



Run Number: 206962
Event Number: 38652990
Date: 2012-07-14, 08:31:06 CET
EtCut > 0.5 GeV
PtCut > 0.4 GeV
Electron: black
Cells: Tiles, EMC

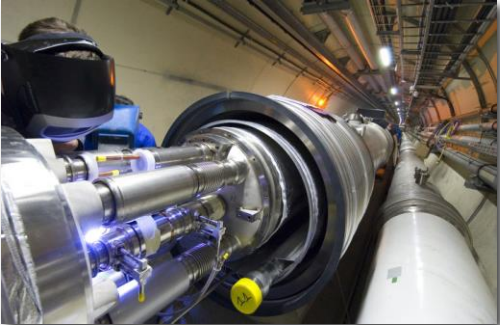
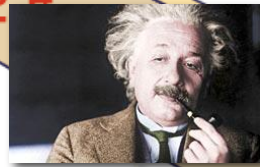
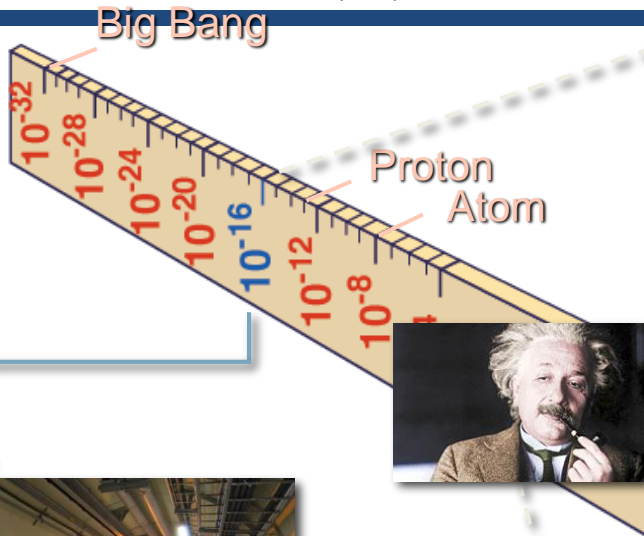
Введение в физику частиц

Татьяна Берже-Гринева
(LAPP Аннесу, Франция)

Физика частиц

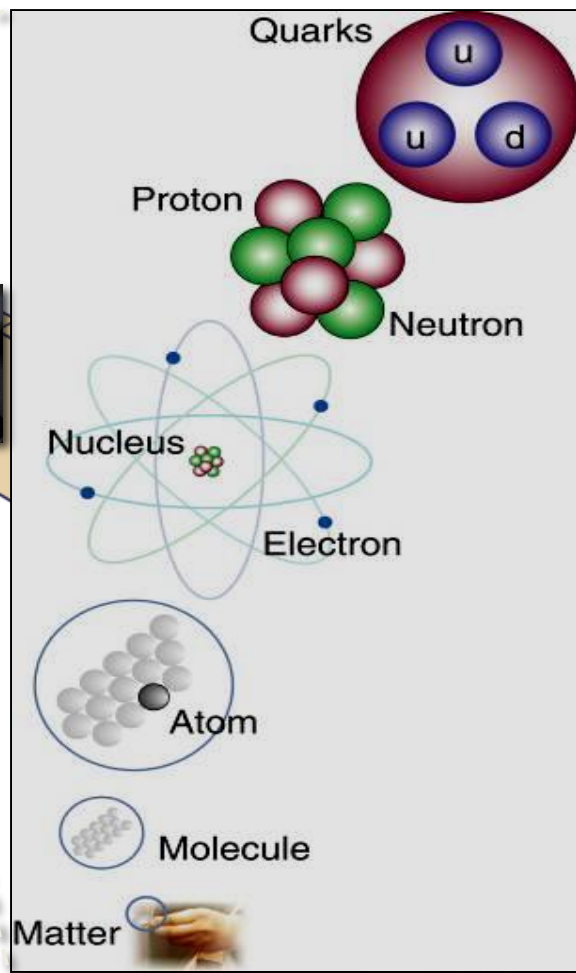
- устанавливает характеристики микрообъектов
- проводит их классификацию
- изучает свойства фундаментальных взаимодействий
- анализирует обусловленные ими процессы

Из чего «сделана» Вселенная?



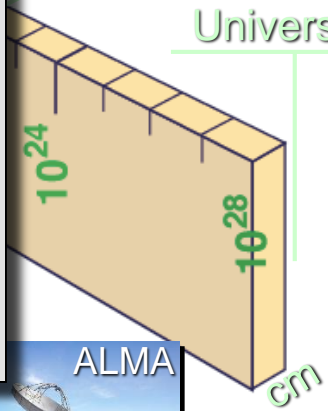
LHC

Super-Microscope



Radius of Galaxies

Universe



AMS

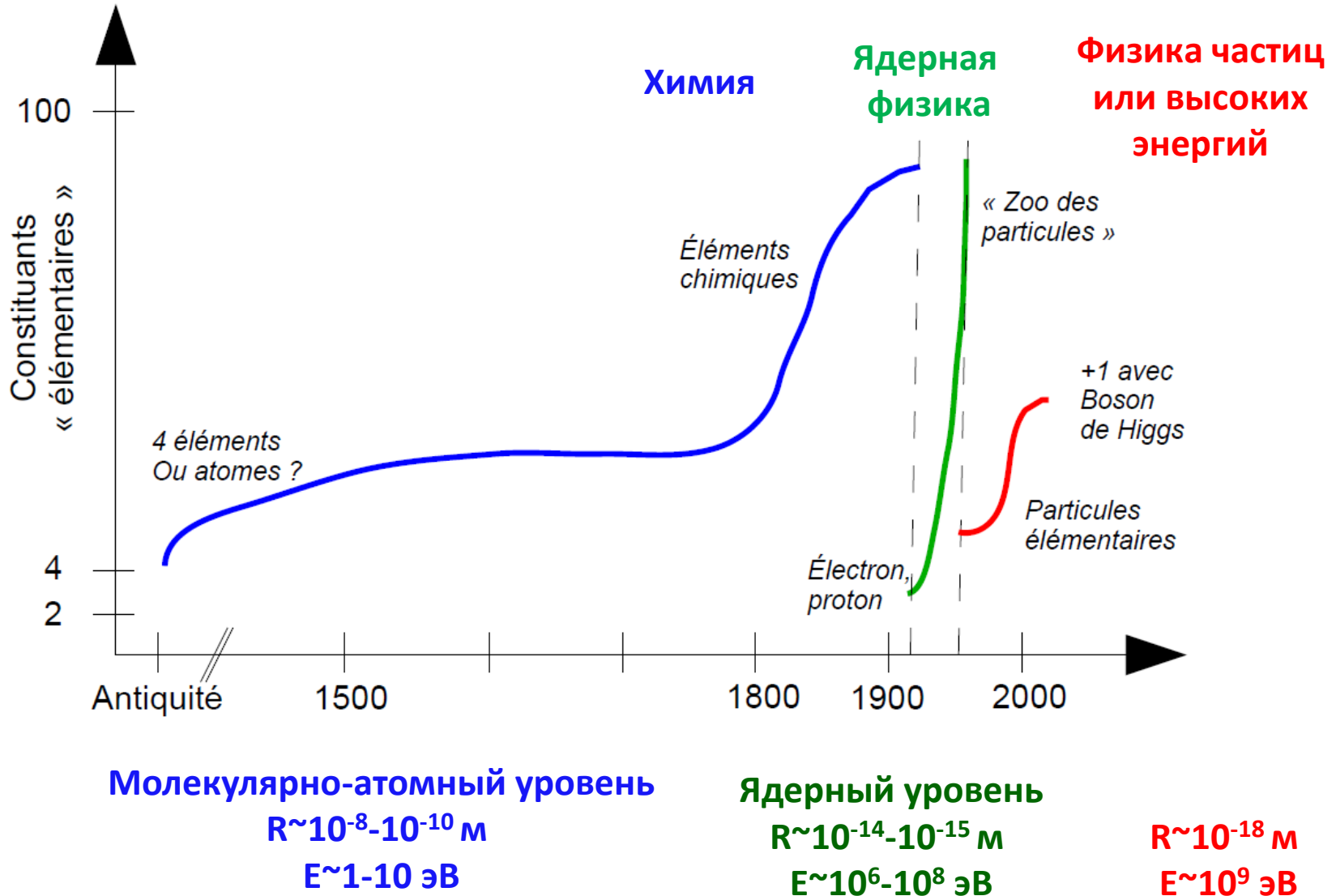


ALMA



VLT

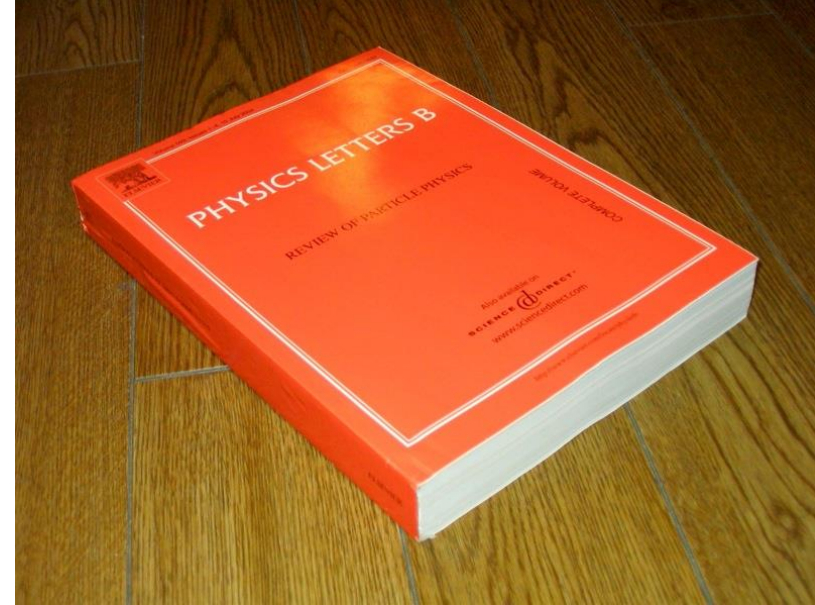
Микромир



Частицы

Свойства частицы:

- Масса
- Электрический заряд
- Спин (собственный момент импульса)
- Время жизни
- Магнитный момент
- ...



Citation: K.A. Olive *et al.* (Particle Data Group), *Chin. Phys. C*, **38**, 090001 (2014) and 2015 update

LEPTONS

e

$$J = \frac{1}{2}$$

$$\text{Mass } m = (548.57990946 \pm 0.00000022) \times 10^{-6} \text{ u}$$

$$\text{Mass } m = 0.510998928 \pm 0.000000011 \text{ MeV}$$

$$|m_{e^+} - m_{e^-}|/m < 8 \times 10^{-9}, \text{ CL} = 90\%$$

$$|q_{e^+} + q_{e^-}|/e < 4 \times 10^{-8}$$

Magnetic moment anomaly

$$(g-2)/2 = (1159.65218076 \pm 0.00000027) \times 10^{-6}$$

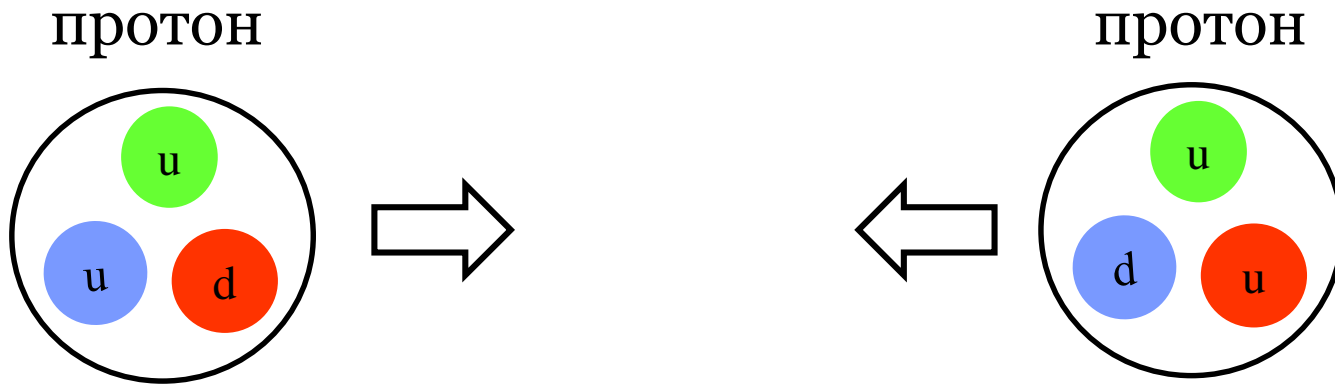
$$(g_{e^+} - g_{e^-}) / g_{\text{average}} = (-0.5 \pm 2.1) \times 10^{-12}$$

$$\text{Electric dipole moment } d < 0.87 \times 10^{-28} \text{ e cm, CL} = 90\%$$

$$\text{Mean life } \tau > 4.6 \times 10^{26} \text{ yr, CL} = 90\% \text{ [a]}$$

Как найти новые частицы?

