

Элементарно, Хиггс!

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



Программа курса лекций

- Лекция I Физика элементарных частиц в предверии смены парадигм
- Лекция II Симметрии в физике элементарных частиц
- Лекция III Стандартная модель: сильные взаимодействия
- Лекция IV Стандартная модель: электрослабые взаимодействия
- Лекция V Физика за пределами Стандартной модели

Лекция III

Стандартная модель: сильные взаимодействия

- Квантовая хромодинамика
- Цветная симметрия сильных взаимодействий
- Глюоны как переносчики сильных взаимодействий
- Адроны построенные из кварков
- Гипотеза невылетания кварков
- Партонная модель
- Процессы рождения адронов на коллайдерах

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu - m - eA_\mu) \psi$$

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

Хромодинамика как калибровочная теория сильных взаимодействий

Лагранжиан

Группа инвариантности SU(3)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F_{\mu\nu}^a + \bar{\psi}_i \gamma^\mu (\partial_\mu - m - gT_{ij}^a A_\mu^a) \psi_j$$

$$F_{\mu\nu}^a = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

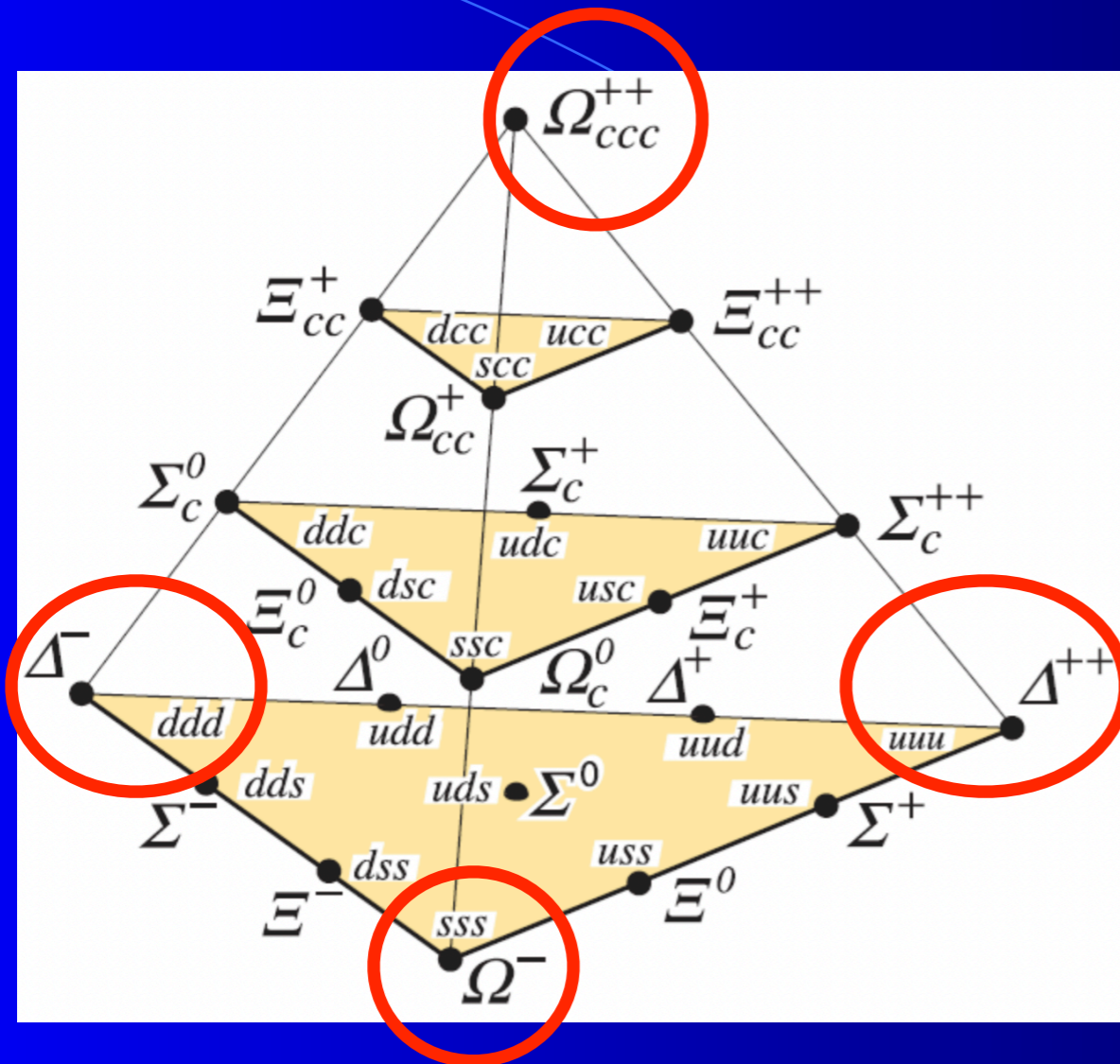
$$\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} \gamma^\mu (\partial_\mu - m - eA_\mu) \psi$$

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

- Сильное вз. осуществляются путём обмена квантом глюонного (цветного) поля -глюоном
- Глюонное поле описывается уравнением Янга-Миллса (обобщение уравнений Максвелла)
- Главное отличие от электродинамики в том, что глюоны тоже несут цветной заряд и взаимодействуют друг с другом

Цвет кварков

Адроны сделаны из кварков



$$\Delta^- (d \uparrow d \uparrow d \uparrow)$$

$$\Omega^- (s \uparrow s \uparrow s \uparrow)$$

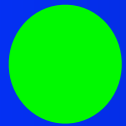
$$\Delta^{++} (u \uparrow u \uparrow u \uparrow)$$

Чтобы преодолеть принцип запрета Паули нужно антисимметризовать волновую функцию, введя новое квантовое число - «цвет»

$$\Delta^- = \varepsilon^{ijk} (d_i \uparrow d_j \uparrow d_k \uparrow)$$

Цветные кварки и глюоны

q



\bar{q}



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

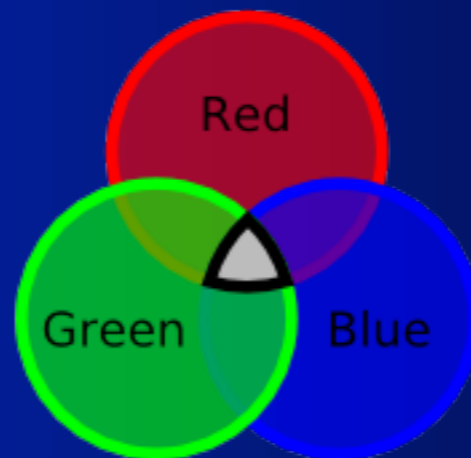
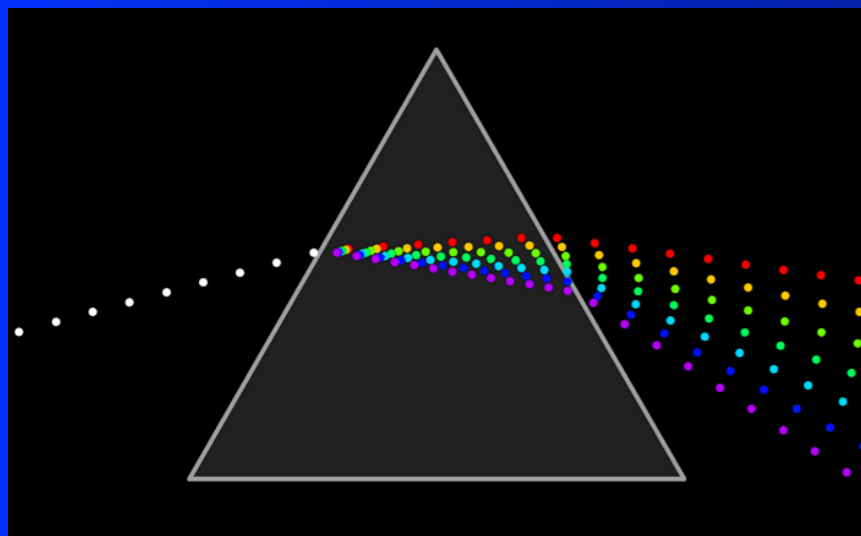
Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

Глюоны имеют восемь цветов:

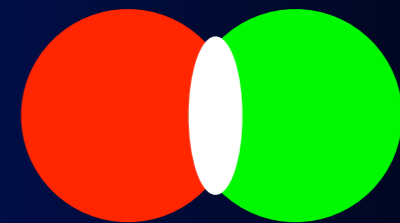
красный-анти**синий**, **зелёный**-анти**красный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !



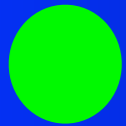
барион



МЕЗОН

Цветные кварки и глюоны

q



\bar{q}



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

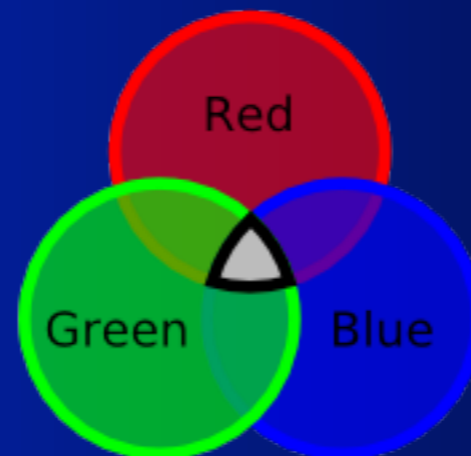
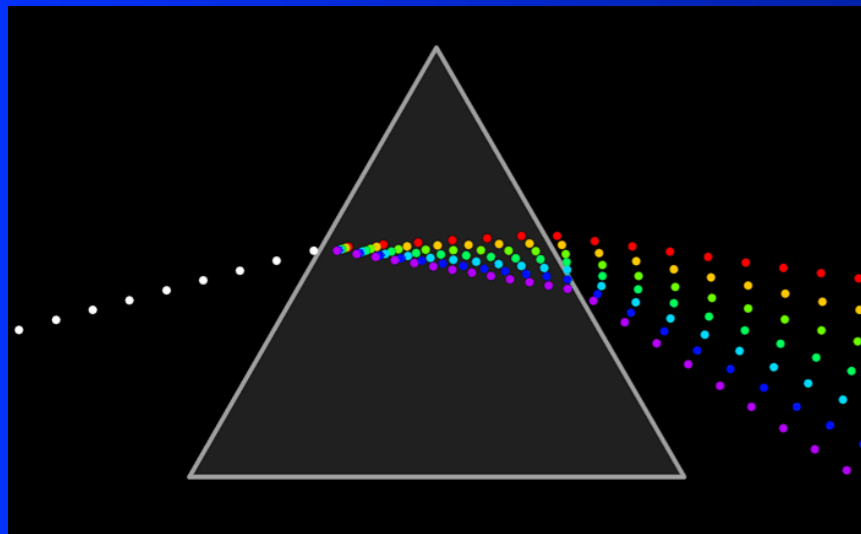
Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

Глюоны имеют восемь цветов:

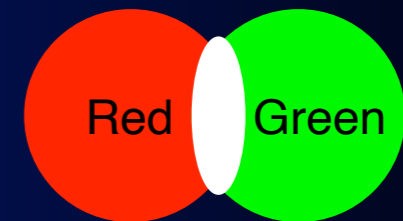
красный-антисиний, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !



барион



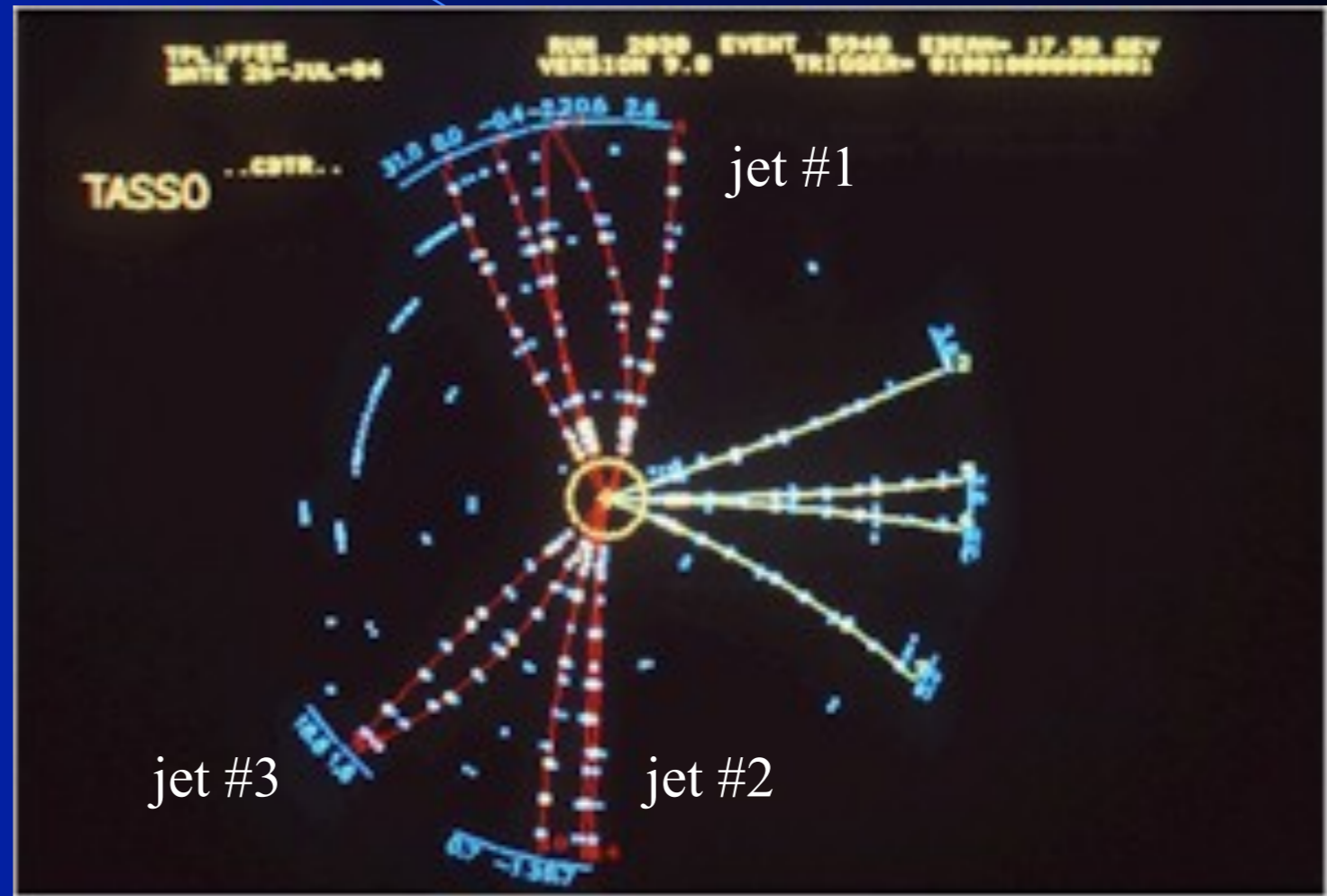
МЕЗОН

Открытие глюона



- Глюон – переносчик сильных взаимодействий был открыт в 1979 году на ускорителе PETRA (DESY)

- Свидетельством открытия глюона явилось наличие трёх-струйного события в рассеянии адронов



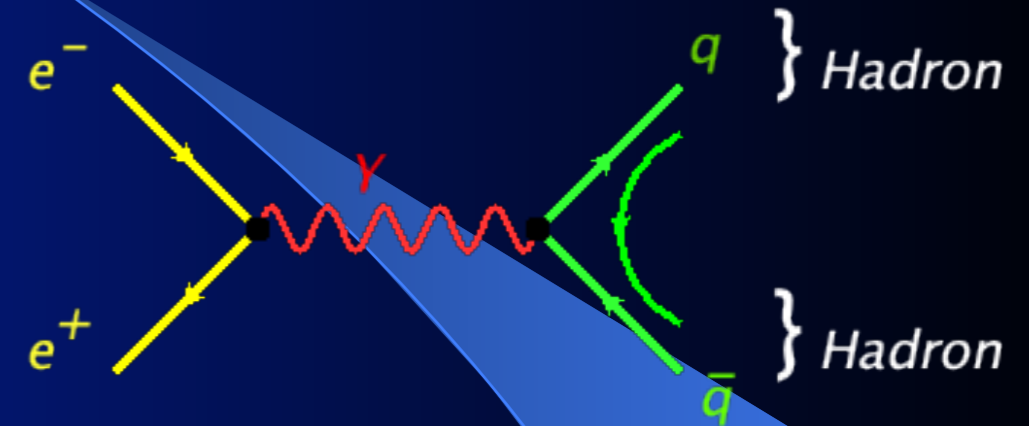
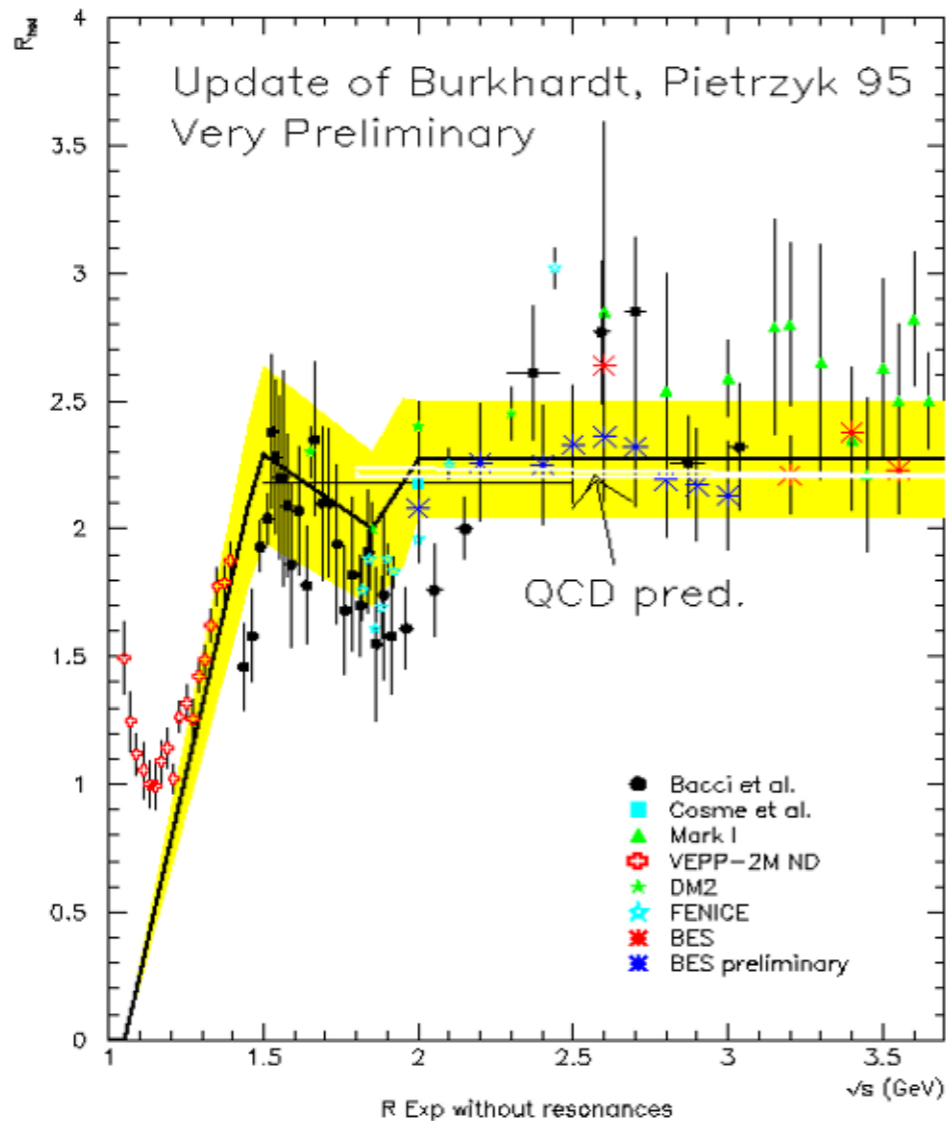
$$g_{ij}^a$$

$$a = 1, \dots, 8$$

$$i, j = 1, 2, 3 \quad \leftarrow \text{«ЦВЕТ»}$$

Red	Green	Blue	Color
Anti-Red	Anti-Green	Anti-Blue	Anti-Color
			Quarks
			Anti-Quarks

