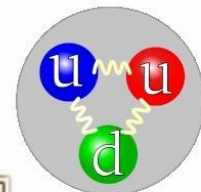


Распад резонанса  $\Delta^{++}$ . Распад происходит в результате сильного взаимодействия



Распад  $\Lambda$ -гиперона. Распад происходит в результате слабого взаимодействия

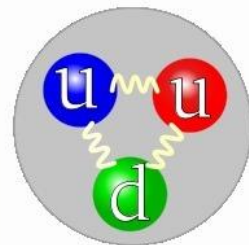




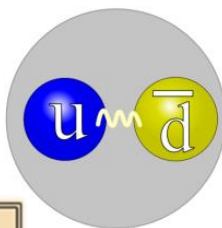
# Кварковая структура барионов

$B = 1$

Частица	Кварковый состав	Масса, $mc^2$ (МэВ)	Время жизни (сек) или ширина (МэВ)	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
p	uud	938.27	$> 10^{34}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
n	ddu	939.57	$887 \pm 2$ сек	$1/2^+(1/2)$	$p e \bar{\nu}$
$\Lambda$	uds	1116	$2.6 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p \pi^-, n \pi^0$
$\Sigma^+$	uus	1189	$0.80 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p \pi^0, n \pi^+$
$\Sigma^0$	uds	1193	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda \gamma$
$\Sigma^-$	dds	1197	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n \pi^-$
$\Xi^0$	uss	1315	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^0$
$\Xi^-$	dss	1321	$1.6 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda \pi^-$
$\Omega^-$	sss	1672	$0.82 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$
$\Delta^{++}$ $\Delta^+$ $\Delta^0$ $\Delta^-$	$\left. \begin{array}{l} uuu \\ uud \\ udd \\ ddd \end{array} \right\}$	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	(n или p) + $\pi$



Частица	Кварковый состав	Масса, $mc^2$ (МэВ)	Жизненное время, ширина (МэВ)	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
$\Sigma^+(1385)$	uus	1383	36	} $3/2^+(1)$	Лп, $\Sigma\pi$
$\Sigma^0(1385)$	uds	1384	36		
$\Sigma^-(1385)$	dds	1387	39		
$\Xi^0(1530)$	uss	1532	9.1	} $3/2^+(1/2)$	$\Xi\pi$
$\Xi^-(1530)$	dss	1535	9.1		
N(1440)	$N^+ uud$	} 1430-1470	250-450	$1/2^+(1/2)$	n(p)+ $\pi(2\pi), \Delta\pi$
	$N^0 udd$				
N(1520)	$N^+ uud$	} 1515-1530	110-135	$3/2^-(1/2)$	n(p)+ $\pi(2\pi), \Delta\pi$
	$N^0 udd$				
$\Lambda_C^+$	udc	2285	$2.0 \cdot 10^{-13}$ сек	$1/2^+(0)$	(n или p) + другие
$\Sigma_C^{++}$	uuc	2453	2.2	} $1/2^+(1)$	$\Lambda_C^+ \pi$
$\Sigma_C^+$	udc	2454	<4.6		
$\Sigma_C^0$	ddc	2452	2.2		



# Кварковая структура мезонов

$B = 0$

Частица	Кварковый состав	Масса, $Mc^2$ (МэВ)	Время жизни (сек) или ширина	Спин-четность, изоспин $J^P(I)$	Основные моды распада
$\pi^+, \pi^-$	$u\bar{d}, d\bar{u}$	139.57	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1)$	$\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-$
$\pi^0$	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134.98	$8.4 \cdot 10^{-17}$	$0^-(1)$	$2\gamma$
$K^+, K^-$	$u\bar{s}, s\bar{u}$	494	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$0^-(1/2)$	$\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-, \pi^0 \pi^\pm$
$K^0, \bar{K}^0$	$d\bar{s}, s\bar{d}$	498	$0.89 \cdot 10^{-10} K_S^0$	$0^-(1/2)$	$\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$
			$5.2 \cdot 10^{-8} K_L^0$	$0^-(1/2)$	$\text{печ}, \pi\mu\nu, 3\pi^0, \pi^0 \pi^+ \pi^-$
$\eta$	$u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$	547	1.2 кэВ	$0^-(0)$	$2\gamma, 3\pi^0, \pi^0 \pi^+ \pi^-$
$\eta'$	$u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$	958	0.20 МэВ	$0^-(0)$	$\eta \pi^+ \pi^-, \rho^0 \gamma, \pi^0 \pi^0 \eta$
$\rho^\pm, \rho^0$	$\left. \begin{matrix} u\bar{d}, d\bar{u} \\ u\bar{u} - d\bar{d} \end{matrix} \right\}$	770	151 МэВ	$1^-(1)$	$\text{пл}$
$\omega$	$u\bar{u} + d\bar{d}$	782	8.4 МэВ	$1^-(0)$	$\pi^+ \pi^- \pi^0$
$\phi$	$s\bar{s}$	1020	4.4 МэВ	$1^-(0)$	$K^+ K^-, \pi^+ \pi^- \pi^0$
$D^\pm$	$c\bar{d}, d\bar{c}$	1869	$1.1 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	} $K + \text{другие частицы},$ $e + \text{другие}, \mu + \text{другие}$
$D^0, \bar{D}^0$	$c\bar{u}, u\bar{c}$	1865	$4.2 \cdot 10^{-13}$	$0^-(1/2)$	
$D_S^\pm$	$c\bar{s}, s\bar{c}$	1969	$4.7 \cdot 10^{-13}$	$0^-(0)$	$K + \text{другие}$
$B^\pm, B^0, \bar{B}^0$	$\left. \begin{matrix} u\bar{b}, b\bar{u} \\ d\bar{b}, b\bar{d} \end{matrix} \right\}$	5279	$1.6 \cdot 10^{-12}$	$0^-(1/2)$	$D^0 + \text{др}, D^* + \text{др}$
				$0^-(1/2)$	$\nu + \text{др}, D^+ + \text{др}, D^* + \text{др}$
$J/\psi$	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	$1^-(0)$	$\text{адроны}, e^+ e^-, \mu^+ \mu^-$
$Y$	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	$1^-(0)$	$\tau^+ \tau^-, e^+ e^-, \mu^+ \mu^-$

### 3. Электрослабое взаимодействие

**Электрослабое взаимодействие** является общим описанием слабого взаимодействия и электромагнитного взаимодействия. Хотя эти два взаимодействия очень различаются на обычных низких энергиях, в теории они представляются как два разных проявления одного взаимодействия. При энергиях выше **энергии объединения** (порядка 100 ГэВ) они соединяются в единое **электрослабое взаимодействие**.

