

Путешествие в микромир с физиком-теоретиком

Часть II



Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

1. Инвариантным относительно сдвигов в пространстве-времени
-> закон сохранения энергии-импульса
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени
-> закон сохранения момента количества движения (углового момента)

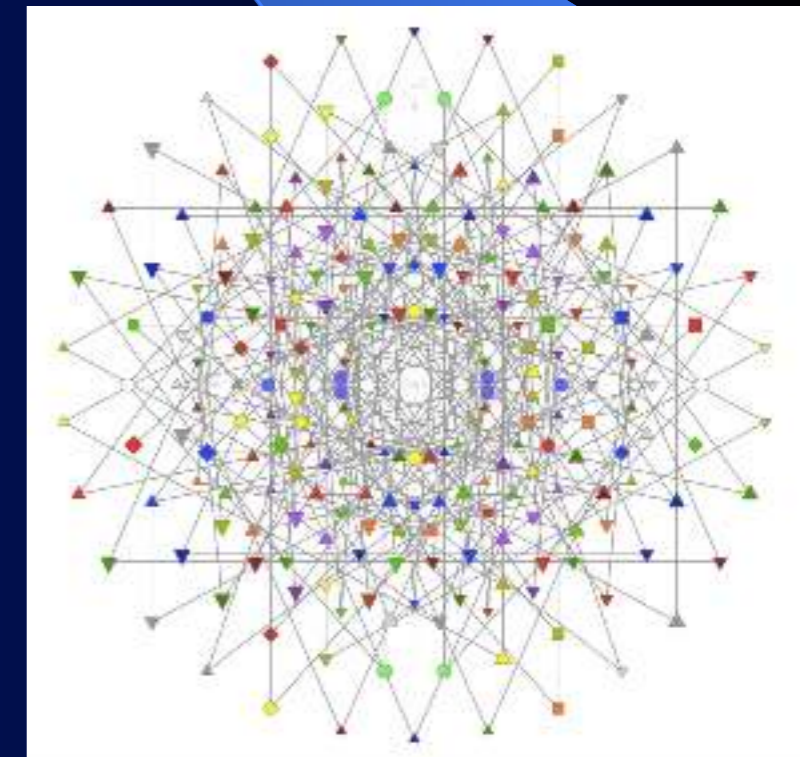
Пространственные симметрии

1. Инвариантным относительно сдвига фазы волновой функции частицы -> закон электрического заряда (Эл Маг В3) $U(1)$
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве «цветов» кварков -> закон сохранения «цветов» заряда (Сильн В3) $SU(3)$
3. Инвариантность относительно вращений в пространстве изоспина -> закон сохранения изоспина (Слаб В3) $SU(2)$

Внутренние симметрии

Симметрии

Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!



Симметрия может быть весьма сложной

корни группы E_8

Электромагнитные взаимодействия

1. Осуществляются путём обмена квантом электромагнитного поля - фотоном
2. Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$

$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

1. Заряженные частицы (кварки и лептоны) описываются уравнением Дирака

$$(\hat{\partial} - m - e\hat{A})\psi = 0$$

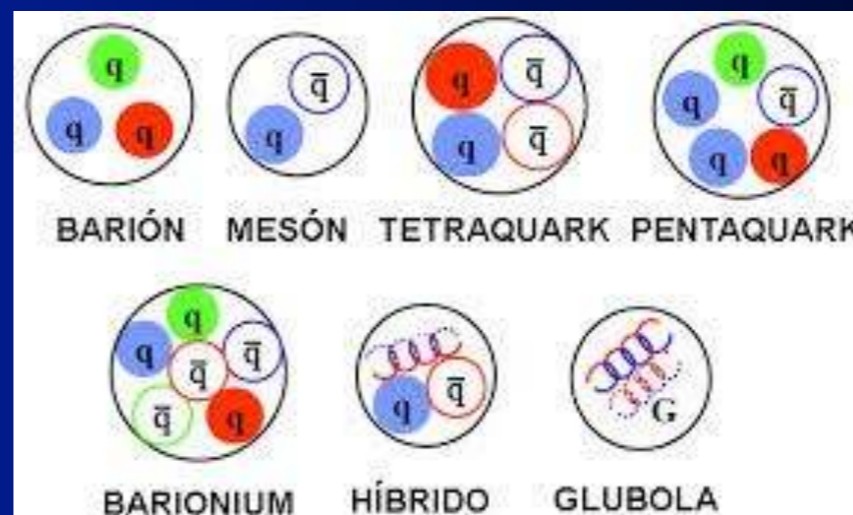
$$\hat{\partial} = \gamma^\mu \partial_\mu$$

Сильные взаимодействия

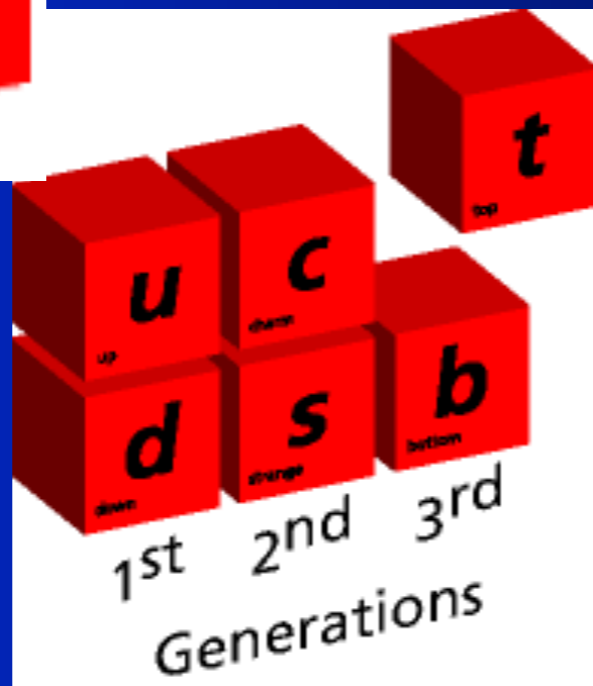
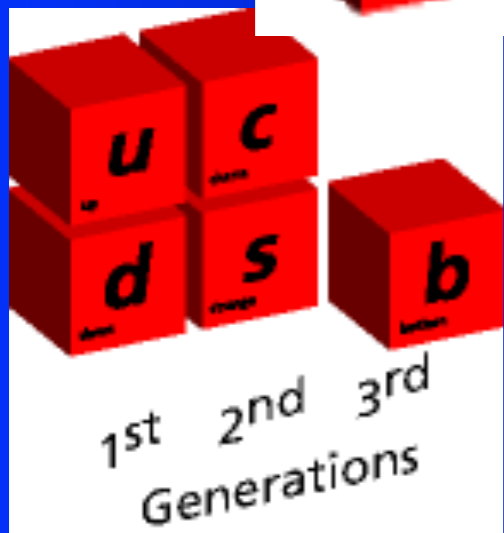
1. Осуществляются путём обмена квантом глюонного (цветного) поля - глюоном
2. Глюонное поле описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Главное отличие от электродинамики в том, что глюоны тоже несут цветной заряд и взаимодействуют друг с другом
4. Постулат конфайнмента: кварки и глюоны не могут наблюдаться в свободном состоянии, наблюдаются только «бесцветные» объекты
5. Бесцветные объекты бывают следующих типов:

мезоны : $M = \bar{q}q$ барионы $B = qqq$

экзотические адроны



Кварки – “кирпичики”

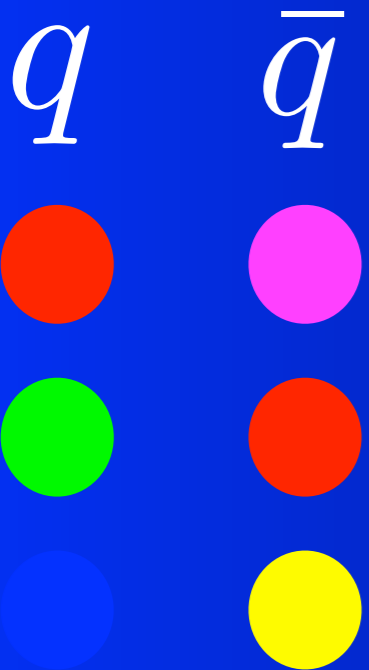


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

По непонятной причине природа создала 3 копии (поколения) кварков и лептонов



Цветные кварки



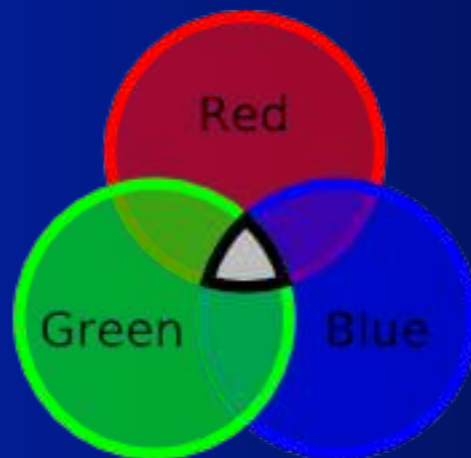
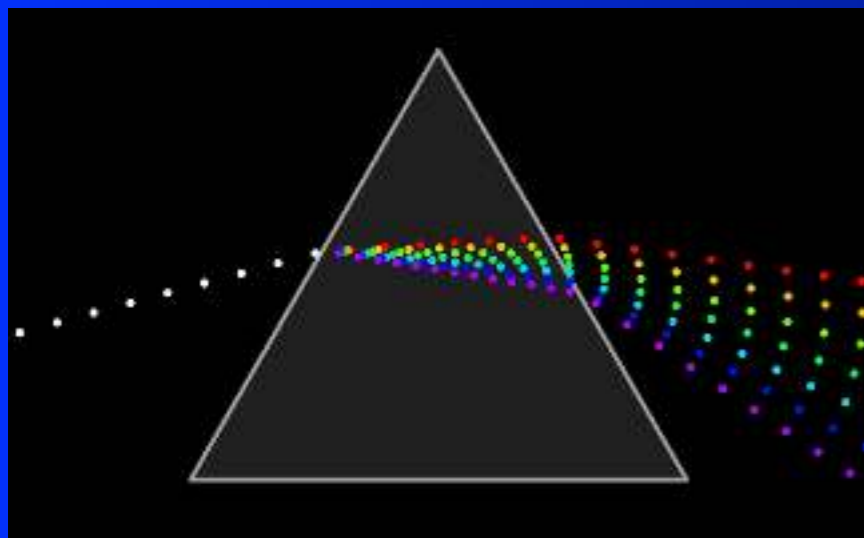
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

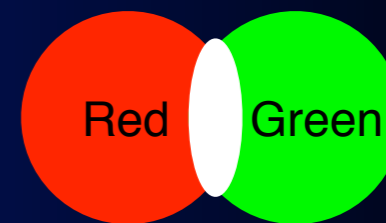
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

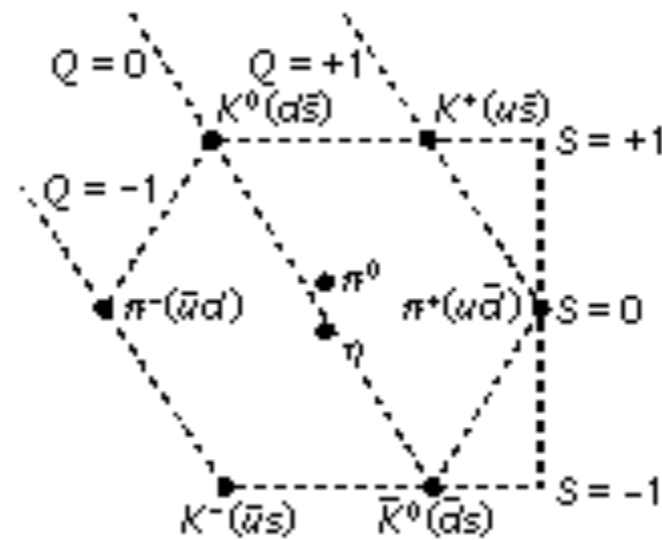
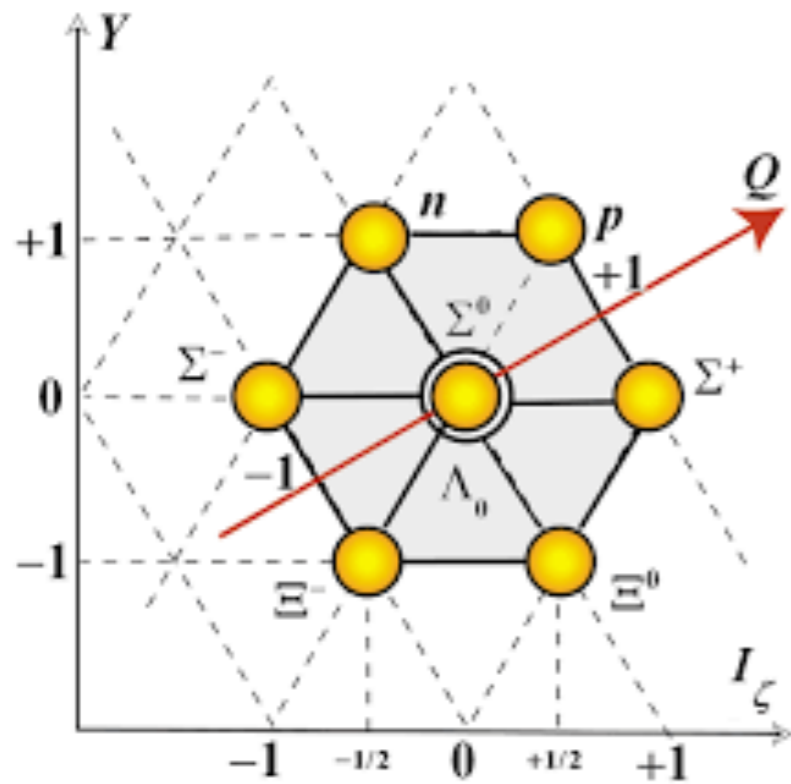


барион

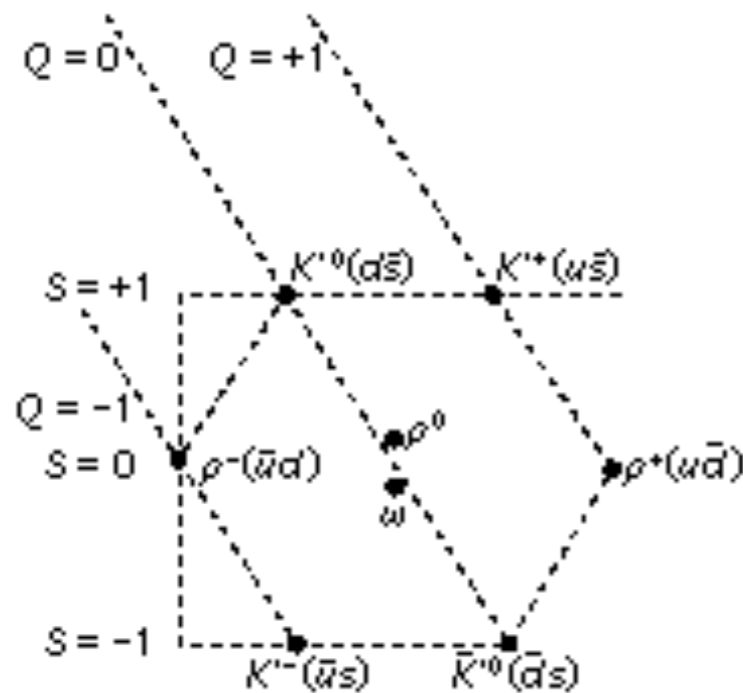


МЕЗОН

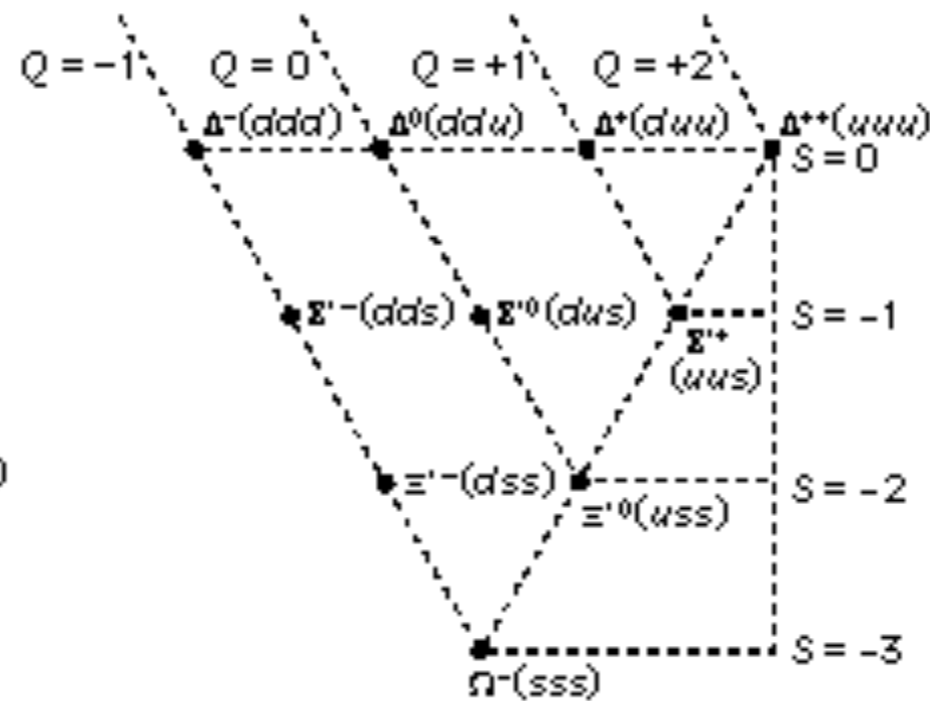
Таблицы элементарных частиц



ОКТЕТ МЕЗОНОВ ($s = 0$)



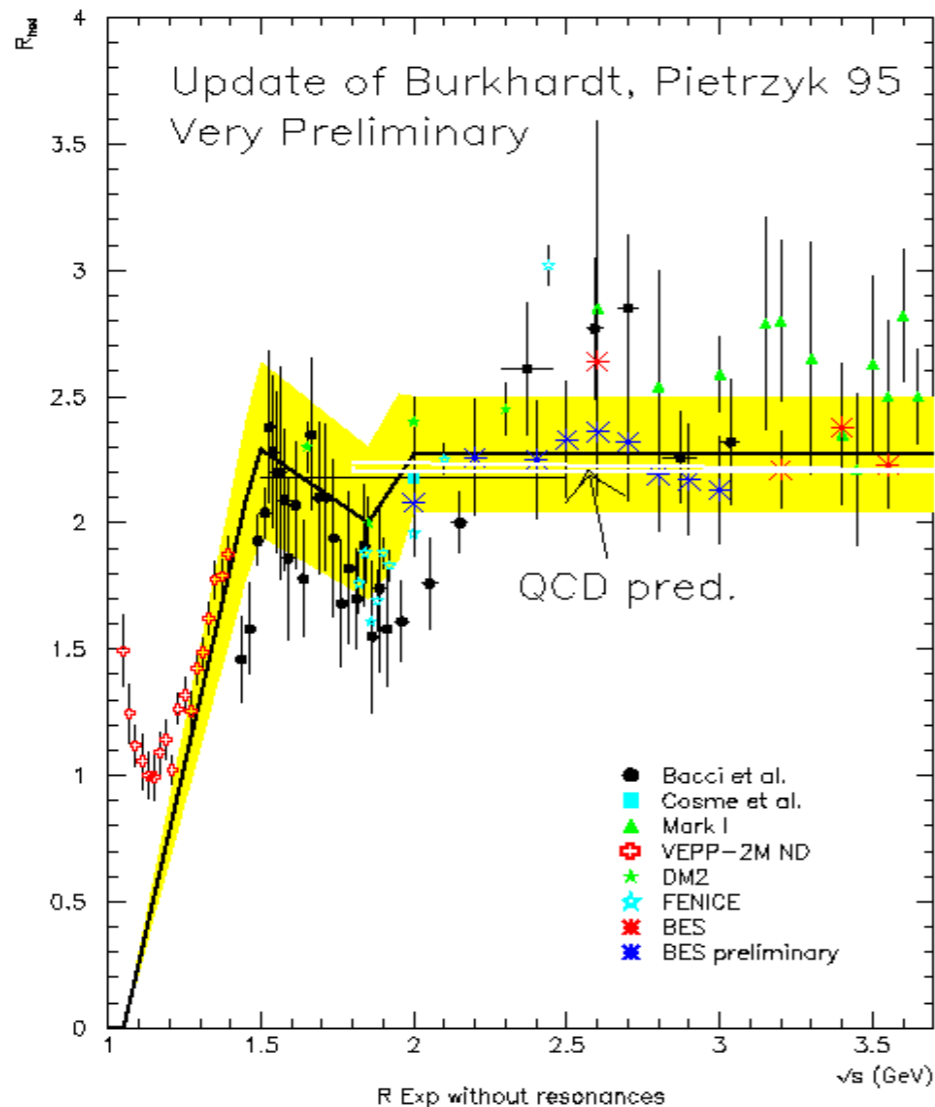
ОКТЕТ МЕЗОНОВ ($s = 1$)



ДЕКУПЛЕТ БАРИОНОВ ($s = 3/2$)

Было обнаружено, что по какой-то причине частицы группируются в 8 (октеты) и 10 (декуплеты)

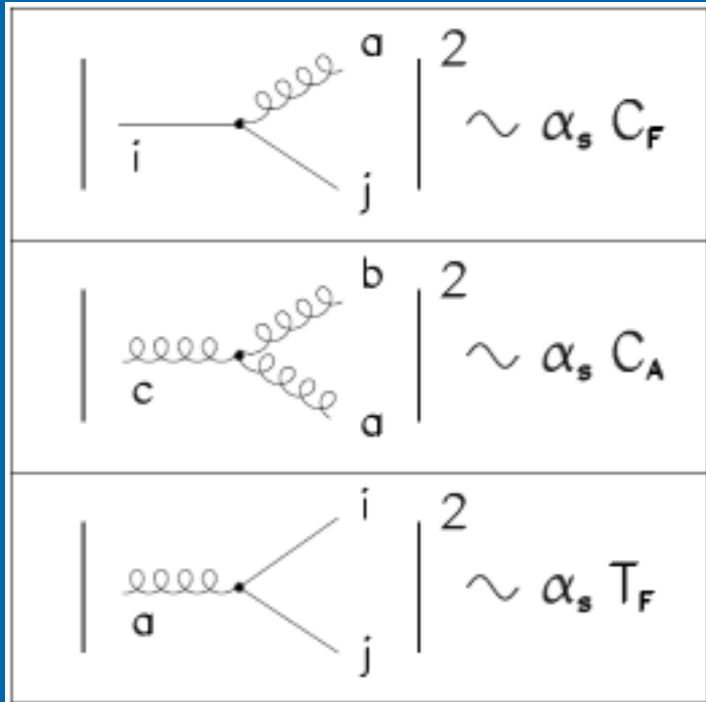
The Number of Colours



- The x-section of electron-positron annihilation into hadrons is proportional to the number of quark colours. The fit to experimental data at various colliders at different energies gives

$$N_c = 3.06 \pm 0.10$$

The group structure of the SM



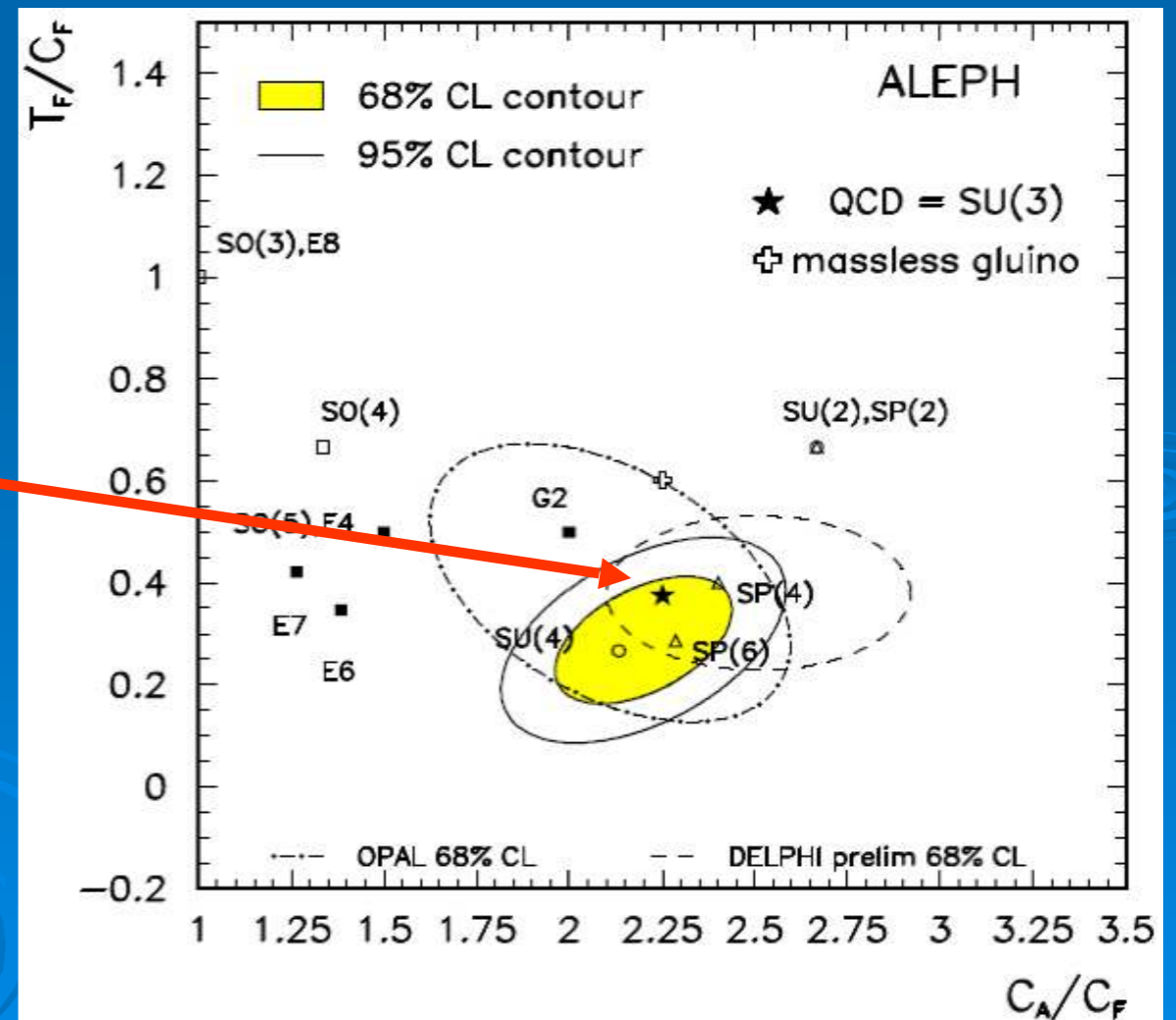
$$\sum_{a=1}^{N_A} (T^a T^{\dagger a})_{ij} = \delta_{ij} C_F, \quad \sum_{i,j=1}^{N_F} T_{ij}^a T_{ji}^{\dagger b} = \delta^{ab} T_F, \quad \sum_{a,b=1}^{N_A} f^{abc} f^{*abd} = \delta^{cd} C_A$$

Casimir Operators

For SU(N)

$$C_A = N_C, \quad C_F = \frac{N_C^2 - 1}{2N_C}, \quad T_F = 1/2$$

QCD analysis definitely singles out the SU(3) group as the symmetry group of strong interactions

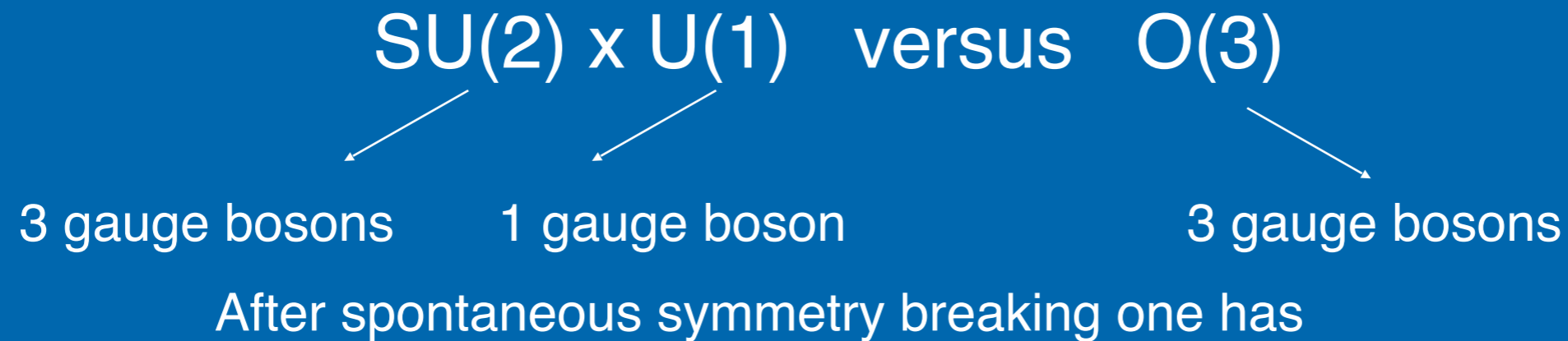


Слабые взаимодействия

1. Осуществляются путём обмена промежуточными векторными бозонами W, Z
2. Поля W и Z описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
3. Поля W, Z тоже несут слабый заряд (изоспин) и взаимодействуют друг с другом
4. Поля W, Z могут наблюдаться в свободном состоянии и обладают массой
5. В слабых взаимодействиях участвуют лептоны и кварки
6. Слабые взаимодействия - короткодействующие

$$R \sim 1/M_W$$

Electro-weak sector of the SM



3 massive gauge bosons
(W^+ , W^- , Z^0) and 1 massless (γ)



2 massive gauge bosons
(W^+ , W^-) and 1 massless (γ)



- Discovery of neutral currents was a crucial test of the gauge model of weak interactions at CERN in 1973
- The heavy photon gives the neutral current without flavour violation

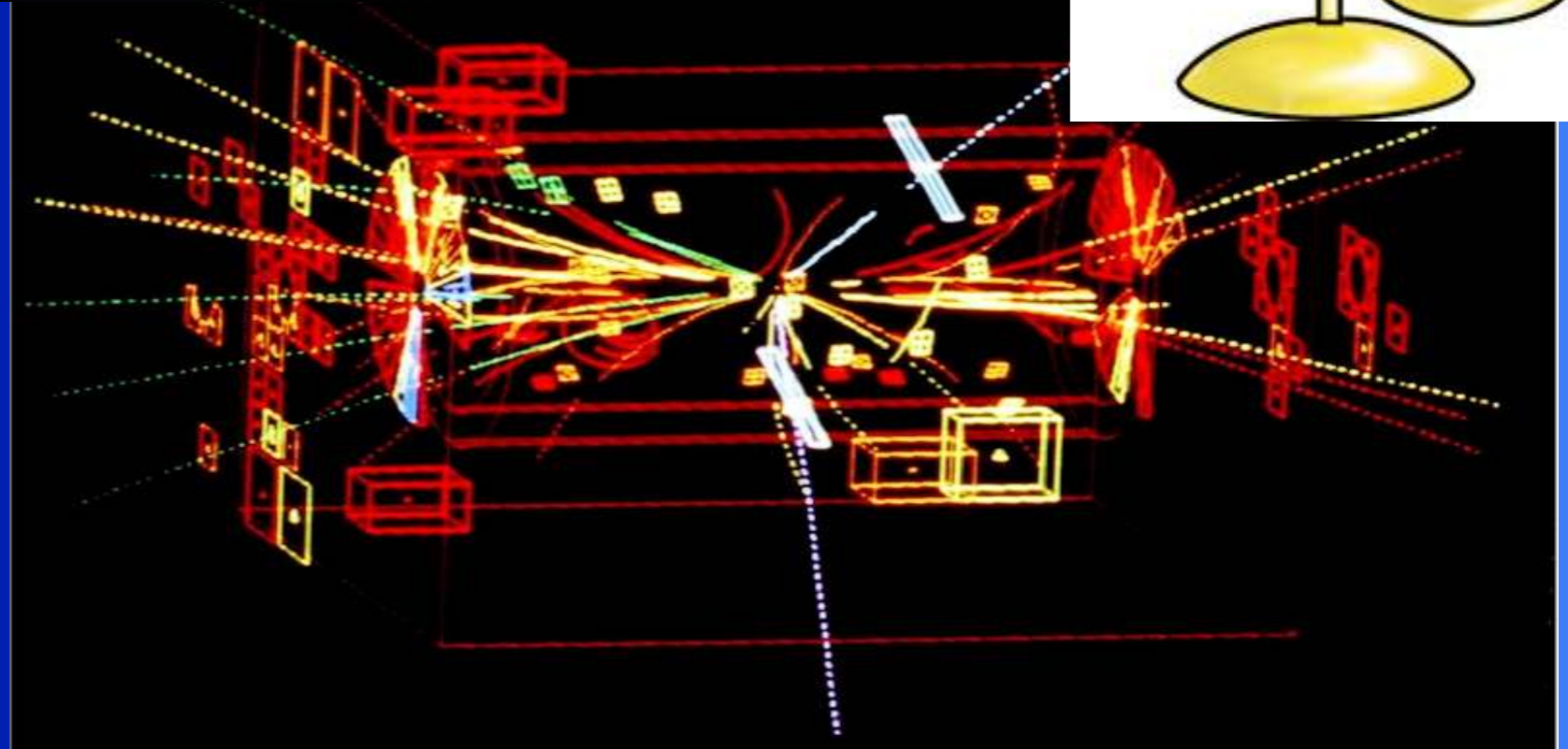
Открытие W и Z бозонов



- Открытие W и Z бозонов – переносчиков слабых взаимодействий на ускорителе SPS (CERN) в 1983 году



явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий



Зачем нужна нарушенная симметрия?

Инвариантность относительно фазовых преобразований

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi(x)$$

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) + \partial_\mu\alpha(x)$$

Массовый член A_μ^2 не инвариантен и запрещён -> фотон имеет нулевую массу!

То же самое справедливо и для глюона - глюон имеет нулевую массу, если группа SU(3) не нарушена

Но W и Z бозоны массивны - > группа SU(2) должна быть нарушена!

Прямое нарушение группы SU(2) приводит к росту сечений рассеяния W бозонов и противоречит эксперименту

Выход из тупика - > спонтанное нарушение симметрии

Спонтанное нарушение симметрии

Спонтанное нарушение симметрии: Симметричная система уравнений с несимметричными начальными или краевыми условиями

Скалярное поле $H(x)$

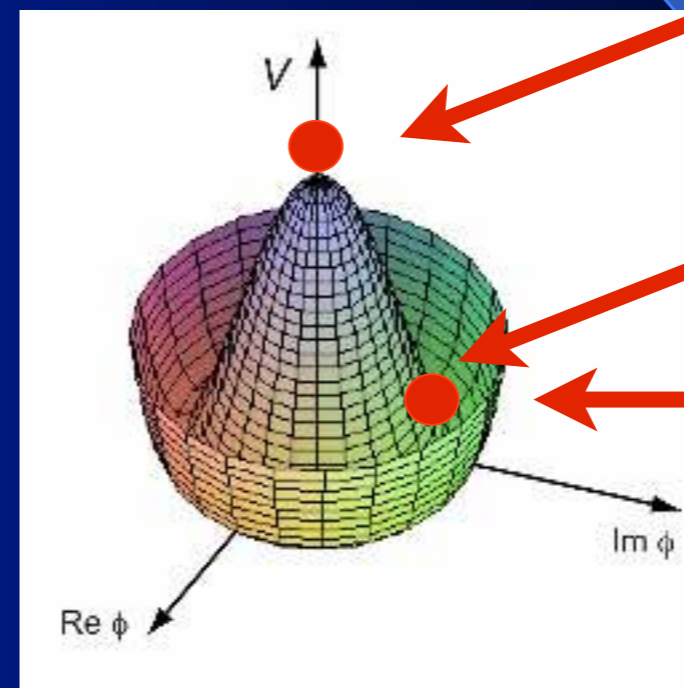
$$\langle H(x) \rangle = v$$

среднее значение поля

$$g^2 W_\mu^2 H^2 \rightarrow g^2 W_\mu^2 (H + v)^2 \\ \rightarrow g^2 W_\mu^2 (v^2 + \dots) \rightarrow M_W^2 W_\mu^2$$

$$M_W^2 = g^2 v^2$$

Потенциал



Неустойчивое состояние

Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

Проблема: безмассовые поля! -> механизм Брута-Энглера-Хиггса: безмассовые скалярные поля превращаются в продольные степени свободы массивных W и Z бозонов и исчезают из спектра



Хиггсовский Бозон

$$H(x) = v + h(x) \leftarrow \text{Хиггсовский бозон}$$

Массы элементарных частиц в Стандартной Модели

$$m_{quark} = y_{quark} \cdot v$$

$$m_{lepton} = y_{lepton} \cdot v$$

$$m_W = g \cdot v$$

$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

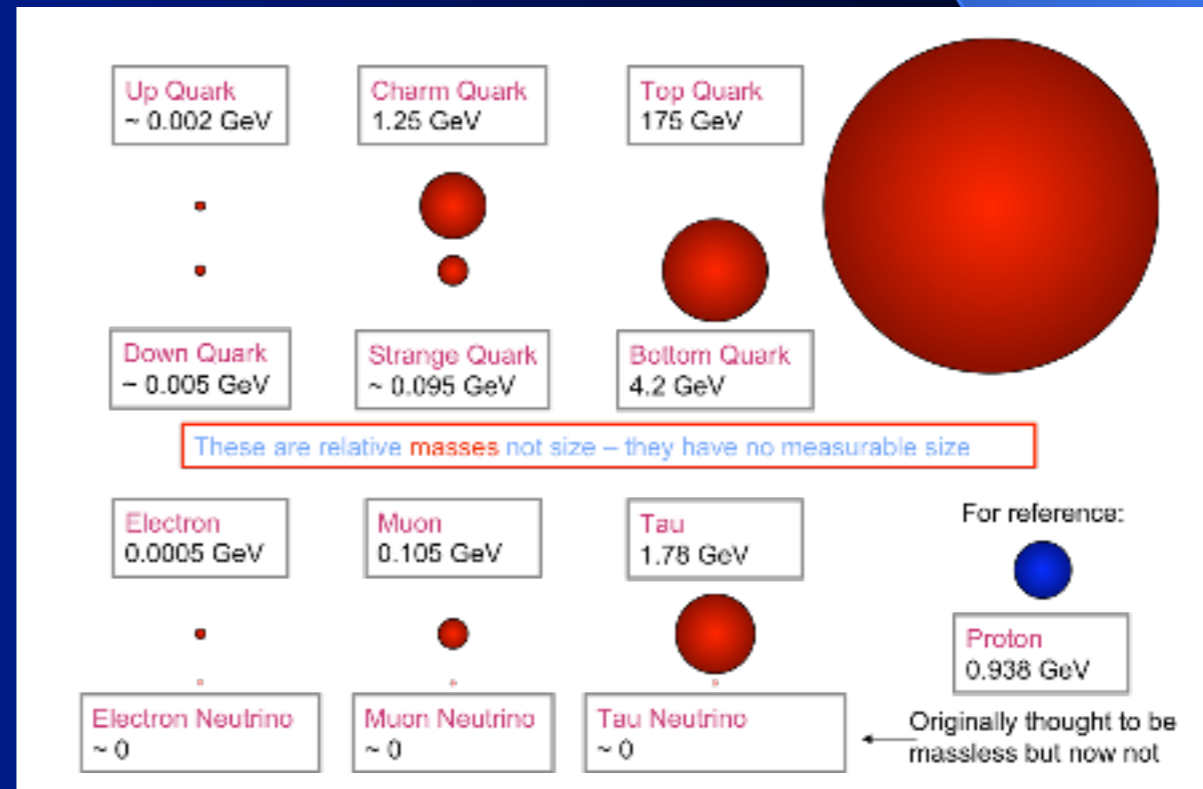
$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем БЭХ за счет вакуумного среднего последнего!

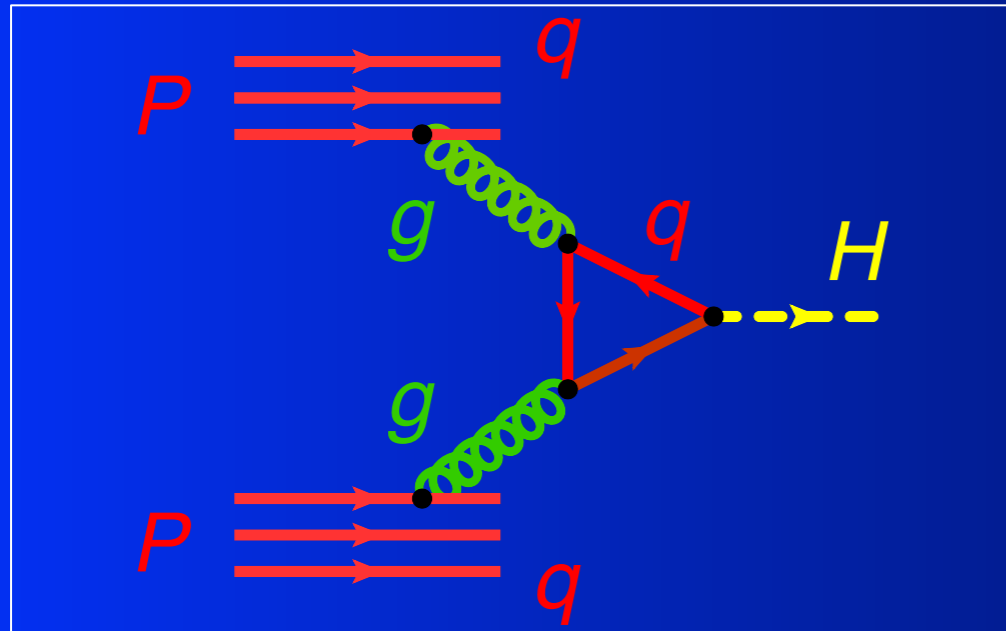
Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с хиггсовским (полем) бозоном



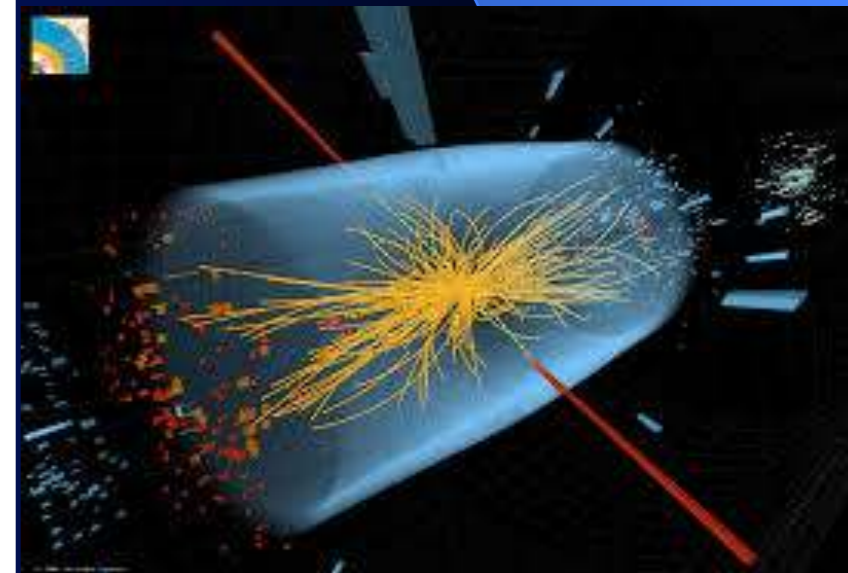
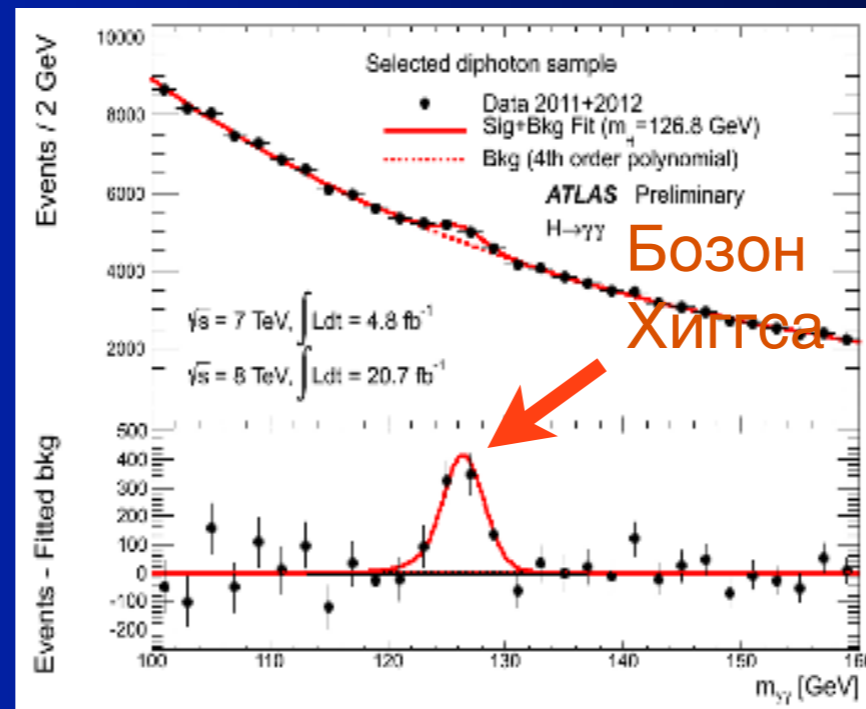
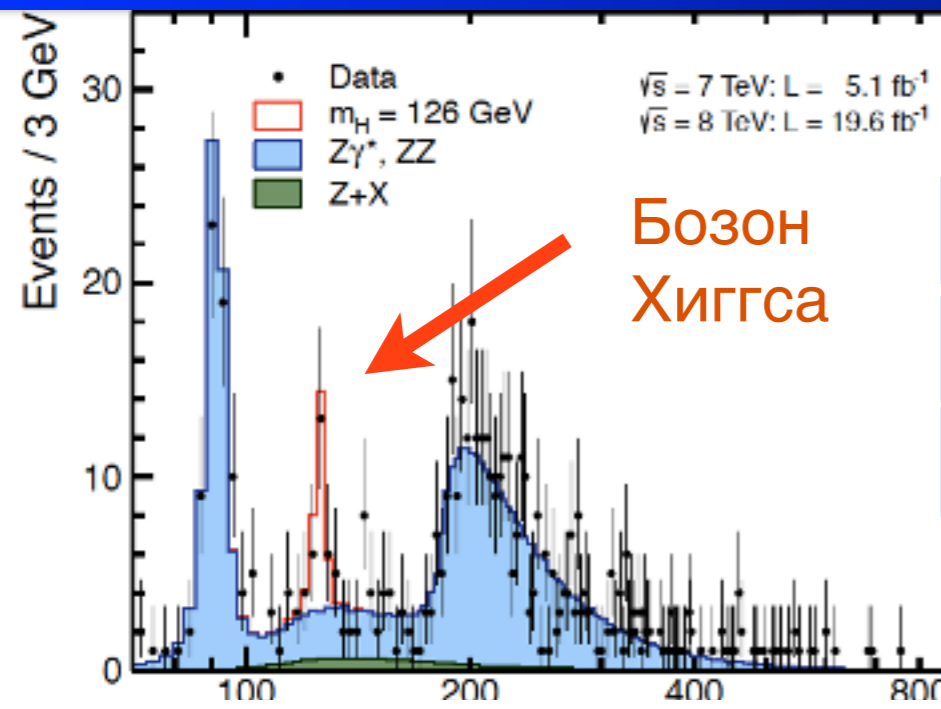
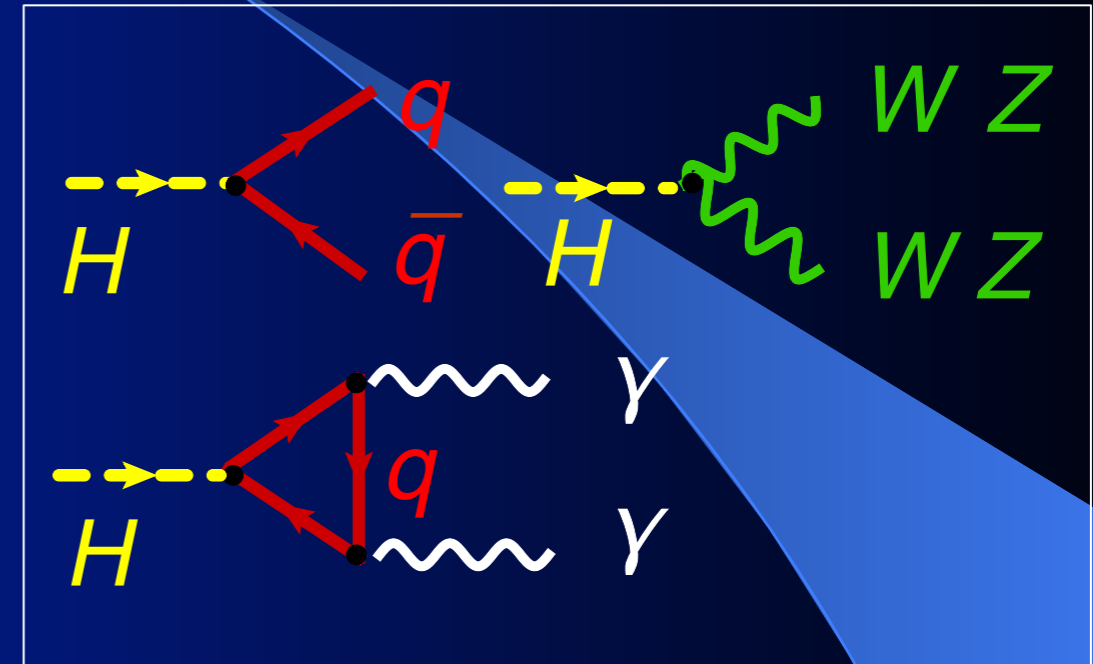
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

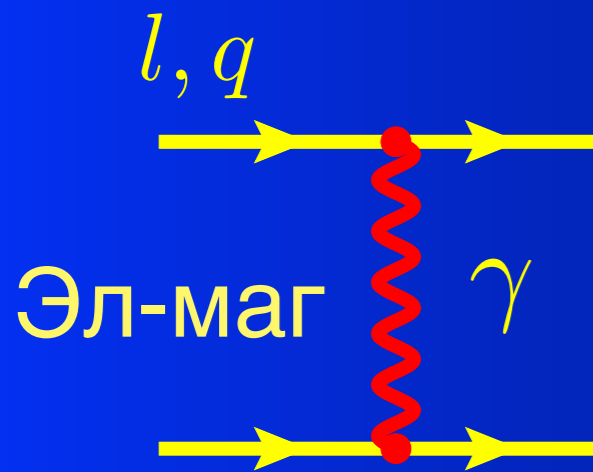
Рождение на протонном коллайдере



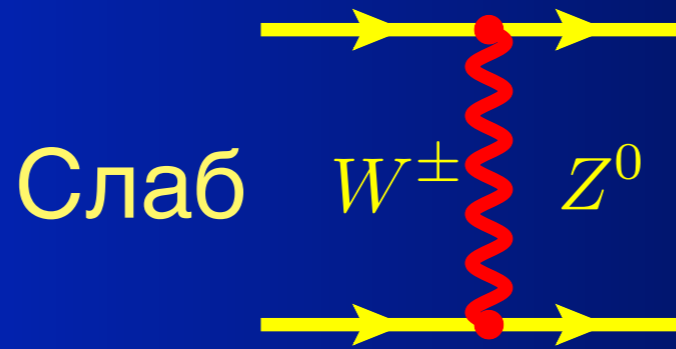
Процессы распада



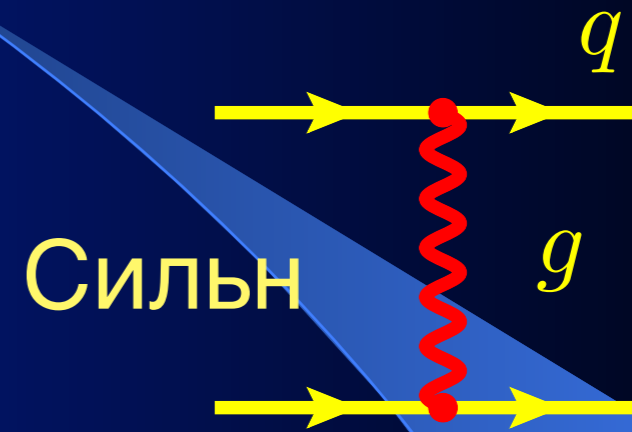
Пять фундаментальных сил Природы



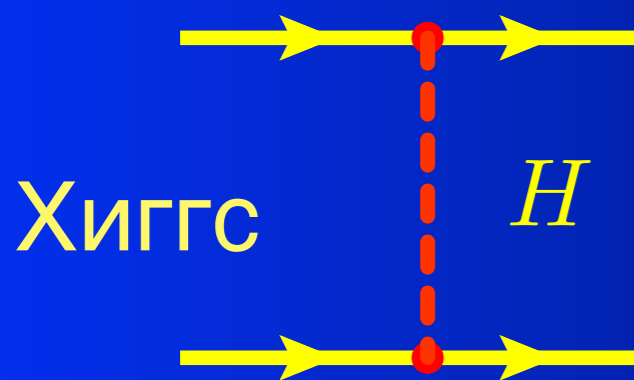
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



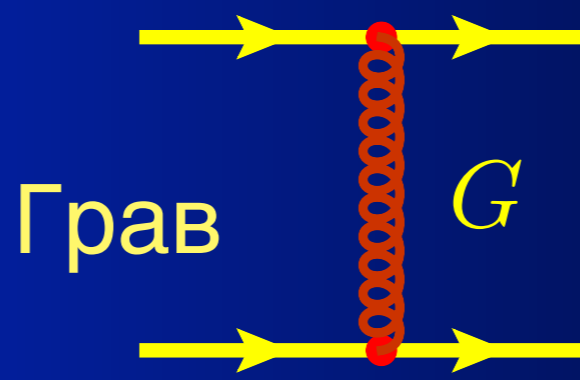
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

СПИН

γ	W^\pm	Z^0	g	=1
H				=0
G				=2