Число цветов кварков



Сечение электрон-позитронной аннигиляции в адроны пропорционально числу цветов кварков. Сравнение с экспериментальными данными с разных коллайдеров при разных энергиях даёт

$$N_c = 3.06 \pm 0.10$$

Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force	

Bosons (Forces)

СИЛЫ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ

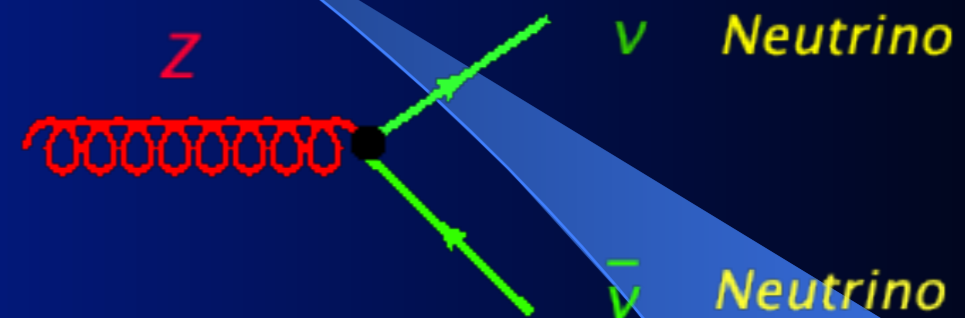
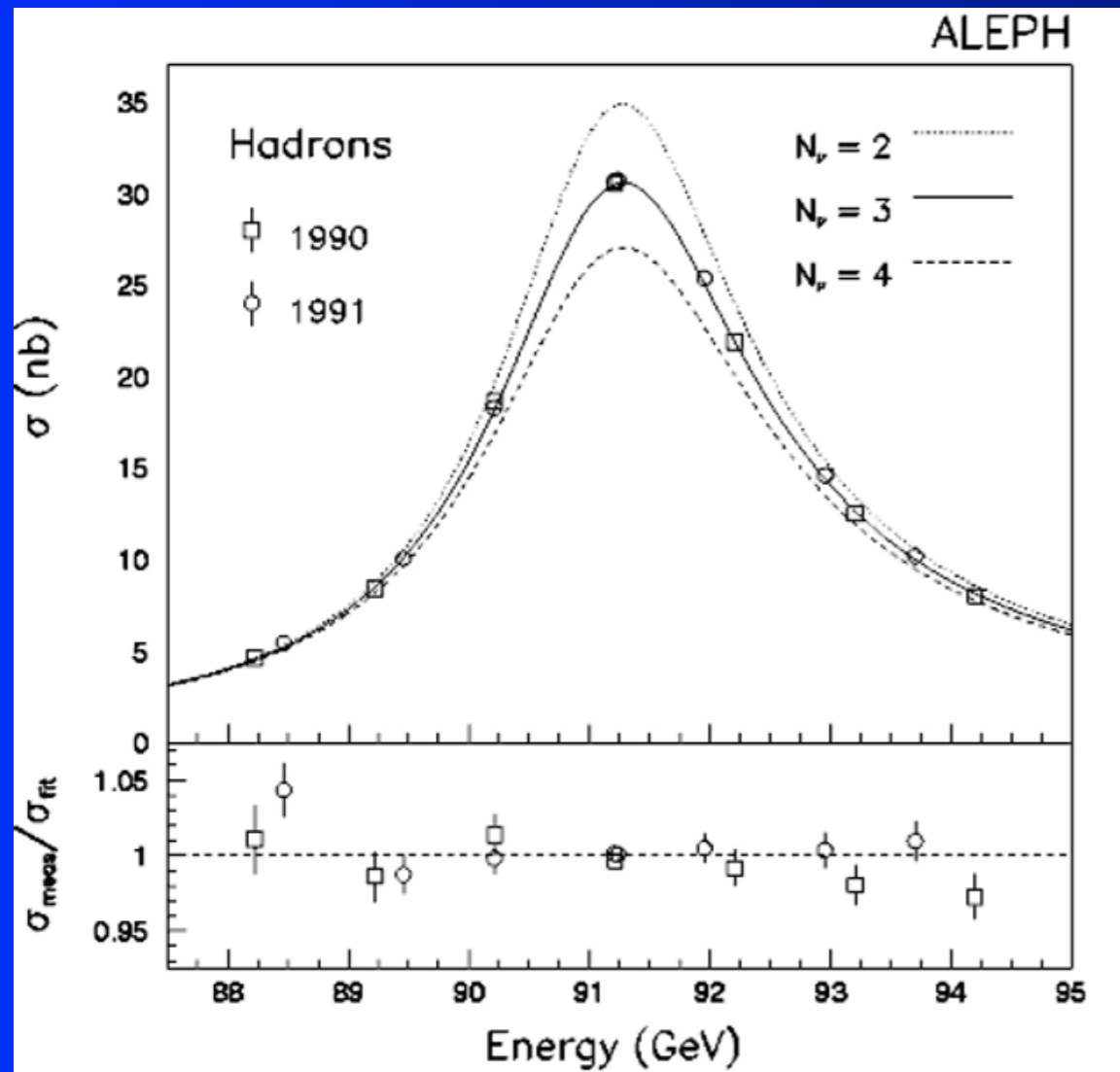
СИЛЬНЫЕ

СЛАБЫЕ

ЮКАВСКИЕ

ГРАВИТАЦИЯ

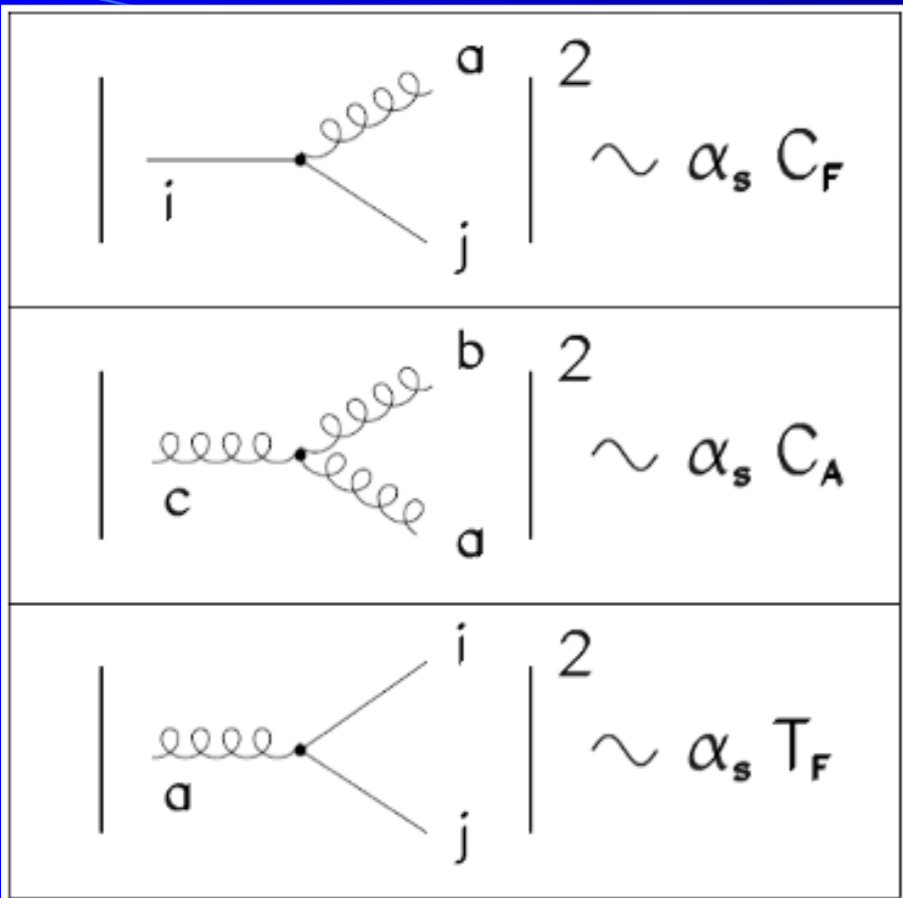
Число поколений частиц материи



Форма и ширина линии Z -бозона полученные на электрон-позитронном коллайдере ЛЭП зависят от числа поколений и даёт для числа сортов лёгких нейтрино (числа поколений)