- Космические лучи
- Ускорители/коллайдеры:



– Высокая энергия $E = mc^2$

– Большое количество событий $N = \mathcal{L} \cdot \sigma$

Ускорители

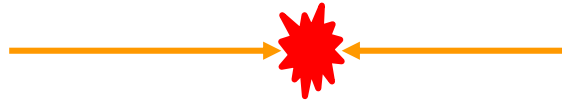
Неподвижная

Мишень

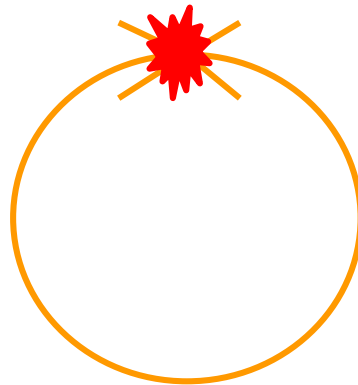


$$E_{\text{fix}} = 2 \frac{E_{\text{col}}^2}{m} - m$$

Линейный
коллайдер

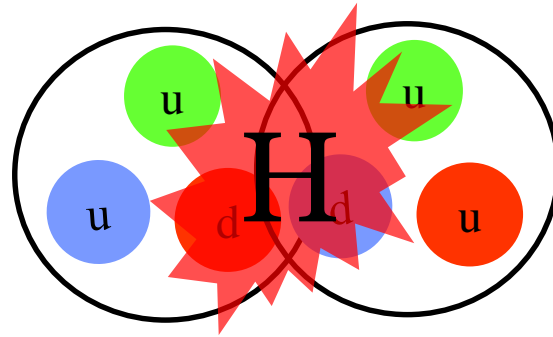


Круговой
коллайдер



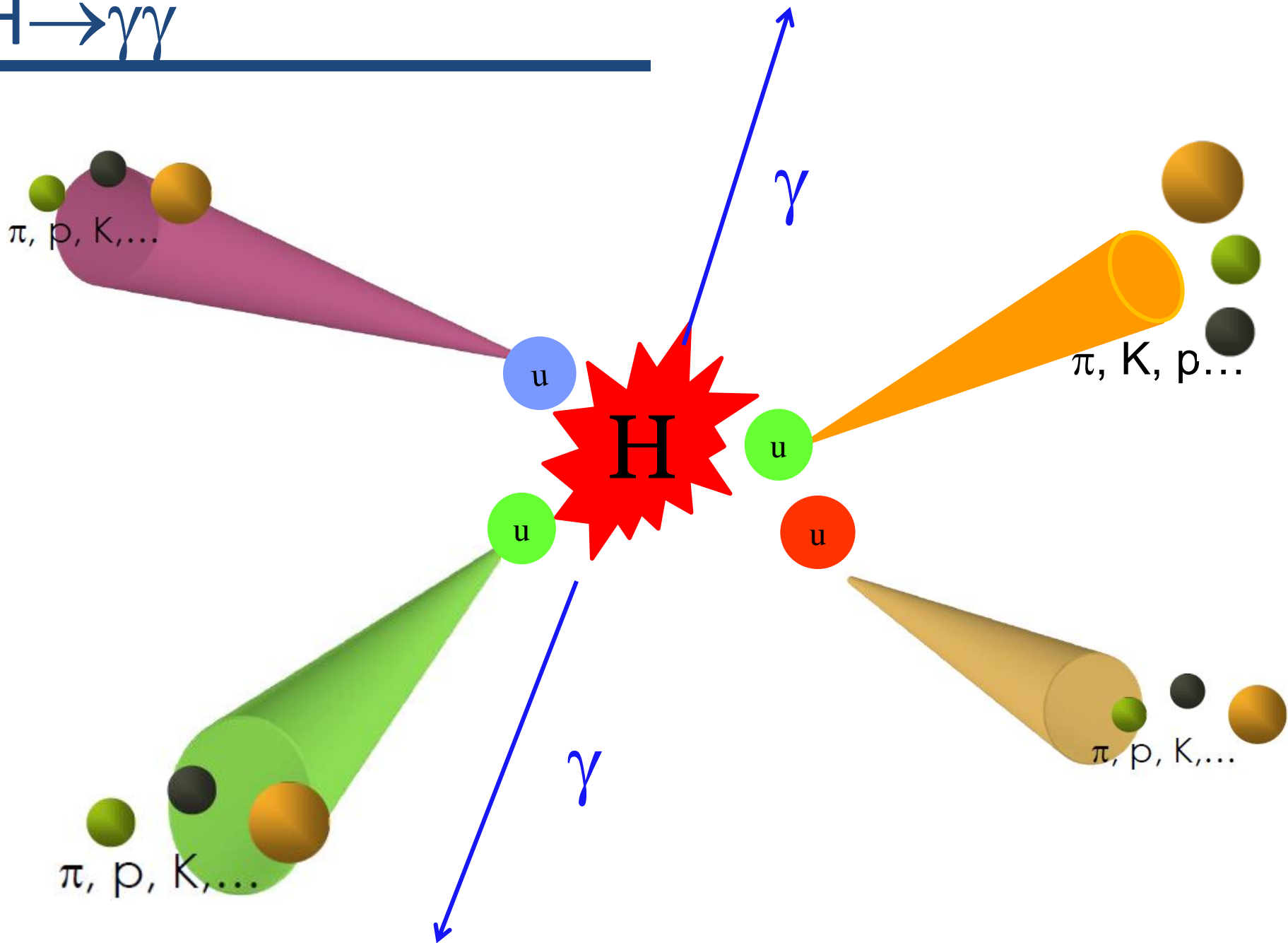
$$\mathcal{L} = \frac{1}{4\pi} \frac{fkN_1N_2}{\sigma_x\sigma_y}$$

Метод рассеяния



Бозон Хигса

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

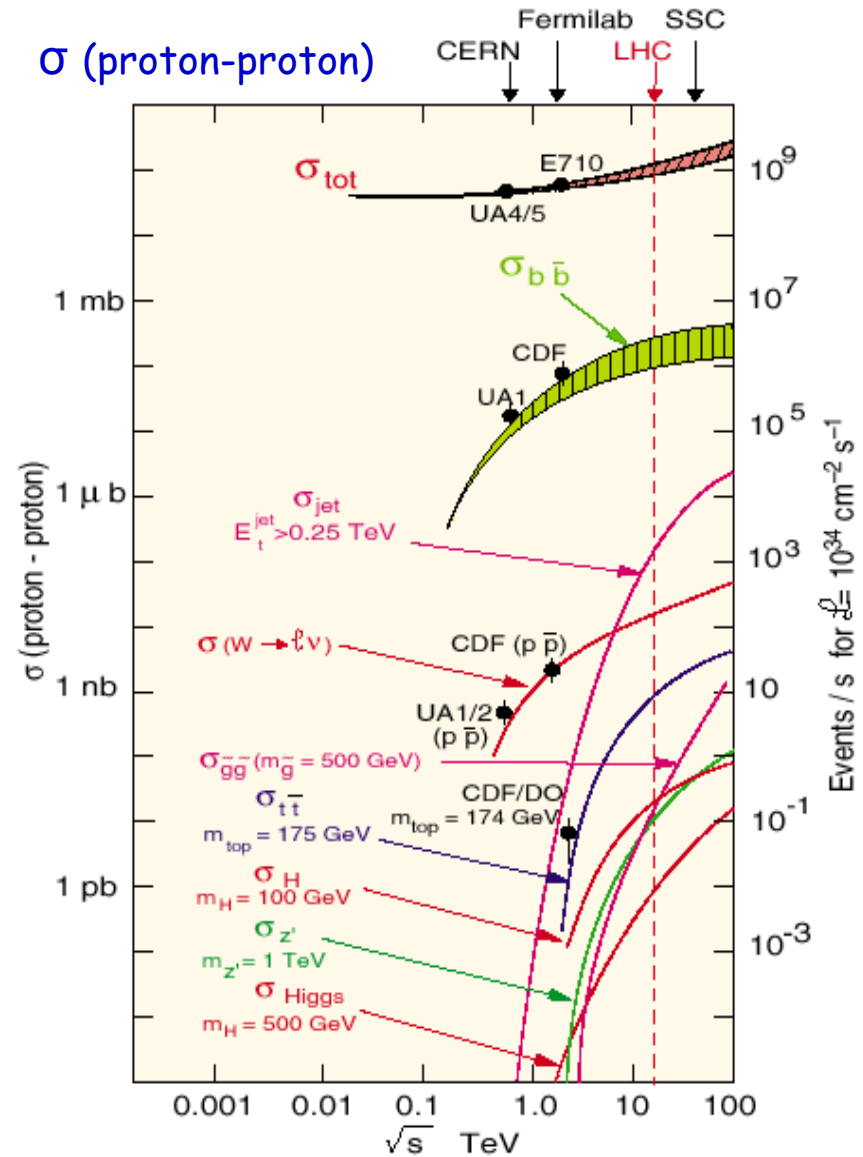


Законы сохранения и симметрия

Законы сохранения	Симметрия
Импульс	Пространственная
Энергия	Временная
Угловой импульс	Вращательная инвариантность
Заряд	КМ фаза

Эффективное поперечное сечение

- Эффективное поперечное сечение (σ)** — это физическая величина, характеризующая вероятность перехода системы двух взаимодействующих частиц в определённое конечное состояние.



Резонанс

- **Резонанс** — элементарная частица с коротким временем жизни. Определяются как пик в распределении энергии вторичных частиц.

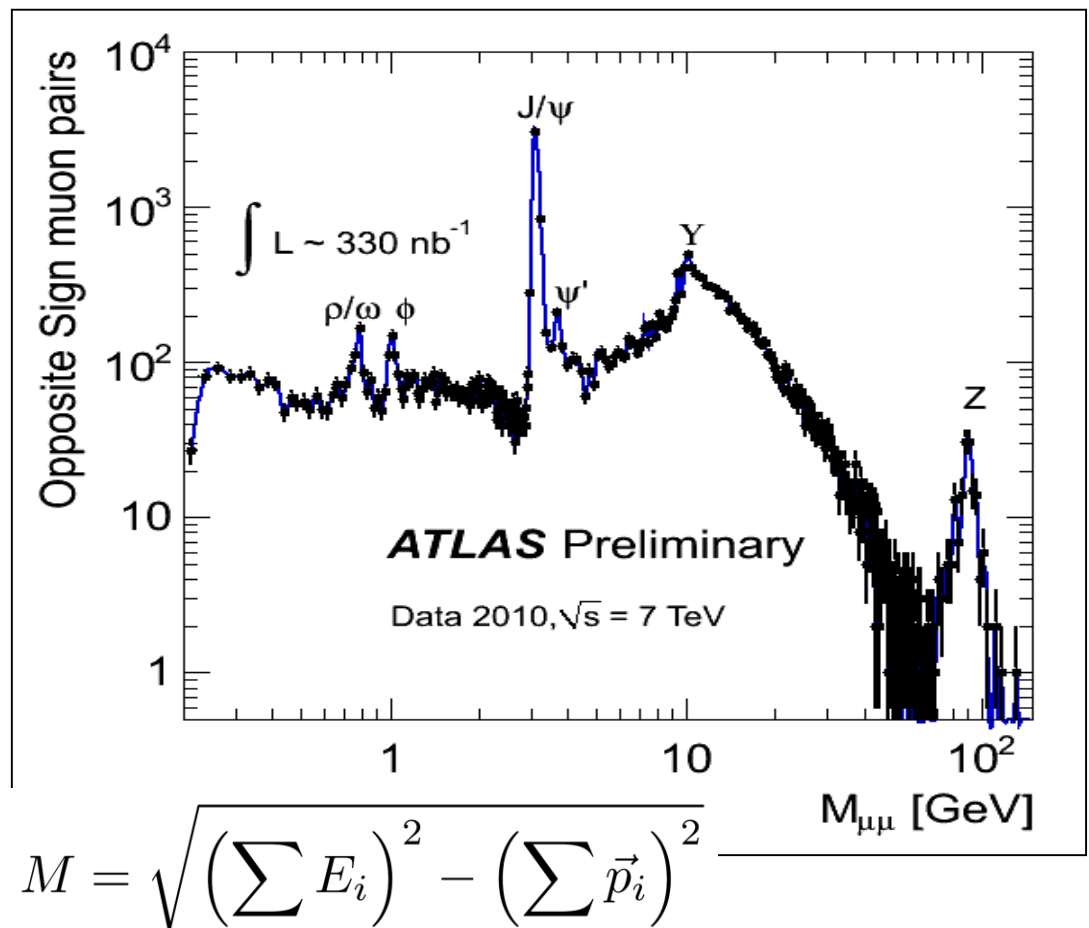
$$E^2 = \vec{p}^2 + m^2$$

$$E = m\gamma \quad \vec{p} = m\gamma\vec{\beta}$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

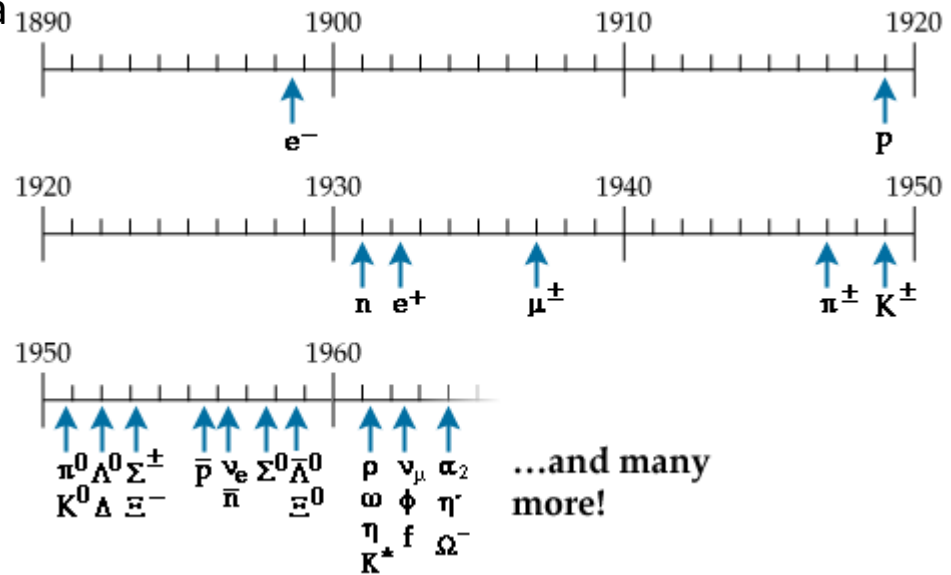
$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$$t = t_0\gamma$$

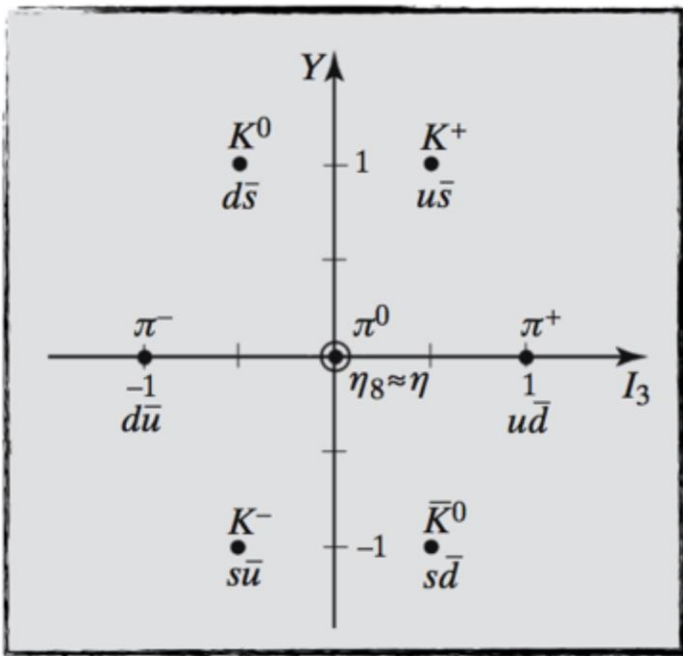


Немного истории

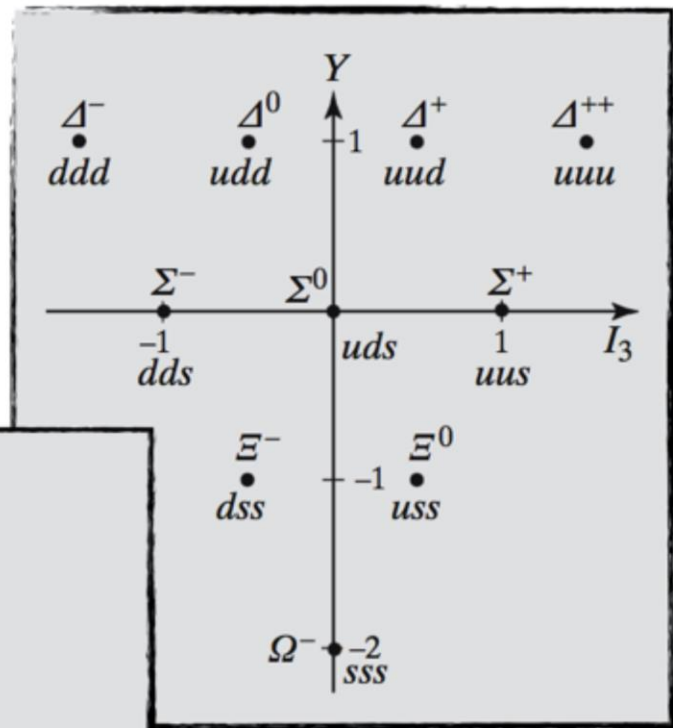
- 1897 - Дж. Томсон открыл электрон (e^-);
- 1905 г. - Альберт Эйнштейн предположил, что фотон объясняет фотоэффект.
- 1911 - Эрнест Резерфорд открыл ядро атома;
- 1919 - Эрнст Резерфорд обнаружил протон (p);
- 1928 - Пол Дирак постулировал существование позитронов в результате уравнения Дирака;
- 1930 - Вольфганг Паули постулировал нейтрино для объяснения энергетического спектра бета-распадов;
- 1932 - Джеймс Чадвик открыл нейтрон (n);
- 1932 - Карл Д. Андерсон открыл позитрон (e^+);
- 1935 - Хидеки Юкава предсказал существование мезонов как несущих частиц сильной ядерной силы;
- 1936 - Карл Д. Андерсон обнаружил мюон, изучая космическое излучение (μ);
- 1947 год - Джордж Диксон Рочестер и Клиффорд Батлер обнаружили каон (K), первую странную частицу;
- 1947 - Сесил Пауэлл, Цезарь Лэттес и Джузеппе Оччаллини обнаружили пион (π);
- 1955 - Оуэн Чемберлен, Эмилио Сегре, Клайд Виганд и Томас Ипсилантис обнаружили антипротон;



