

Микромир и Вселенная 2019

Взаимодействие кварков

Распады адронов

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

u c t

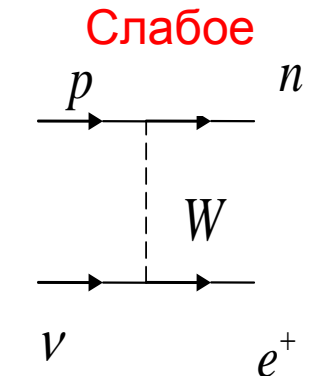
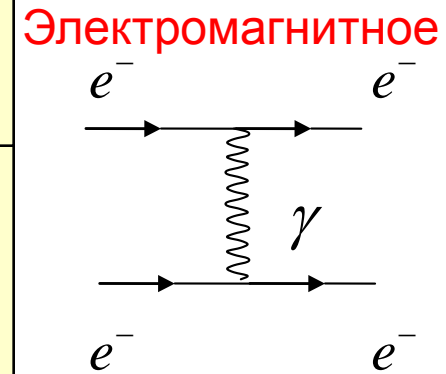
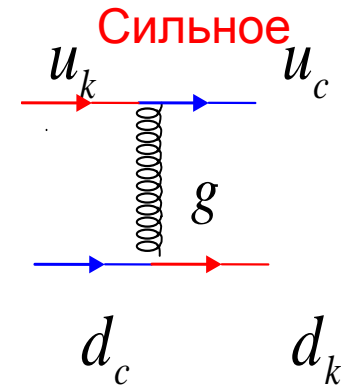
d s b

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

H - бозон Хиггса

Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

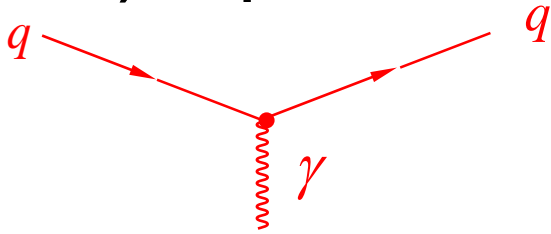
Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин $J = 1$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин $J = 1$
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны W^{\pm}, Z	Массивные бозоны W^+, W^-, Z , спин $J = 1$, $m_W c^2 \approx 80 \text{ ГэВ}$, $m_Z c^2 \approx 91 \text{ ГэВ}$
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин $J = 2$



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

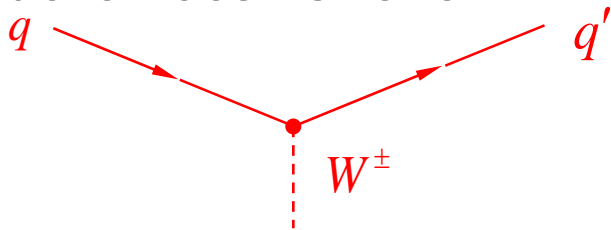
Взаимодействие кварков

Кварки участвуют в электромагнитных взаимодействиях, излучая или поглощая γ -квант, при этом не изменяется ни цвет, ни тип (аромат) кварков:



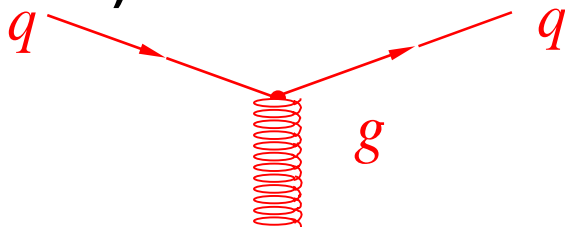
Вершина электромагнитного взаимодействия кварков

Кварки участвуют в слабых взаимодействиях излучая или поглощая W^\pm бозоны, при этом изменяется тип (аромат) кварка, цвет кварка остаётся без изменения



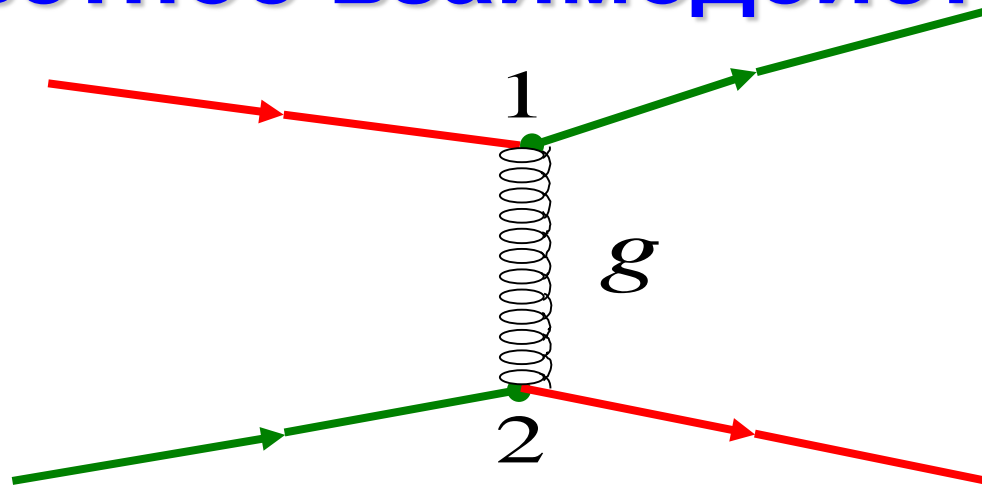
Вершина слабого взаимодействия кварков

Кварки участвуют в сильных взаимодействиях излучая или поглощая глюон, при этом изменяется цвет кварка, но его тип (аромат) остаётся неизменным



Вершина сильного взаимодействия кварков

Цветное взаимодействие



Глюоны – безмассовые электрически нейтральные частицы со спином $J = 1$, четностью $P = -1$, переносят сильное, т. е. цветное взаимодействие между кварками.

Они как бы склеивают кварки в адронах (название глюона происходит от англ. *glue* – клей).

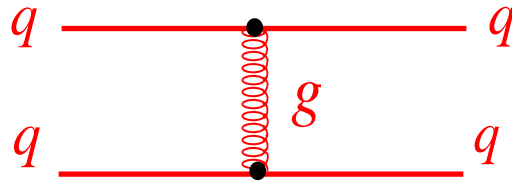
При испускании или поглощении глюона кварки изменяют цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются.

Глюоны обладают цветом. Цветовая структура глюона отличается от цветовой структуры кварка.

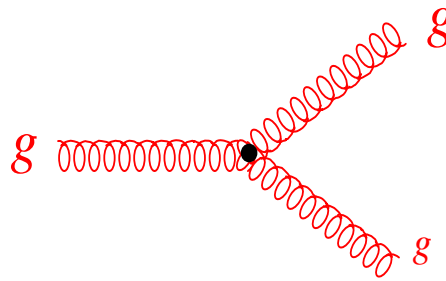
$$J^P (g) = 1^-$$

Глюоны – переносчики сильного взаимодействия

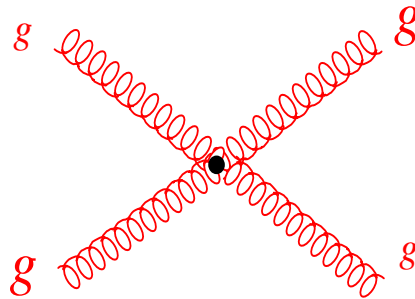
Глюоны в отличие от фотонов обладают цветом, поэтому для них наряду с одноглюонным обменом



возможны процессы испускания глюона глюоном



и взаимодействия двух глюонов.

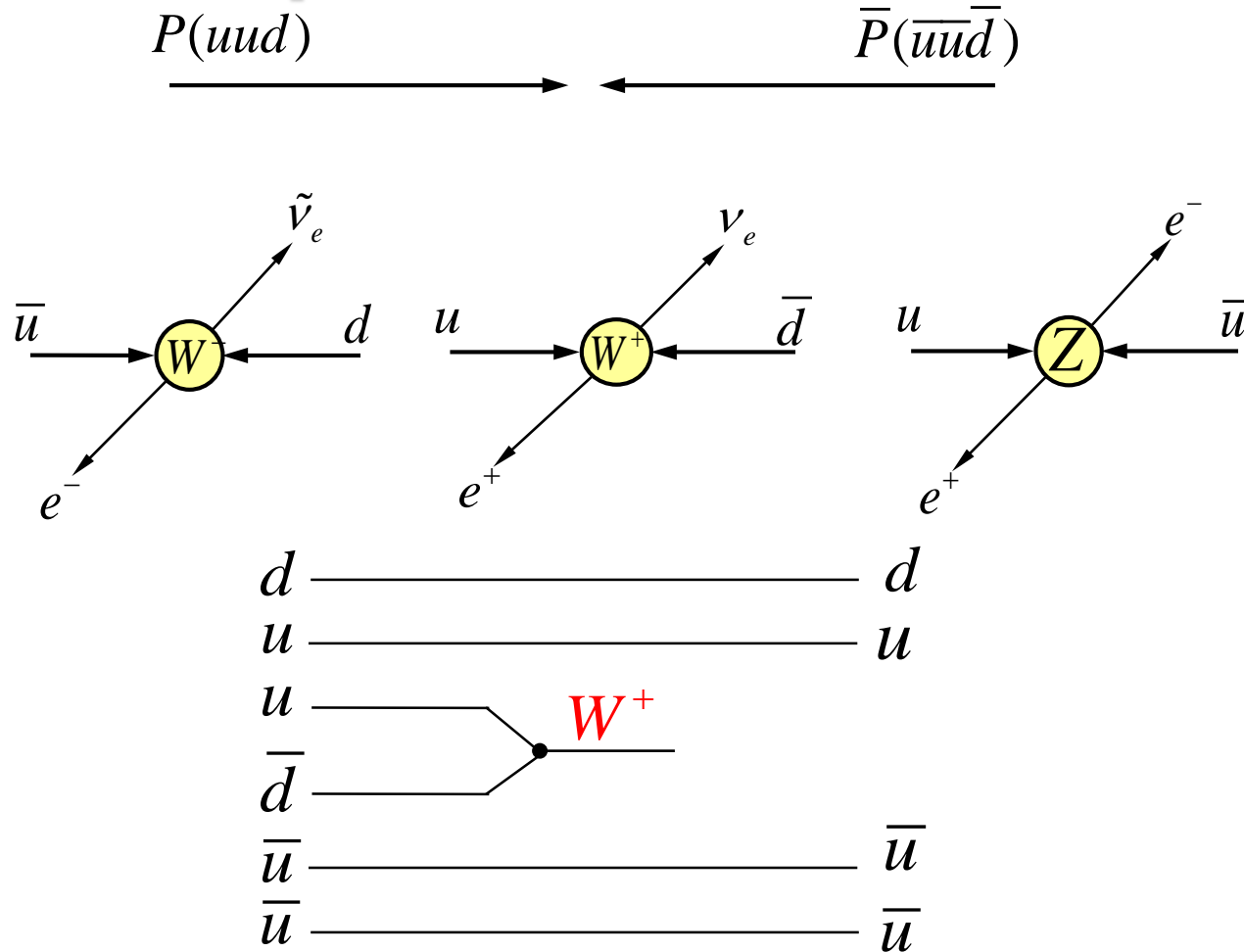


Взаимодействие глюонов ответственно за удержание кварков внутри адрона. В отличие от константы электромагнитного взаимодействия, константа сильного цветного взаимодействия растёт с увеличением расстояния между кварками, что приводит к принципиально новому поведению системы кварков и глюонов. При увеличении расстояния между кварками и глюонами их энергия взаимодействия растёт. В результате свободные кварки и глюоны в природе не наблюдаются. Они «заперты» внутри бесцветных адронов. Это явление носит название **конфайнмента**.