$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

Группа симметрии сильных взаимодействий

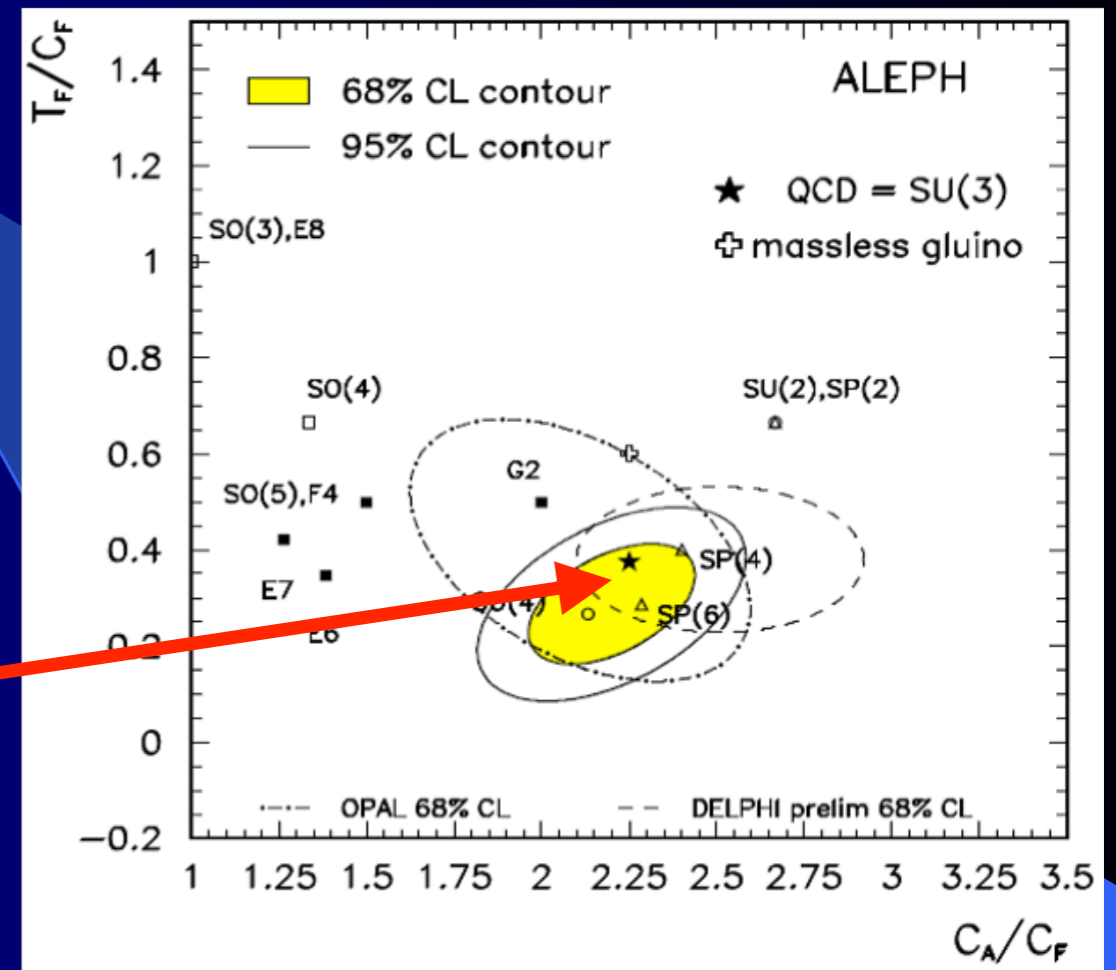


$$\sum_{a=1}^{N_A} (T^a T^{\dagger a})_{ij} = \delta_{ij} C_F \quad , \quad \sum_{i,j=1}^{N_F} T_{ij}^a T_{ji}^{\dagger b} = \delta^{ab} T_F \quad , \quad \sum_{a,b=1}^{N_A} f^{abc} f^{*abd} = \delta^{cd} C_A$$

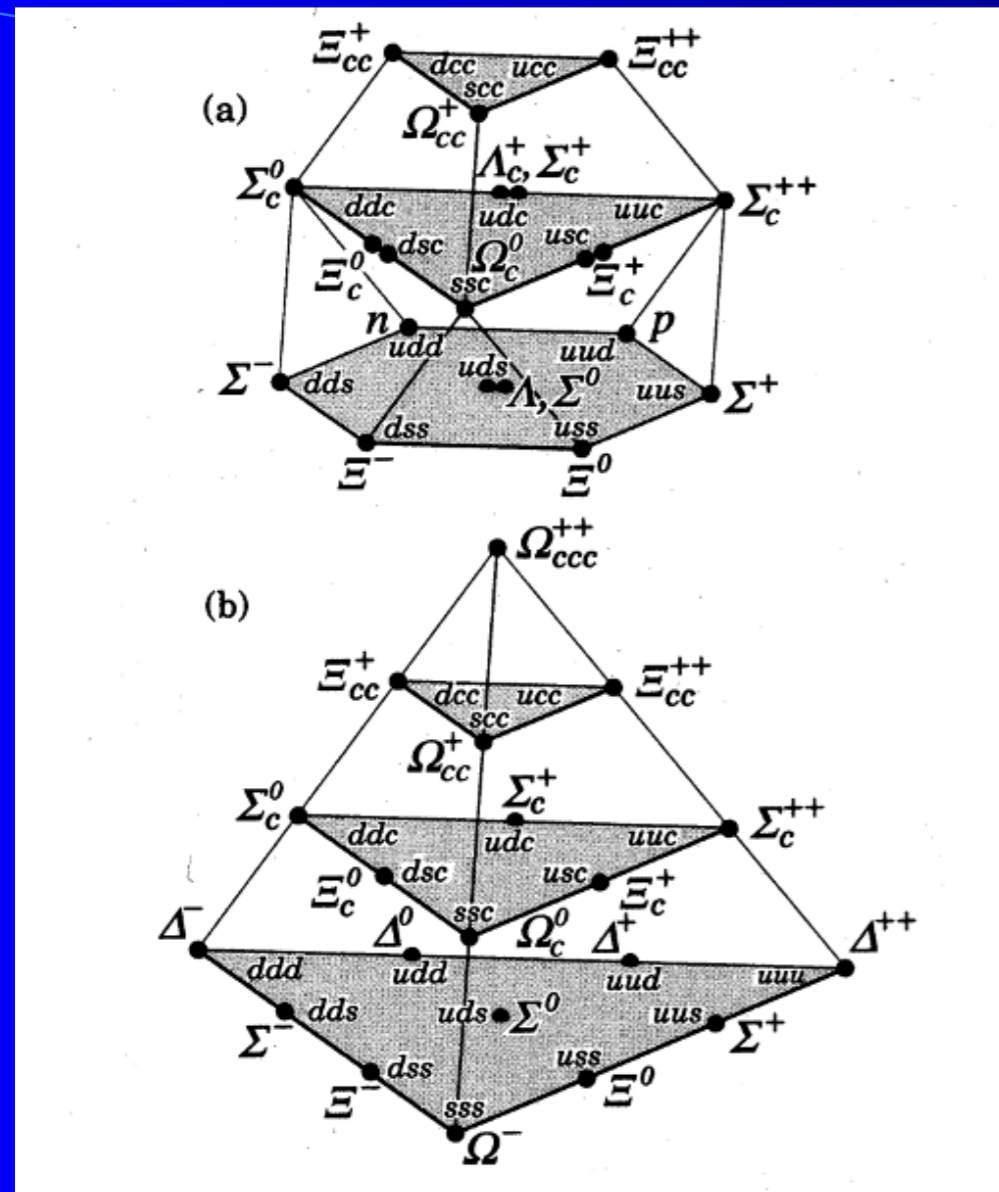
For SU(N)

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

КХД анализ определённо указывает на группу SU(3) как группу симметрии сильных взаимодействий



Адроны построенные из кварков



- Постулат конфайнмента: кварки и глюоны не могут наблюдаться в свободном состоянии, наблюдаются только «бесцветные» объекты
- Бесцветные объекты бывают следующих типов:

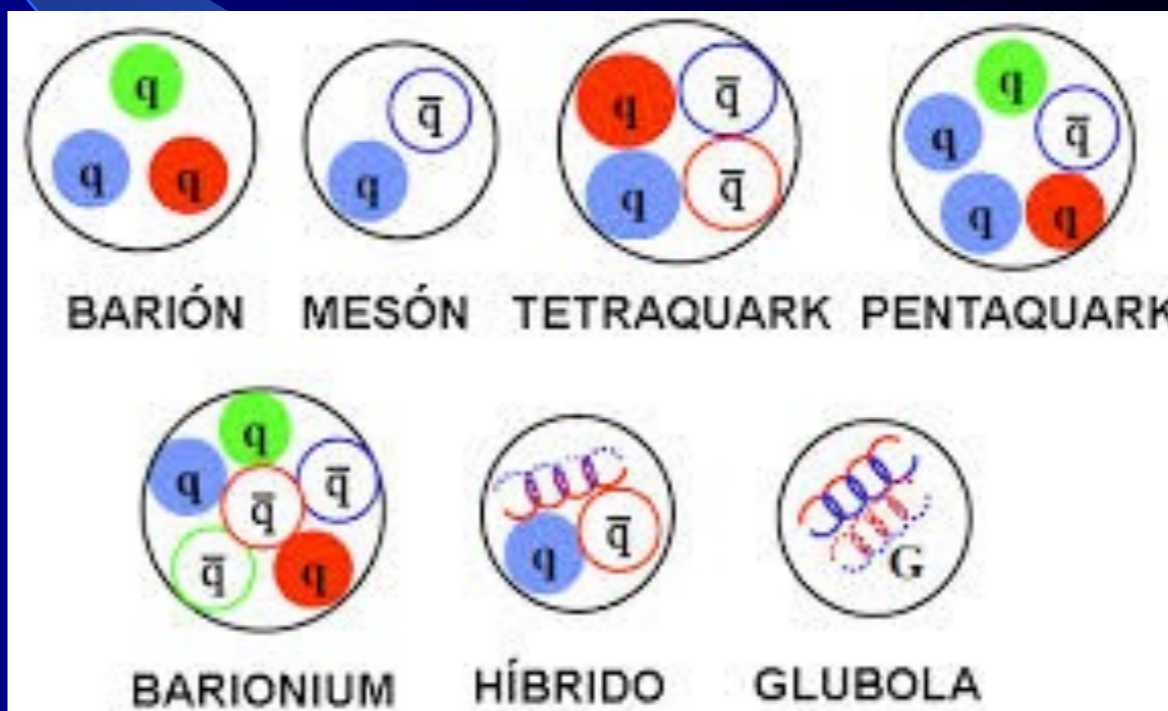
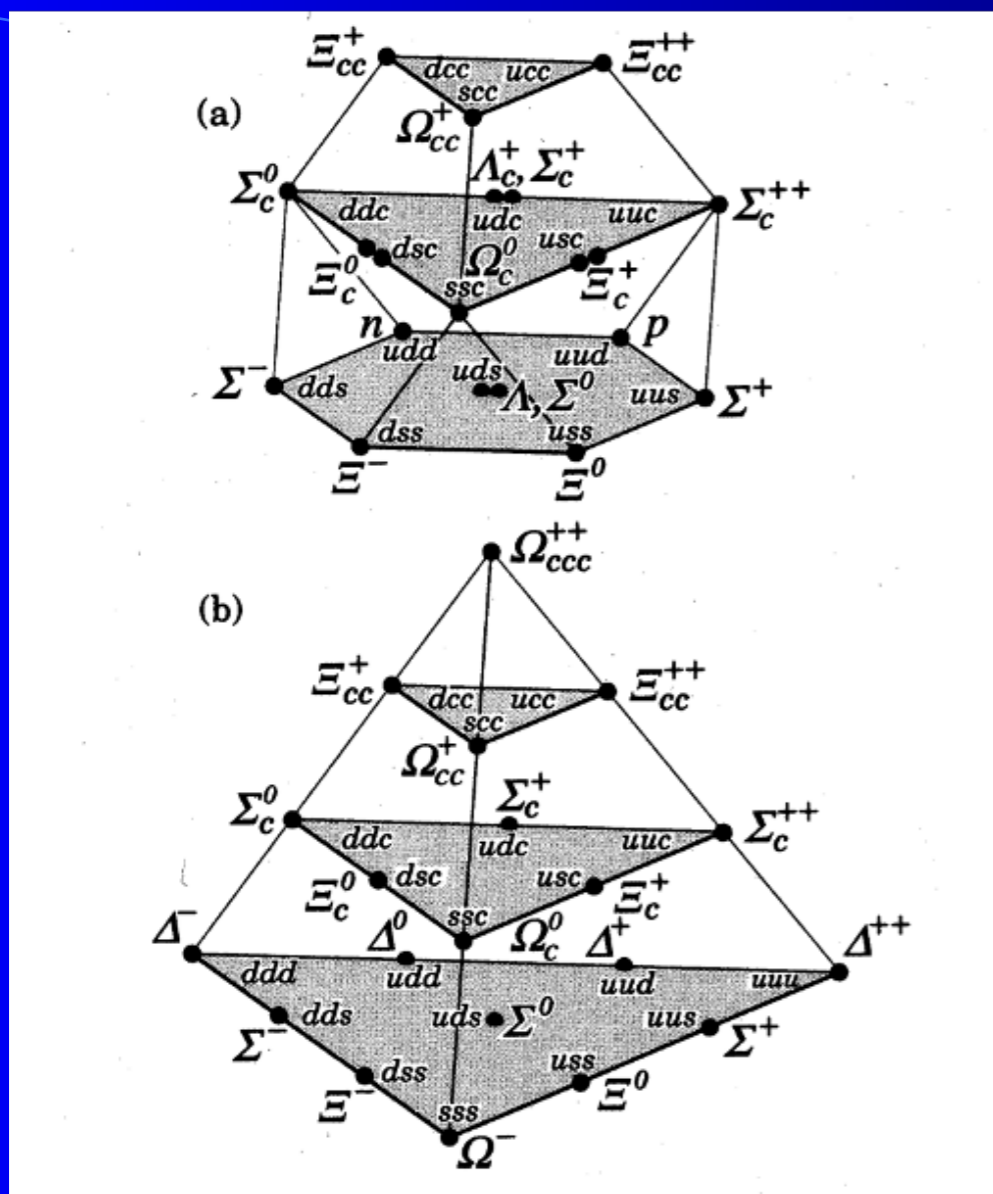
мезоны : $M = \bar{q}q$ барионы $B = qqq$