Теория **ЭСВ** создана в конце 60-х годов 20-го века С. Вайнбергом, Ш. Глэшоу, А. Саламом как единая (объединённая) теория слабого и электромагнитного взаимодействий кварков и лептонов, осуществляемых посредством обмена четырьмя частицами — безмассовыми фотонами (электромагнитное взаимодействие) и тяжёлыми промежуточными векторными бозонами (слабое взаимодействие). Причём **фотон и Z-бозон являются суперпозицией других двух частиц —  $B^0$  и  $W^0$** :

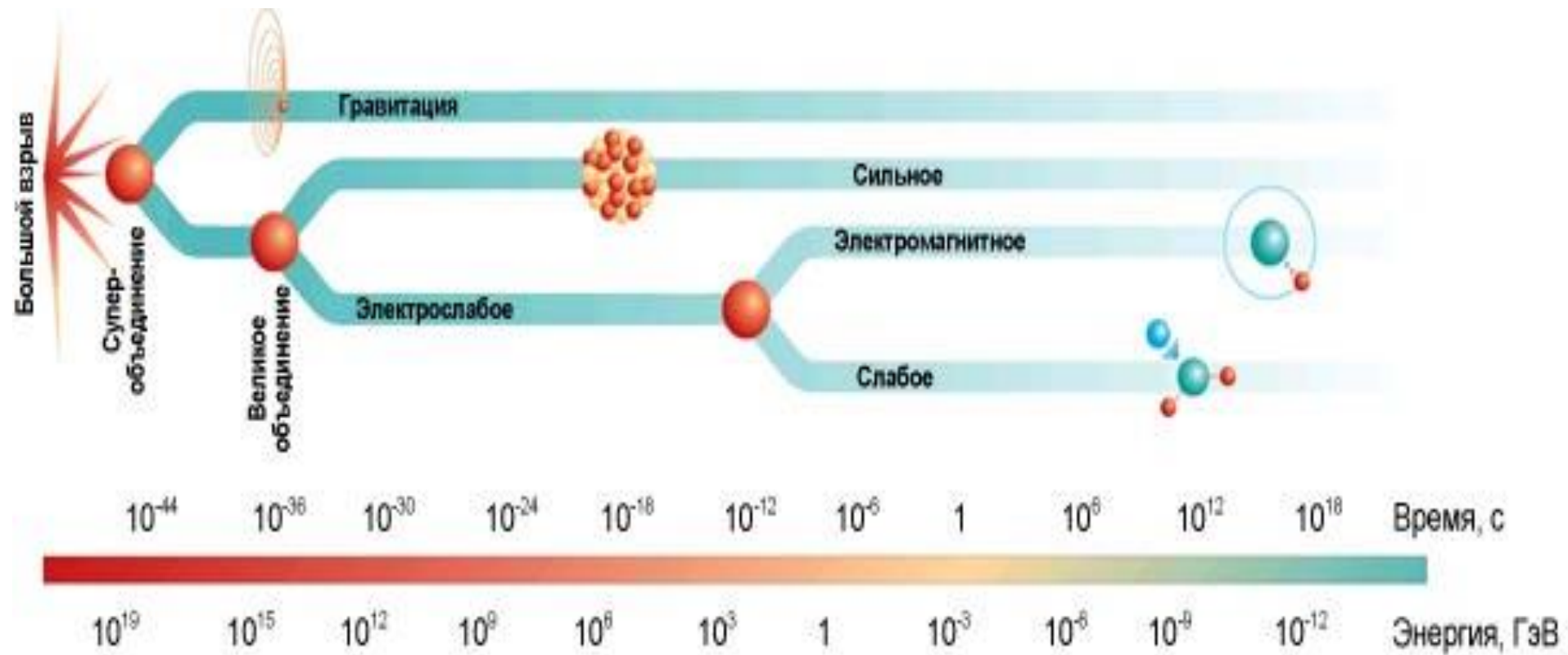
$$\gamma = B^0 \cdot \cos \theta_W + W^0 \cdot \sin \theta_W$$

$$Z^0 = -B^0 \cdot \sin \theta_W + W^0 \cdot \cos \theta_W$$

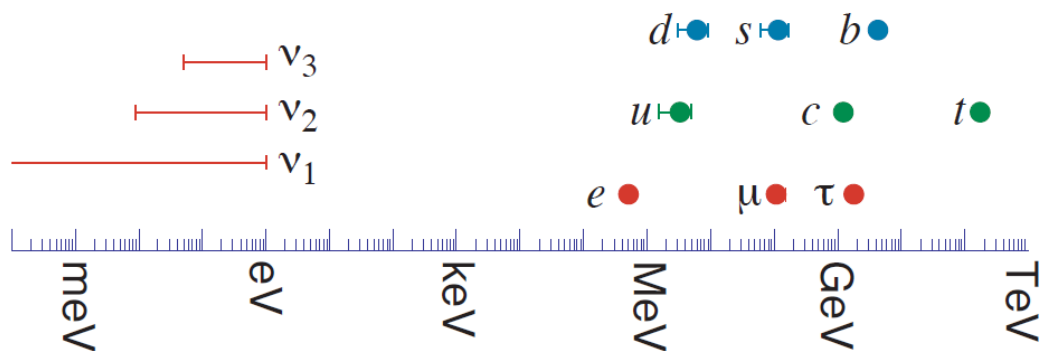
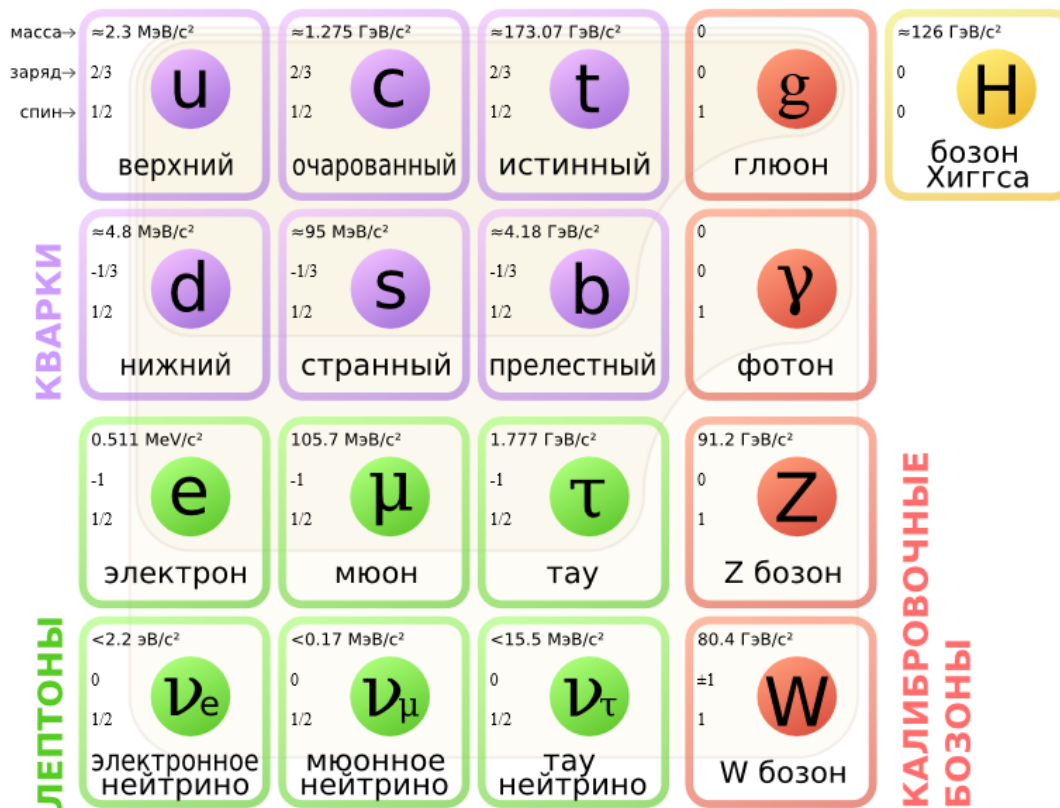
где  $\theta_W$  угол смешивания Вайнберга