W^+ , W^- , Z - бозоны

Переносчиками слабого взаимодействия являются W^+ , W^- , Z бозоны которые называют промежуточными бозонами. Бозоны W и Z были предсказаны теоретически задолго до их экспериментального обнаружения как «промежуточные» частицы, переносящие слабое взаимодействие. Слабое взаимодействие, также как и электромагнитное, передается частицами со спином $J = 1$. Однако, в отличие от переносчика электромагнитного взаимодействия — фотона, W^+ , W^- бозоны являются заряженными частицами. Z -бозон, также как и фотон, не имеет электрического заряда.

Регистрация Z и W± бозонов



Нобелевская премия по физике

1984 г. – К. Руббиа, С. Ван дер Меер.

За решающий вклад в большой проект, который привел к открытию полевых частиц W и Z, переносчиков слабого взаимодействия

W бозон

Заряд

$$Q = \pm 1e$$

Спин

$$J = 1$$

Масса

$$m = 80.419 \pm 0.056 \text{ ГэВ}$$

$$m_{W^+} - m_{W^-} = 0.2 \pm 0.6 \text{ ГэВ}$$

$$m_Z - m_W = 10.76 \pm 0.05 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$$

$$\langle N \rangle = 19.3 \pm 0.4$$

Полная ширина

Среднее число

заряженных частиц

Каналы распада

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e \quad (10.66 \pm 0.20)\%$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad (10.49 \pm 0.29)\%$$

$$W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau \quad (10.4 \pm 0.4)\%$$

$$W^+ \rightarrow \text{адроны} \quad (68.5 \pm 0.6)\%$$

Z бозон

Заряд

$$Q = 0$$

Спин

$$J = 1$$

Масса

$$m = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ ГэВ}$$

Полная ширина

$$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma(\text{адроны}) = 1.7444 \pm 0.002 \text{ ГэВ}$$

$$\Gamma(e^+e^-) = 84.00057 \text{ МэВ}$$

$$\frac{\Gamma(\mu^+\mu^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 0.9999 \pm 0.0032$$

$$\frac{\Gamma(\tau^+\tau^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 1.0012 \pm 0.0036$$

$$\Gamma(\text{inv}) = 499.0 \pm 1.5 \text{ МэВ}$$

$$\langle N \rangle = 21.07 \pm 0.11$$

Среднее число заряженных частиц

Каналы распада

$$Z \rightarrow e^+e^- \quad (3.367 \pm 0.005)\%$$

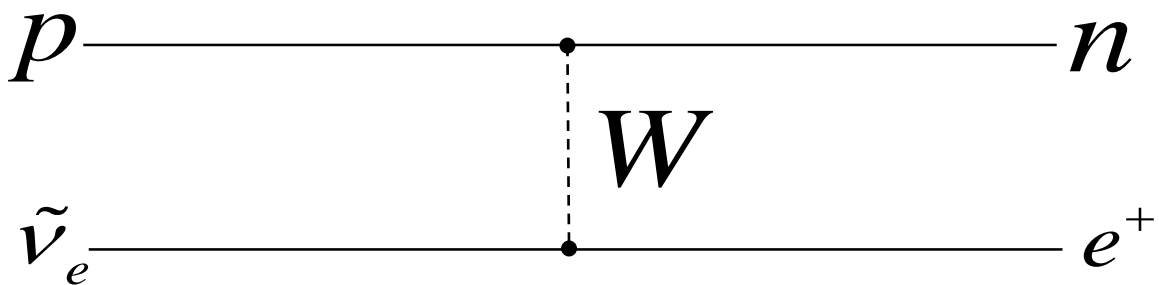
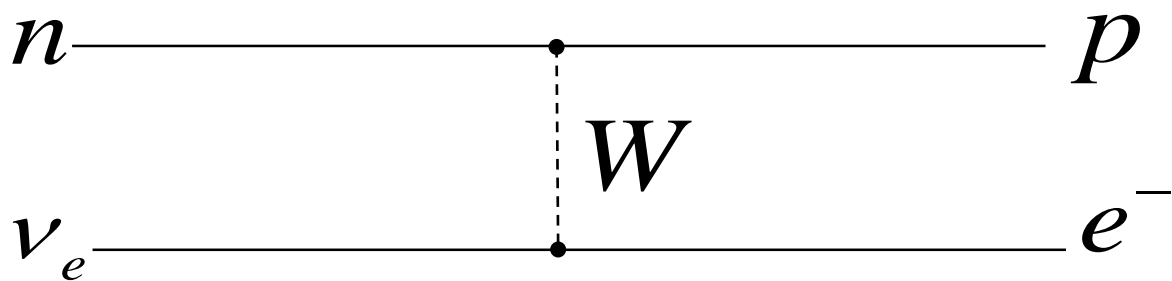
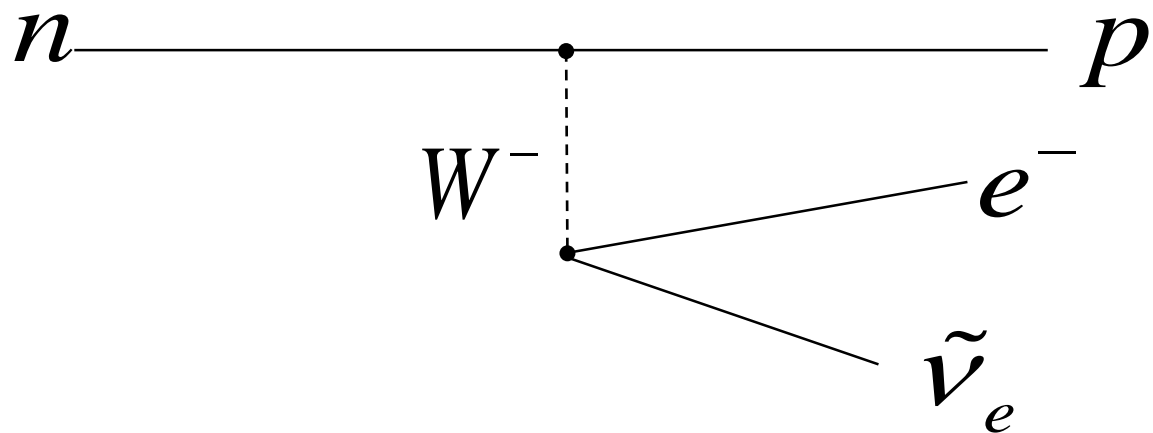
$$Z \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (3.367 \pm 0.008)\%$$

$$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \quad (3.371 \pm 0.009)\%$$

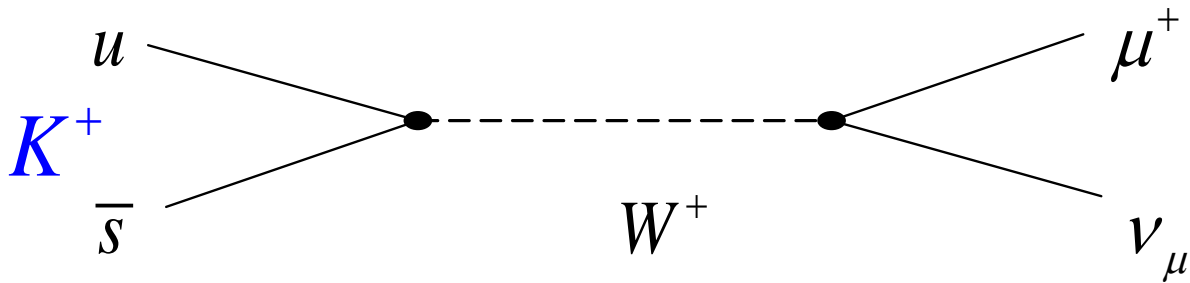
$$Z \rightarrow \text{inv} \quad (20.02 \pm 0.006)\%$$

$$Z \rightarrow \text{адроны} \quad (69.84 \pm 0.07)\%$$

Распад нейтрона



Пример

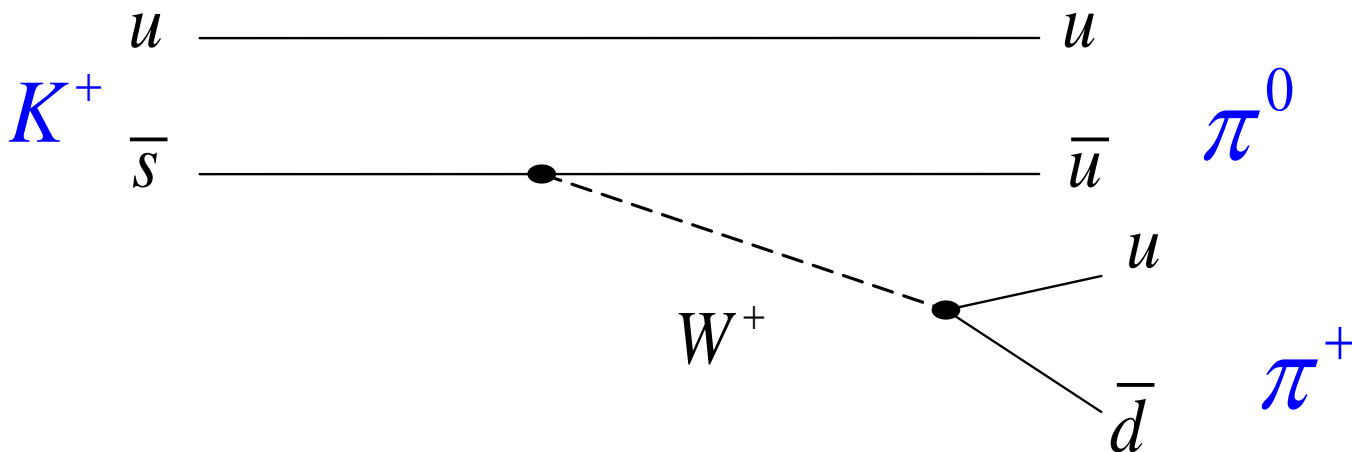
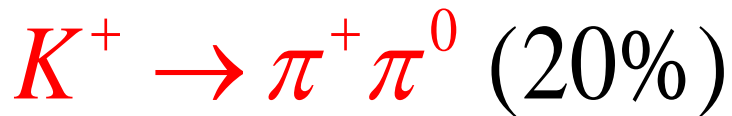