Адроны построенные из кварков

- Постулат конфайнмента: кварки и глюоны не могут наблюдаться в свободном состоянии, наблюдаются только «бесцветные» объекты
- Бесцветные объекты бывают следующих типов:

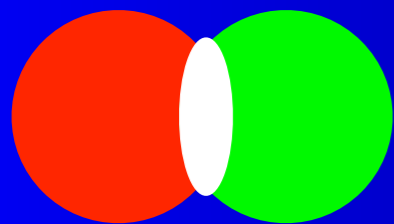
мезоны : $M = \bar{q}q$ барионы $B = qqq$

экзотические адроны



Гипотеза невылетания кварков

Кварки удерживаются внутри адронов за счёт глюонов, образующих струны натянутые между кварками



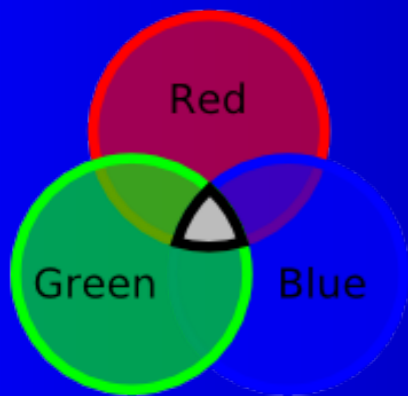
мезон



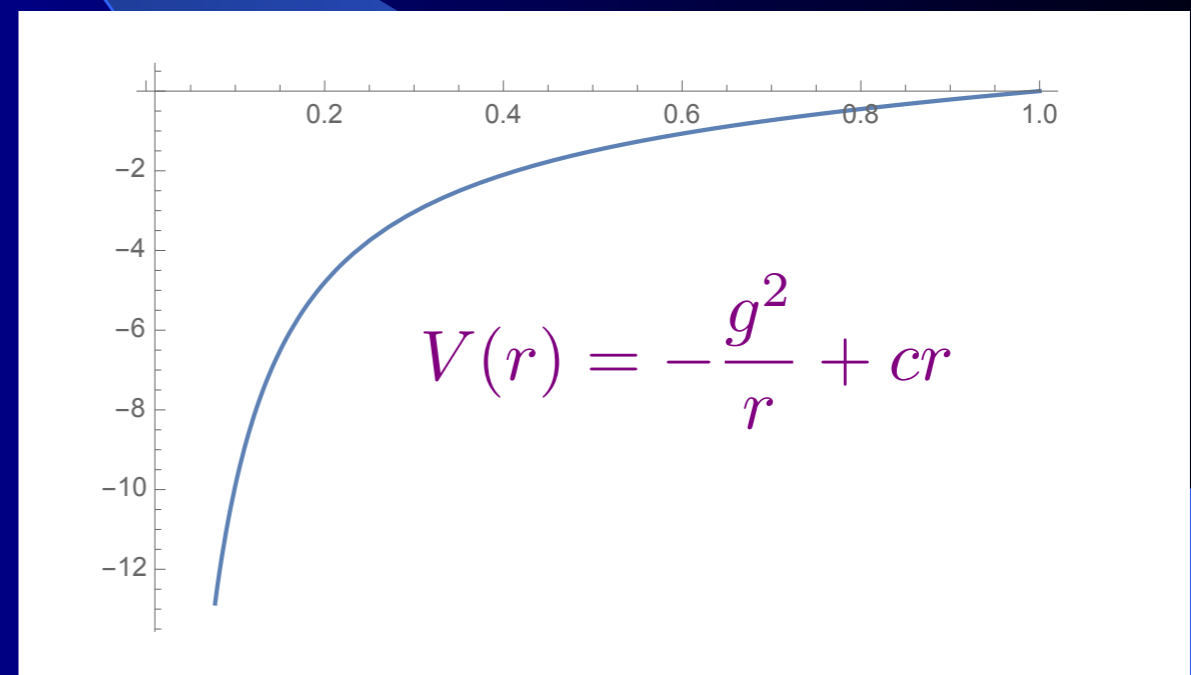
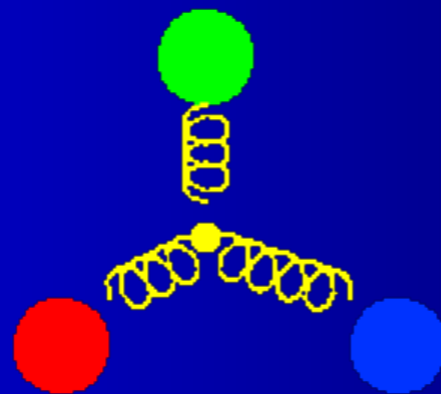
Разрыв струны