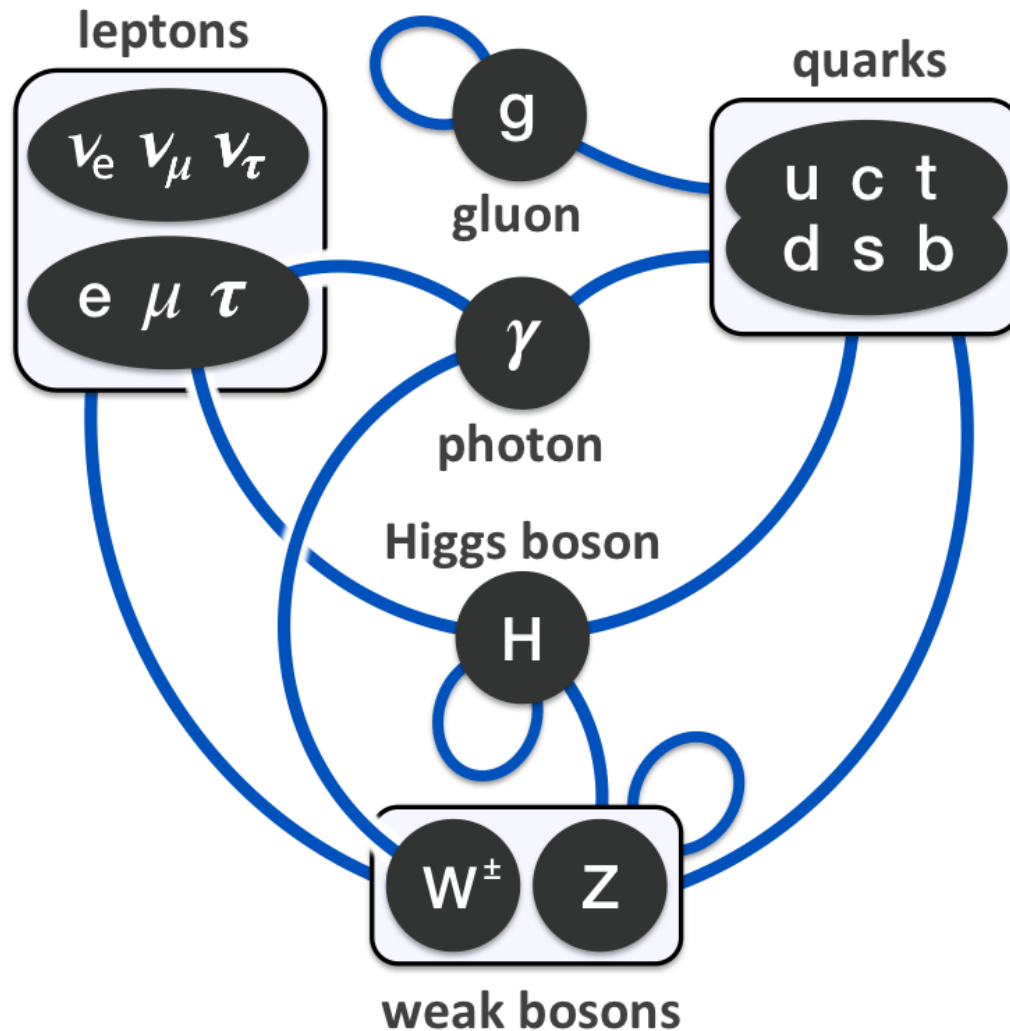
За разработку этой теории Глэшоу, Вайнберг и Салам получили **Н.п. 1979 г.**

Существование ЭС взаимодействий было экспериментально установлено в две стадии: сначала были открыты нейтральные токи в совместном эксперименте *Гаргамелла* по рассеиванию нейтрино в 1973 г., а затем совместные эксперименты *UA1* и *UA2* в 1983 г. доказали существование W и Z калибровочных бозонов при помощи протон-антипротонных столкновений на ускорителе *SPS*



# 4. Стандартная Модель





Взаимодействие между различными частицами в Стандартной модели

## Лептоны

Лептоны *не участвуют в сильных взаимодействиях*, имеют спин 1/2 и лептонные заряды  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .

Частица	Масса, МэВ	Время жизни	Лептонный заряд			Основные моды распада
			$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	
$\nu_e$	$< 7 \cdot 10^{-6}$	Стабильно	+1	0	0	
$\nu_\mu$	$< 0.17$	Стабильно	0	+1	0	
$\nu_\tau$	$< 18$	Стабильно	0	0	+1	
$e^-$	0.511	$> 4.3 \cdot 10^{23}$ лет	+1	0	0	
$\mu^-$	105.66	$2.2 \cdot 10^{-6}$ с	0	+1	0	$e\nu\bar{\nu}$
$\tau^-$	1777	$2.9 \cdot 10^{-13}$ с	0	0	+1	адроны + $\nu, \mu\nu\bar{\nu}, e\nu\bar{\nu}$

Символ	Название	Заряд	Масса
<b>Первое поколение</b>			
$e^-$	Электрон	-1	0,510998910(13) МэВ/c <sup>2</sup>
$\nu_e$	Электронное нейтрино	0	$< 2$ эВ/c <sup>2</sup>
<b>Второе поколение</b>			
$\mu^-$	Мюон	-1	105,6583668(38) МэВ/c <sup>2</sup>
$\nu_\mu$	Мюонное нейтрино	0	$< 0,19$ МэВ/c <sup>2</sup>
<b>Третье поколение</b>			
$\tau^-$	Тау-лептон	-1	1776,84(17) МэВ/c <sup>2</sup>
$\nu_\tau$	Тау-нейтрино	0	$< 18,2$ МэВ/c <sup>2</sup>