$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^+) = 105,6 \text{ МэВ}$$

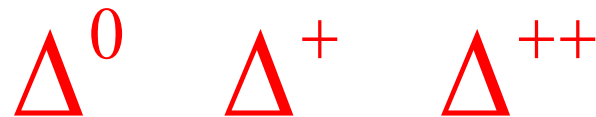
$$M(\pi^+) = 139,6 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

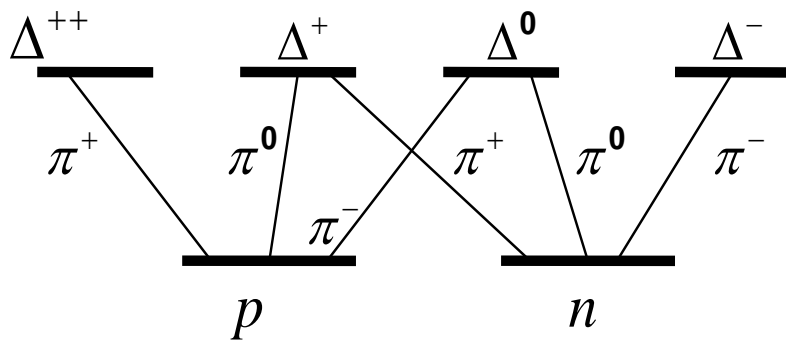
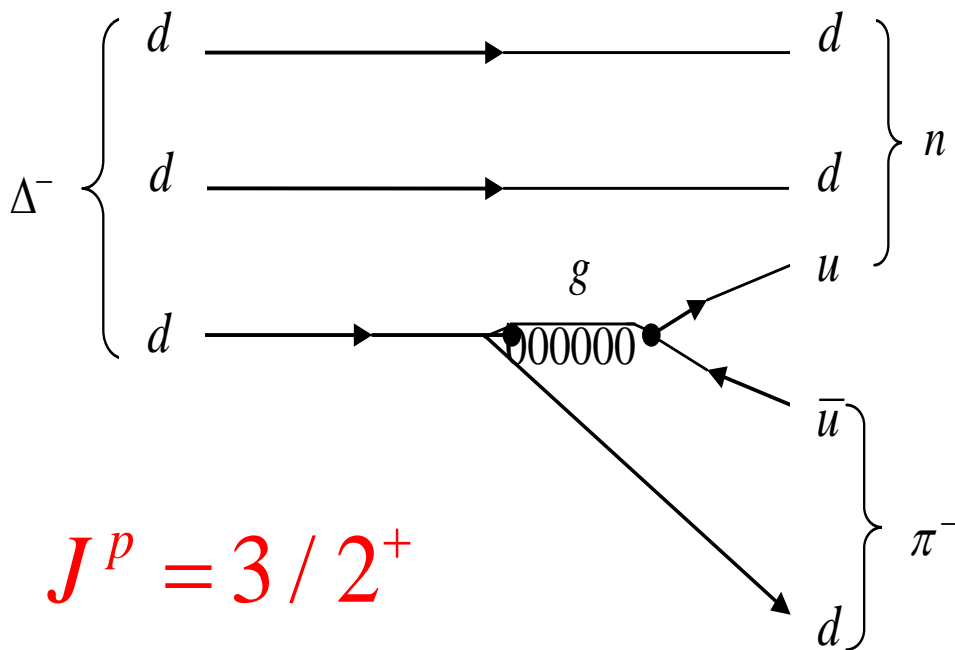


Сильные распады адронов

Все адроны за исключением протона являются *нестабильными частицами* и характеризуются способом распада и средним временем жизни τ . Определяющим для скорости распада является фундаментальное взаимодействие, ответственное за распад адрона. Быстрее всех – за характерное время $\approx 10^{-23}$ с – происходят распады за счёт сильного взаимодействия.

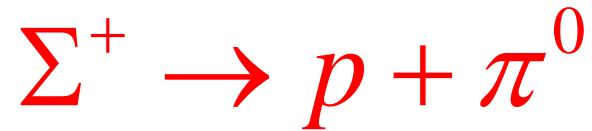
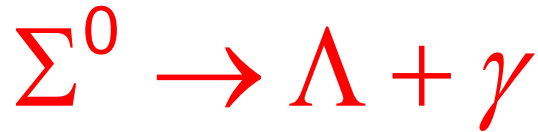


$$M(\Delta) = 1232 \text{ МэВ}$$



Электромагнитные и слабые распады адронов

Следующими по скорости являются распады за счёт электромагнитного взаимодействия. Обычно это время больше 10^{-19} с.

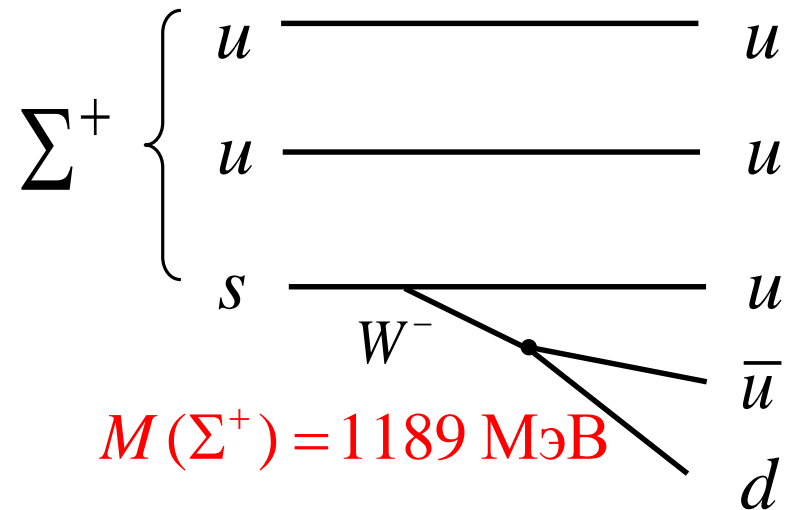
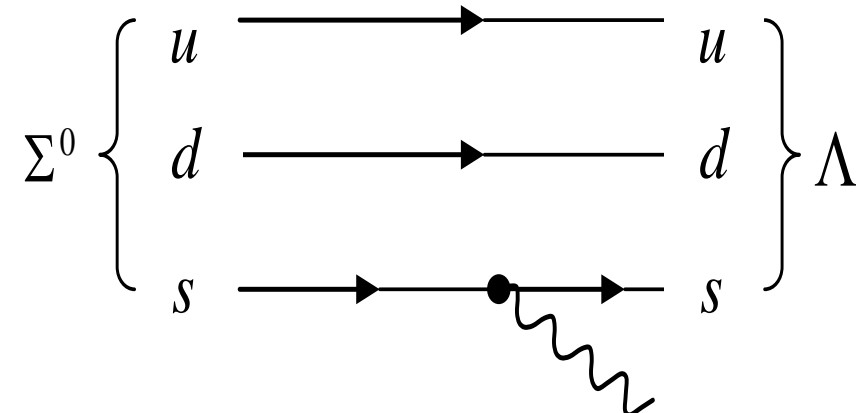


электромагнитный распад

слабый распад

$$\tau = 7,4 \cdot 10^{-20} \text{ с}$$

$$\tau = 0,8 \cdot 10^{-10} \text{ с}$$



$$M(\Sigma^0) = 1193 \text{ МэВ}$$

$$M(\Sigma^+) = 1189 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1116 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

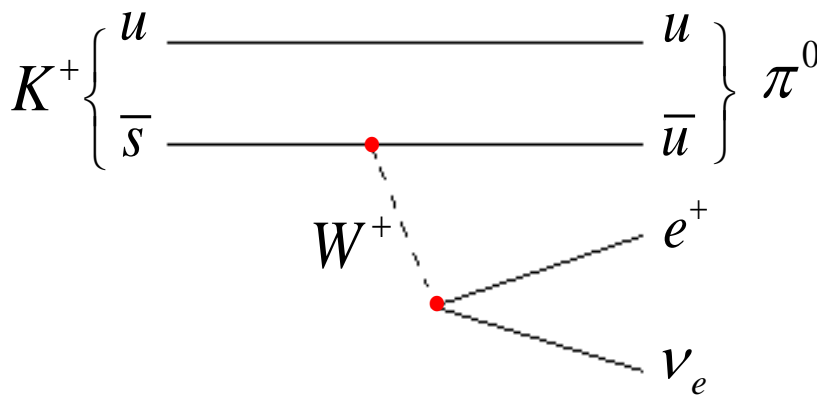
Слабые распады адронов



Распад s-кварка

$$K^+ (u\bar{s}) \rightarrow \pi^0 (u\bar{u}) + e^+ + \nu_e$$

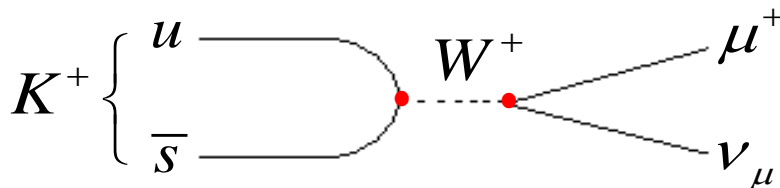
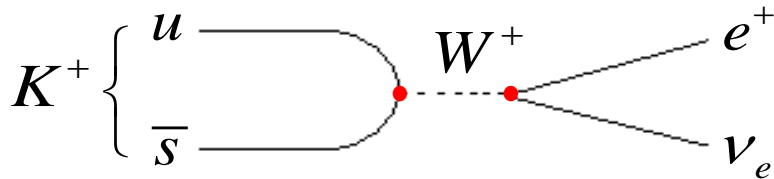
u *c* *t*
d *s* *b*