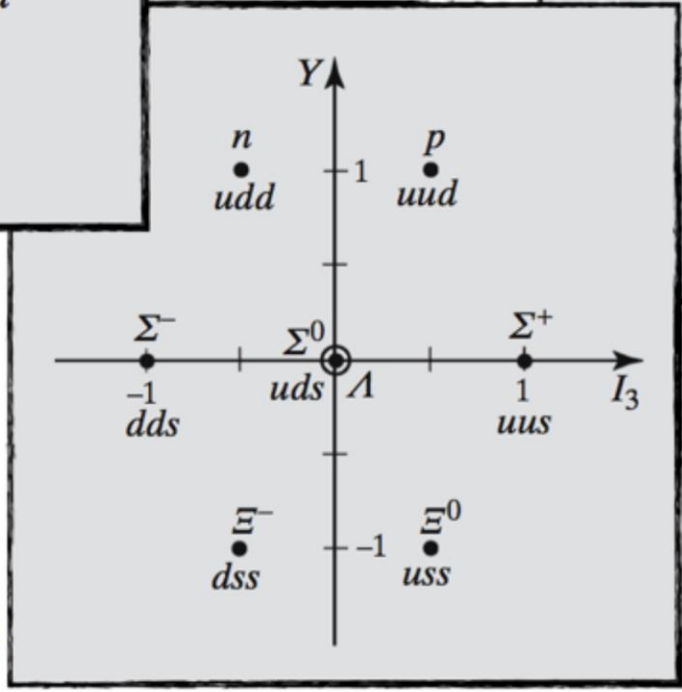
Классификация частиц (адронов)



Meson octet



Baryon decuplet



Baryon octet

Открытие Ω^- и кварков

VOLUME 12, NUMBER 8

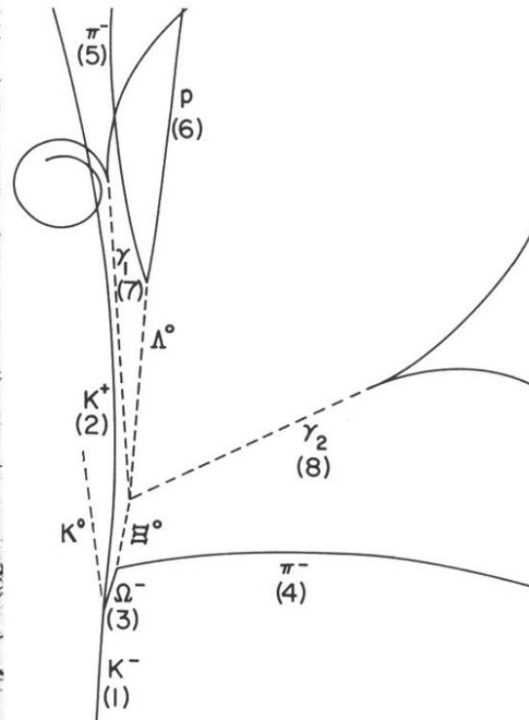
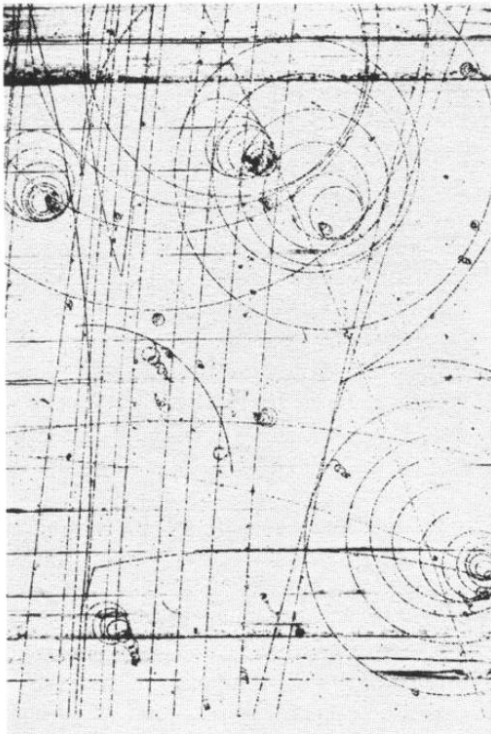
PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 FEBRUARY 1964

OBSERVATION OF A HYPERON WITH STRANGENESS MINUS THREE*

V. E. Barnes, P. L. Connolly, D. J. Crennell, B. B. Culwick, W. C. Delaney, W. B. Fowler, P. E. Hagerty,† E. L. Hart, N. Horwitz,† P. V. C. Hough, J. E. Jensen, J. K. Kopp, K. W. Lai, J. Leitner,† J. L. Lloyd, G. W. London,† T. W. Morris, Y. Oren, R. B. Palmer, A. G. Prodell, D. Radojčić, D. C. Rahm, C. R. Richardson, N. P. Samios, J. R. Sanford, R. P. Shutt, J. R. Smith, D. L. Stonehill, R. C. Strand, A. M. Thorndike, M. S. Webster, W. J. Willis, and S. S. Yamamoto
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
(Received 11 February 1964)

It has been pointed out¹ that among the multitude of resonances which have been discovered recently, the $N_{3/2}^*(1238)$, $Y_1^*(1385)$, and $\Xi_{1/2}^*(1532)$ can be arranged as a decuplet with one member still missing. Figure 1 illustrates the position of the nine known resonant states and the postulated tenth particle plotted as a function of mass and the third component of isotopic spin. As can be seen from Fig. 1, this particle (which we call Ω^- , following Gell-Mann¹) is predicted to be a negatively charged isotopic singlet with strangeness minus three.² The spin and parity should be the same as those of the $N_{3/2}^*$, namely, $3/2^+$. The 10-dimensional representation of the group SU_3 can be identified with just such a decuplet. Consequently, the existence of the Ω^- has been cited as a crucial test of the theory of unitary symmetry of strong interactions.^{3,4} The mass is predicted⁵ by the Gell-Mann-Okubo mass formula to be about $1680 \text{ MeV}/c^2$. We wish to report the observation of an event which we believe to be an example of the production and decay of such a particle.



Кварки были обнаружены в экспериментах по глубокому неупругому рассеянию в Стэнфордском линейном ускорительном центре в 1968 году...

Ноябрьская революция

10 ноября 1974 г. Физики Марка I дважды проверили то, что они считали незначительным статистическим несоответствием в своих данных. Журнал показывает два графика в логарифмическом масштабе. Метки на оси у гласят: σ (нб), $(\mu / ee) / (\mu / ee)$ КЭД. На оси x наименьшее число равно 1,55, наибольшее - 1,57.

Computer reconstruction of a psi-prime decay in the Mark I detector
Riordan, Michael.
The Hunting of the Quark.
1987. p. 313

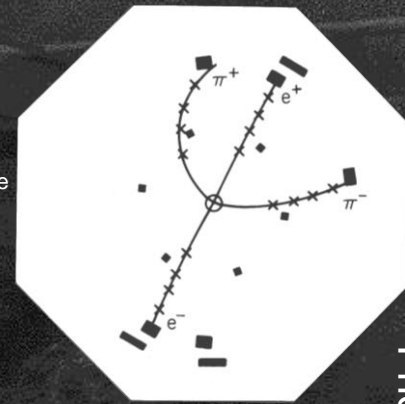
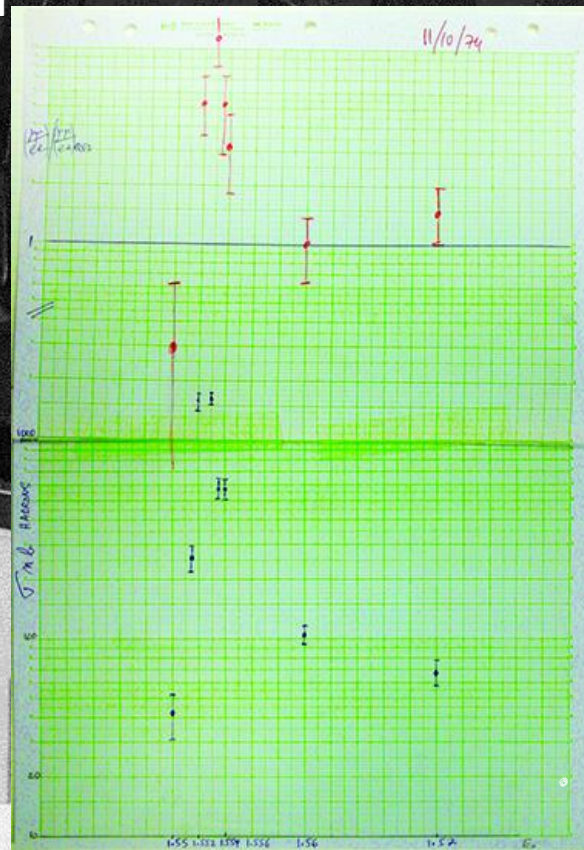


Photo by Vera Lüth



Why is it such a sharp peak?
Think OZ!

From Symmetry magazine, courtesy of
Burton Richter & SLAC Archives

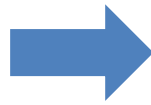


Квантовая электродинамика (КЭД)

- Создана в 1940-х годах в работах [Фейнмана](#), [Швингера](#), [Томонаги](#), [Дайсона](#).
- Объединяет квантовую механику, специальную теорию относительности и электромагнетизм

Уравнение Шрёдингера

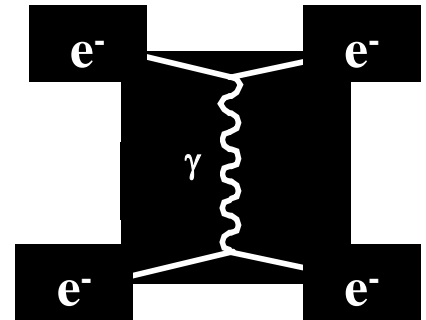
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$



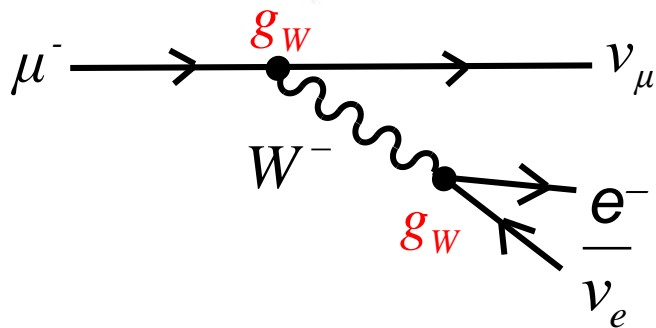
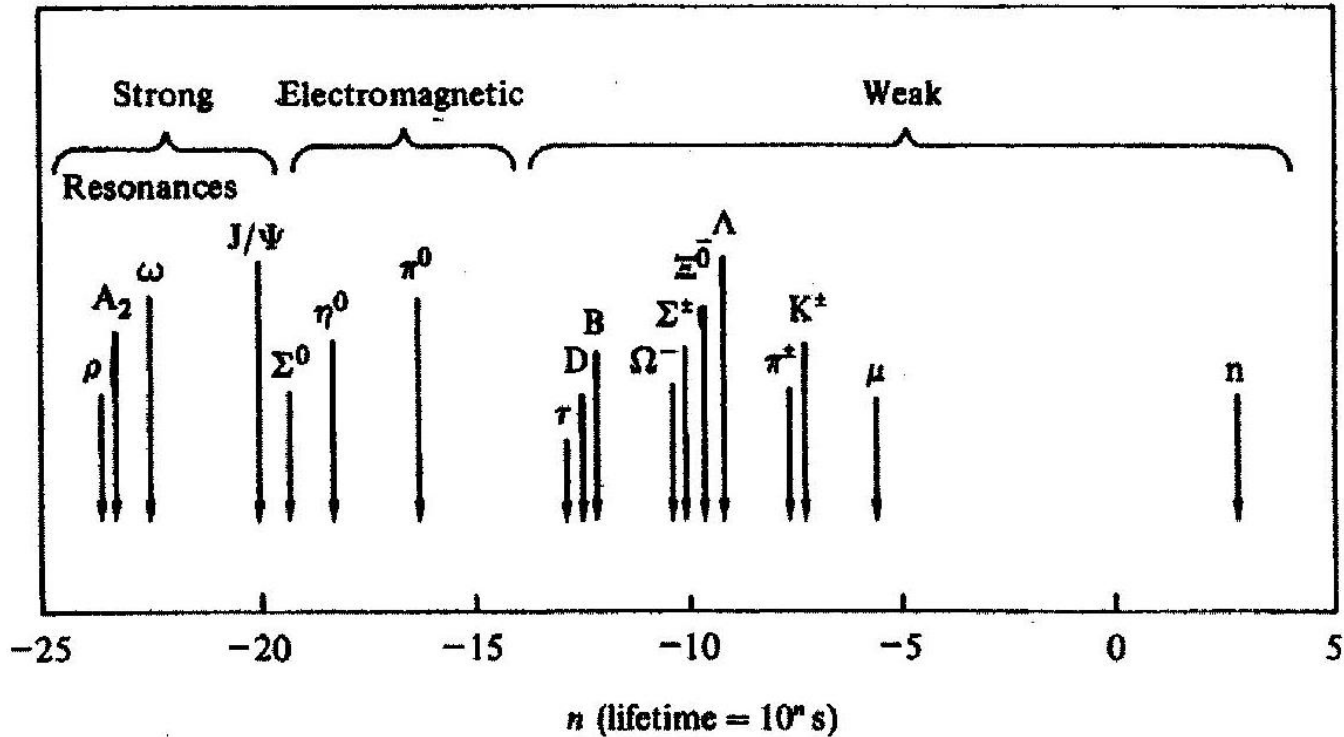
Уравнение Дирака

$$(\gamma^\mu \partial_\mu + im) \psi = 0, \quad \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$$

- Описывает взаимодействия с участием гамма-квантов (фотонов)
 - всякое взаимодействие носит обменный характер.
 - Для каждого типа взаимодействия есть
 - частицы - объекты взаимодействия
 - частицы - переносчики взаимодействия



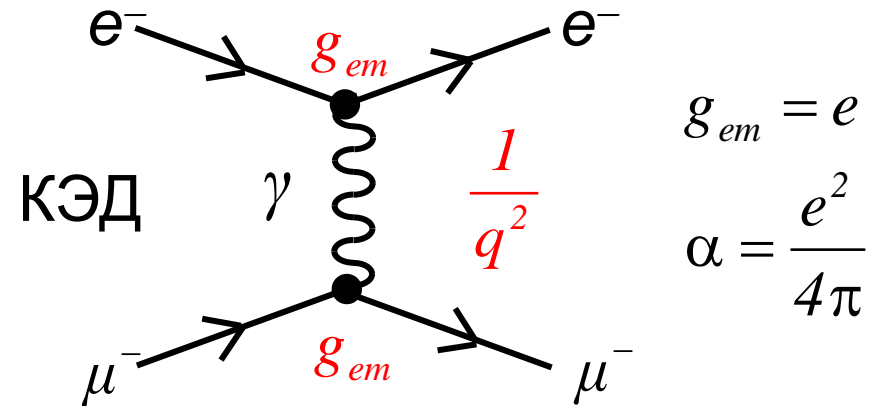
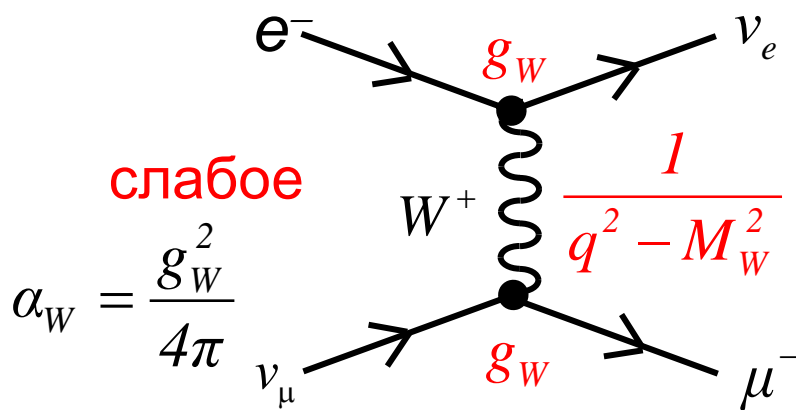
Время жизни частиц



$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu \quad ; \quad \tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad ; \quad n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

Слабые и электромагнитные процессы



- Тяжелый переносчик -> маленький радиус взаимодействия

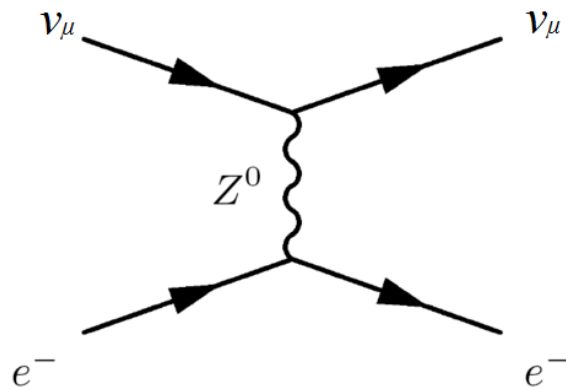
$$M_W = 80.4 \text{ GeV} \Rightarrow \text{Range} \approx \frac{1}{M_W} \sim 0.002 \text{ fm}$$

- Переносчик несет электромагнитный заряд

Нейтральные токи

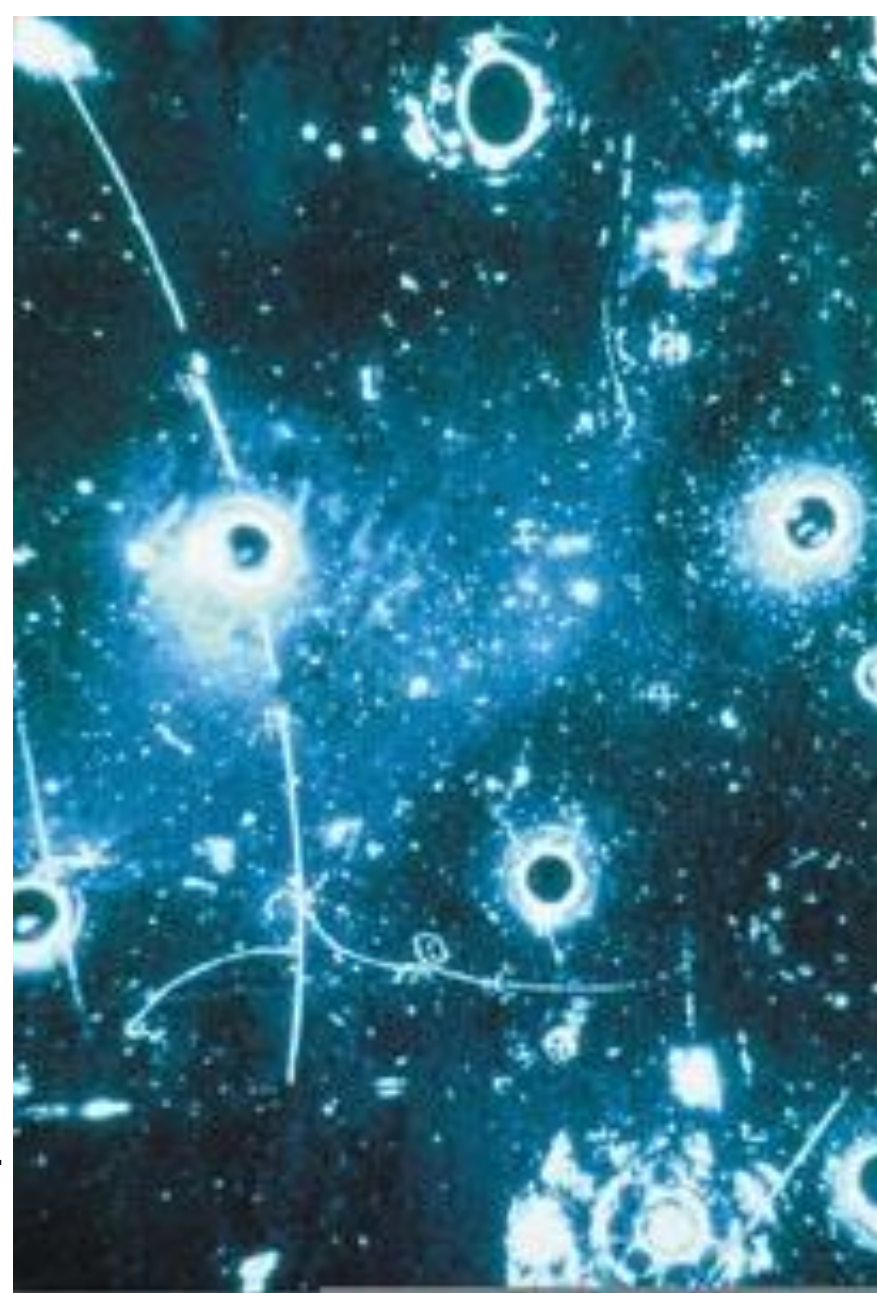


Gargamelle 1973



Первый пример процесса нейтрального тока.

Электрон проецируется с энергией 400 МэВ под углом $1,5 \pm 1,5^\circ$ к лучу, входящему справа.

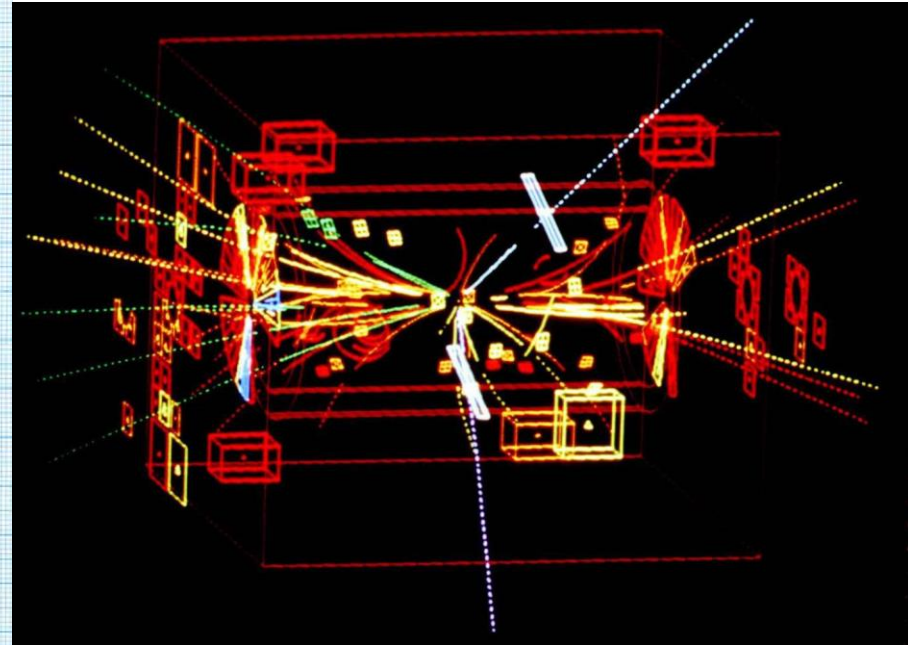
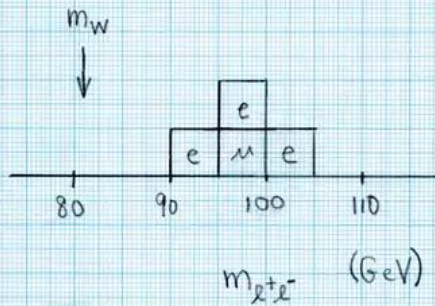


Открытие Z бозона

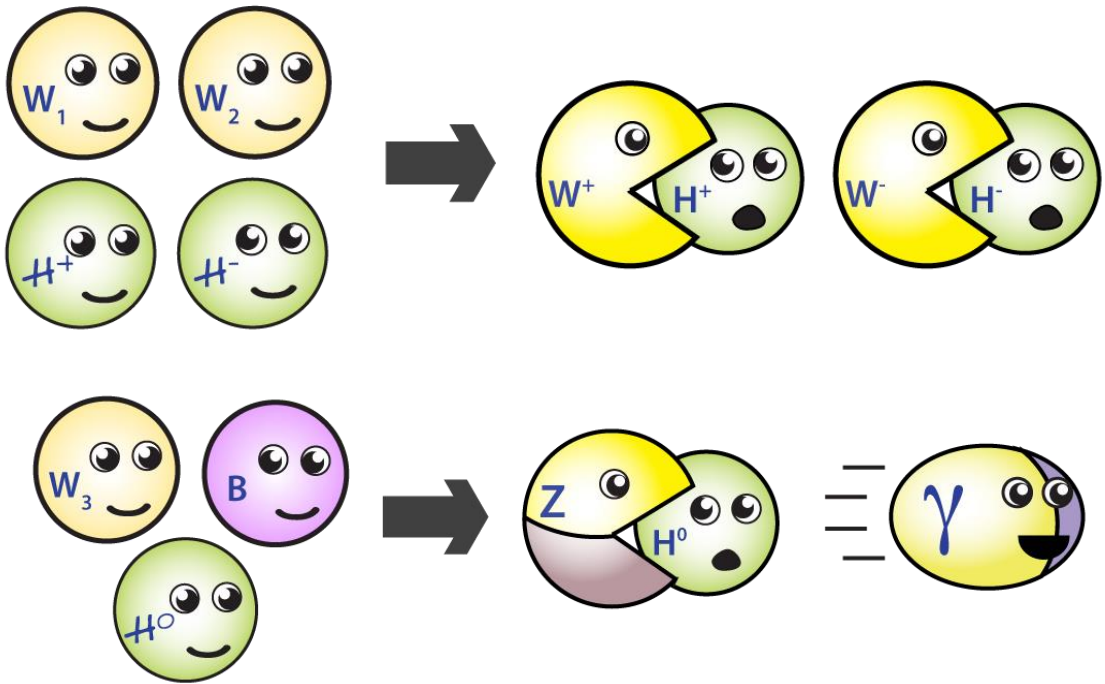
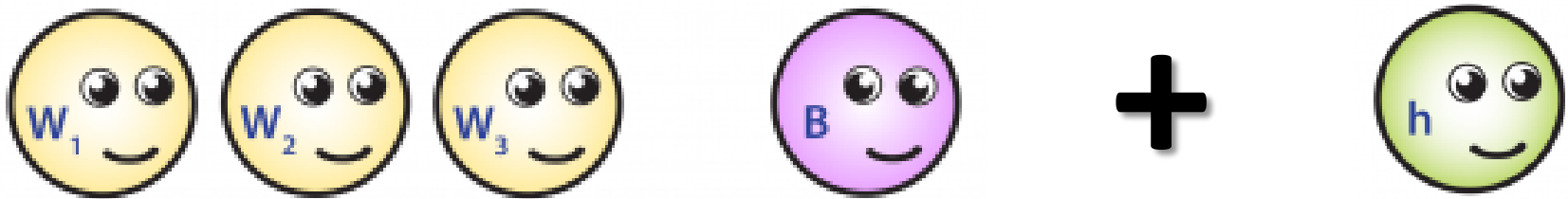
30/5/83

Z° Candidates

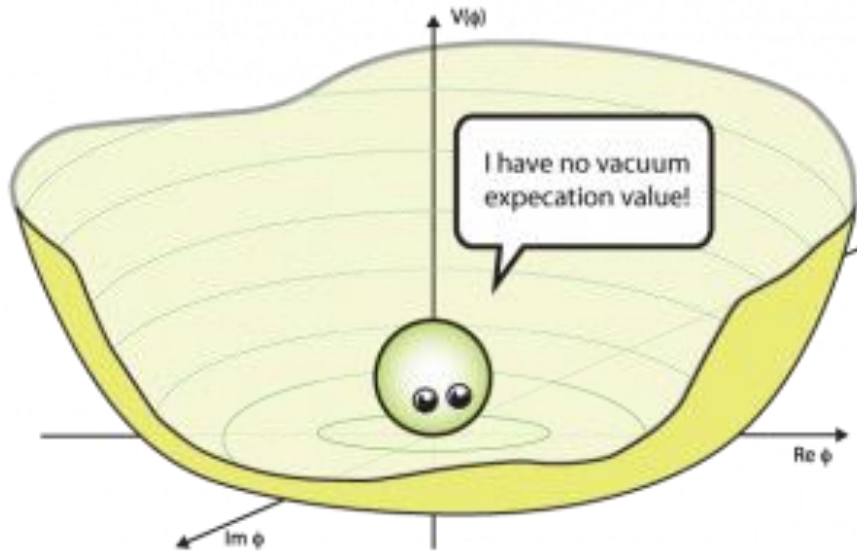
1. 6059 / 1010 e^+e^- track radiates?, $p \neq E$
 $m \sim 103 \text{ GeV}$
 2. 6600 / 222 $\mu^+\mu^-$
 $m \approx 95.4 \pm 9.6 \text{ GeV}$
 3. 7433 / 1001 e^+e^-
 $m \sim 93 \text{ GeV}$
 4. 7434 / 746 e^+e^-
 $m \sim 98 \text{ GeV}$
- } recorded 12 minutes apart!



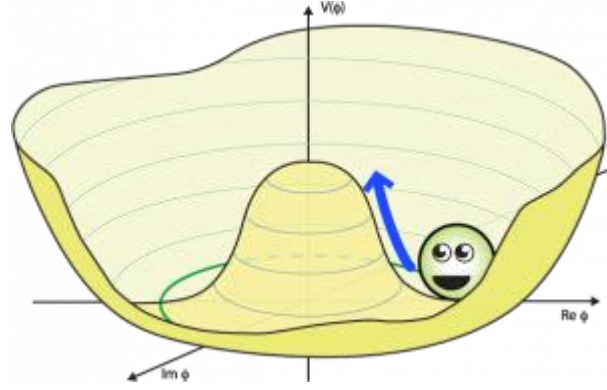
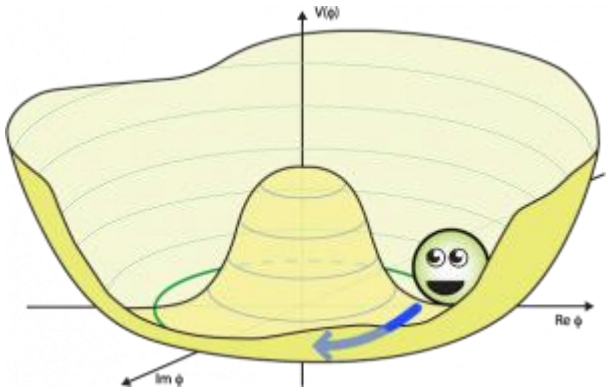
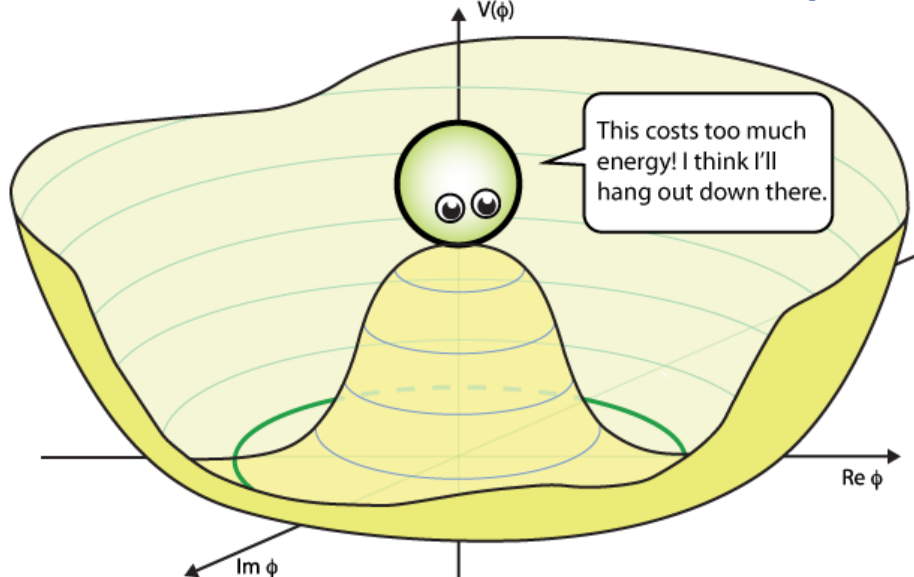
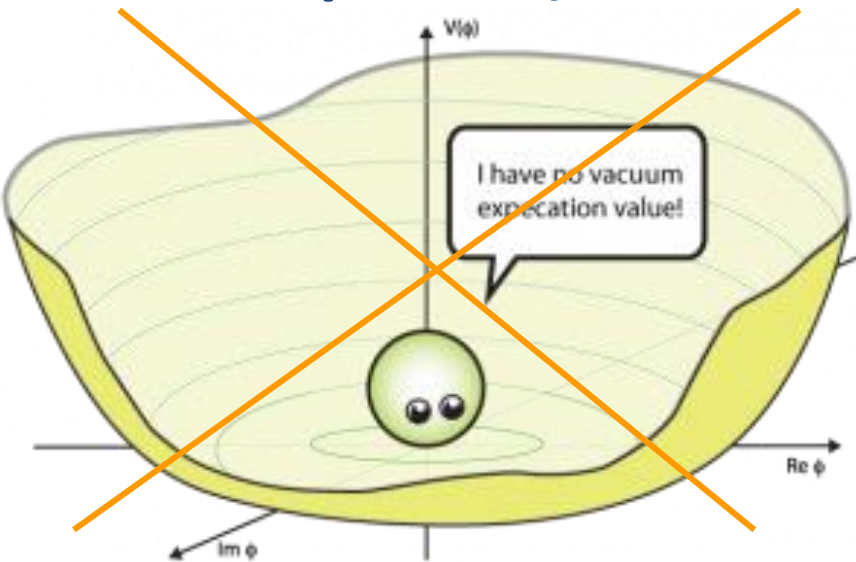
Нарушение электрослабой симметрии



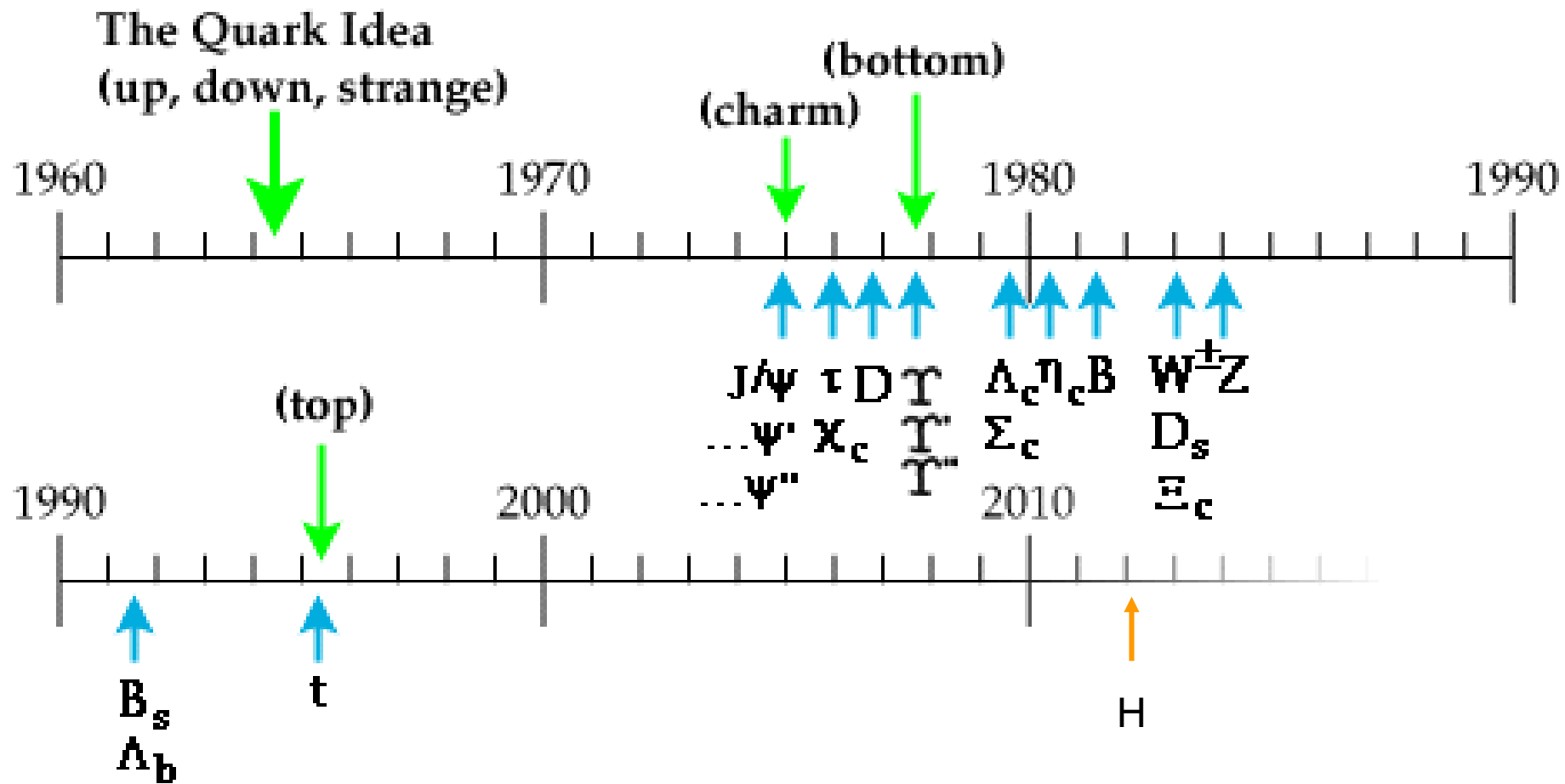
Нарушение электрослабой симметрии (Потенциал поля Хиггса)



Нарушение электрослабой симметрии (Потенциал поля Хиггса)



Открытия продолжаются

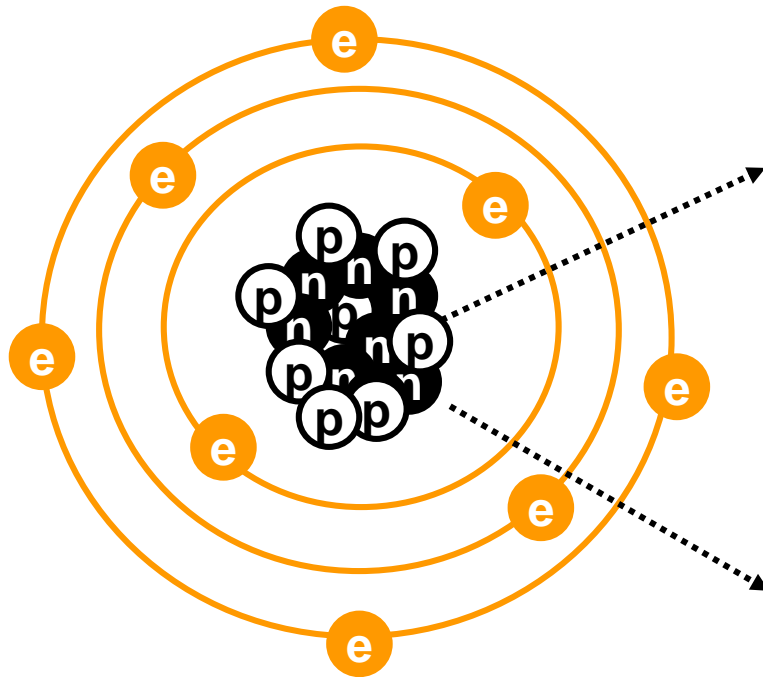


Стандартная Модель (СМ)

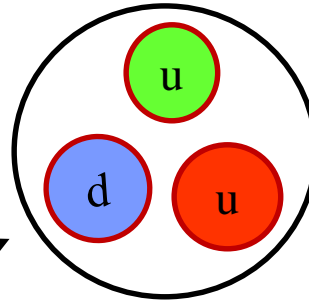
1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> W boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> Z boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

Мир вокруг нас

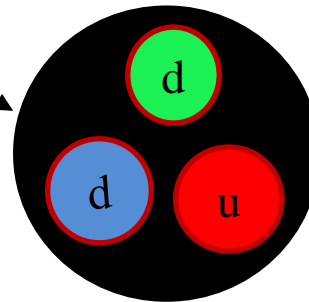
Атом Кислорода



протон



нейтрон



1968: SLAC

u

up quark

1968: SLAC

d

down quark

1956: Savannah River Plant

ν_e

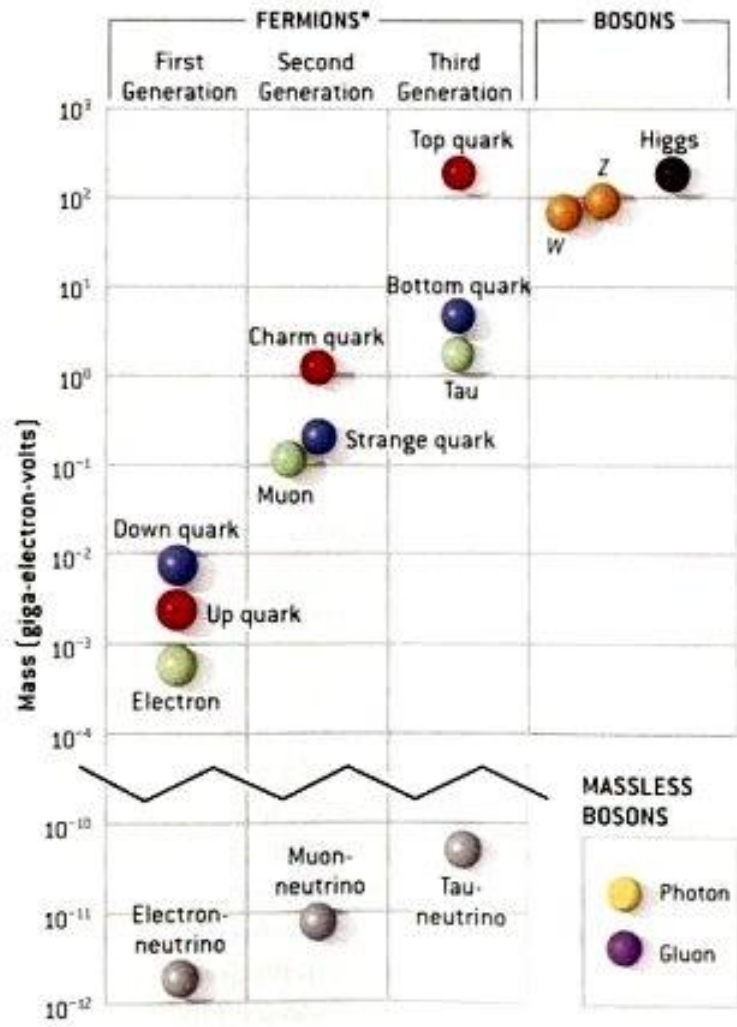
electron neutrino

1897: Cavendish Laboratory

e

electron

Стандартная Модель (СМ)

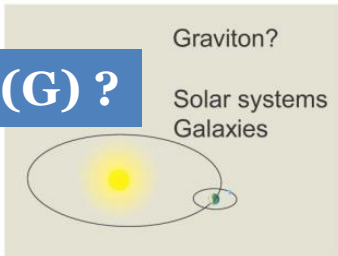


1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> W boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> Z boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

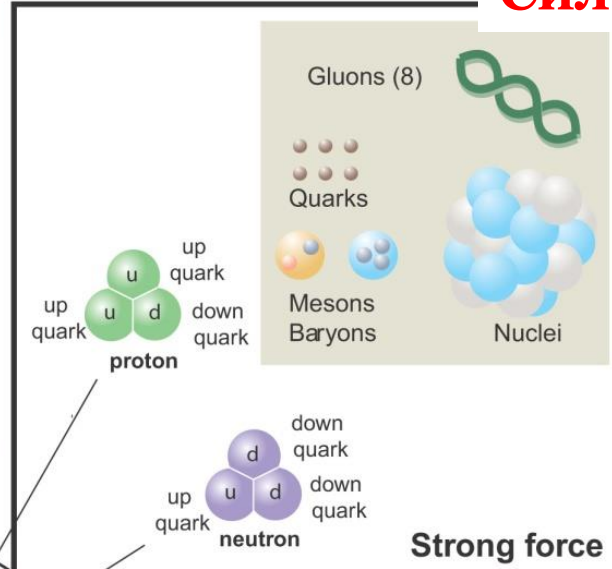
Взаимодействия в природе

Гравитационное

Гравитон (G) ?



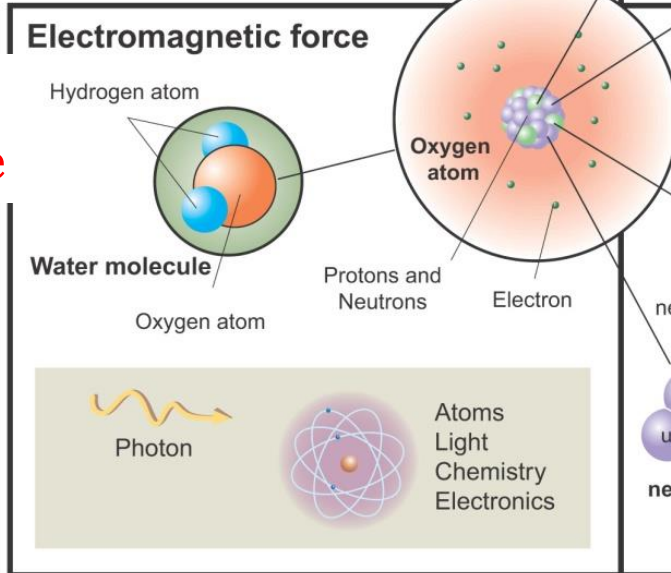
Сильное



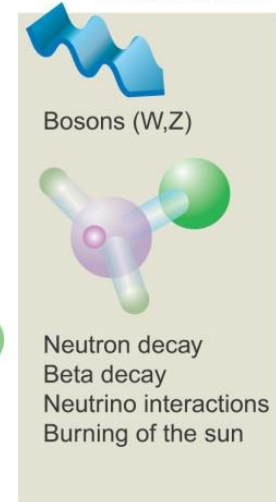
**8
Глюон (g)**

**Электро-
магнитное**

**ФОТОН
 γ**



Weak force



Слабое

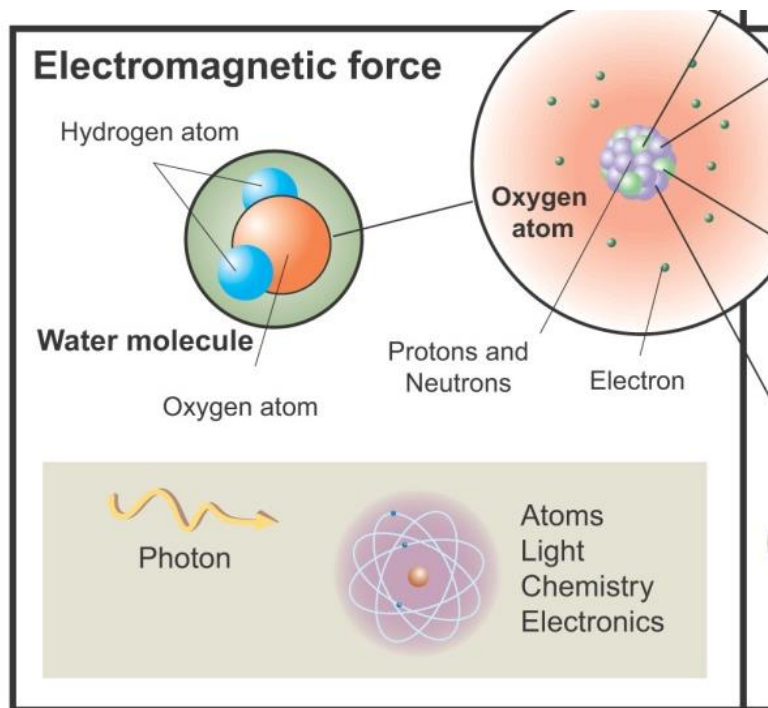
**Бозоны
 W^{\pm}, Z**

Взаимодействия в природе

Взаимодействие	Текущее описание теорией	Частица-переносчик	Квадрат константы	Зависимость от расстояния
<u>Гравитация</u>	<u>Общая теория относительности (ОТО)</u>	<u>Гравитон</u> (гипотетич.)	10^{-40}	$1/r^2$
<u>Слабое</u>	<u>Теория электрослабого взаимодействия (ТЭВ)</u>	<u>W^+ W^- Z^0 бозоны</u>	10^{-6}	$e^{-m_{W,Z} r}/r$
<u>Электромагнитное</u>	<u>Квантовая электродинамика (КЭД)</u>	<u>Фотон</u>	$1/137$	$1/r^2$
<u>Сильное</u>	<u>Квантовая хромодинамика (КХД)</u>	<u>Глюон</u>	1	$-\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$

Стандартная Модель описывает сильные, слабые и электро-магнитные взаимодействия

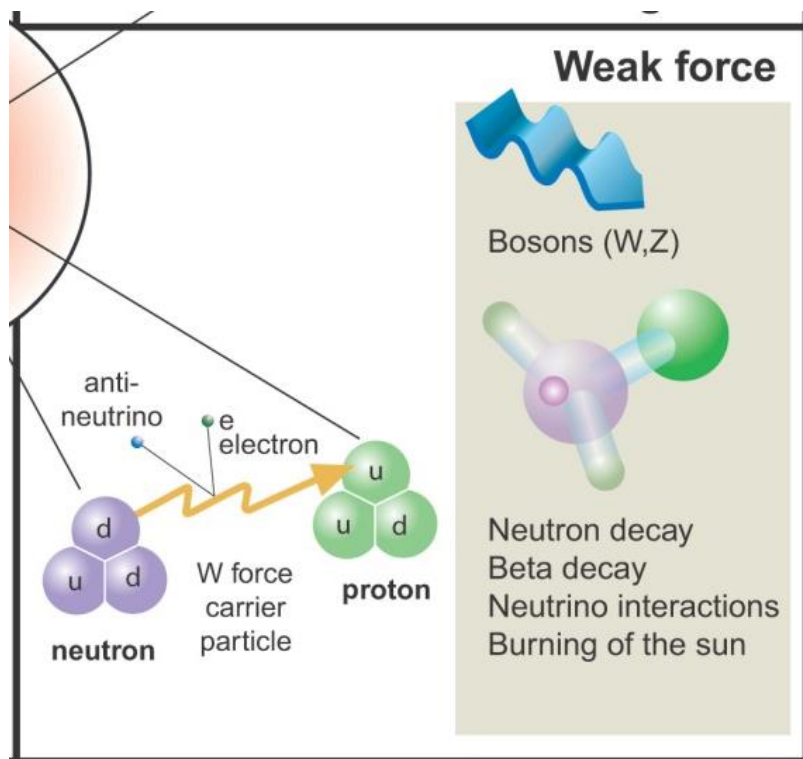
Стандартная Модель (СМ)



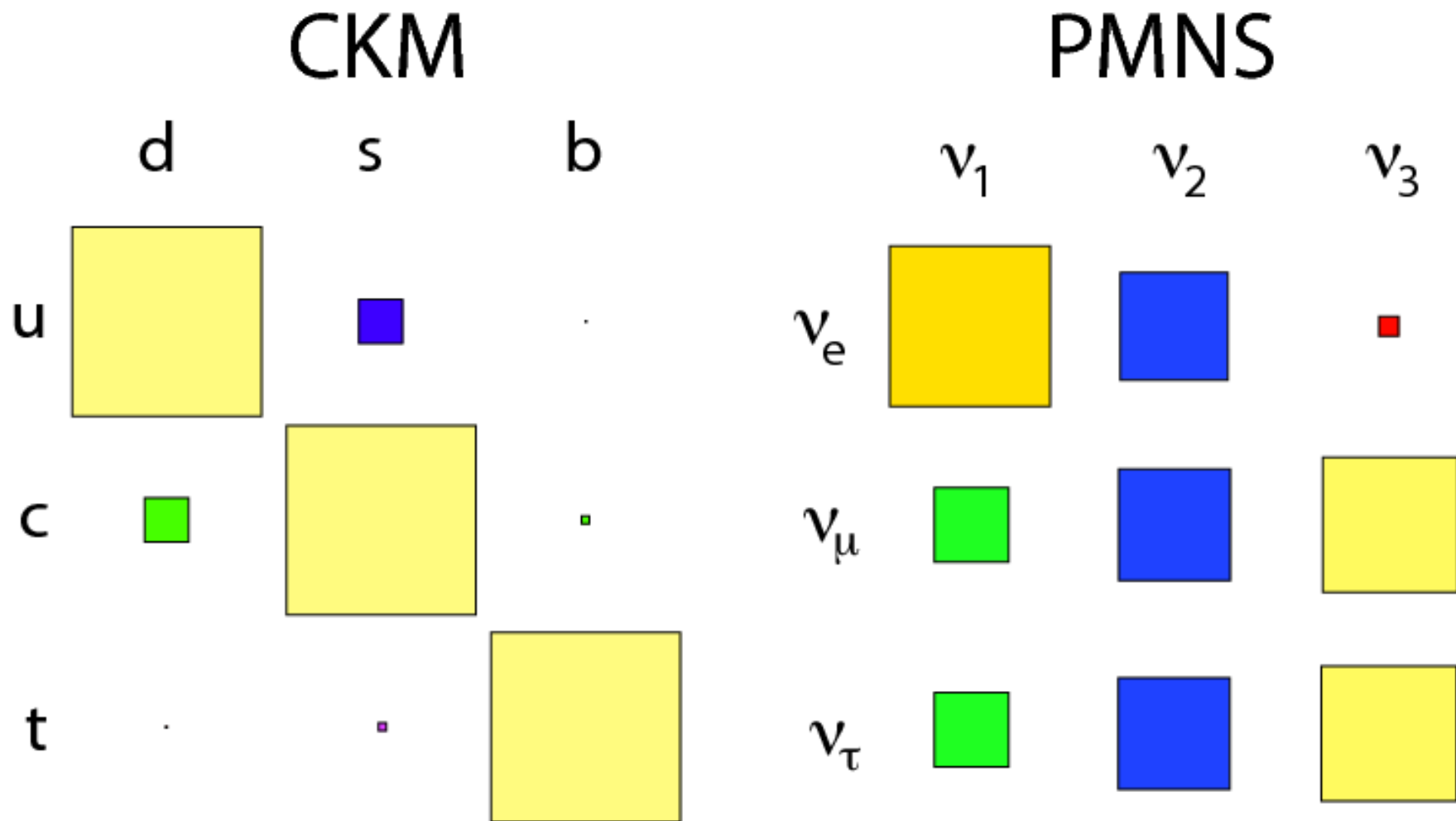
1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> <i>W</i> boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> <i>Z</i> boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

Стандартная Модель (СМ)

1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> W boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> Z boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

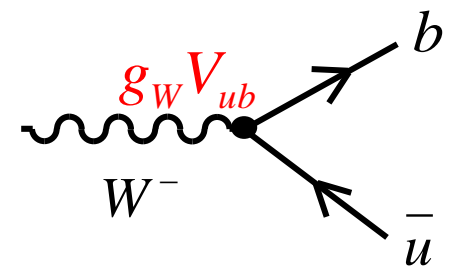
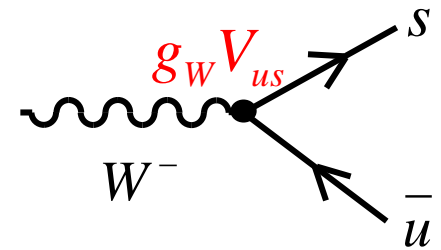
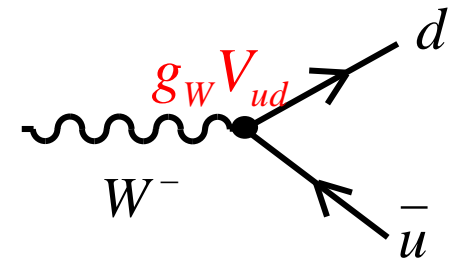
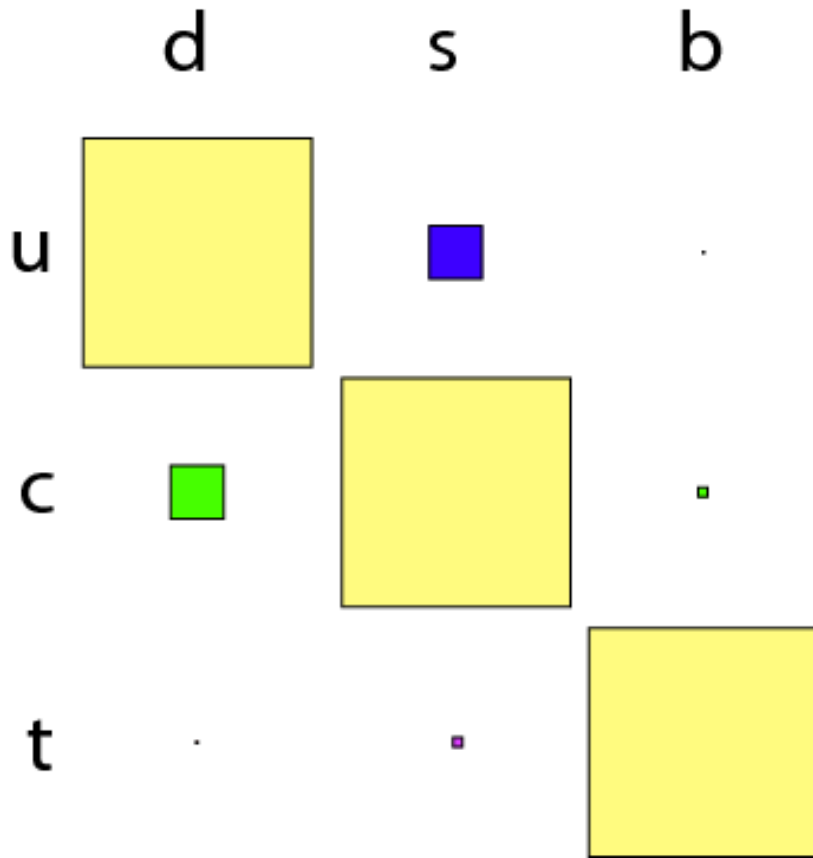


Смешивание частиц



Смешивание частиц

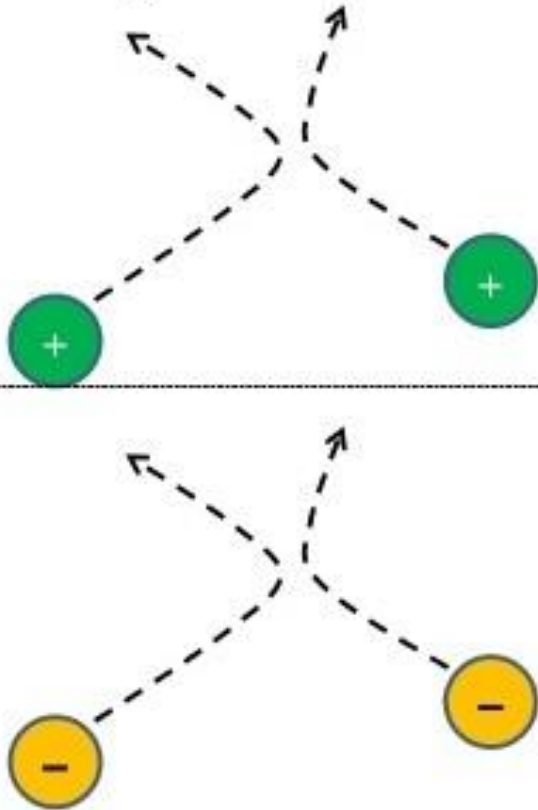
CKM



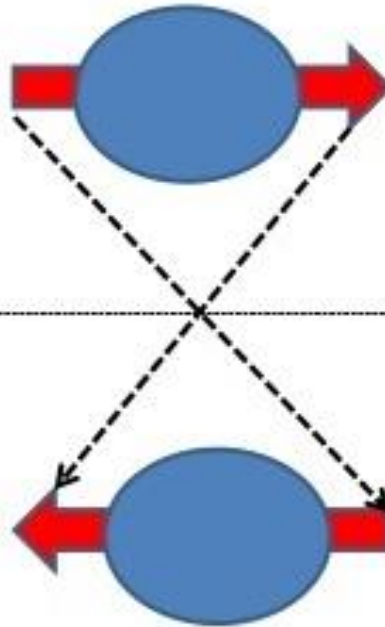
CPT-инвариантность

Fundamental symmetry transformations:

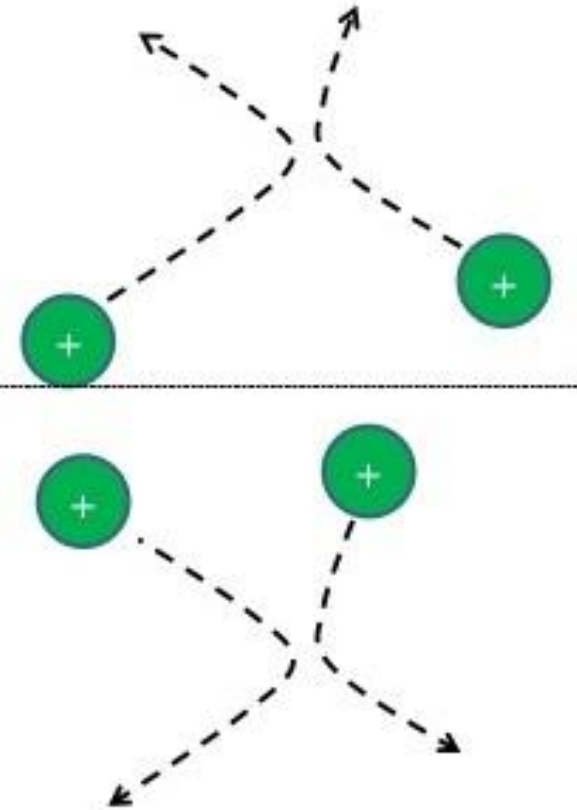
Charge



Parity



Time

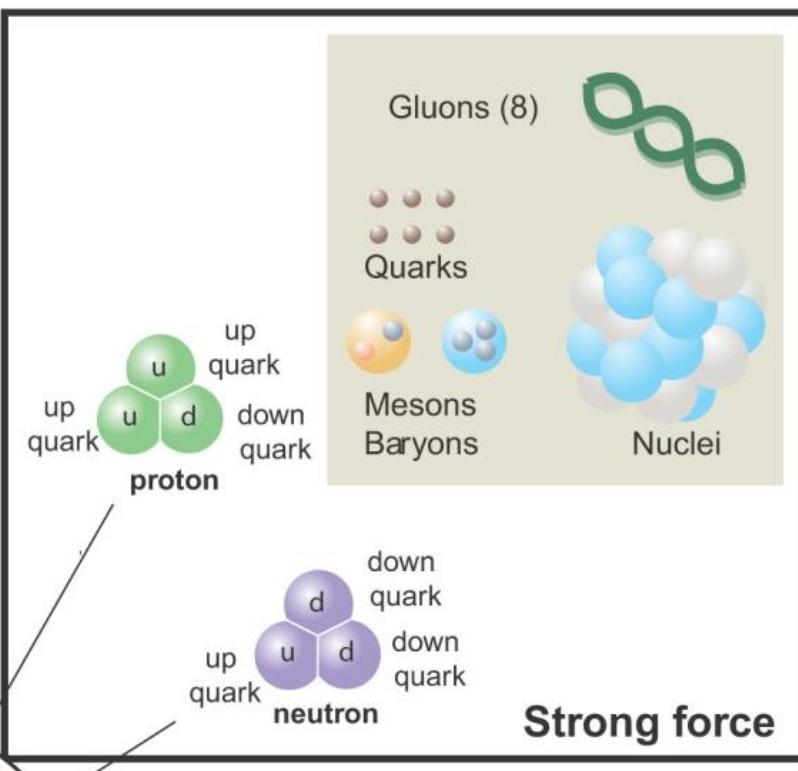


Individual symmetries violated

Product of all three– “CPT” symmetry– preserved

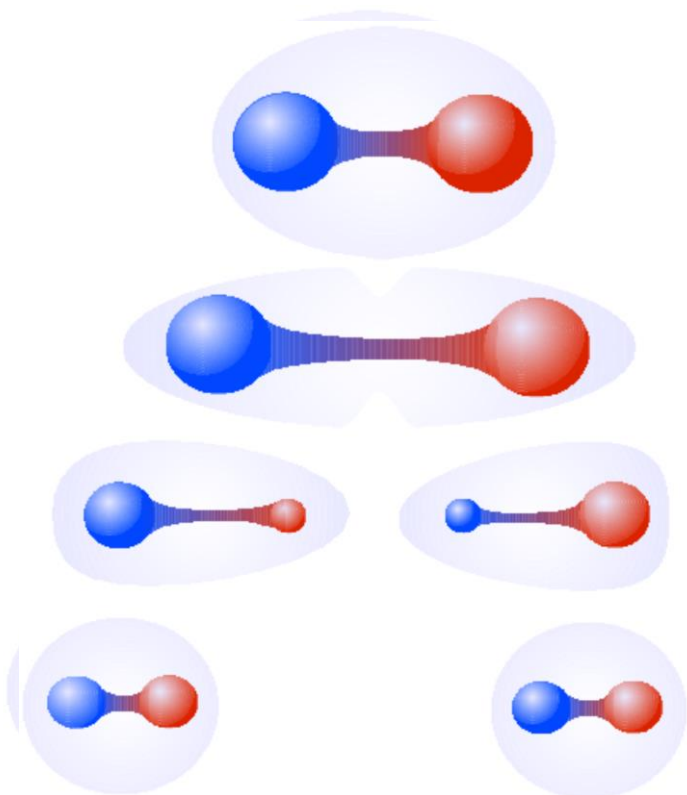
Стандартная Модель (СМ)

1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> <i>W</i> boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> <i>Z</i> boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson



Стандартная Модель (СМ)

$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$



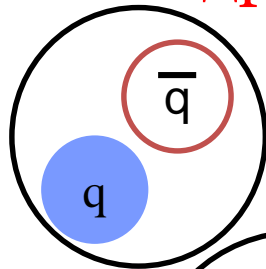
1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> W boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> Z boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

Стандартная Модель (СМ)

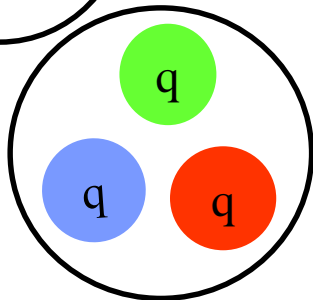
$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

Кварки не существуют
в свободном состоянии
они формируют
«бесцветные» адроны:

Мезоны



Барионы



1968: SLAC u up quark	1974: Brookhaven & SLAC c charm quark	1995: Fermilab t top quark	1979: DESY g gluon
1968: SLAC d down quark	1947: Manchester Univ.. s strange quark	1977: Fermilab b bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN W W boson
1897: Cavendish Laboratory e electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN Z Z boson
			2012: CERN H Higgs boson

Стандартная Модель (СМ)

9 масс частиц

4 параметра

матрицы смешивания

кварков

2 параметра поля Хиггса

3 константы

взаимодействия

3 массы нейтрино

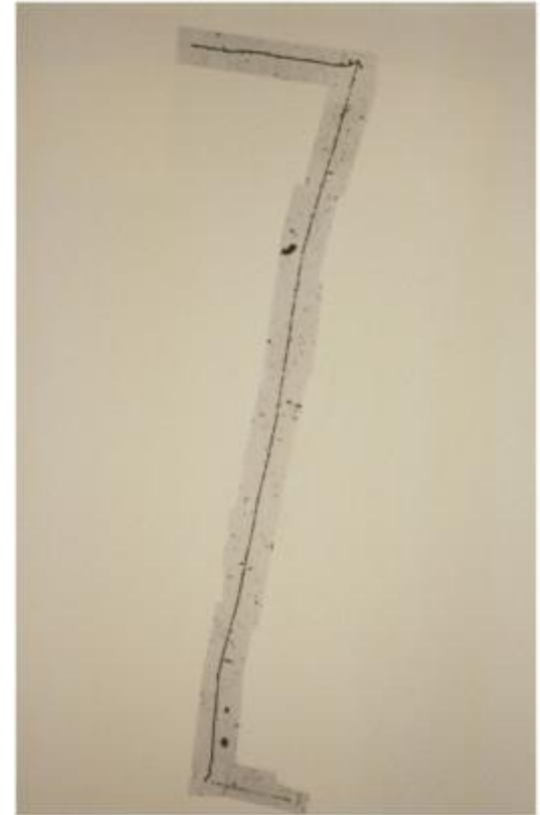
4+2 параметра матрицы
смешивания нейтрино

1968: SLAC <i>u</i> up quark	1974: Brookhaven & SLAC <i>c</i> charm quark	1995: Fermilab <i>t</i> top quark	1979: DESY <i>g</i> gluon
1968: SLAC <i>d</i> down quark	1947: Manchester Univ.. <i>s</i> strange quark	1977: Fermilab <i>b</i> bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN <i>W</i> W boson
1897: Cavendish Laboratory <i>e</i> electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN <i>Z</i> Z boson
			2012: CERN <i>H</i> Higgs boson

Частицы

Все частицы распадаются, если этому не препятствуют законы сохранения:

- энергии-импульса
- момента импульса
- заряда
- барионного числа
- лептонного числа

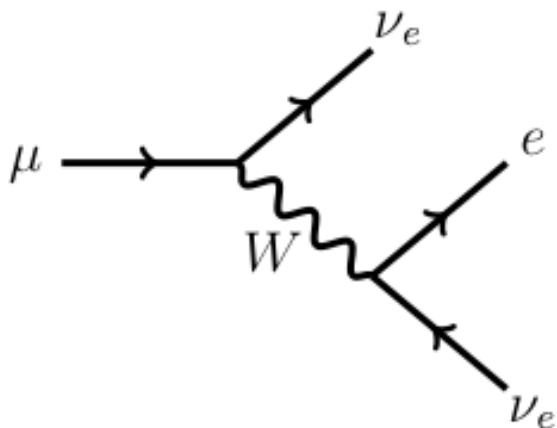


AllPosters

Частицы

Стабильные частицы: e (электрон), γ (фотон), нейтрино, $p(uud)$ протон

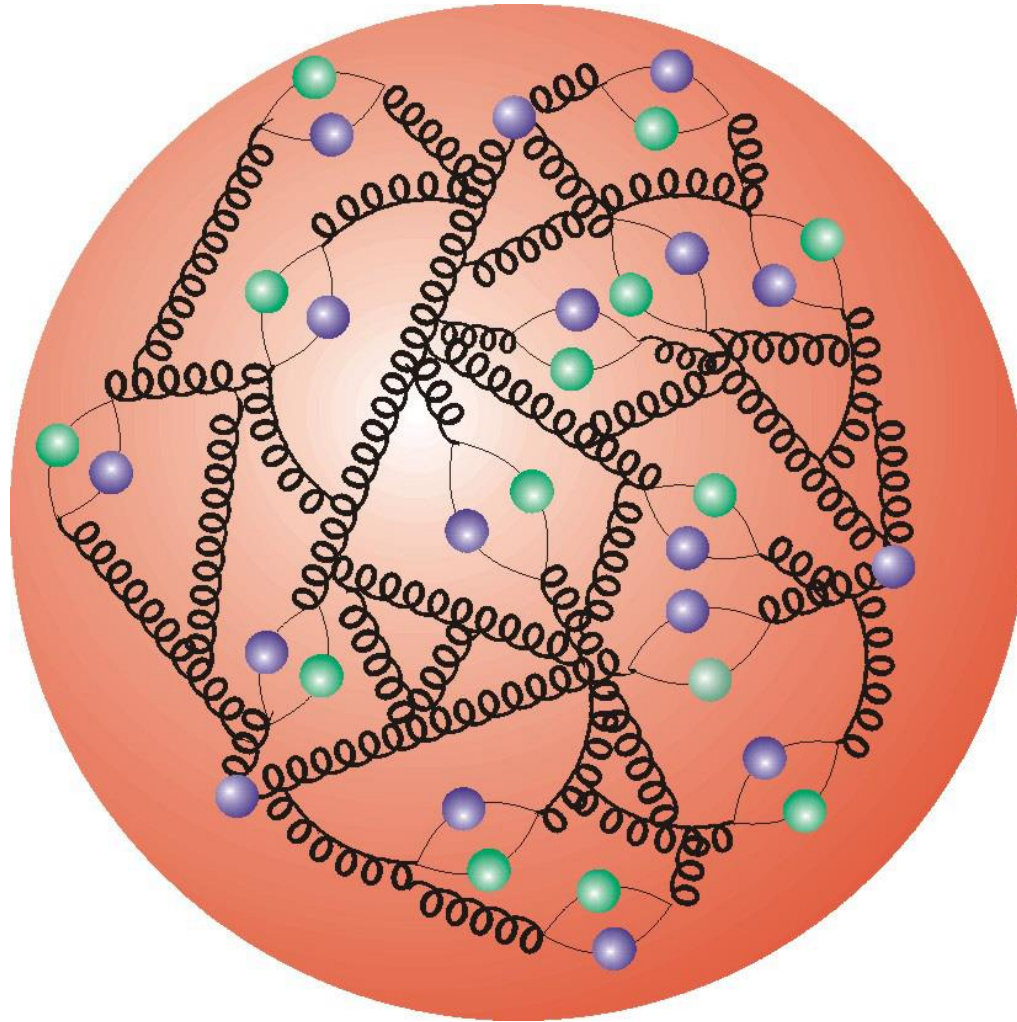
Долгоживущие частицы: μ (мюон), $\pi^+(u\bar{d})$ пион, $K^+(u\bar{s})$ каон, $n(udd)$ нейтрон...



1968: SLAC u up quark	1974: Brookhaven & SLAC c charm quark	1995: Fermilab t top quark	1979: DESY g gluon
1968: SLAC d down quark	1947: Manchester Univ.. s strange quark	1977: Fermilab b bottom quark	1923: Washington Univ. γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1982: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN W W boson
1897: Cavendish Laboratory e electron	1937: Caltech & Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN Z Z boson
			2012: CERN H Higgs boson

Backups

Внутри протона



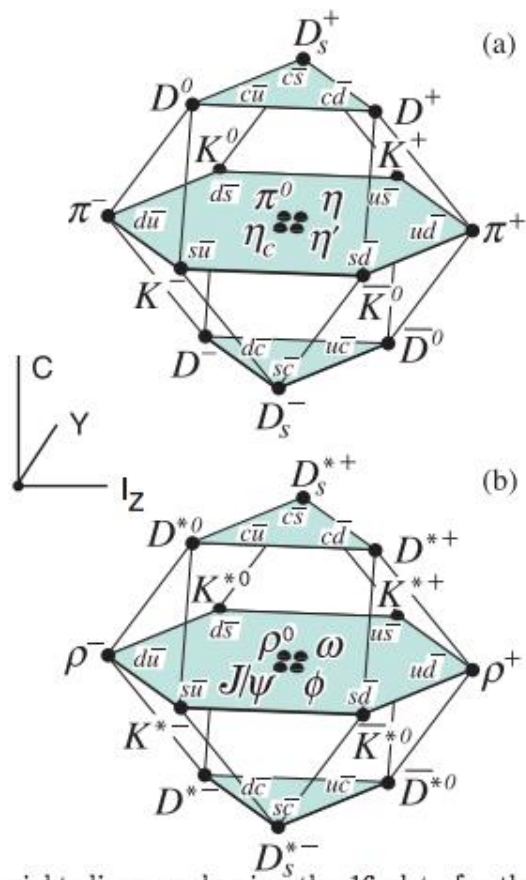


Figure 15.1: SU(4) weight diagram showing the 16-plets for the pseudoscalar (a) and vector mesons (b) made of the u , d , s , and c quarks as a function of isospin I_z , charm C , and hypercharge $Y = B + S - \frac{C}{3}$. The nonets of light mesons occupy the central planes to which the $c\bar{c}$ states have been added.

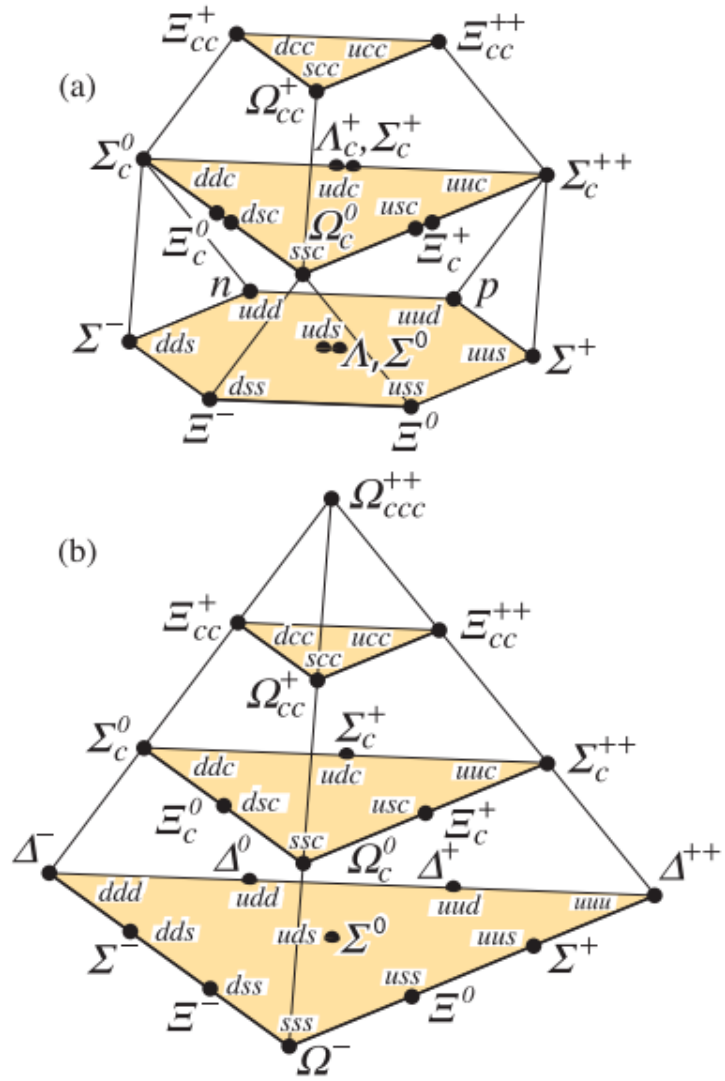


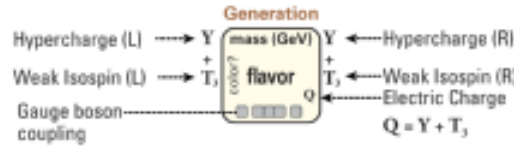
Figure 15.4: SU(4) multiplets of baryons made of u , d , s , and c quarks. (a) The 20-plet with an SU(3) octet. (b) The 20-plet with an SU(3) decuplet.

The Standard Model of Particle Physics

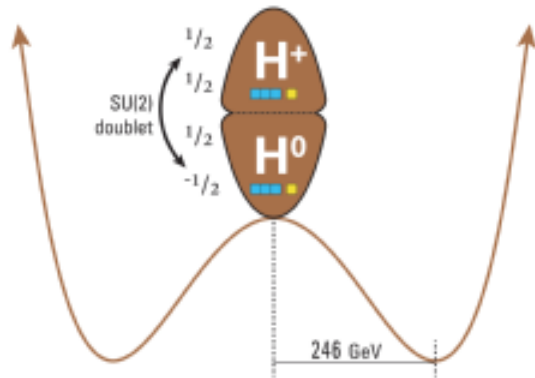
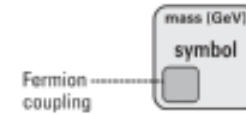
Spin 0 (Higgs Boson)



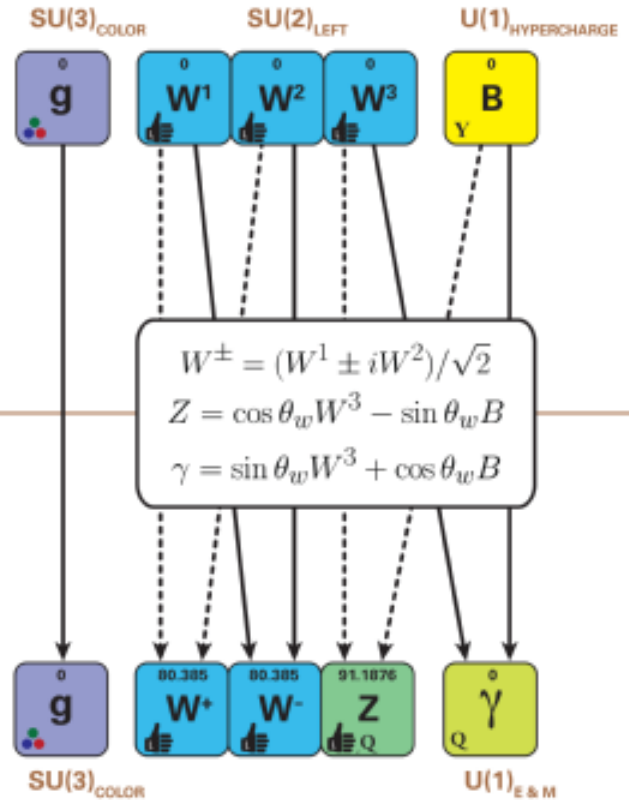
Spin 1/2 (Fermions)



Spin 1 (Gauge Bosons)



	1 st	2 nd	3 rd	
Left handed SU(2) doublet	$1/6$	$1/6$	$1/6$	$2/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	
	u	c	t	
	d	s	b	
	$1/6$	$1/6$	$1/6$	
	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	
Left handed SU(2) doublet	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	
	e	μ	τ	
	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	
	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	

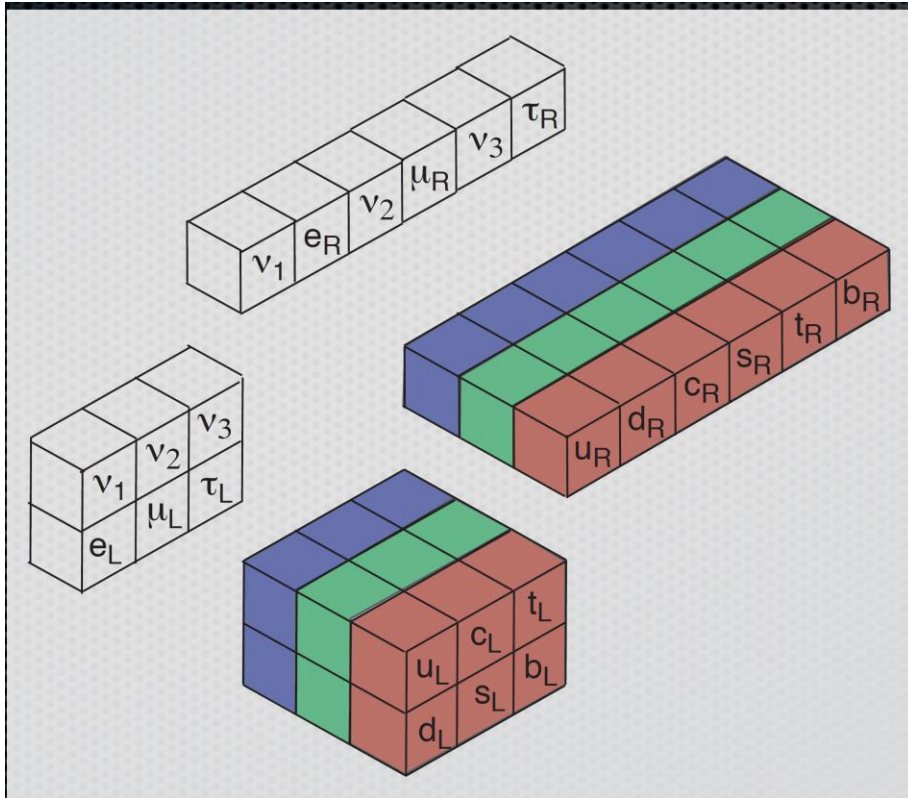


Unbroken Symmetry Broken Symmetry



	1 st	2 nd	3 rd
0.0023	1.275	173.07	
u	c	t	$2/3$
0.0048	0.095	4.18	
d	s	b	$-1/3$
m_e	M_μ	M_τ	
ν_e	ν_μ	ν_τ	0
0.000511	0.105658	1.77682	
e	μ	τ	-1

Киральные кварки и лептоны



The WEAK interaction distinguishes between LEFT and RIGHT-HANDED states.

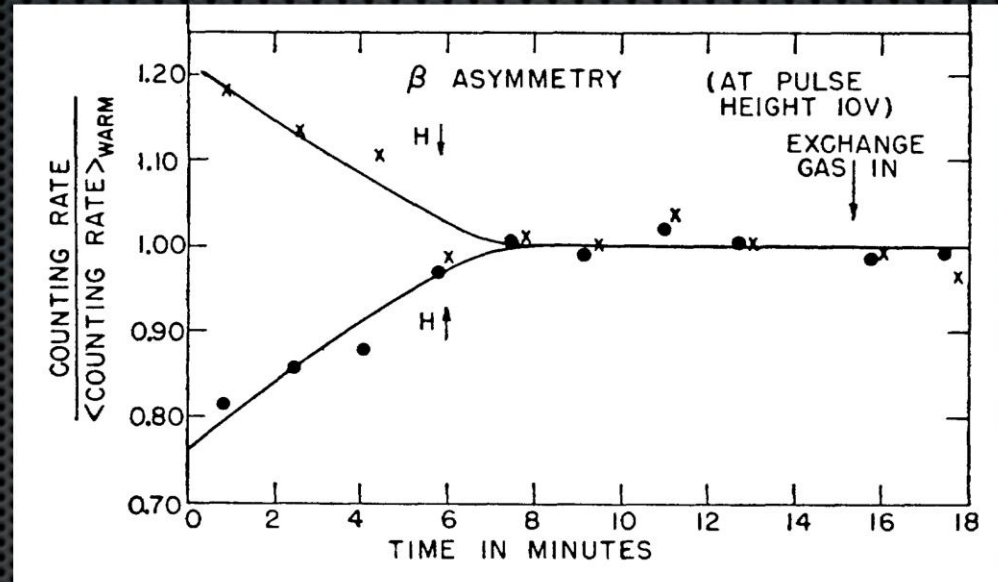
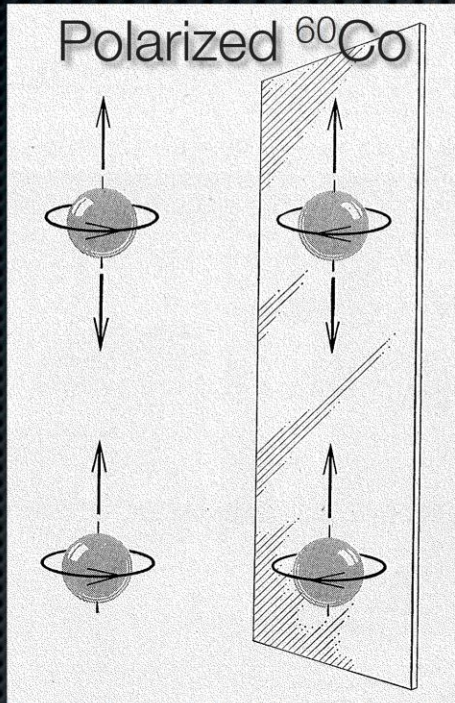
The weak interaction couples preferentially to

LEFT-HANDED PARTICLES

and

RIGHT-HANDED ANTIPARTICLES

β -decay: parity not conserved!



Unobservable observed

90 PARITY NOT CONSERVED!
Dec 27, 1956.