## Калибровочные бозоны

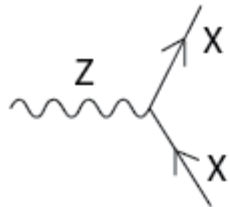
*Калибровочные бозоны* - частицы с целым значением спина, переносящие взаимодействия между фундаментальными частицами

Взаимодействие	Характерная константа взаимодействия	Кванты (калибровочные бозоны)	Масса кванта (ГэВ)	Характерные масштабы расстояний (см)
Сильное	1	g (глюон)	0	$\sim 10^{-13}$
Электромагнитное	$10^{-2}$	$\gamma$	$< 2 \cdot 10^{-16}$	$\infty$
Слабое	$10^{-6}$	$W^-, W^+$	80.39	$10^{-16}$
		Z	91.19	
Гравитационное	$10^{-38}$	гравитон (?)		$\infty$

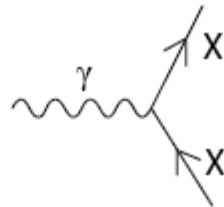
## Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия	Характерное время жизни, с	Характерное сечение, мб
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, спин $J = 1$ , безмассовые.	$1\Phi_M = 1/m_\pi$	1	$10^{-23}$ $\Delta \rightarrow N\pi$	10 $p_r \rightarrow p_r$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, спин $J = 1$ , безмассовый.	$\infty$	$(1/137)^{1/2}$	$10^{-20} - 10^{-16}$ $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma$	$10^{-3}$ $\gamma p \rightarrow p\pi^0$
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+, W^-, Z$ , спин $J = 1$ , $m(W^\pm) = 80\text{ГэВ}$ , $m(Z) = 91\text{ГэВ}$ .	$10^{-2}\Phi_M = 1/m_W$	$10^{-6}$	$>10^{-12}$ $\Sigma^- \rightarrow n\pi^-$ $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$	$10^{-14}$ $\nu p \rightarrow \nu p$ $\nu p \rightarrow \mu^- p\pi^+$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$	–	–

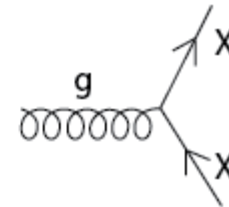
## Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



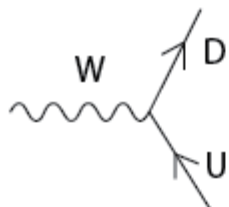
X is any fermion in the Standard Model.



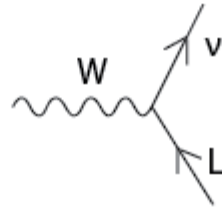
X is electrically charged.



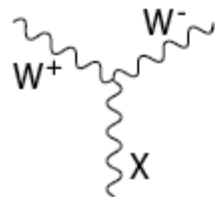
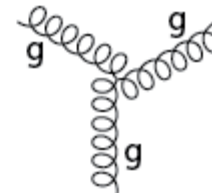
X is any quark.



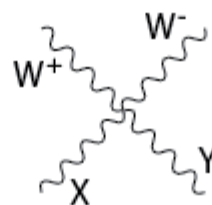
U is a up-type quark;  
D is a down-type quark.



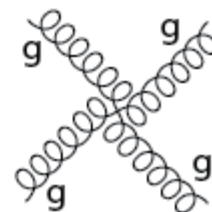
L is a lepton and  $\nu$  is the corresponding neutrino.

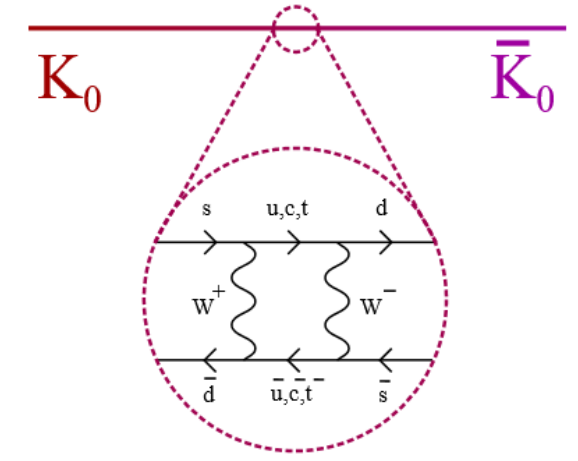
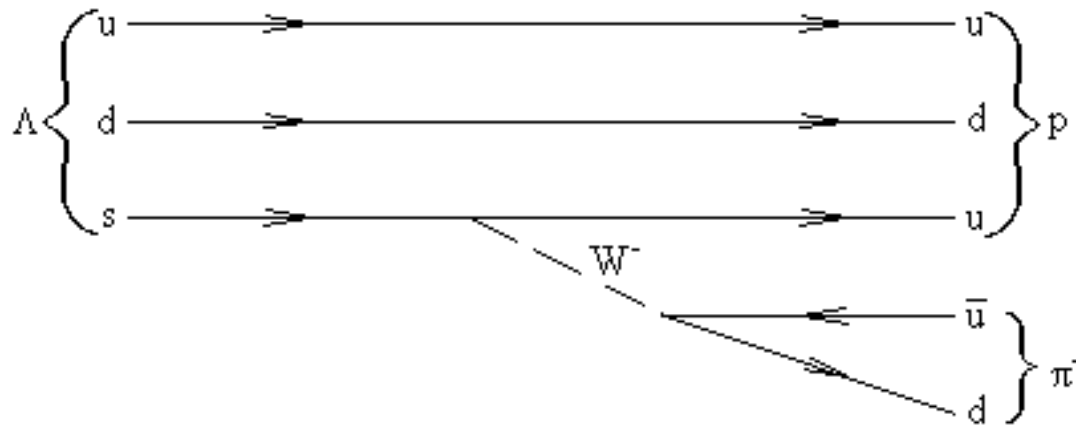
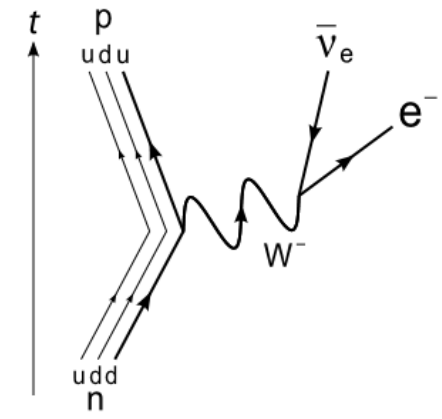
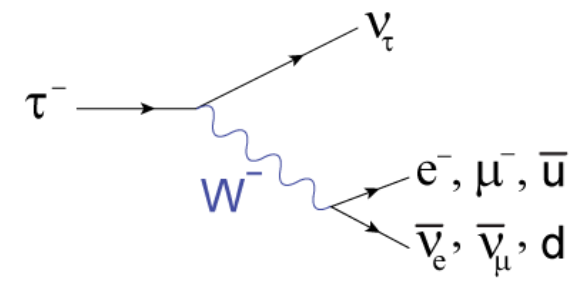
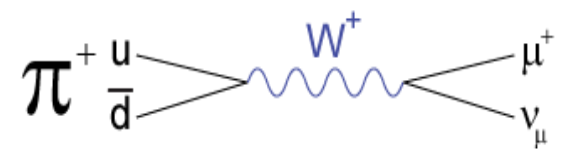
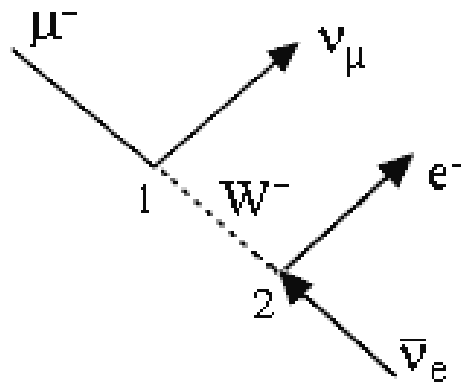
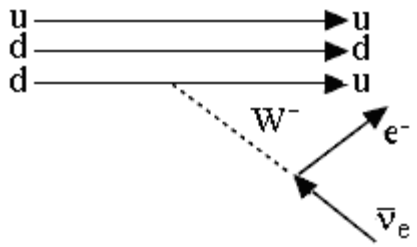