$$M(K^+) = 4,94 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

$$\tau(K^+) = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$



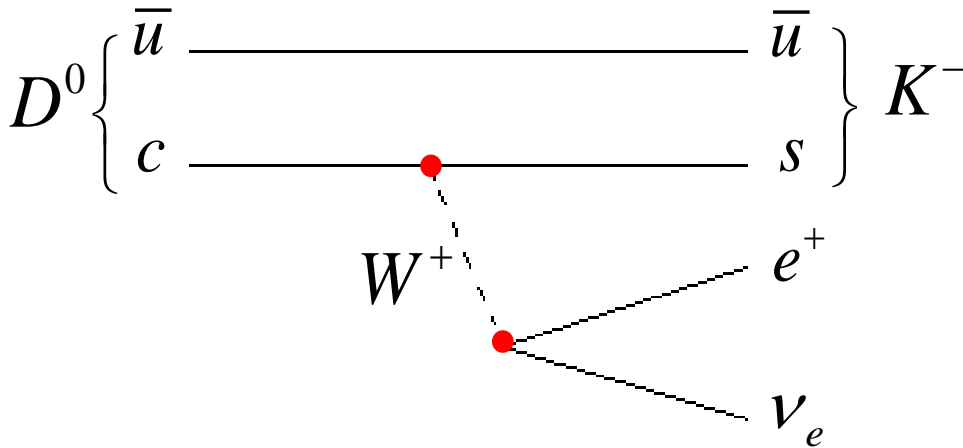
Распад с-кварка

$$M(D^0) = 1864.5 \text{ МэВ}$$

$$\tau(D^0) = 4,1 \cdot 10^{-13} \text{ сек}$$

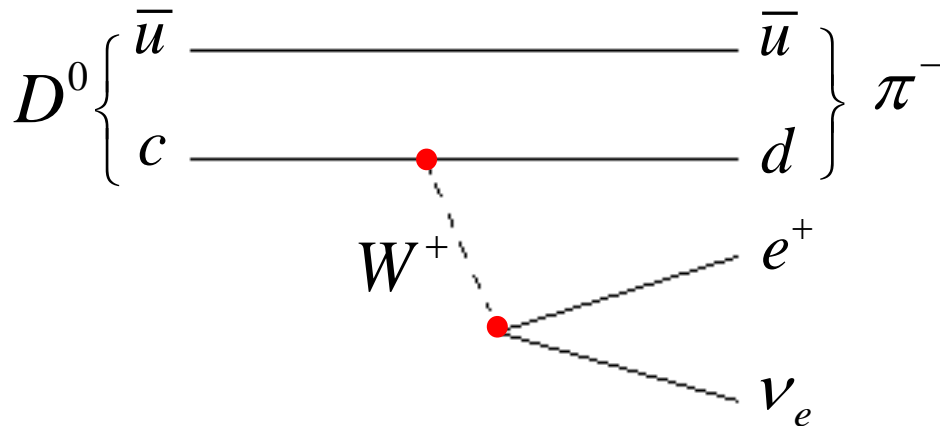
u c t
d s b

$$D^0(c\bar{u})$$



$$D^0 \rightarrow K^- + e^+ + \nu_e$$

$$(3.63 \pm 0.18)\%$$



$$D^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

$$(3.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$$

Распады $c \rightarrow s$ происходят гораздо чаще, чем распады $c \rightarrow d$

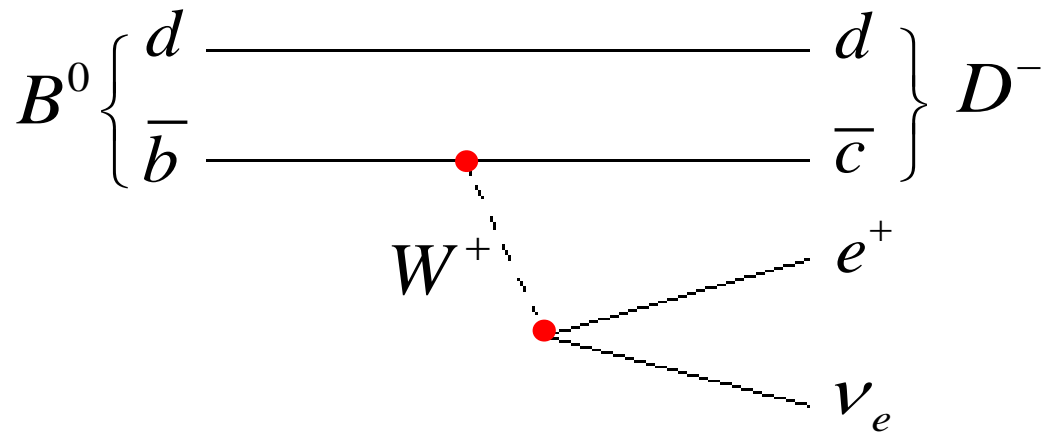
Распад b -кварка

$$M(B^0) = 5279.4 \pm 0.5 \text{ МэВ}$$

$$B^0(d\bar{b})$$

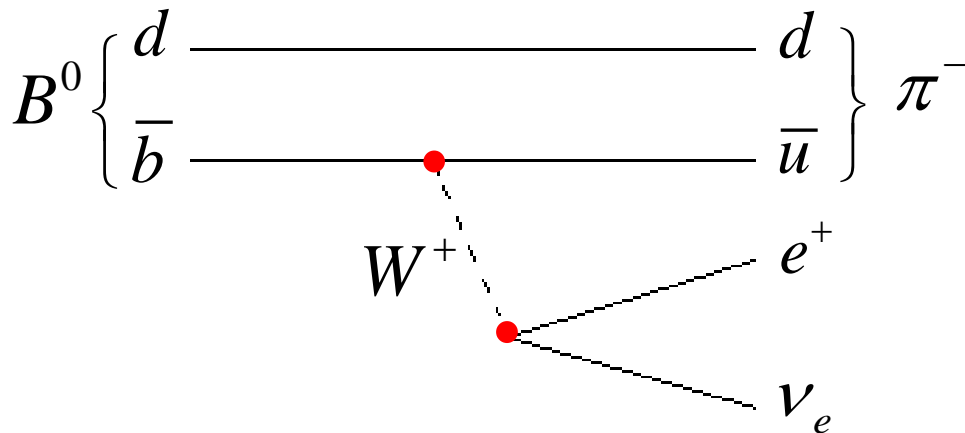
$$\tau(B^0) = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$$

u c t
 d s b



$$B^0 \rightarrow D^- + e^+ + \nu_e$$

$(2.10 \pm 0.19)\%$



$$B^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

$(1.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$

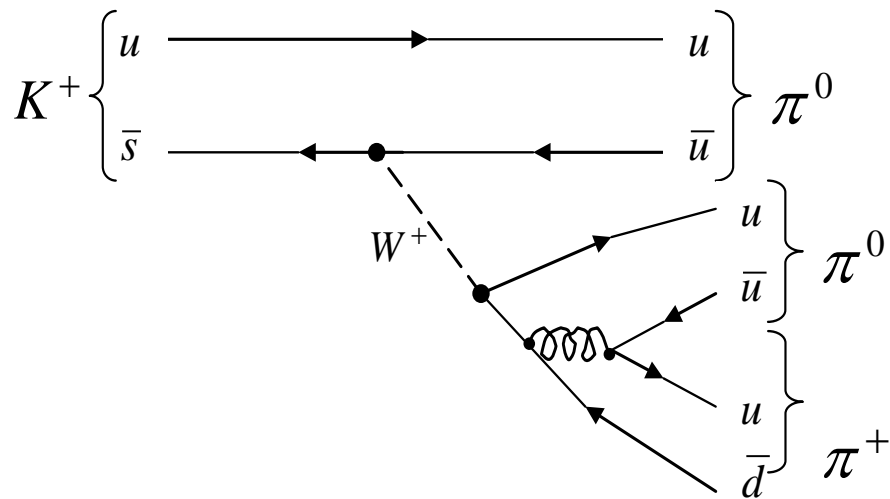
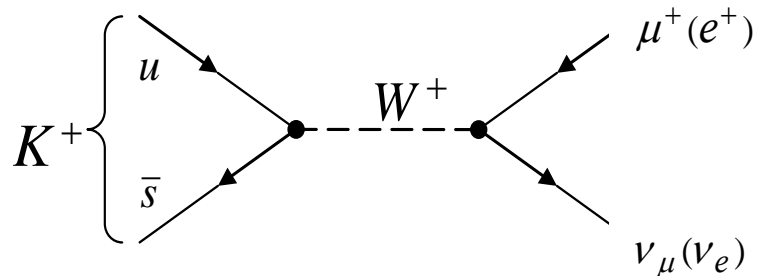
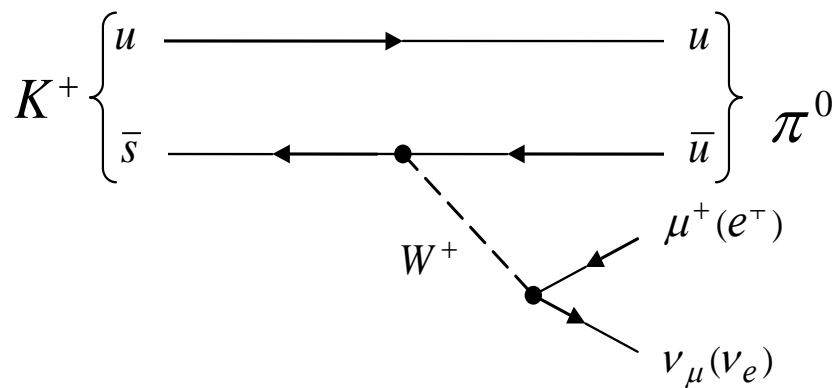
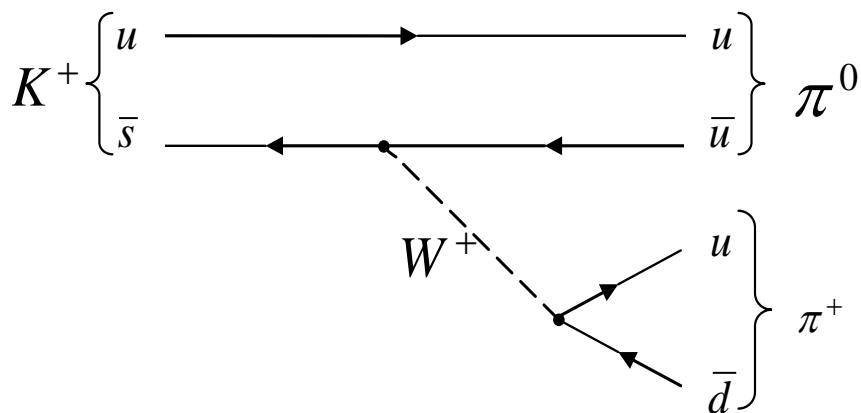
Распады $b \rightarrow c$ происходят гораздо чаще, чем распады $b \rightarrow u$

Распады K^+ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

$$J^P = 0^-$$



Каналы распада	Относительные вероятности
$\mu^+ \nu_\mu$	63.4%
$\pi^+ \pi^0$	21.1%
$\pi^+ \pi^+ \pi^-$	5.6%
$\pi^0 e^+ \nu_e$	4.9%
$\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	3.3%
$\pi^+ \pi^0 \pi^0$	1.7%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$5.5 \cdot 10^{-3}$
$\pi^0 \pi^0 \gamma$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\pi^0 e^+ \nu_e \gamma$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^+ \pi^- \gamma$	$1.0 \cdot 10^{-4}$
$\pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	$4.1 \cdot 10^{-5}$
$\pi^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	$2.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ \nu_e$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
$\pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	$1.4 \cdot 10^{-5}$

Распады K^+ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

$$\tau = 1.2 \times 10^{-8} \text{ с}$$

$$J^P(I) = 0^-(1/2)$$

Распады π – мезонов

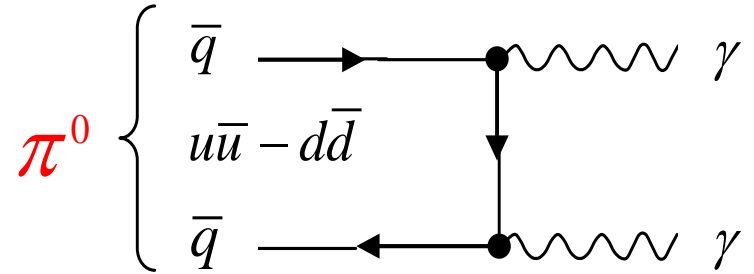
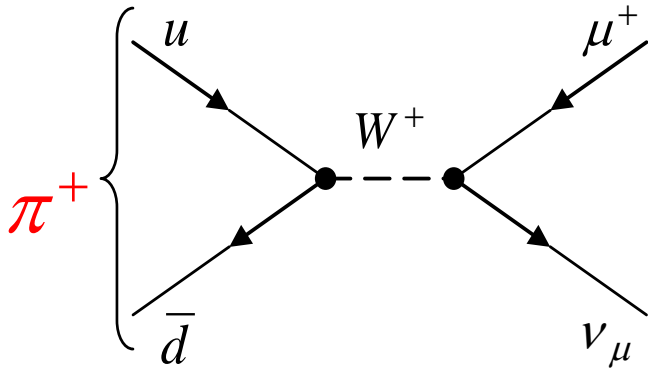
Каналы распада π^+ -мезона ($\tau = 2.6 \cdot 10^{-8}$ с)

Каналы распада	Относительная вероятность
$\mu^+ \nu_\mu$	99.988%
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	$2.0 \cdot 10^{-4}$
$e^+ \nu_e$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
$e^+ \nu_e \gamma$	$1.6 \cdot 10^{-7}$
$e^+ \nu_e \pi^0$	$1.0 \cdot 10^{-8}$
$e^+ \nu_e e^+ e^-$	$3.2 \cdot 10^{-9}$
$e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	$< 5 \cdot 10^{-6}$

Каналы распада π^0 -мезона ($\tau = 0.84 \cdot 10^{-16}$ с)

Каналы распада	Относительная вероятность
2γ	98.80%
$e^+ e^- \gamma$	1.2%
$e^+ e^+ e^- e^-$	$3.1 \cdot 10^{-5}$
$e^+ e^-$	$6.2 \cdot 10^{-8}$
4γ	$< 2 \cdot 10^{-8}$

Распады π – мезонов



Так как π^\pm -мезон является самым легким положительно заряженным адроном, он должен распадаться на легкие заряженные лептоны e^\pm или μ^\pm и соответствующие нейтрино $\nu_e(\nu_\mu)$ или антинейтрино $\bar{\nu}_e(\bar{\nu}_\mu)$. Распад происходит в результате слабого взаимодействия, поэтому π^\pm -мезон имеет характерное для слабого взаимодействия время жизни $\tau(\pi^\pm) = 2.6 \cdot 10^{-8}$ с.

Распад π^0 -мезона происходит в результате электромагнитного взаимодействия. Поэтому время жизни π^0 -мезона ($\tau(\pi^0) = 0.84 \cdot 10^{-16}$ с) много меньше времени жизни заряженных пионов.

Законы сохранения

Характеристика		Взаимодействие		
		сильное	электромагнитное	слабое
Аддитивные законы сохранения				
Электрический заряд	Q	+	+	+
Энергия	E	+	+	+
Импульс		+	+	+
Момент количества движения		+	+	+
Барионный заряд	B	+	+	+
Лептонные заряды	L_e, L_μ, L_τ	+	+	+
Странность	s	+	+	-
Очарование (charm)	c	+	+	-
Bottom	b	+	+	-
Top	t	+	+	-
Изоспин	I	+	-	-
Проекция изоспина	I_3	+	+	-
Мультипликативные законы сохранения				
Пространственная чётность	P	+	+	-
Зарядовая чётность	C	+	+	-
Комбинированная чётность	CP	+	+	-
Обращение времени	T	+	+	-
CPT-инвариантность		+	+	+

Размеры протона и нейтрона

Распределения электрического заряда и магнитного момента протона

$$\langle r_E^2 \rangle_p^{1/2} = (0.86 \pm 0.01) \text{ ФМ}, \quad \langle r_M^2 \rangle_p^{1/2} = (0.86 \pm 0.06) \text{ ФМ}.$$

Распределения электрического заряда и магнитного момента нейтрона

$$\langle r_E^2 \rangle_n^{1/2} = (0.10 \pm 0.01) \text{ ФМ}. \quad \langle r_M^2 \rangle_n^{1/2} = (0.89 \pm 0.07) \text{ ФМ}.$$

- Размер протона ~ 0.8 ФМ. Размер нейтрона приблизительно такой же.
- Протон лишен четкой границы. Плотность заряда в протоне плавно убывает по закону
 $\rho(r) = \rho(0)\exp(-r/a)$, где $\rho(0) = 3 \text{ е/ФМ}^3$, $a = 0.23 \text{ ФМ}$.

- Среднеквадратичный радиус протона

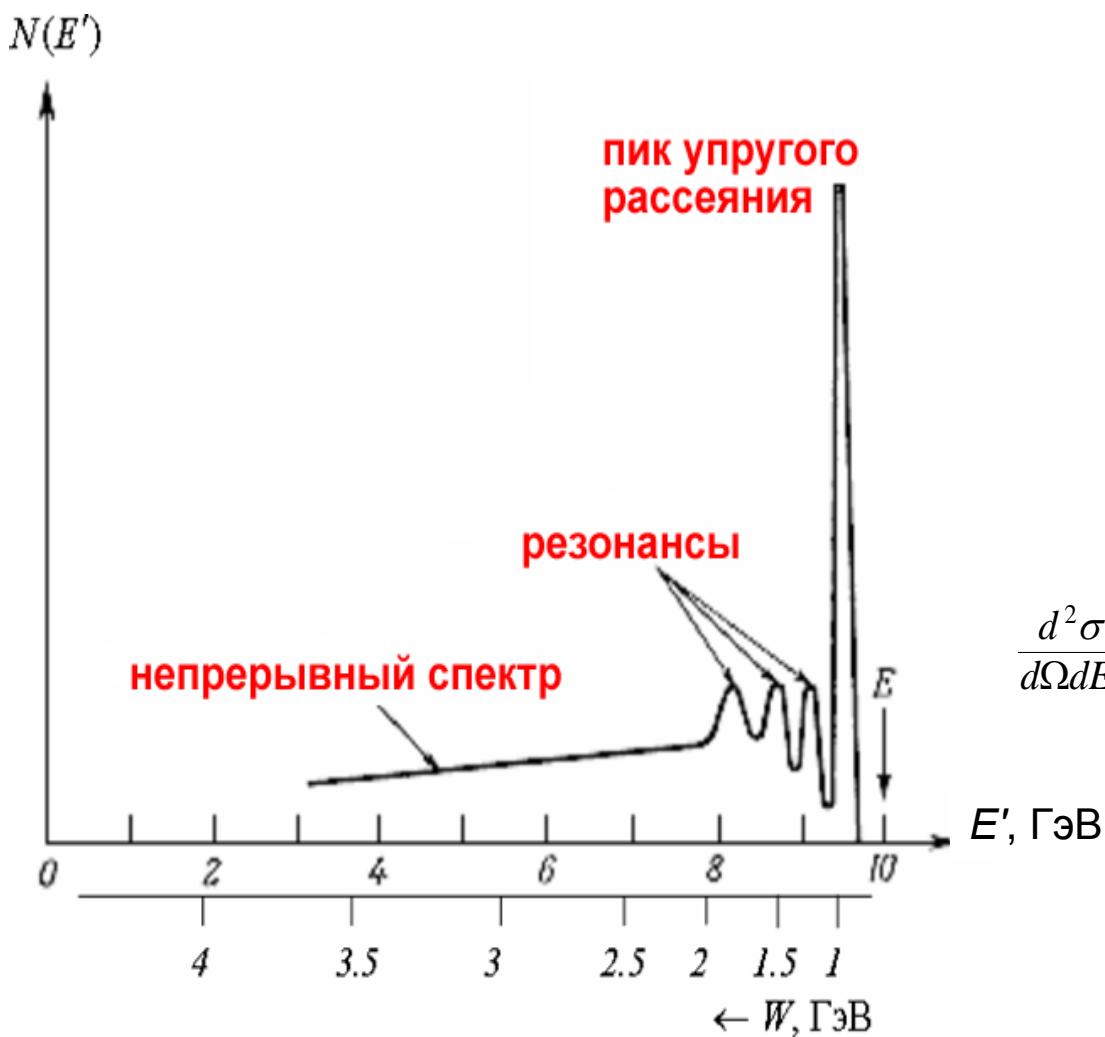
$$\langle r^2 \rangle = \frac{\int_0^\infty 4\pi r^2 \rho(r) r^2 dr}{\int_0^\infty 4\pi r^2 \rho(r) dr} = 0,62 \text{ ФМ}^2.$$

- Отличие величины $\langle r_E^2 \rangle_n^{1/2}$ от нуля означает, что заряд нейтрона только после усреднения по всему объему нейтрона равен нулю.
- В нейтроне центральная часть ($r < 0.7 \text{ ФМ}$) заряжена положительно, периферийная часть — отрицательно.
- Распределения магнитных моментов протона и нейтрона совпадают.

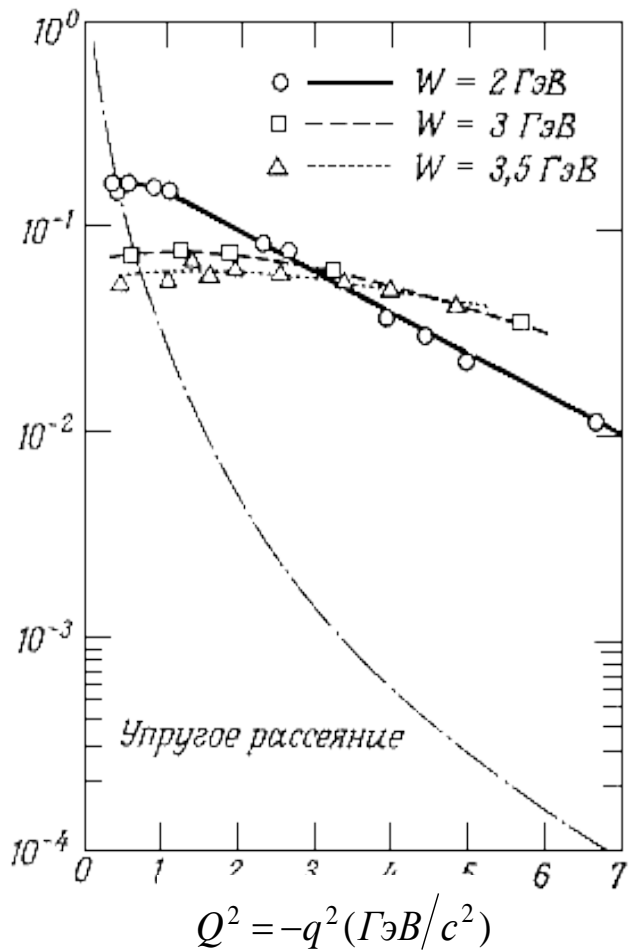
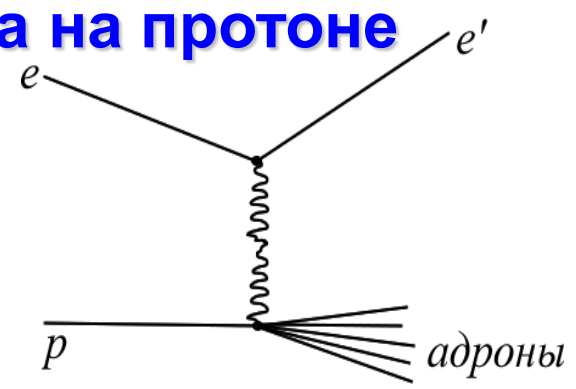


Данные о структуре нуклона свидетельствуют о том, что нуклон имеет сложную внутреннюю структуру. По современным представлениям он состоит из кварков, взаимодействующих посредством обмена квантами сильного взаимодействия — глюонами.

Глубоконеупругое рассеяние электрона на протоне

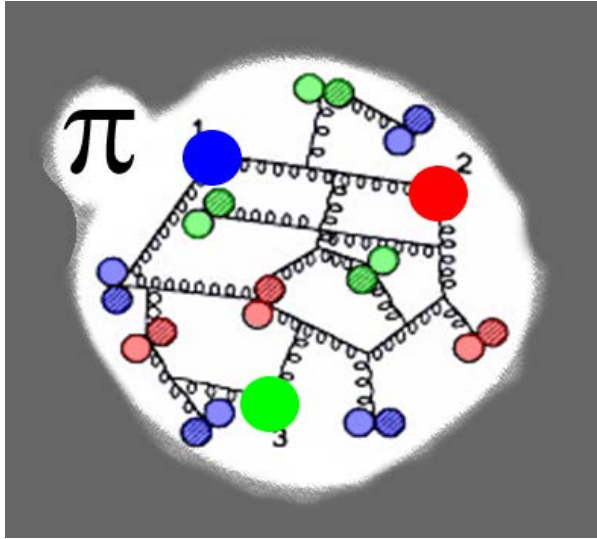


$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} / \frac{d\sigma_M}{d\Omega}$$



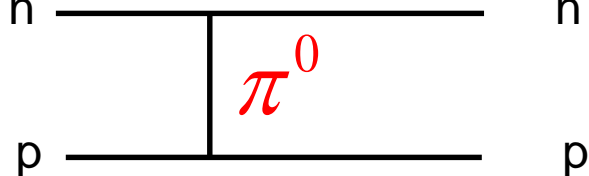
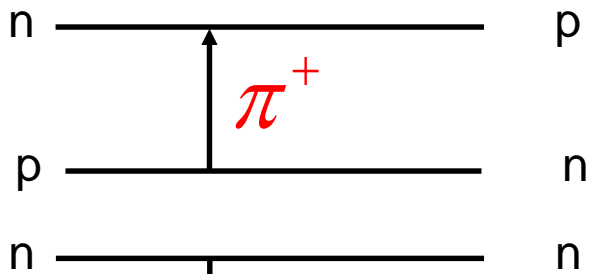
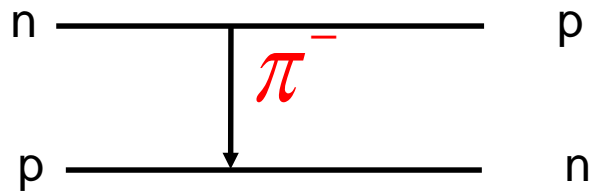
Схематический спектр электронов с энергией $E \approx 10$ ГэВ, рассеянных на протоне.

Структура протона



В экспериментах по глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино были определены заряды и спины партонов внутри нуклона.

1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами, несут около половины внутренней энергии нуклона.



Результаты этих исследований подтверждают, что нуклон это частица, состоящая из трех валентных кварков, виртуальных морских кварков-антикварков и глюонов.

Как устроен Мир (Стандартная Модель)

ФЕРМИОНЫ

u	c
d	s
ν_e	ν_μ
e	μ

I

II

t

b

ν_τ

τ

III

Кварки

Лептоны

БОЗОНЫ

g
γ
W^\pm
Z^0

Сильное

Электромагнитное

Слабое

АДРОНЫ

БАРИОНЫ (qqq)

нуклоны

p, n

резонансы

$\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ и тд

гипероны

$\Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Omega^-$ и тд

МЕЗОНЫ ($q\bar{q}$)

пионы

π^+, π^0, π^-

каоны

K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0 и тд

«векторные»

$\rho^+, \rho^0, \rho^-, \omega$ и тд

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

u

c

t

d

s

b

$8g, \gamma, W^+, W^-, Z$

H – бозон Хиггса

Лептоны и кварки связаны в обычной материи. Атом

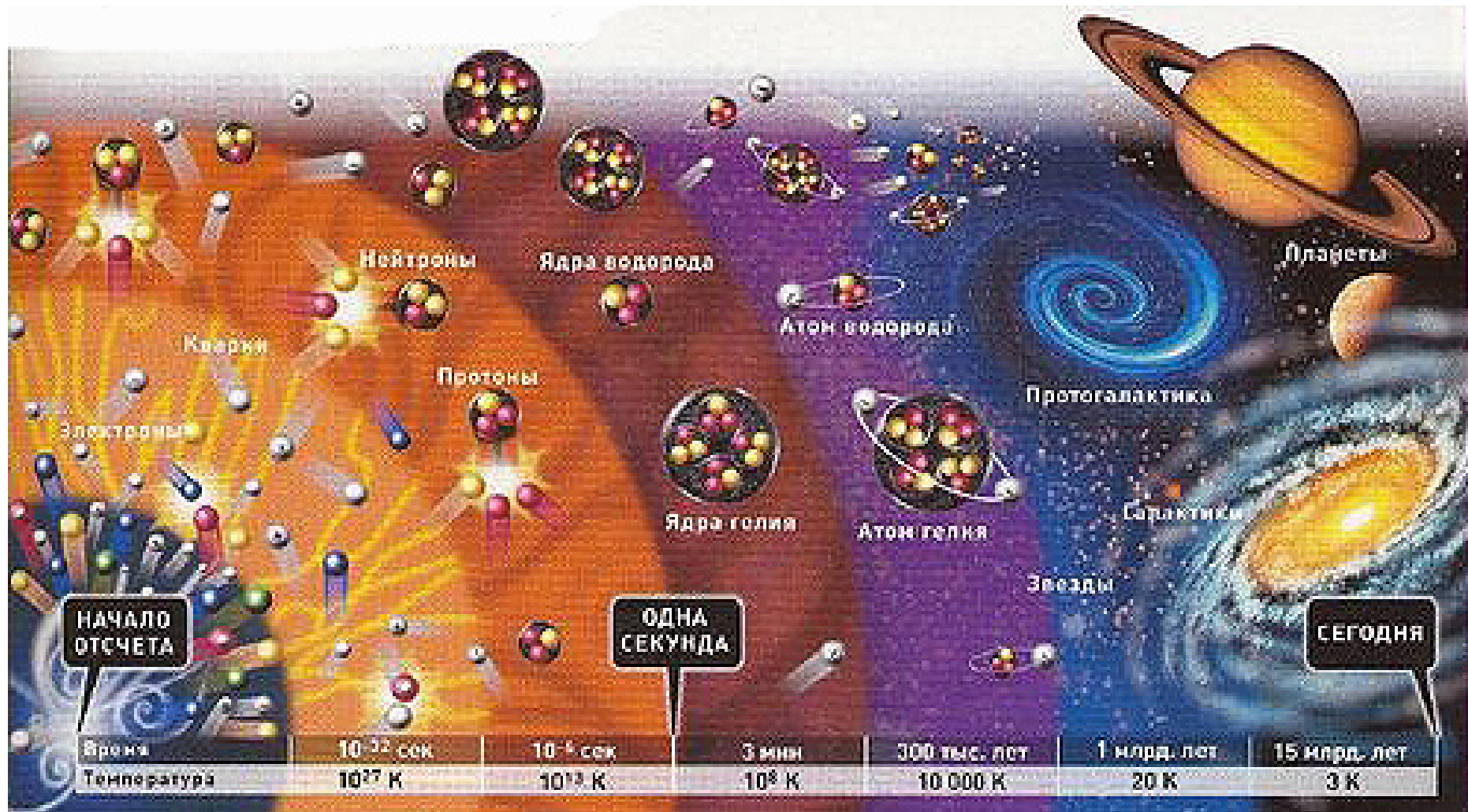
Догалактические этапы эволюции Вселенной

Время после Большого взрыва	Характерные температуры, К	Этап/Событие
$< 10^{-43}$ с	$> 10^{32}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий)
10^{-43} с	10^{32}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$ с	$10^{32} - 10^{28}$	Великое объединение электрослабого и сильного взаимодействий
10^{-36} с	10^{28}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электрослабого взаимодействий
10^{-35} с	10^{28}	Окончание инфляционной стадии расширения Вселенной
10^{-10} с	10^{15}	Конец электрослабого объединения
10^{-6} с	10^{13}	Кварк-адронный фазовый переход
$10^{-10} - 10^{-4}$ с	$10^{15} - 10^{12}$	Адронная эра. Рождение и аннигиляция адронов и лептонов
$10^{-4} - 10$ с	$10^{12} - 10^{10}$	Лептонная эра. Рождение и аннигиляция лептонов
$0.1 - 1$ с	$2 \cdot 10^{10}$	Отделение нейтрино. Вселенная становится прозрачной для нейтрино (антинейтрино)
$10^2 - 10^3$ с	$\approx 10^9$	Дозвездный синтез гелия
10 с – 40 000 лет	$10^{10} - 10^4$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом
40 000 лет	10^4	Начало эры вещества. Вещество начинает доминировать над излучением
400 000 лет	$3 \cdot 10^3$	Образование атомов. Разделение вещества и излучения (Вселенная прозрачна для излучения)
1 млрд. лет	20	Образование галактик

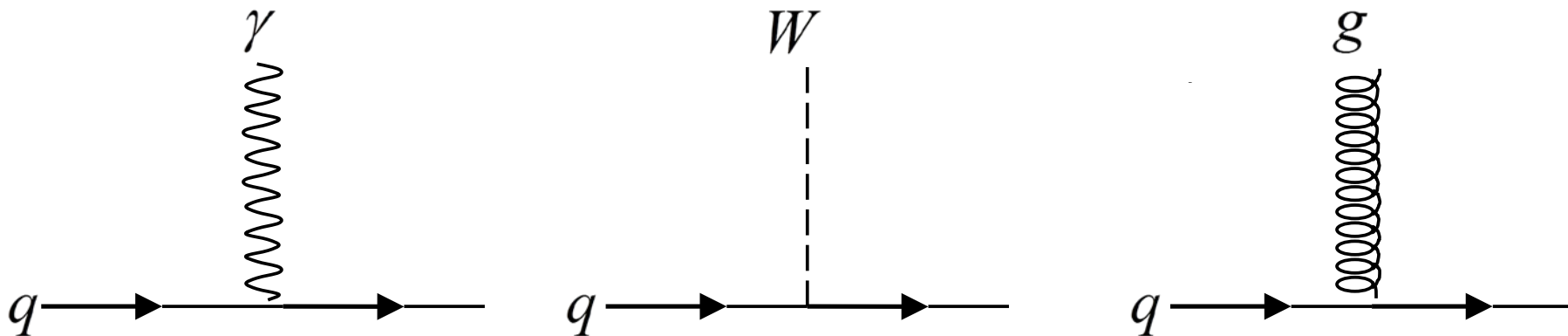
Космическая шкала времени

Время от настоящего момента, млрд. лет	Событие
13,7	Большой Взрыв
13	Образование Галактик
10	Сжатие нашей протогалактики
10	Образование первых звёзд
5	Образование Солнечной системы, планет
4	Образование земных пород
3	Зарождение микроорганизмов
2	Формирование атмосферы Земли
1	Зарождение жизни
0,60	Ранние окаменелости
0,45	Рыбы
0,15	Динозавры
0,05	Первые млекопитающие
2 млн. лет	Человек

Эволюция Вселенной

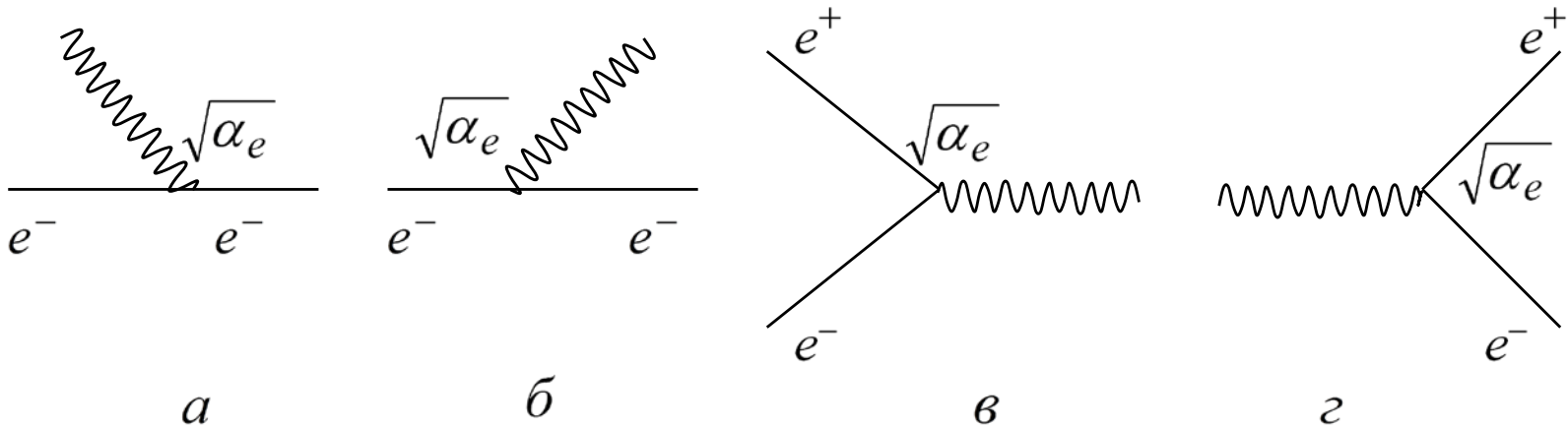


Элементарные амплитуды



Поглощение кварком фотона (электромагнитное взаимодействие),
 W -бозона (слабое взаимодействие), глюона (сильное взаимодействие)

Узлы, характеризующиеся одной и той же константой связи α_e



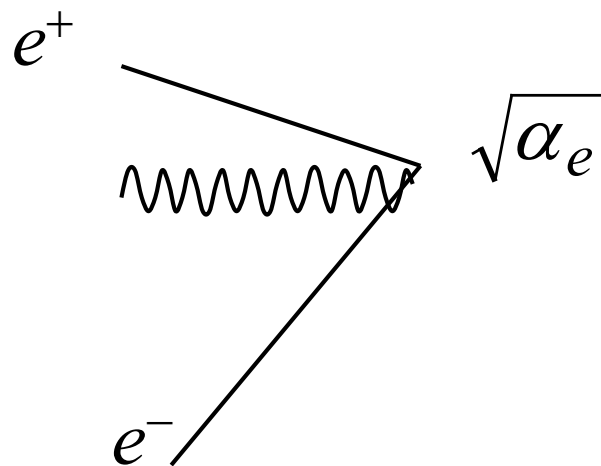
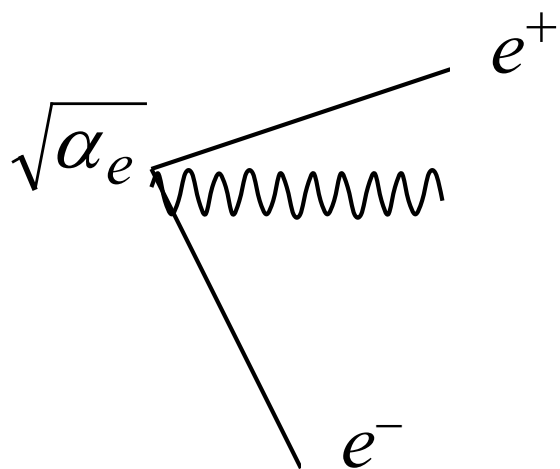
a - поглощение фотона электроном

б - испускание фотона электроном

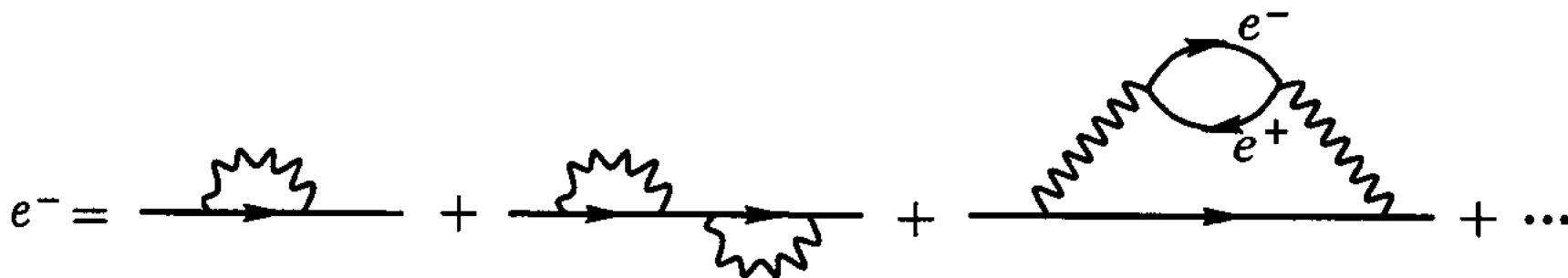
в - аннигиляция электрон-позитронной пары в один фотон

г - рождение электрон-позитронной пары фотоном

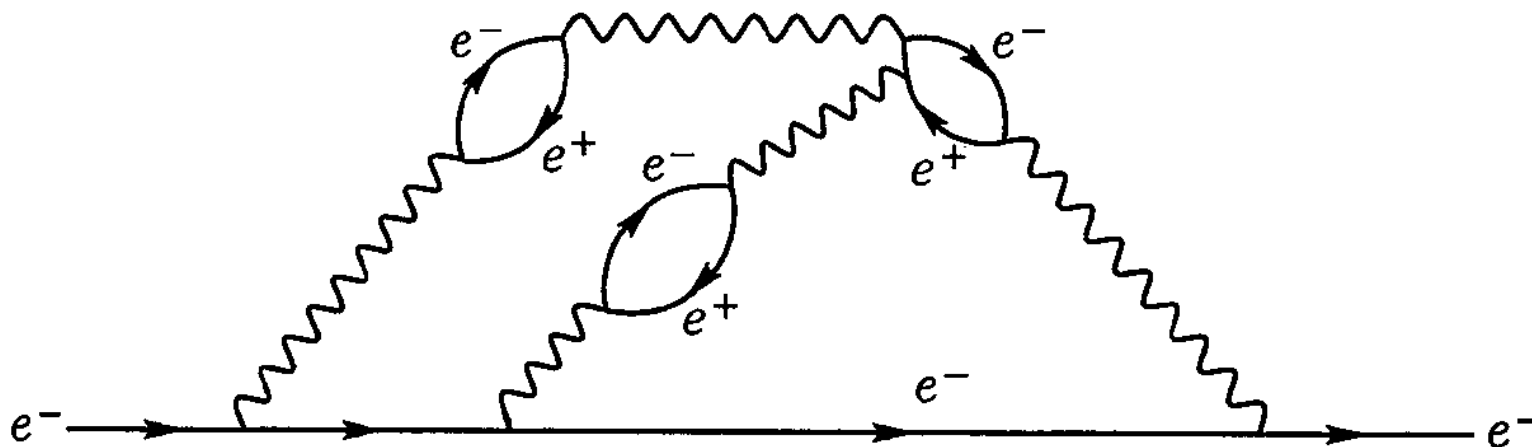
Узлы рождения и поглощения трех частиц вакуумом



Сумма диаграмм, описывающих распространение свободного электрона



Одна из возможных диаграмм свободного электрона



Экранировка электрического заряда в КЭД

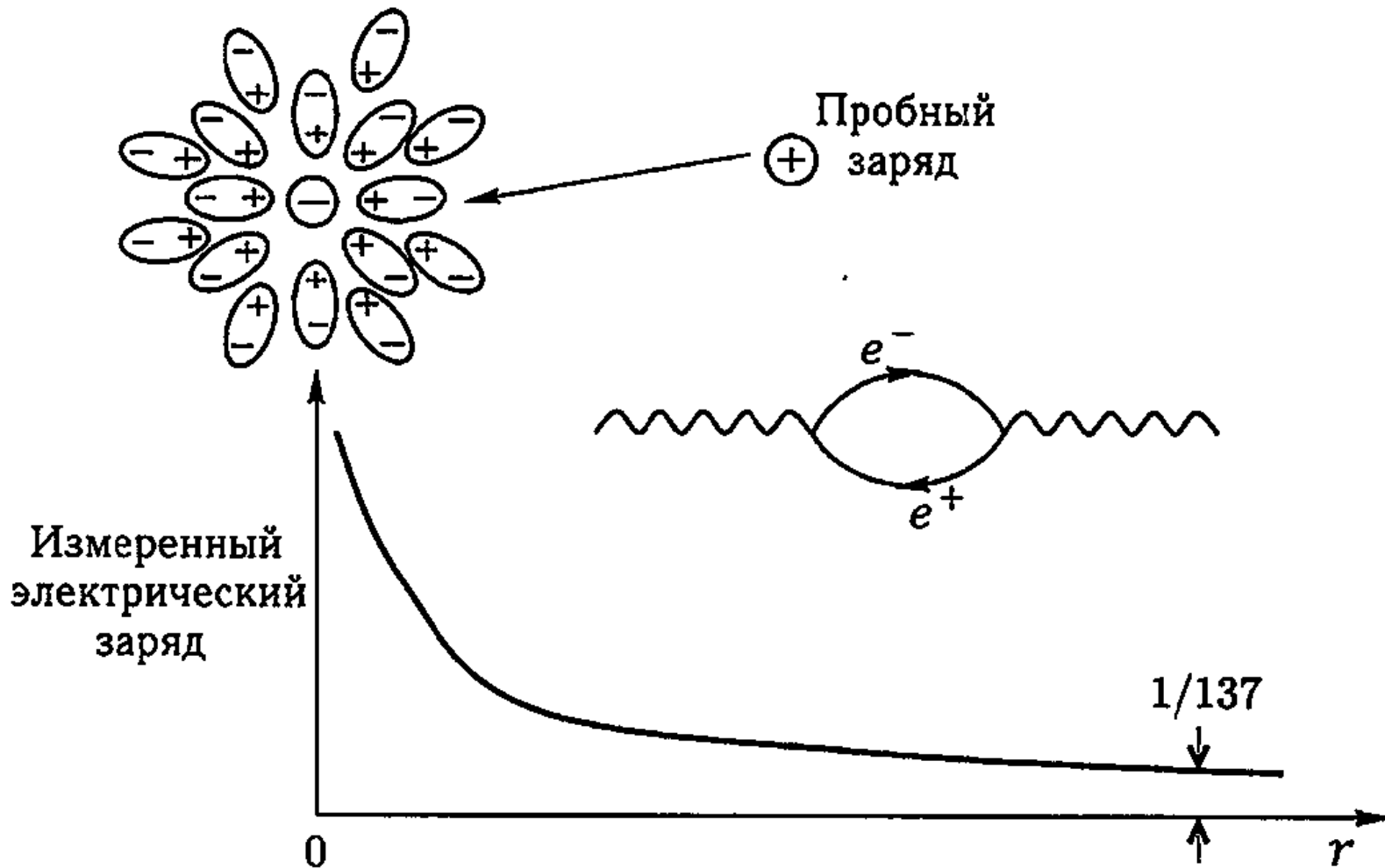


Диаграмма экранировки в КХД

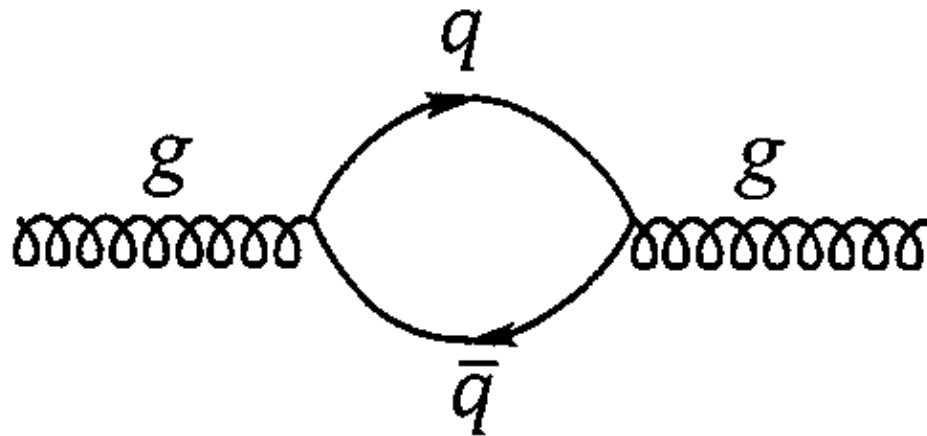
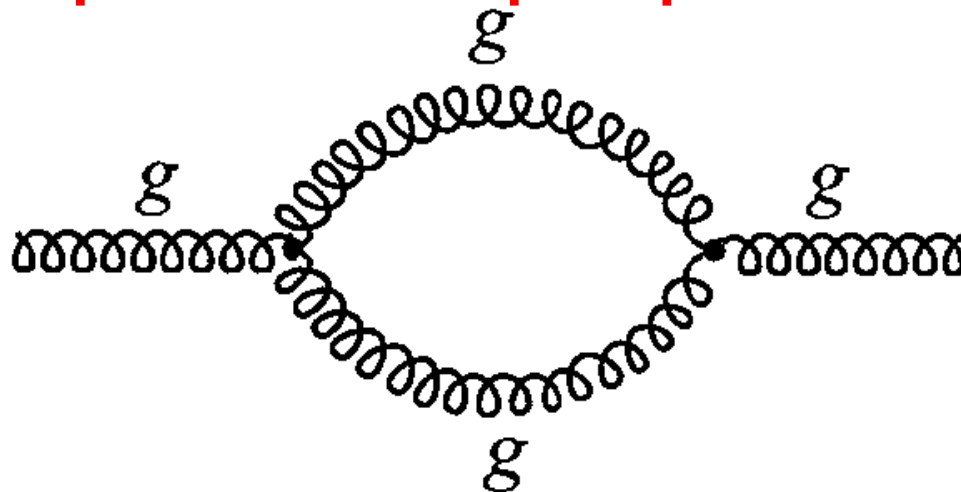
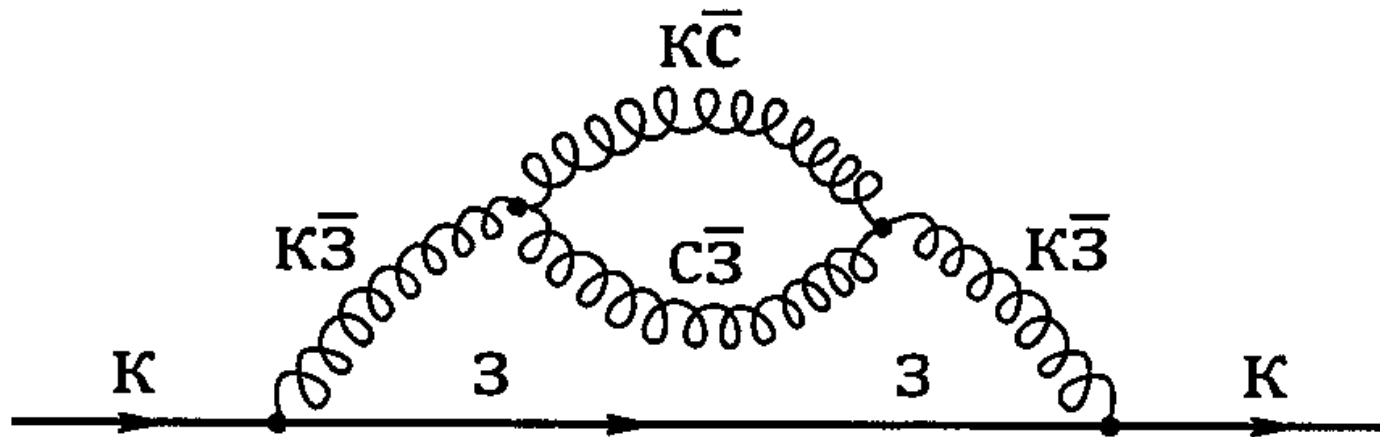


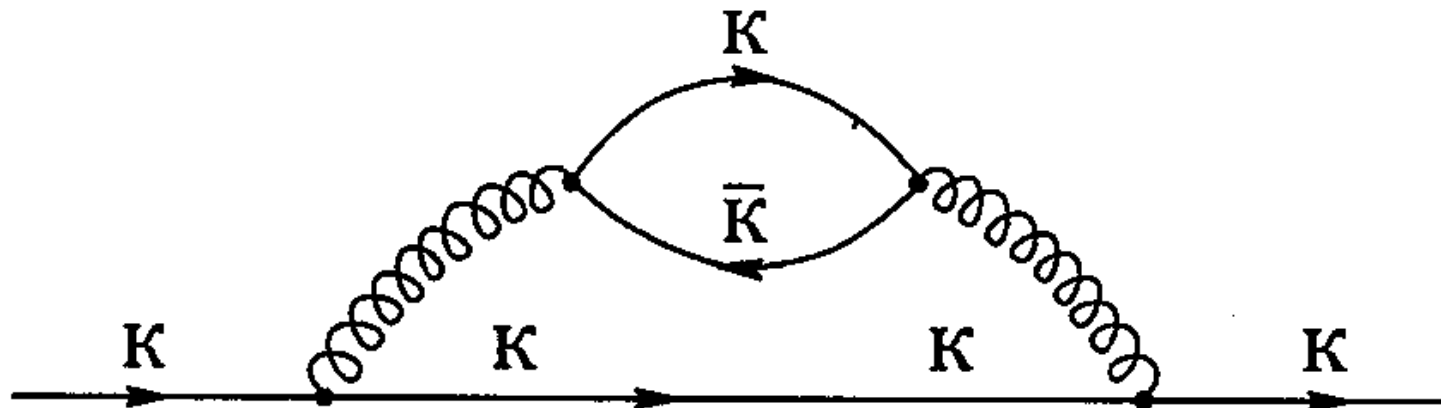
Диаграмма антиэкранировки в КХД



Процесс, приводящий к антиэкранировке цветового заряда кварка



Процесс, приводящий к экранировке цветового заряда кварка



Антиэкранировка цветовой заряда