Образование новых кварков

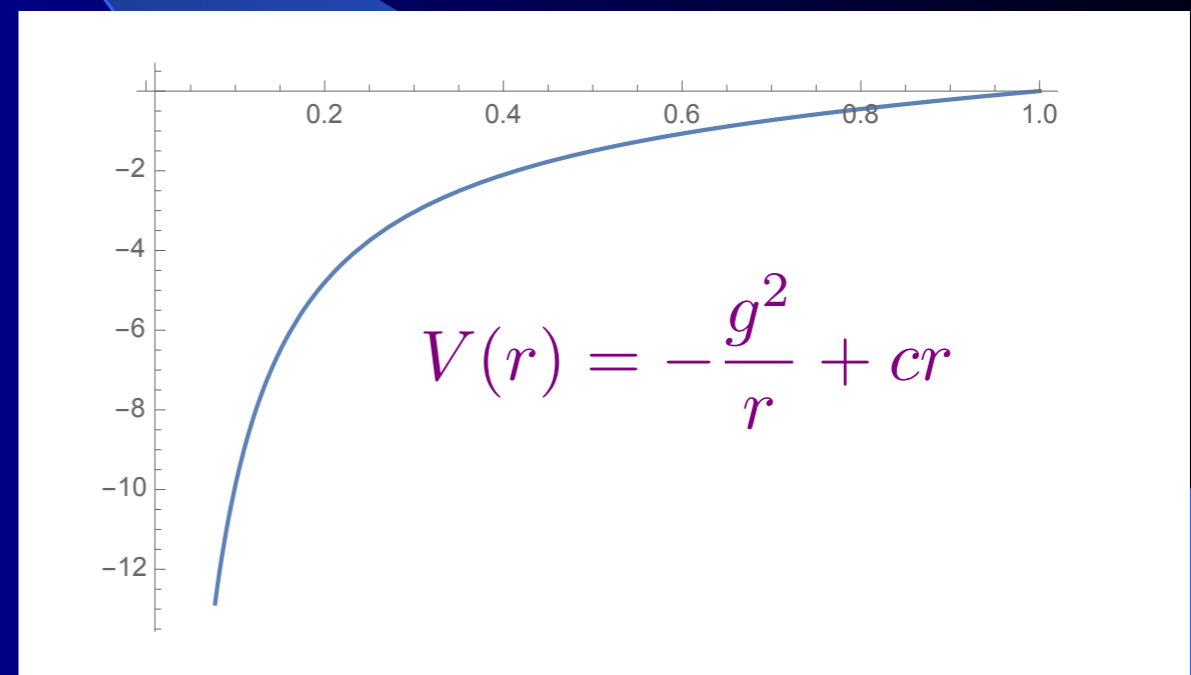
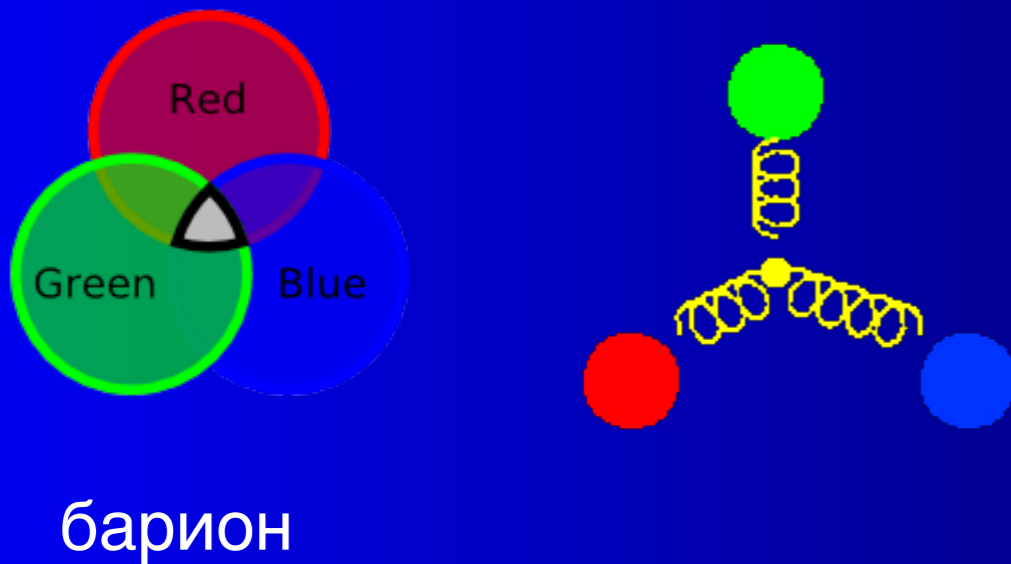
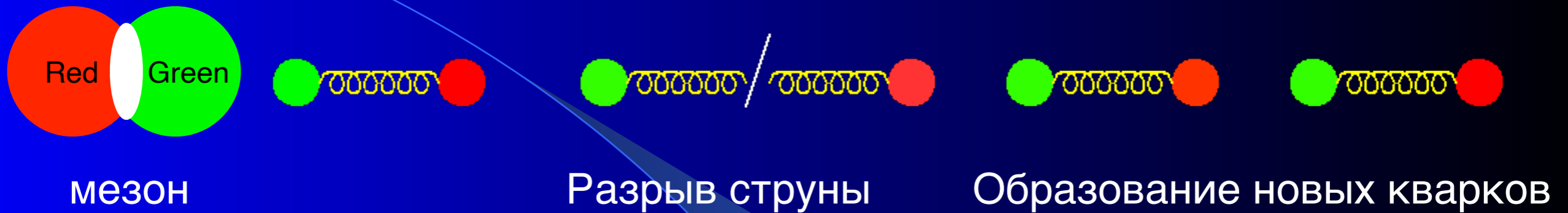


барион



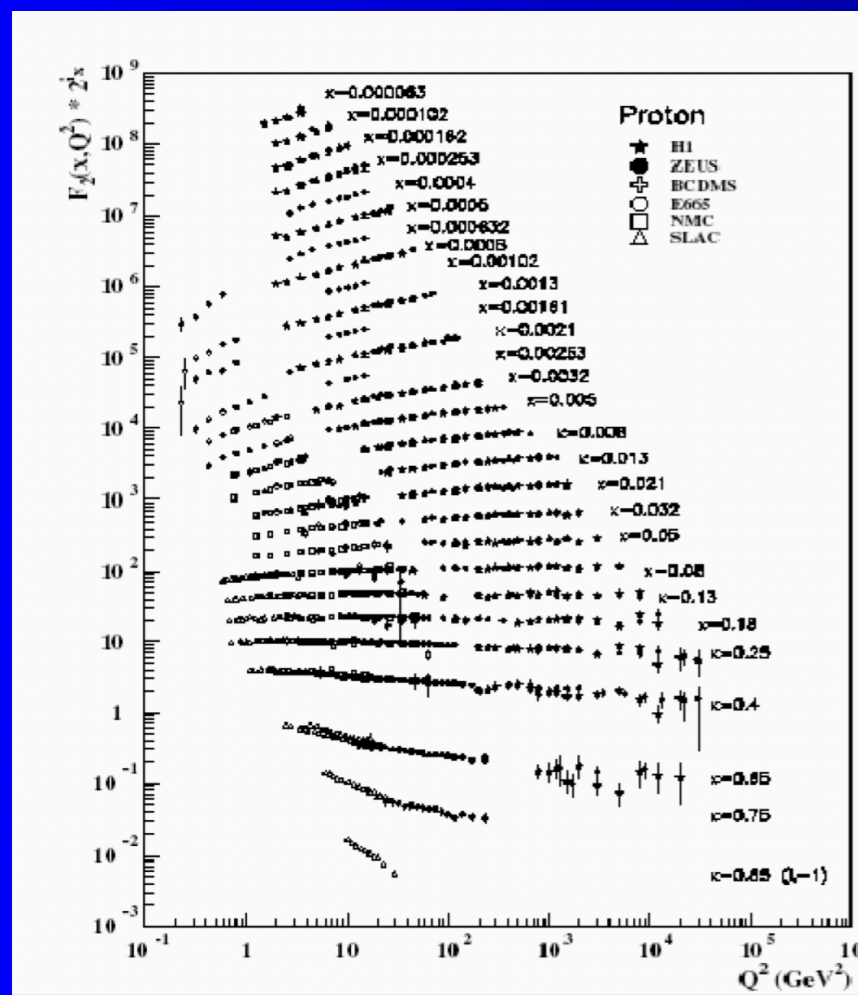
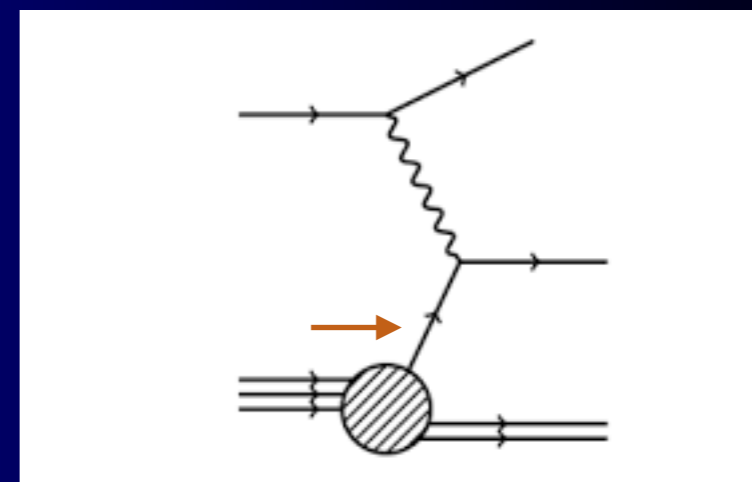
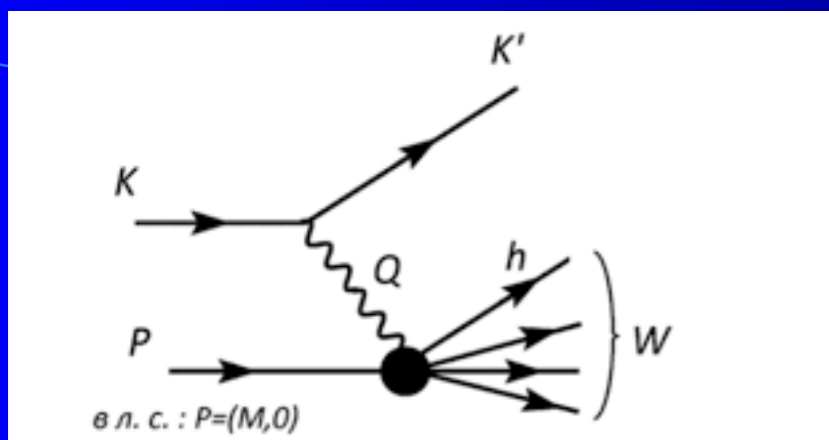
Гипотеза невылетания кварков

Кварки удерживаются внутри адронов за счёт глюонов, образующих струны натянутые между кварками