X is a photon or Z-boson.



X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.

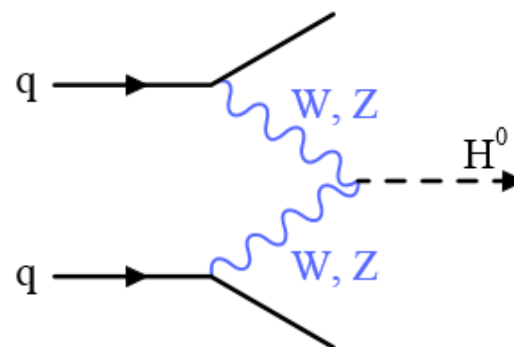




**Бозон Хиггса, Хиггсовский бозон, хиггсбон** (англ. *Higgs boson*) — элементарная частица, квант поля Хиггса в Стандартной модели отвечает за инертную массу элементарных частиц.

Хиггсовский бозон является скалярной частицей, то есть обладает **нулевым спином**.

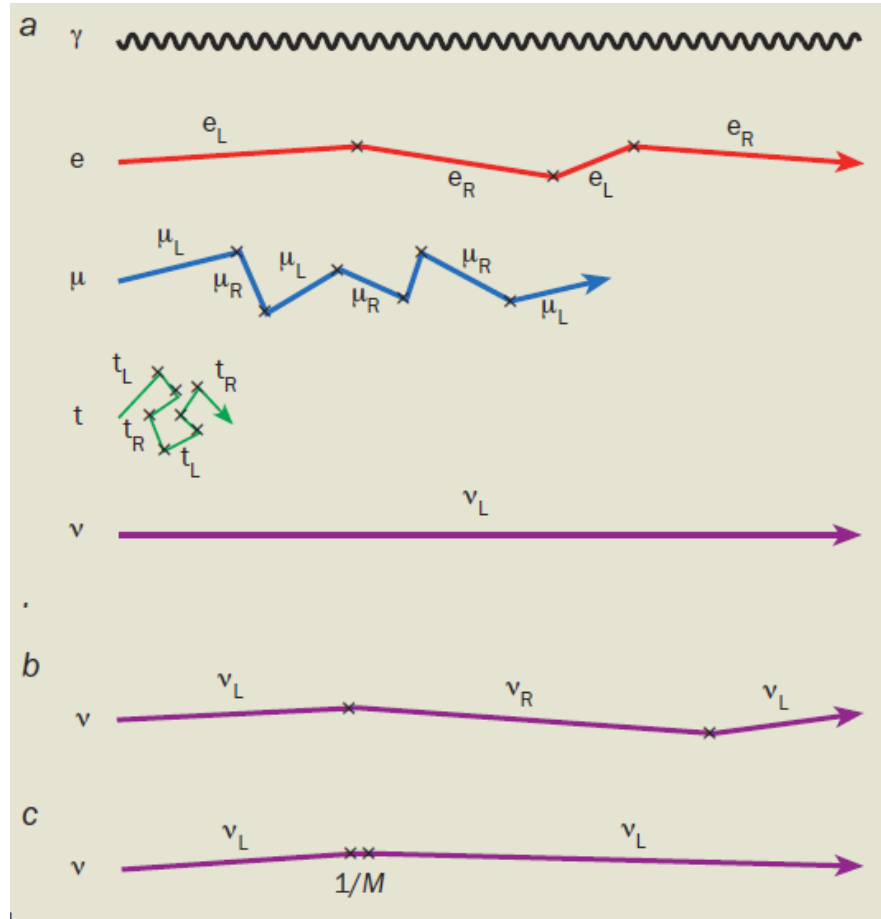
Постулирован британским физиком Питером Хиггсом в 1964 году



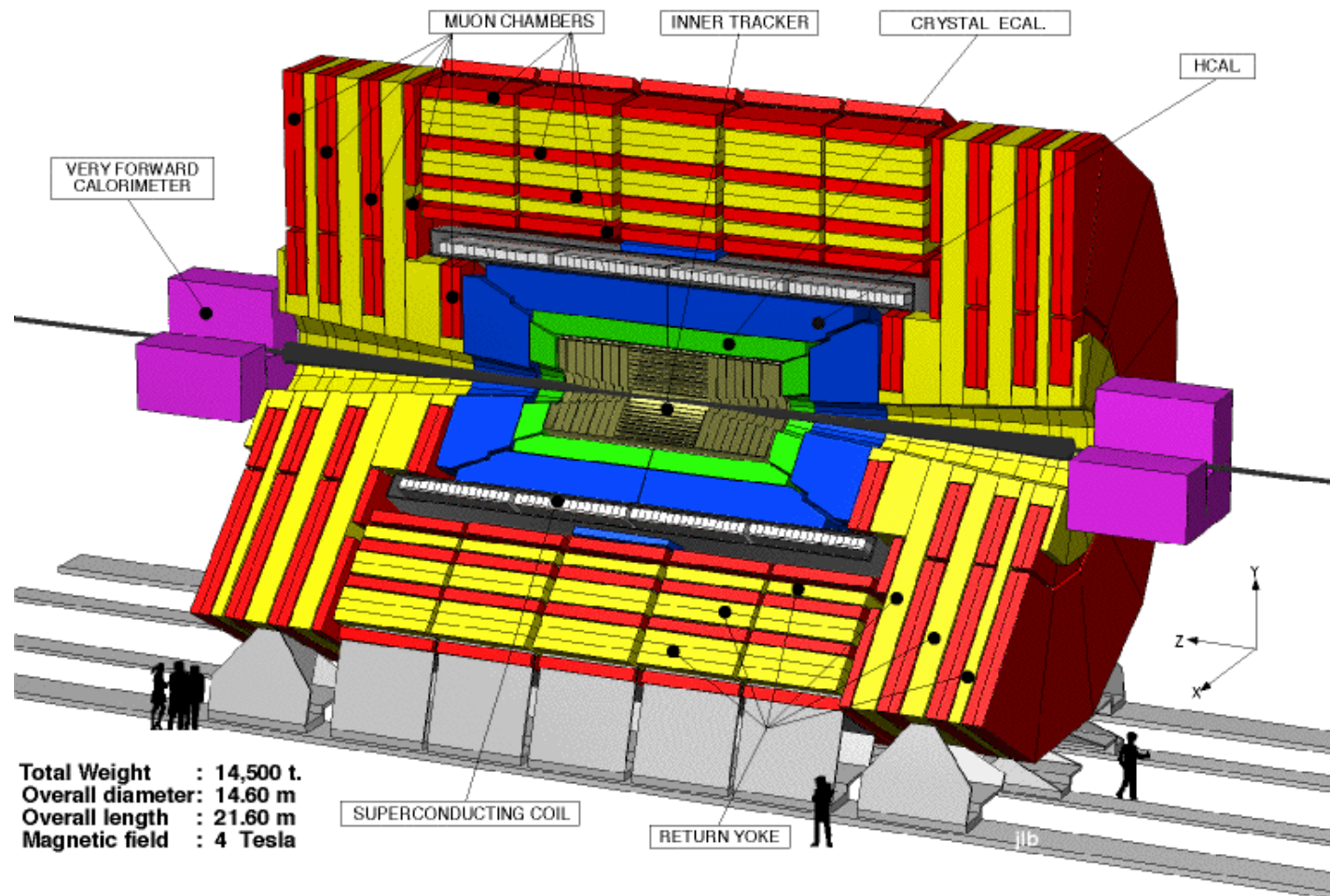
4 июля 2012 года, в результате исследований на БАК, был обнаружен кандидат на его роль — новая частица с массой около  $125\text{—}126 \text{ ГэВ}/c^2$ . Имелись веские основания считать, что эта частица является бозоном Хиггса.

В марте 2013 года появились сообщения от отдельных исследователей ЦЕРНа, что найденная полугодом ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

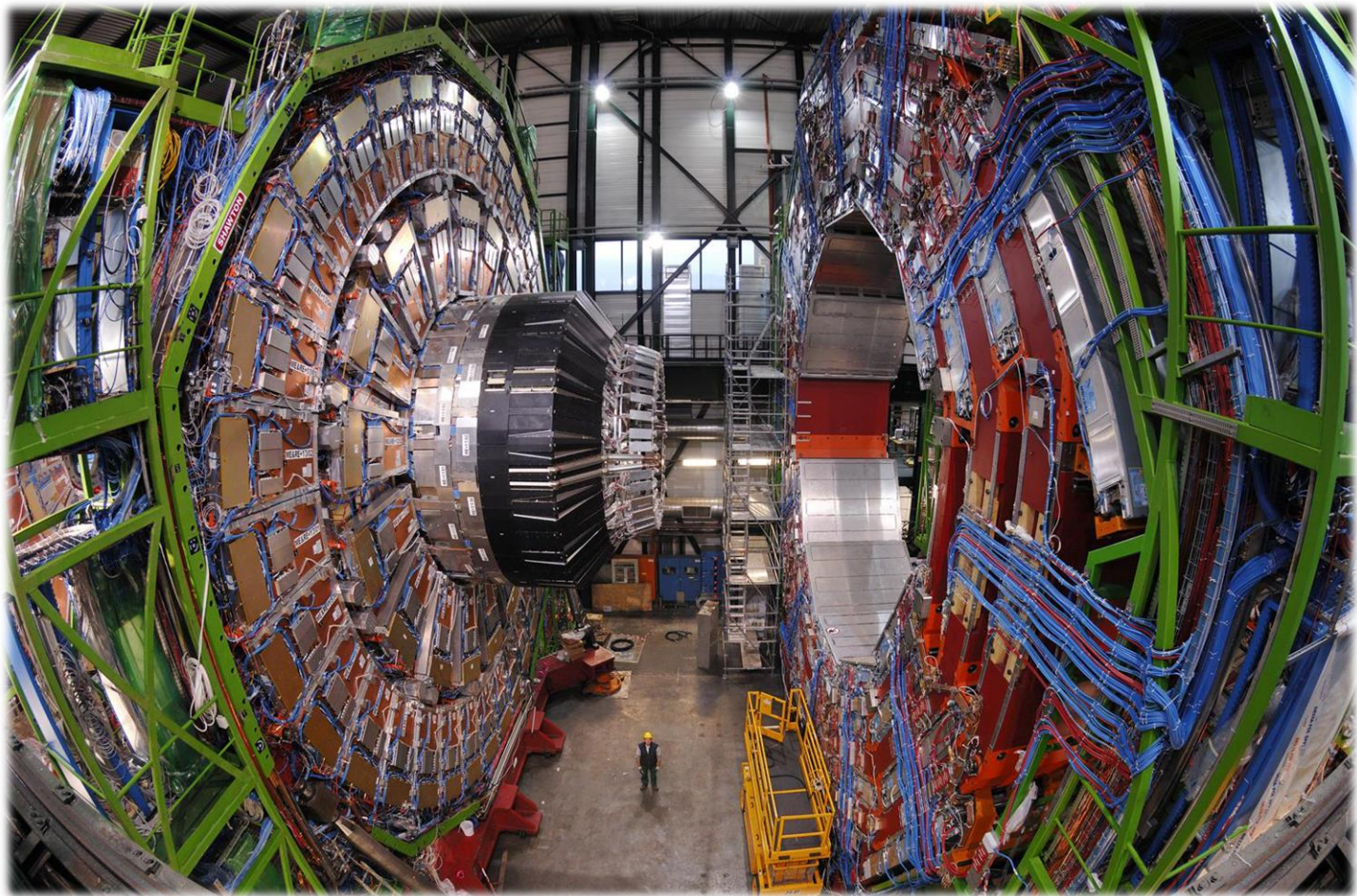
Это открытие завершило формирование Стандартной модели