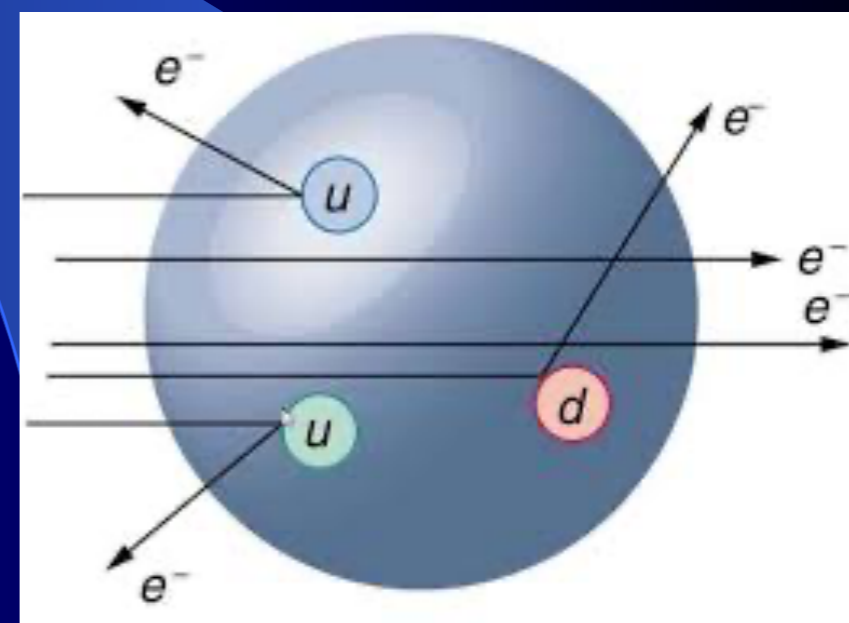


Рассеяние электронов на протонах

Партонная модель

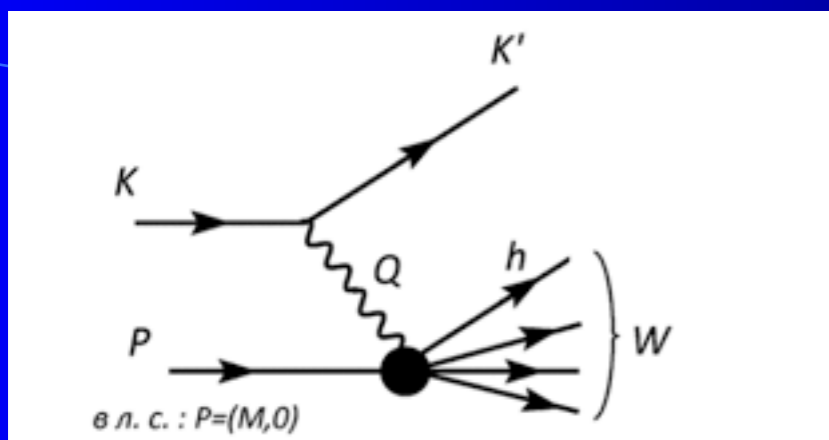


$$x = \frac{Q^2}{W^2}$$

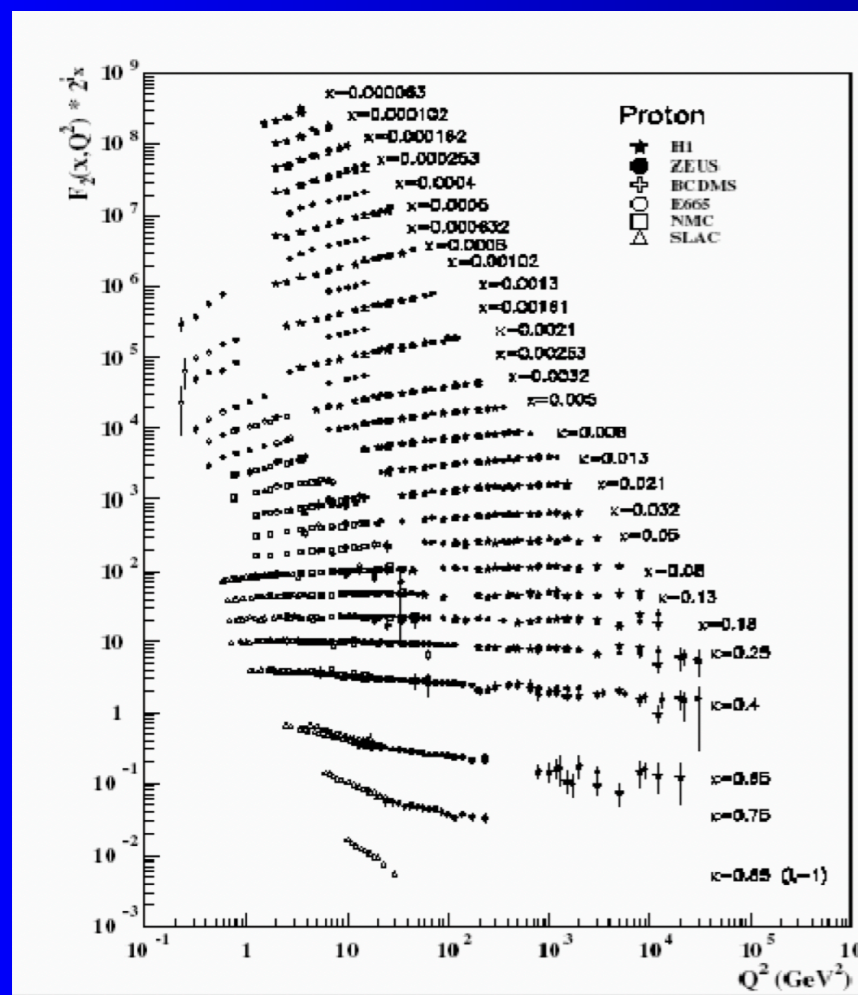
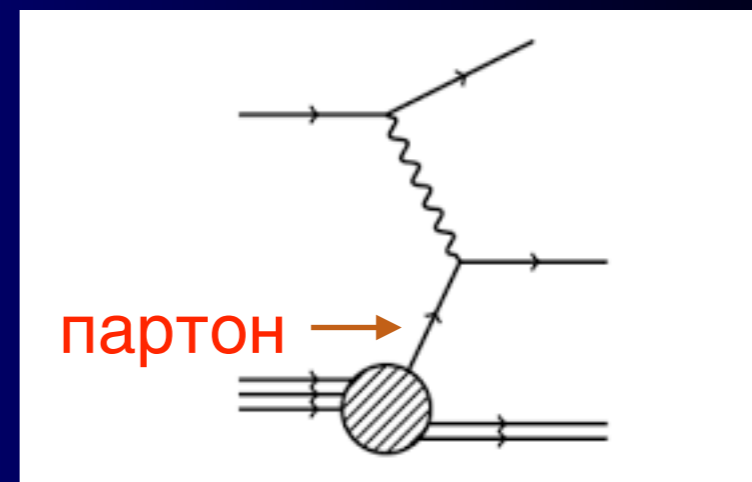


Рассеяние электронов на протонах

Партонная модель



Q - импульс переданный от электрона протону

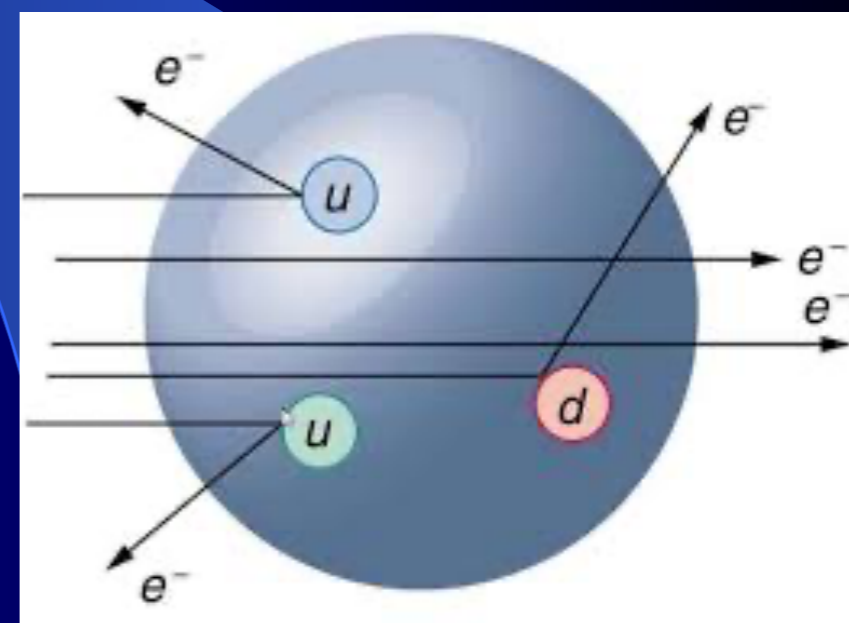


W - полная энергия рождённых адронов

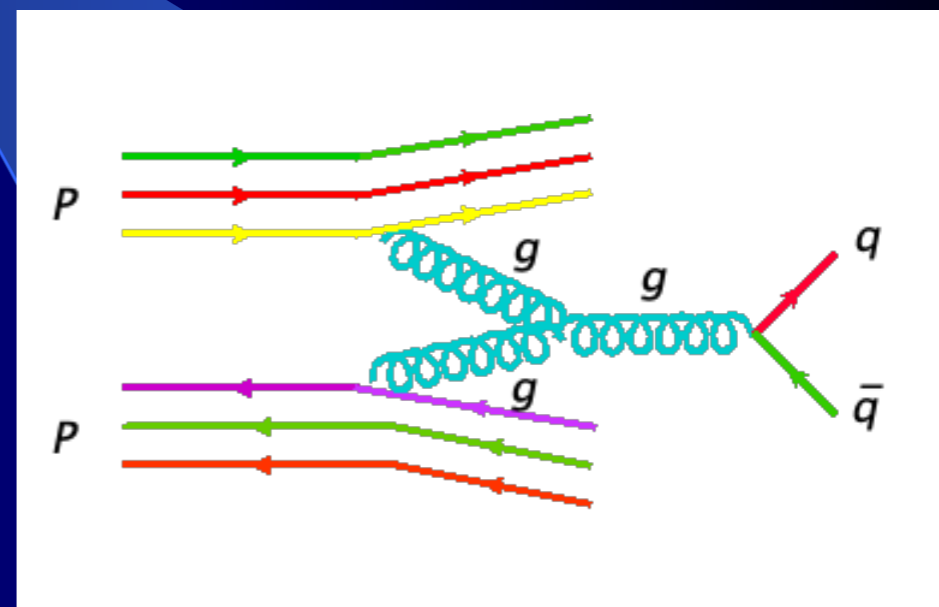
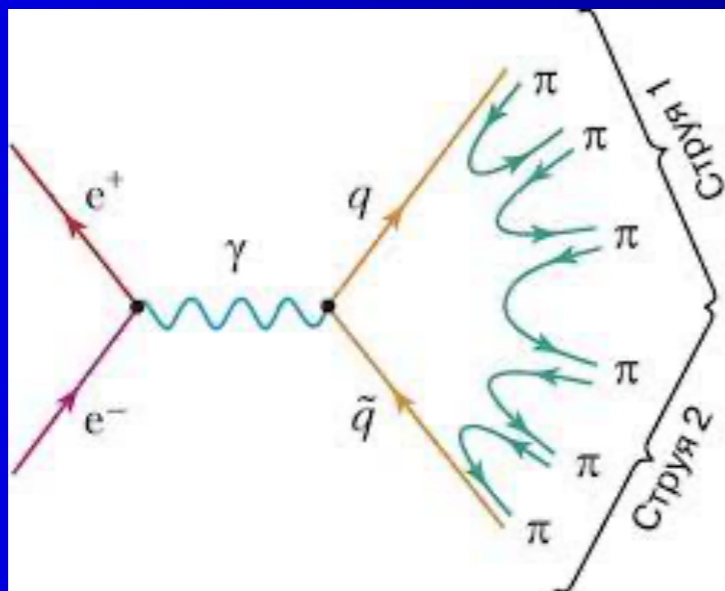
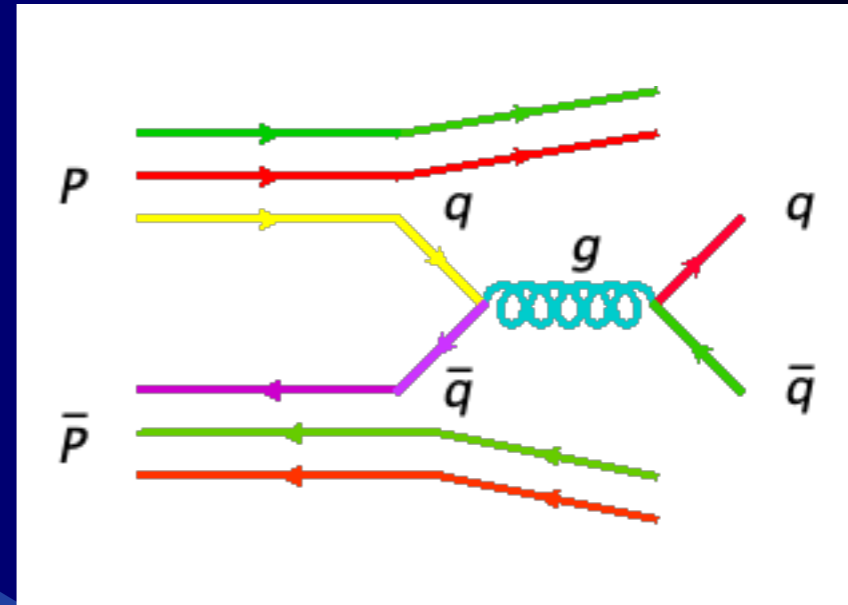
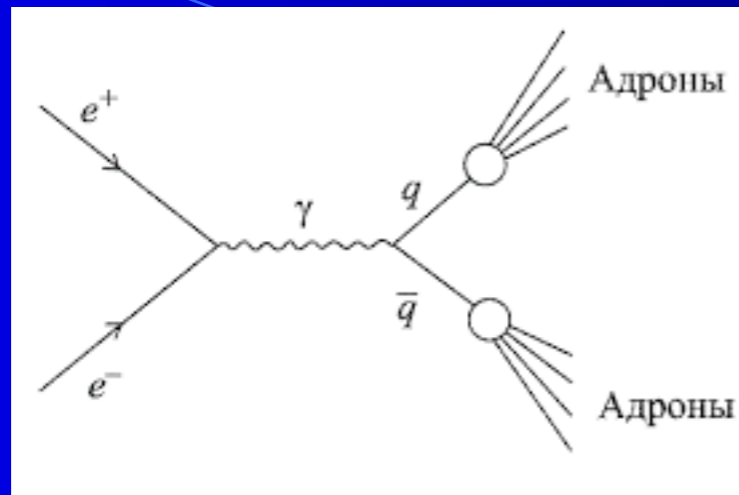
Отждествление партон с кварками

$$x = \frac{Q^2}{W^2}$$

скейлинг

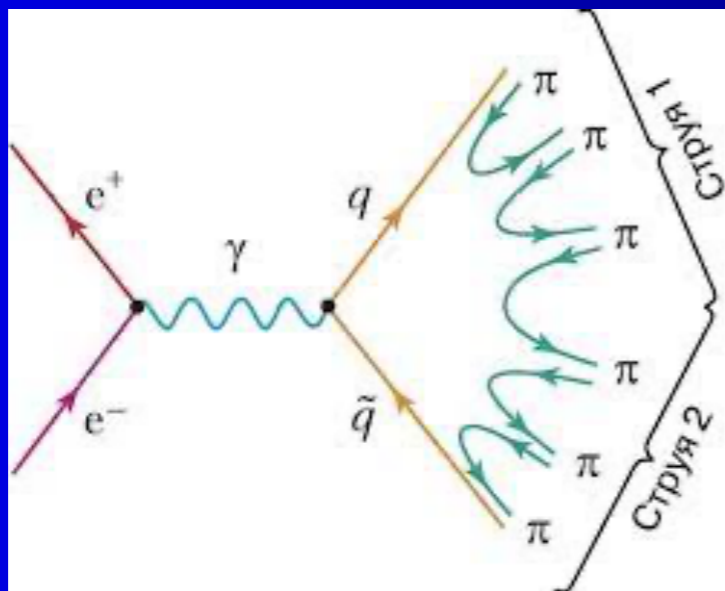
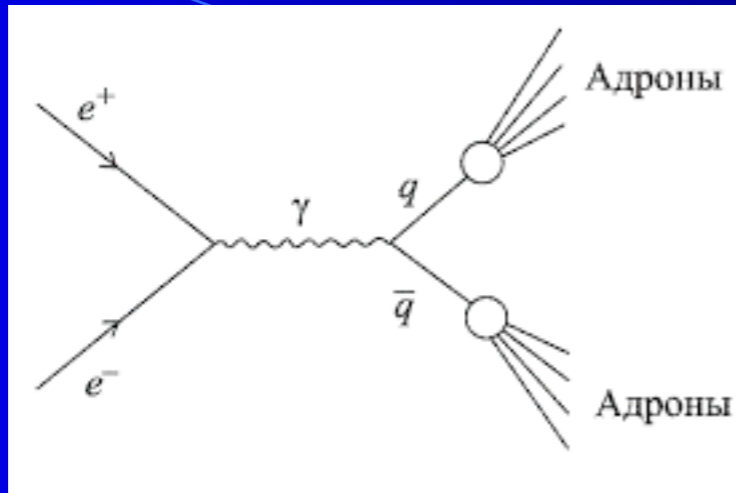


Рождение адронов на коллайдерах



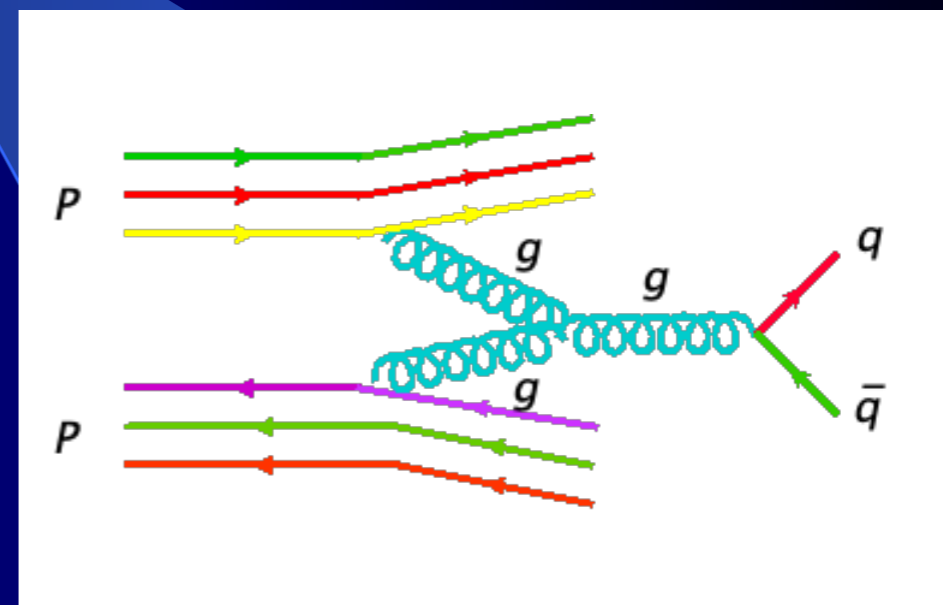
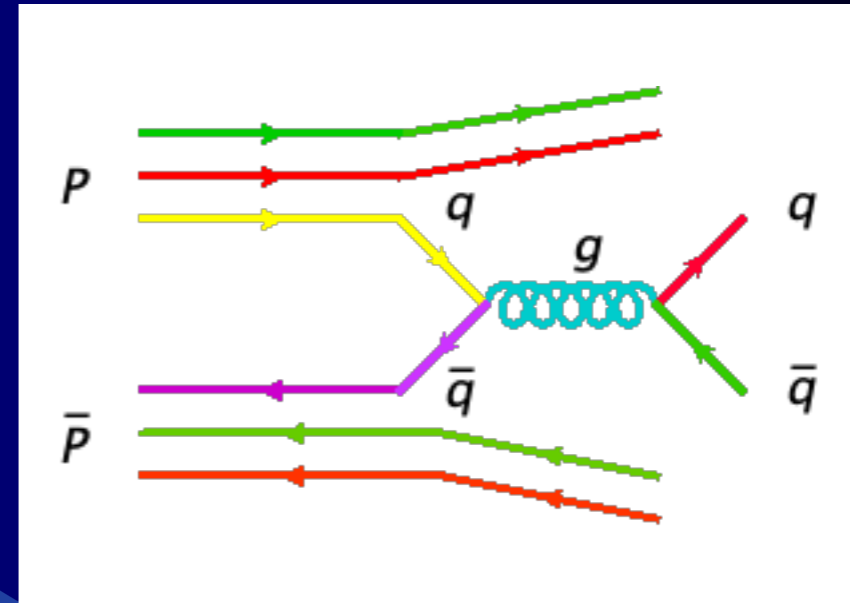
Рождение адронов на коллайдерах

Электрон-позитронный коллайдер



Адроны образуют струи вдоль направлений рождённых кварков

Протонный коллайдер



Кварковые подпроцессы

Большой адронный коллайдер