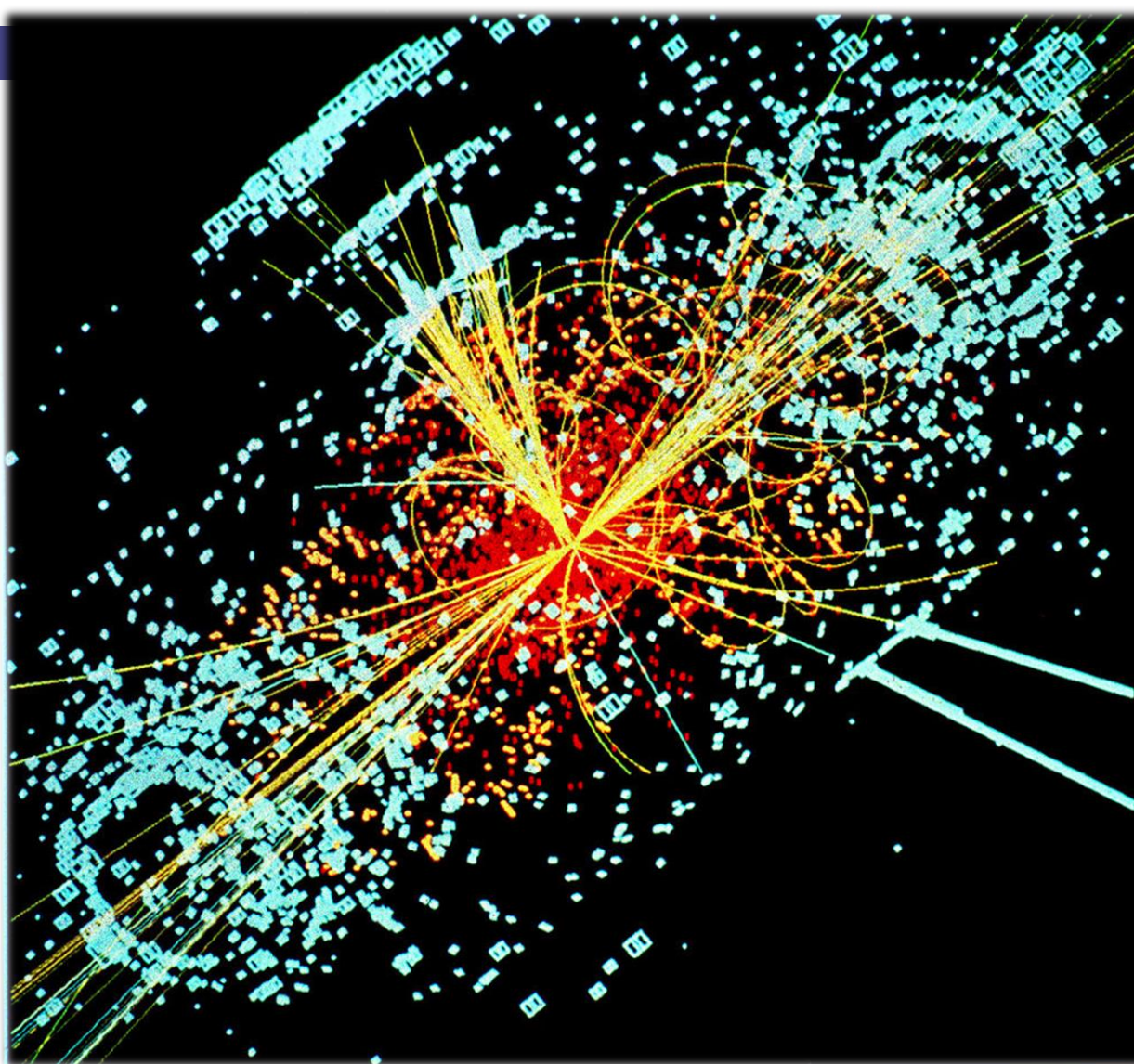
**Mass generation:** a) Particles acquire a mass through scattering with the Higgs field, with each interaction changing particle handedness, and with heavy particles like the tauon scattering much more frequently than light particles like the electron. The photon and neutrino are massless in the minimal standard model. b) A Dirac neutrino mass, which requires the addition of a right-handed neutrino field. c) A left-handed Majorana mass term, depicted as a second-order interaction involving some high mass scale  $M$  beyond the standard model. The standard model's Higgs induces the Dirac neutrino masses that, in combination with the Majorana masses of the right-handed neutrinos of the seesaw mechanism, can explain the large difference between neutrino and charged-fermion masses



**CMS** particle detector on the Large Hadron Collider (LHC) at CERN



**CMS** particle detector on the Large Hadron Collider (LHC) at CERN



An example of simulated data modeled for the **CMS** particle detector on the Large Hadron Collider (LHC) at CERN. Here, following a collision of two protons, a **Higgs boson is produced which decays into two jets** of hadrons and two electrons. The lines represent the possible paths of particles produced by the proton-proton collision in the detector while the energy these particles deposit is shown in blue.

## Elementary Particles

	Types	Generations	Antiparticle	Colors	Total
Quarks	2	3	Pair	3	36
Leptons			Pair	None	12
Gluons	1	1	Own	8	8
Photon			Own	None	1
Z Boson			Own		1
W Boson			Pair		2
Higgs			Own		1
<b>Total number of (known) elementary particles:</b>					<b>61</b>

## 5. Физика за пределами С.М.

### Необъяснённые экспериментальные наблюдения

#### Гравитация

Стандартная модель не предоставляет объяснение гравитации. Кроме того, она несовместима с наиболее успешной теорией гравитации — *Общей теорией относительности*.

#### Тёмная материя и тёмная энергия

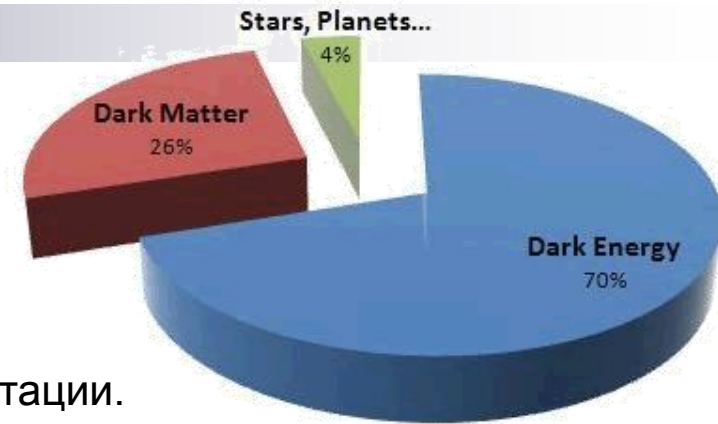
Стандартная модель способна объяснить лишь около 4 % материи во Вселенной. Из недостающих 96 % около 26 % должны быть тёмной материей, то есть материей, которая ведёт себя точно так же как другая материя, которую мы знаем, но которая взаимодействует только слабо с полями Стандартной модели. Остальное должно быть *тёмной энергией*, постоянной плотностью энергии вакуума.

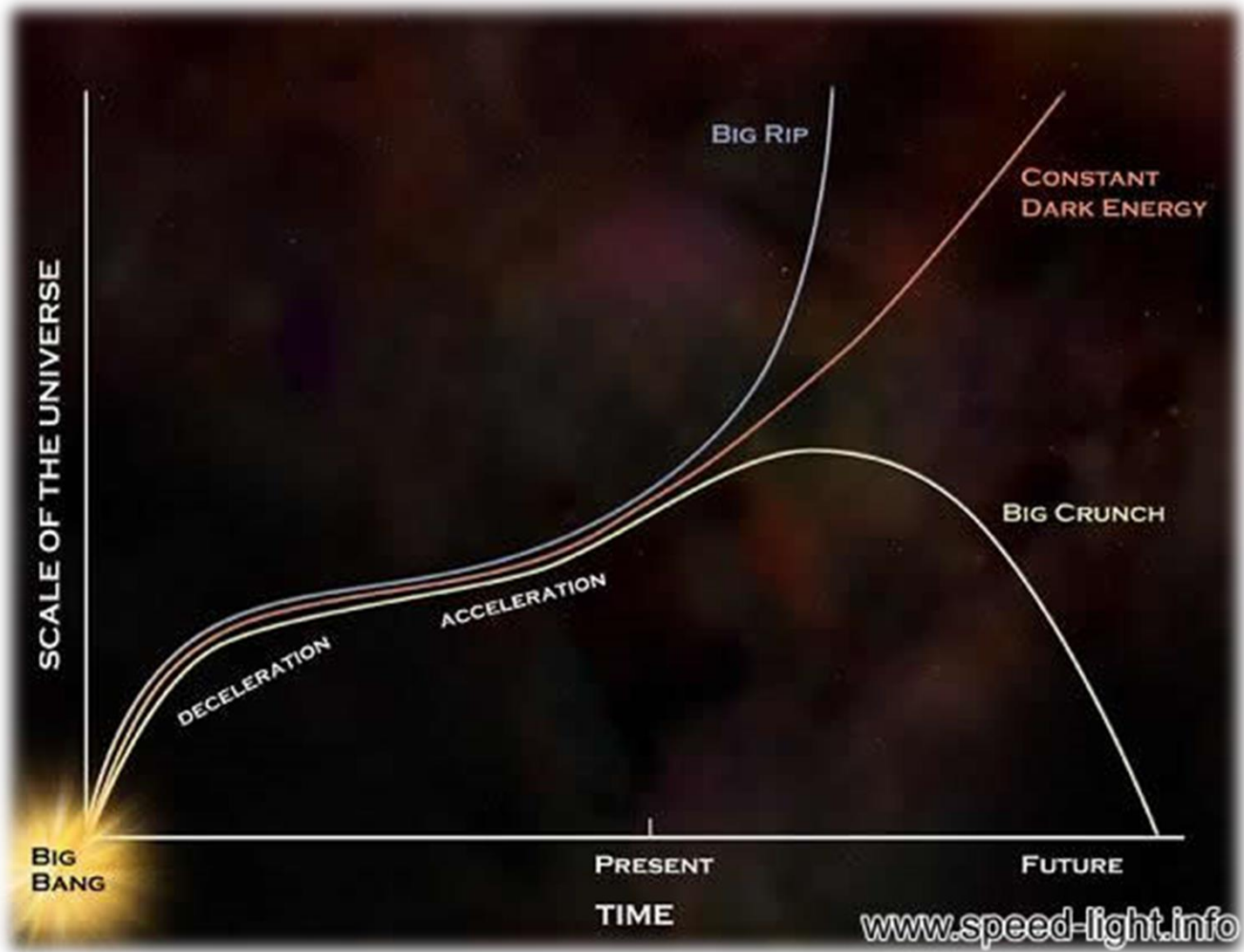
#### Массы нейтрино

Согласно Стандартной модели нейтрино являются безмассовыми частицами. Эксперименты по нейтринным осцилляциям показали, что нейтрино имеют массу.

#### Асимметрия материи и антиматерии

Вселенная состоит по большей части из вещества. Стандартная модель предсказывает, что вещество и антивещество должны были быть созданы в (почти) равных количествах, которые бы уничтожили друг друга, пока Вселенная охлаждалась.





## Нерешённые теоретические проблемы

### Проблема иерархии фермионных масс

Стандартная модель вводит массы частиц посредством процесса, известного как *спонтанное нарушение симметрии*, вызванное полем *Хиггса*. В рамках Стандартной модели масса Хиггса получает некоторые очень большие квантовые поправки, связанные с присутствием виртуальных частиц (главным образом виртуальных топ-кварков). Эти поправки намного больше, чем фактическая масса Хиггса. Это означает, что параметр голой массы Хиггса в Стандартной модели должен быть тонко настроен таким способом, который почти полностью отменяет квантовые поправки. Этот уровень тонкой настройки считается неестественным многими теоретиками.

### CP-проблема

Теоретически можно утверждать, что Стандартная модель должна содержать член, который *нарушает CP-симметрию между материей и антиматерией* — в части сильного взаимодействия. Экспериментально, однако, такое нарушение не было обнаружено, что означает, что коэффициент при этом члене очень близок к нулю. Эта тонкая настройка также считается противоестественной.

### Количество параметров

Стандартная модель зависит от **19 числовых параметров**. Их значения известны из эксперимента, но происхождение значений неизвестно. Попытки найти *связь между различными параметрами*, например, между массами частиц в разных поколениях, пока не были успешными.



## ***ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ:***

*«В физике мы работаем не ради одного дня, не ради сиюминутного успеха, мы работаем для вечности»*

*Макс Планк*

## Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. Глава XXII.

2. Ядерная физика в Интернете:

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/a19.htm>

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/020.htm>

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/027.htm>

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/028.htm>

1. K.S.Krane. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988. Chapter 18;

[http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-](http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf)

[%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf](http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf)