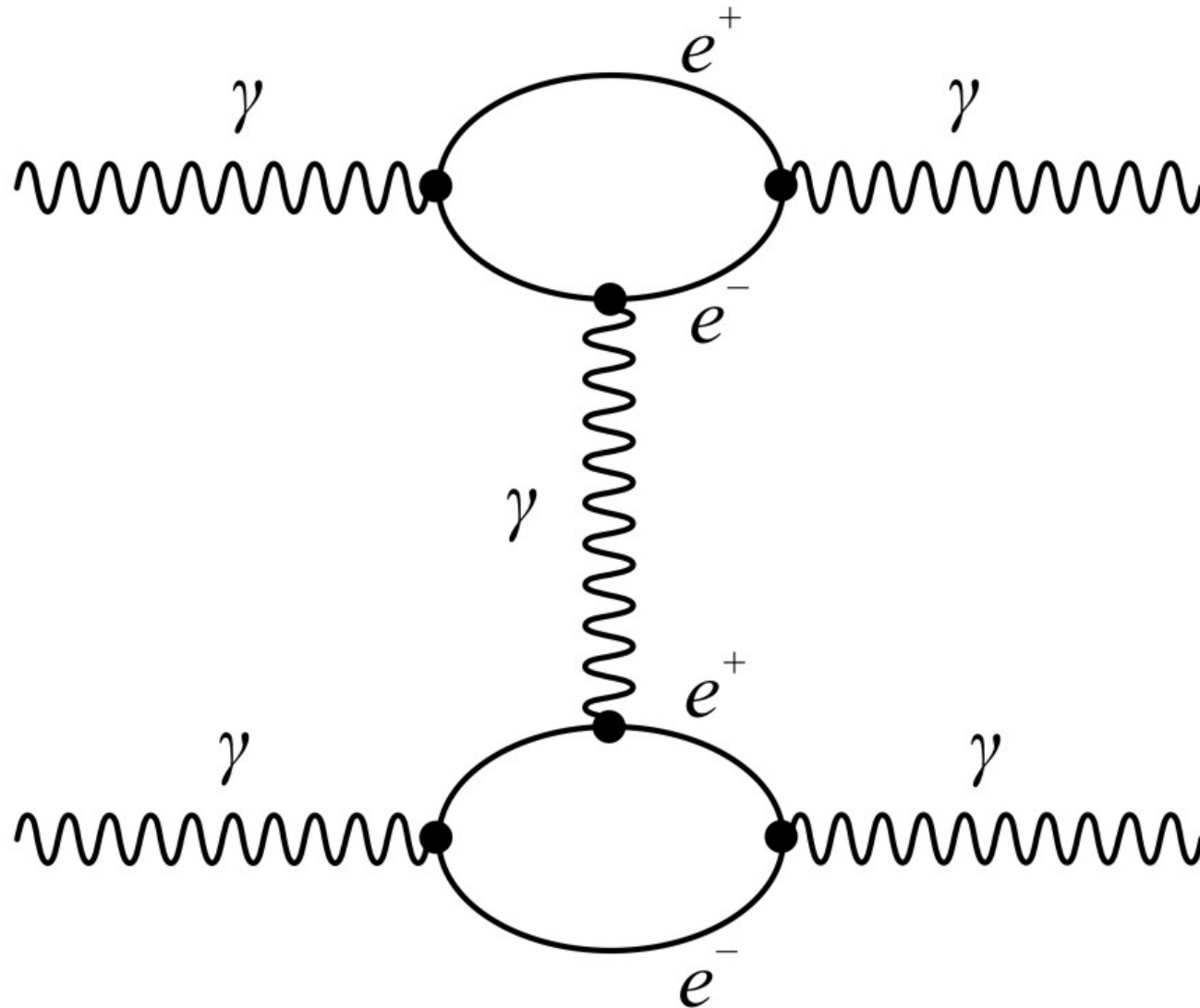


А Д Р О Н Ы

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ЧАСТИЦ**

Взаимодействие фотонов



Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

u

c

t

d

s

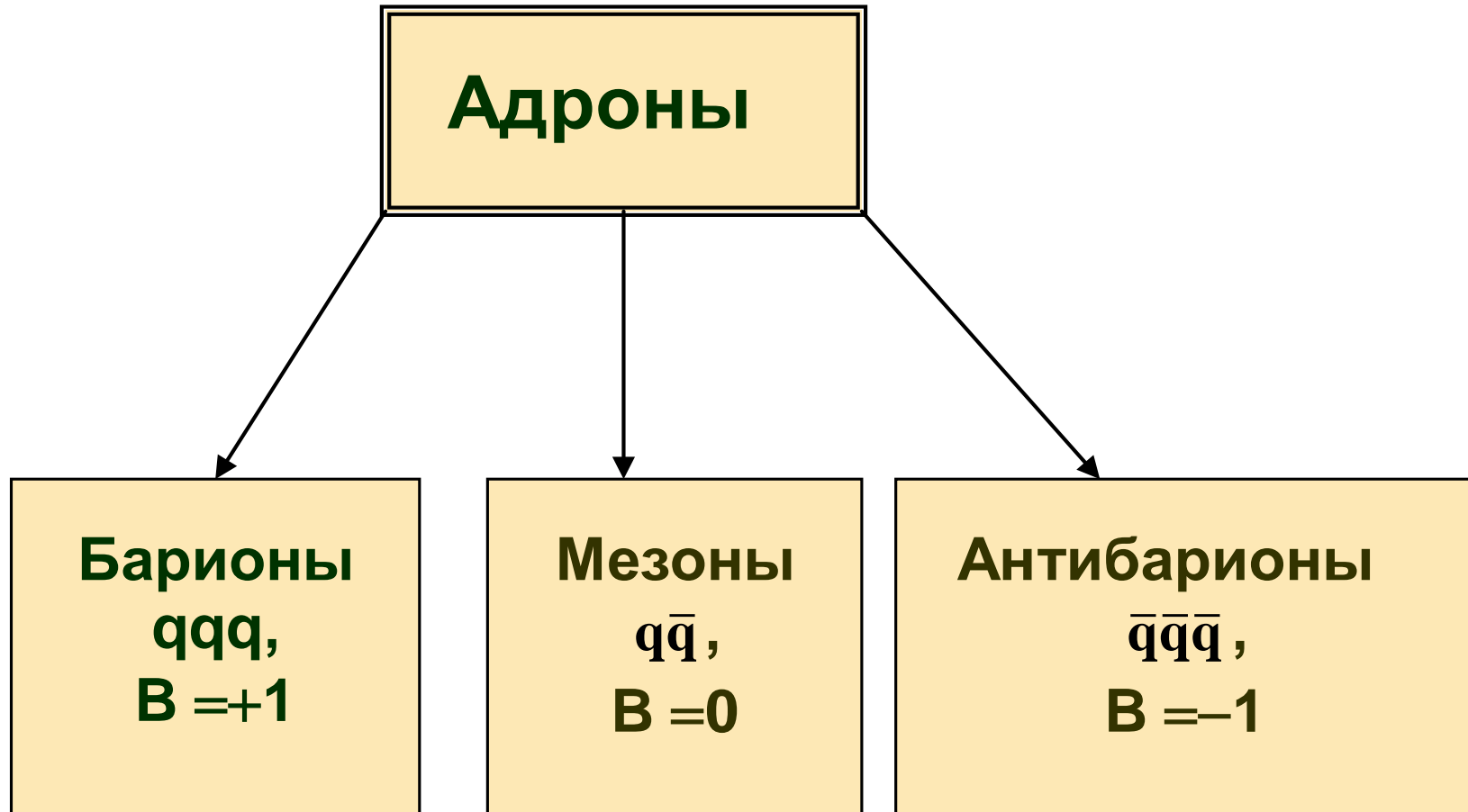
b

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

H – бозон Хиггса

Лептоны и кварки связаны в обычной материи. Атом

Адроны – системы связанных кварков



Кварки объединяются в частицы, называемые адронами.

Модель кварков

- Квантовые числа кварков, образующих адрон, определяют квантовые числа адронов. Адроны имеют определенные значения электрического заряда Q , спина J , чётности P , изоспина I . Квантовые числа s (странность), c (очарование или шарм), b (*bottom*) и t (*top*) разделяют адроны на обычные нестранные частицы (p, n, π, \dots), странные частицы ($K, \Lambda, \Sigma, \dots$), очарованные ($D, \Lambda_c, \Sigma_c, \dots$) и боттом-частицы (B, Λ_B, Ξ_B).
- t -кварк имеет время жизни $\approx 10^{-25}$ с, поэтому он не успевает образовать адрон.
- Всё многообразие адронов возникает в результате различных сочетаний u -, d -, s -, c -, b -кварков, образующих связанные состояния.
- барионы (фермионы с барионным числом $B = 1$) строятся из трех кварков;
- мезоны (бозоны с барионным числом $B = 0$) строятся из кварка и антикварка;
- квантовое число — цвет кварка — имеет три значения: красный, зеленый, синий;
- все известные адроны — бесцветны.

Антипротон 1955

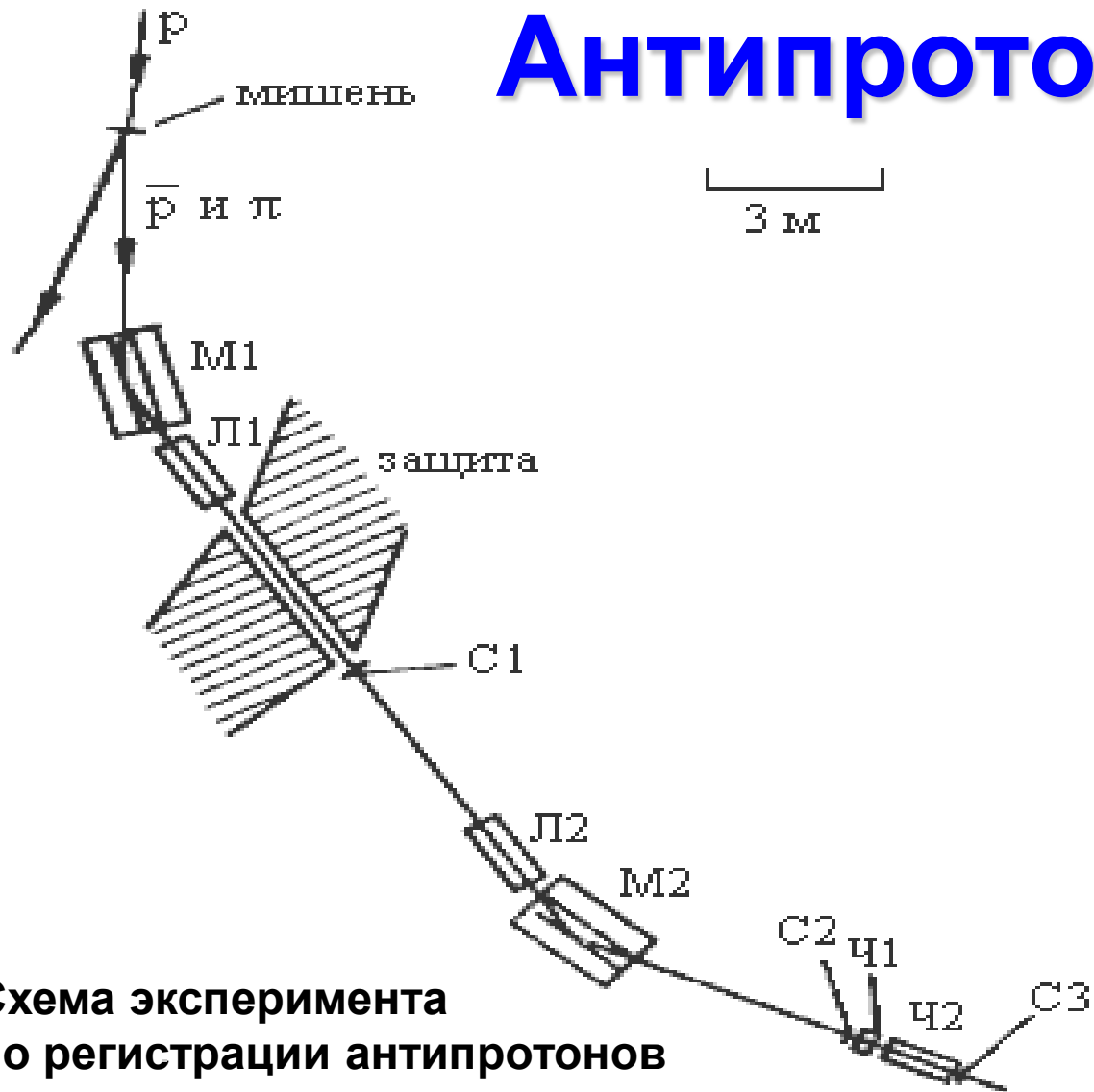
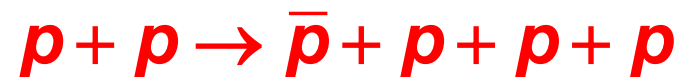


Схема эксперимента по регистрации антипротонов



$$L(C_1 - C_2) = 12m$$

$$\tau(\pi^-) = 4 \cdot 10^{-9} c$$

$$\tau(\bar{p}) = 51 \cdot 10^{-9} c$$

$$\text{Ч1} \quad \beta \geq 0.99$$

$$\text{Ч2} \quad 0.75 \leq \beta \leq 0.79$$

Нобелевская премия по физике
 1959 г. – Э. Сегре, О. Чемберлен.
 За открытие антипротона

Антинейтрон 1956

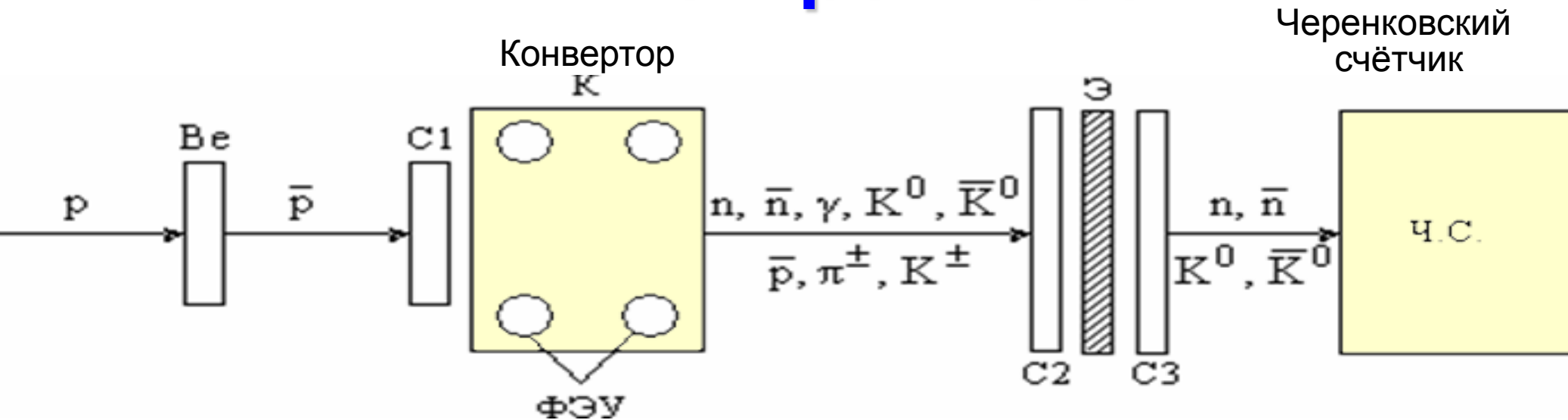


Схема эксперимента по регистрации антинейтронов



В результате $n - \bar{n}$ -аннигиляции образуются
сильновзаимодействующие частицы — π^- , К-мезоны.



Связь характеристик частиц и античастиц

Характеристика		Частица	Античастица
Масса		M	
Спин		J	
Чётность	<i>фермион</i>	$+(-)1$	$-(+)1$
	<i>бозон</i>	$+(-)1$	$+(-)1$
Электрический заряд		$+(-)Q$	$-(+)Q$
Магнитный момент		$+(-)\mu$	$-(+)\mu$
Барионное число		$+B$	$-B$
Лептонное число		$+L_e, +L_\mu, +L_\tau$	$-L_e, -L_\mu, -L_\tau$
Изоспин		I	
Проекция изоспина		$+(-)I_3$	$-(+)I_3$
Странность		$-(+)s$	$+(-)s$
Очарование (Charm)		$+(-)c$	$-(+)c$
Bottom		$-(+)b$	$+(-)b$
Топ		$+(-)t$	$-(+)t$
Время жизни		τ	
Схема распада (пример)		$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$	$\bar{d} \rightarrow \bar{u} + e^+ + \nu_e$

Четность \hat{P}

Инвариантность гамильтониана системы \hat{H} относительно пространственного отражения – инверсии (замены) $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ приводит к закону сохранения чётности и квантовому числу – **чётность**.

Свойства системы частиц определяются видом гамильтониана \hat{H} и волновой функции $\psi(\vec{r})$, являющейся решением соответствующего уравнения Шредингера.

$$\hat{P}\psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r}) = \begin{cases} \psi(\vec{r}), & p = +1, \\ -\psi(\vec{r}), & p = -1 \end{cases}$$

$\psi(-\vec{r}) = \psi(\vec{r})$ - **чётные** функции (состояния),

$\psi(-\vec{r}) = -\psi(\vec{r})$ - **нечётные** функции (состояния).

Инверсия $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ соответствует в сферических координатах преобразованию

$$r \rightarrow r, \quad \theta \rightarrow \pi - \theta, \quad \varphi \rightarrow \pi + \varphi \quad \psi(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r)Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$Y_{lm}(\pi - \theta, \varphi + \pi) = (-1)^l Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$\hat{P}\psi = \pi(-1)^l \psi$$

$(-1)^l$ - **орбитальная четность частицы**

π - **внутренняя четность частицы**

Четность системы А частиц

$$P = \pi_1 \pi_2 \dots \pi_A (-1)^{l_1} (-1)^{l_2} \dots (-1)^{l_A}$$

Внутренняя четность адронов

Внутренняя четность адрона определяется следующими правилами:

- Четность P кварка равна $+1$ и не зависит от типа кварка.

$$P(q) = +1$$

- Четность P антикварка равна -1 и не зависит от типа кварка.

$$P(\bar{q}) = -1$$

- Внутренняя четность P адрона равна произведению четностей входящих в его состав кварков, умноженному на $(-1)^L$,
 L — орбитальный момент кварков в составе адрона.

$$P(\text{барион}) = P(q_1) \cdot P(q_2) \cdot P(q_3) (-1)^{\vec{l}_{q_1} + \vec{l}_{q_2} + \vec{l}_{q_3}} = (-1)^L$$

$$P(\text{мезон}) = P(q_1) \cdot P(\bar{q}_2) (-1)^{\vec{l}_{q_1} + \vec{l}_{q_2}} = (-1)^{L+1}$$

Мезоны ($q\bar{q}$)

Мезоны — связанные состояния кварка и антикварка. Мезоны имеют барионное число $B = 0$. Массы и квантовые числа мезонов определяются типами кварка и антикварка, входящих в состав мезона, взаимной ориентацией их спинов и орбитальных моментов.

Кварковая модель позволяет качественно описать структуру мезонов, получить их квантовые числа.

$\pi^+ (u\bar{d})$

	u	\bar{d}	π^+
Q	+2/3	+1/3	+1
B	+1/3	-1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	+1/2	+1/2	+1
P	+1	-1	-1

$$M(\pi^+) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^+) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

$\pi^- (\bar{u}d)$

	\bar{u}	d	π^-
Q	-2/3	-1/3	-1
B	-1/3	+1/3	0
J	1/2	1/2	0
I	1/2	1/2	1
I_3	-1/2	-1/2	-1
P	-1	1	-1

$$M(\pi^-) = 139.57 \text{ MeV}$$

$$\tau(\pi^-) = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

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

Мезоны

Частица	Кварковая структура	Масса mc^2 , МэВ	Время жизни τ [с] или ширина Γ	Спин-четность, изоспин $J P (I)$	Основные моды распада
π^+	$u\bar{d}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0-(1)	$\mu + \nu$
π^-	$d\bar{u}$	139,57	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0-(1)	$\mu - \tilde{\nu}$
π^0	$u\bar{u} - d\bar{d}$	134,98	$8,4 \cdot 10^{-17}$	0-(1)	2γ
K^+	$u\bar{s}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0-(1/2)	$\mu + \nu$, $\pi^0 \pi^+$
K^-	$s\bar{u}$	494	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0-(1/2)	$\mu - \tilde{\nu}$, $\pi^0 \pi^-$
$\rho^+ \rho^-$ ρ^0	$u\bar{d} \ d\bar{u}$ $u\bar{u} - d\bar{d}$	769	150 МэВ	1-(1)	$\pi\pi$
ω	$u\bar{u} + d\bar{d}$	783	8,4 МэВ	1-(0)	3π
D^+	$c\bar{d}$	1869	$1,1 \cdot 10^{-12}$	0-(1/2)	$K + \text{другие}$, $e + \text{другие}$, $\mu + \text{другие}$
D^-	$d\bar{c}$				
J/Ψ	$c\bar{c}$	3097	87 кэВ	1-(0)	адроны, лептоны
Υ	$b\bar{b}$	9460	53 кэВ	1-(0)	адроны, лептоны

Барионы (qqq)

Протон (uud)

$$M(P) = 938.272 \text{ МэВ}$$

$\tau(P) = \text{стабильный}$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

Нейтрон (udd)

$$M(n) = 939.565 \text{ МэВ}$$

$$\tau(n) = 885.7 \pm 0.8 \text{ с}$$

$$J^P(I) = \frac{1}{2}^+ \left(\frac{1}{2} \right)$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

	u	u	d	p
Q	+2/3	+2/3	-1/3	+1
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	+1/2	-1/2	+1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

	u	d	d	n
Q	+2/3	-1/3	-1/3	0
B	+1/3	+1/3	+1/3	+1
J	1/2	1/2	1/2	1/2
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	-1/2	-1/2	-1/2
P	+1	+1	+1	+1
s, c, b, t	0	0	0	0

Кварковая структура барионов

Барионы — связанные состояния трёх кварков

Частица	Кварковый состав	Масса, mc^2 (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
n	udd	939.565	885.7 ± 0.8	$1/2^+(1/2)$	$p e^- \nu$
Λ	uds	1115.683	$2.63 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(0)$	$p\pi^-, n\pi^0$
Σ^+	uus	1189.37	$0.802 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$p\pi^0, n\pi^+$
Σ^0	uds	1192.64	$7.4 \cdot 10^{-20}$	$1/2^+(1)$	$\Lambda\gamma$
Σ^-	dds	1197.45	$1.48 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1)$	$n\pi^-$
Ξ^0	uss	1314.8	$2.9 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda\pi^0$
Ξ^-	dss	1321.3	$1.64 \cdot 10^{-10}$	$1/2^+(1/2)$	$\Lambda\pi^0$
Ω^-	sss	1672.4	$0.81 \cdot 10^{-10}$	$3/2^+(0)$	$\Lambda K^-, \Xi^0\pi^-$
Δ^{++} Δ^+ Δ^0 Δ^-	uuu uud udd ddd	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n)\pi^{0,\pm}$

Барионы (uud)

Частица	Кварковый состав	Масса, mc^2 (МэВ)	Время жизни (с) или ширина (МэВ)	Спин, чётность, изоспин $J^P(I)$	Основные каналы распада
p	uud	938.272	$>10^{31}$ лет	$1/2^+(1/2)$	
Δ^+	uud	1230-1234	115-125	$3/2^+(3/2)$	$(p, n)\pi$
$N^+(1440)$	uud	1430-1470	250-450	$1/2^+(1/2)$	$(p, n) + \pi$
$N^+(1520)$	uud	1515-1530	110-135	$3/2^-(1/2)$	$(p, n) + 2\pi$ $\Delta + \pi$

Кварки, образующие адроны, могут находиться в состояниях с различными орбитальными моментами L и в состояниях с различными значениями радиального квантового числа n .

$$\Psi(r, \theta, \varphi) = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

Кварки, образующие p и Δ^+ , находятся в состоянии ($n=1, l=0$)

Кварки, образующие $N^+(1440)$, находятся в состоянии ($n=2, l=0$)

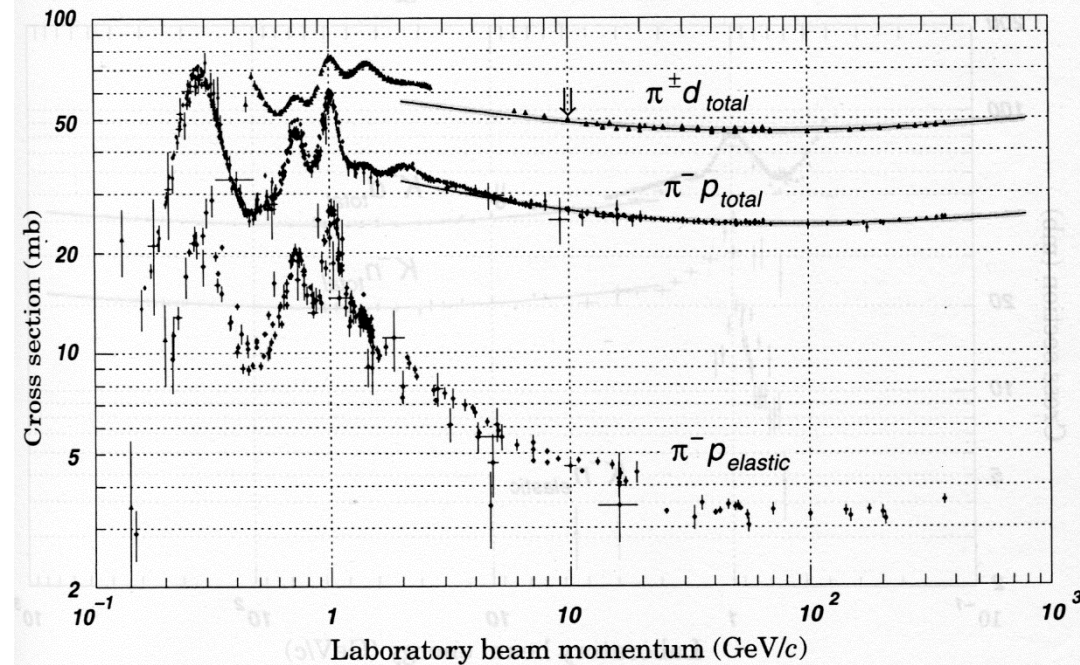
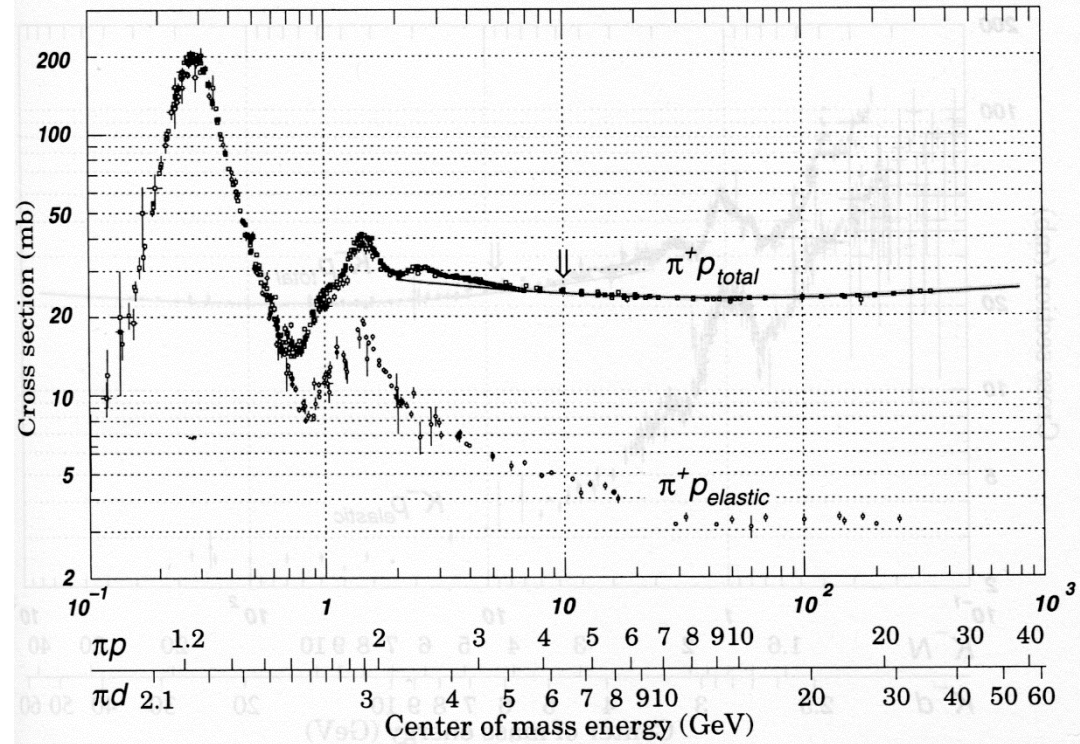
Кварки, образующие $N^+(1520)$, находятся в состоянии ($n=1, l=1$)

Сечения реакций

$$\pi^{-} p, \pi^{+} p$$

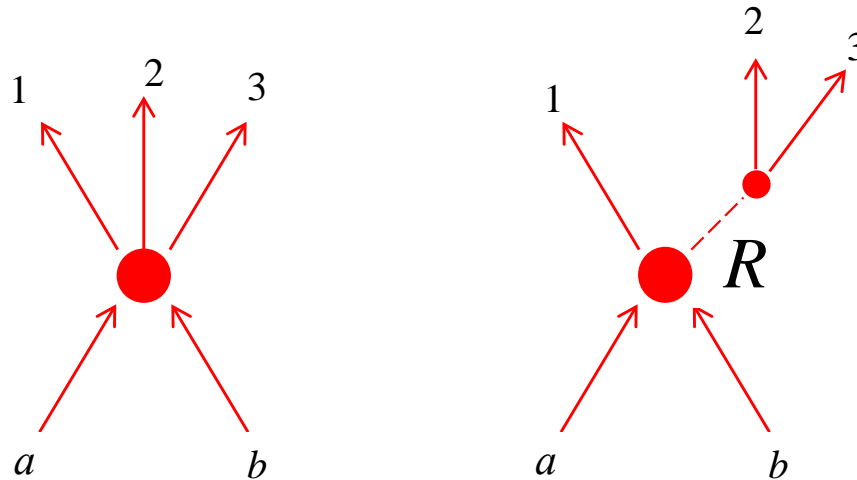
$$\pi^{-} p$$

$$\pi^{+} p$$



Наблюдение резонансов

Способ наблюдения резонансов — *метод инвариантных масс*.



Две возможности протекания реакции $a + b \rightarrow 1 + 2 + 3$ без образования промежуточного резонанса R (слева) и с образованием промежуточного резонанса R (справа).

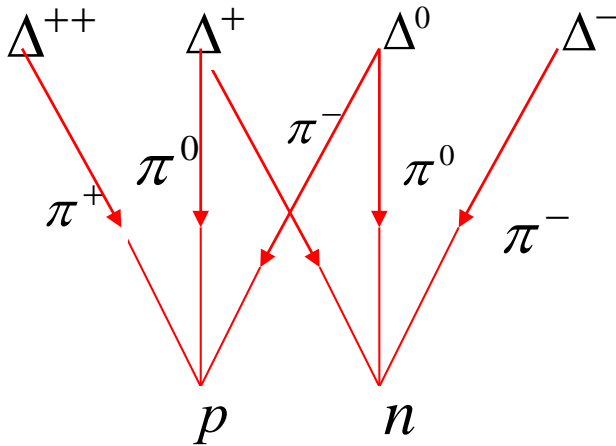
$$m_{23}^2 c^4 = (E_2 + E_3)^2 - c^2 (\vec{p}_2 + \vec{p}_3)^2.$$

Наблюдая отдельные события в трековом детекторе, можно для каждого события получить величину инвариантной массы системы частиц 2 и 3 и затем построить распределение этих масс $N(m_{23}c^2)$. Если реакция идет без образования резонанса (левая часть), то корреляции между парой частиц 2, 3 и частицей 1 нет. Энергия и импульс распределяются между ними случайным образом и получится гладкое распределение без особенностей, заключенное в допустимых кинематических границах.

Если реакция идёт с образованием промежуточного резонанса R , тогда из законов сохранения энергии и импульса следует

$$E_R = E_2 + E_3, \quad \vec{p}_R = \vec{p}_2 + \vec{p}_3$$

Δ резонанс



Основные каналы распада Δ -резонансов

Δ -резонансы наблюдаются в сечениях реакций $\pi^+ p$ и $\pi^- p$. Самый низкий по энергии это резонанс $\Delta(1232)$, имеющий спин-чётность $J^P = 3/2^+$ и изоспин $I = 3/2$. Δ^+ и Δ^0 рассматривают как возбужденные состояния нуклона. По сравнению с нуклонами, у которых $J = 1/2$ и $I = 1/2$, эти резонансы имеют $J = 3/2$, $I = 3/2$.

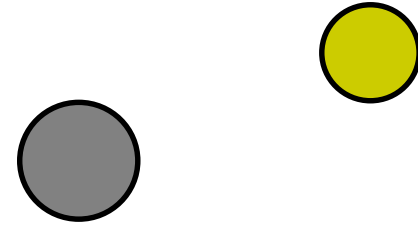
Низкорасположенные нуклонные резонансы в основном распадаются по каналу (n или p) + π . Каналы распада Δ -резонанса показаны на рис. Эти каналы составляют $> 99\%$ всех возможных распадов.

Поскольку резонансы распадаются за счёт сильного взаимодействия, сохраняющего изоспин и его проекцию, то, пользуясь изоспиновой инвариантностью, можно установить изоспин этих резонансов. Изоспины нуклона и пиона равны соответственно $1/2$ и 1 . Отсюда следует, что изоспин системы пион-нуклон может равняться либо $1/2$, либо $3/2$. Система $\pi^- p$ имеет проекцию изоспина $I_3 = 1/2$. Такую проекцию может иметь как изоспин $I = 3/2$, так и $I = 1/2$. Поэтому при взаимодействии $\pi^- p$ наблюдаются как состояние $I = 3/2$, так и состояние $I = 1/2$. Система $\pi^+ p$ имеет изоспиновую проекцию $I_3 = 3/2$. Поэтому в реакции $\pi^+ p$ наблюдается только состояние с $I = 3/2$. Следовательно, все резонансы, которые наблюдаются в сечении $\pi^+ p$, имеют изоспин $I = 3/2$, а те резонансы, которые наблюдаются в сечении $\pi^- p$, но в сечении $\pi^+ p$ отсутствуют, имеют изоспин $I = 1/2$.

Взаимодействие частиц

Взаимодействие. Классическая физика

Дальнодействие

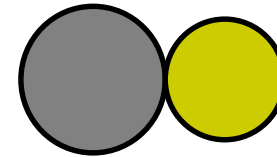


В классической физике, несмотря на разнообразие сил, действующих между телами, взаимодействия между ними описываются двумя фундаментальными взаимодействиями:

- Гравитационным,
- Электромагнитным.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия – дальнодействующие. Поэтому они ответственны за все макроскопические крупномасштабные явления, от окружающей нас повседневной жизни до взаимодействий звезд и галактик.

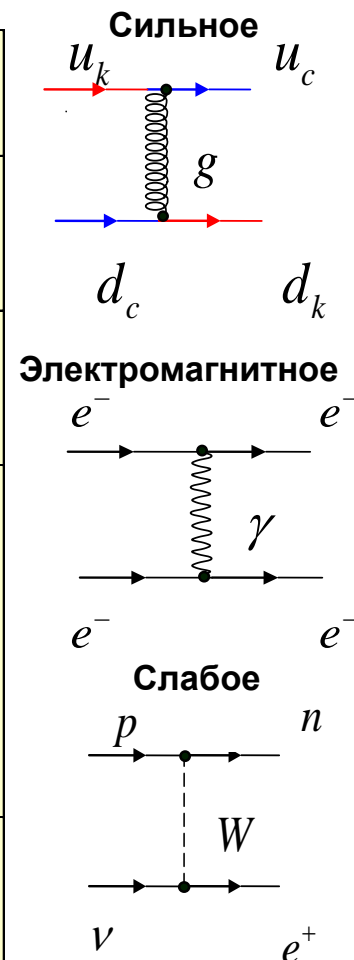
Близкодействие



Одним из проявлений близкодействия в классической физике является соударение бильярдных шаров.

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 $J = 1$, $m_W c^2 \approx 80$ ГэВ, $m_Z c^2 \approx 91$ ГэВ
Гравитационное	Все частицы	Безмассовый гравитон, спин $J = 2$



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия имеют бесконечный радиус т.к. их потенциалы взаимодействия спадают по закону $1/r$. Сравнение гравитационного и электромагнитного взаимодействий двух протонов показывает, что гравитационное взаимодействие слабее электромагнитного на 36 порядков:

$$\frac{F_{\text{грав}}}{F_{\text{кул}}} = \frac{G \frac{m_1 m_2}{r^2}}{\frac{q_1 q_2}{r^2}} \approx 10^{-36}$$

G – гравитационная постоянная Ньютона,
 $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ сек}^{-2}$.

Гравитационное взаимодействие также слабее сильного и слабого взаимодействий. Однако в повседневной жизни, мы в основном ощущаем гравитационное взаимодействие.

Происходит это потому, что несмотря на то, что электромагнитное взаимодействие имеют бесконечный радиус действия, оно сконцентрировано на расстояниях $\approx 10^{-8} \div 10^{-10}$ см в атомах и молекулах. На большем расстоянии образуются электрически нейтральные системы.

Взаимодействие частиц

В нерелятивистской квантовой теории взаимодействие одной частицы с потенциальным полем, например, кулоновским, задается энергией $V(r)$ взаимодействия этого поля с частицей. Взаимодействие двух частиц описывается потенциальной энергией $V(r)$ взаимодействия, которая зависит от их относительного расстояния. Однако, энергия взаимодействия или потенциал имеет ясный смысл только в том случае, когда в процессе взаимодействия частицы не рождаются и не исчезают. В тех же случаях, когда частицы рождаются и исчезают, использование потенциала взаимодействия становится неэффективным. Способом описания взаимодействия является **амплитудный способ**, в котором задаются не потенциалы, а **амплитуды** различных преобразований частиц.

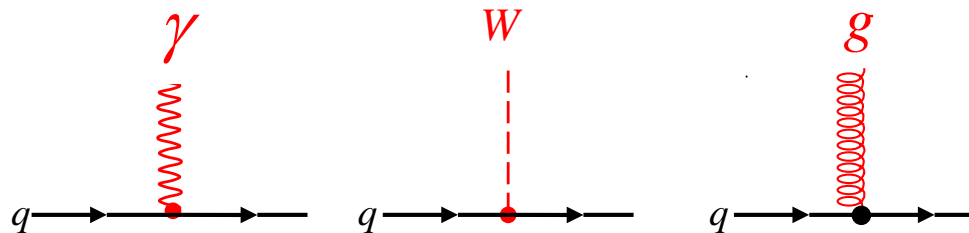
Взаимодействие частиц

Взаимодействия в Стандартной Модели описываются с помощью релятивистски инвариантных амплитуд *пространственно-точечных превращений частиц*. Теории с точечным превращением частиц называют *локальными*. Один из важнейших параметров элементарных амплитуд – это *константа взаимодействия*. Константы взаимодействия определяют вероятности протекания фундаментальных процессов.

В Стандартной Модели все фундаментальные фермионы обладают способностью *испускать или поглощать в одном акте только один из переносчиков взаимодействия*.

При испускании глюонов говорят о сильном взаимодействии, при испускании фотонов об электромагнитном и при испускании калибровочных бозонов — о слабом взаимодействиях.

Чтобы изобразить эти процессы на диаграммах, вводят точечный объект, символизирующий пространственную точку, в которой происходит элементарный акт взаимодействия.



Механизм взаимодействия частиц

Из соотношений неопределенности

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar, \quad \Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$$

следует, что если частица существует в течение короткого промежутка времени Δt , то ее энергия может флюктуировать на величину $\hbar/\Delta t$, а если она находится в области размером Δx , то ее импульс флюктуировает на величину $\hbar/\Delta x$. В течение малых промежутков времени Δt и на малых расстояниях Δx может нарушаться соотношение между импульсом и энергией частицы.

$$E = (p^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}$$

Такие частицы называются виртуальными. Говорят, что они находятся вне массовой поверхности. В виртуальных процессах действуют законы сохранения зарядов — электрического, барионного, лептонных.

В квантовой теории взаимодействия происходят в результате обмена виртуальными частицами — переносчиками этих взаимодействий. Масса виртуальной частицы m и расстояние R , на которое она переносит взаимодействие связаны соотношением

$$R = \hbar / mc.$$

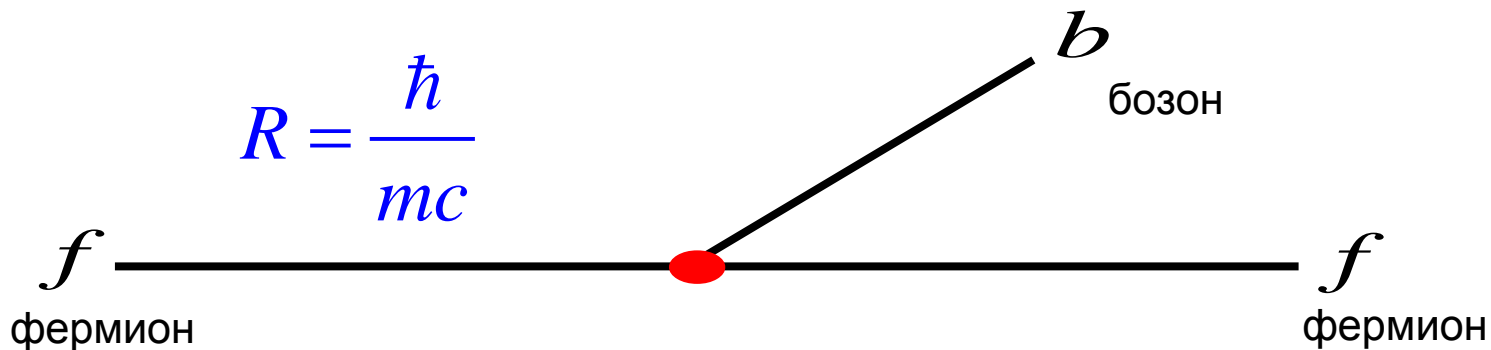
Взаимодействие. Квантовая физика

Локальное взаимодействие в точке Виртуальные частицы

$$\Delta E \cdot \Delta T \approx \hbar$$

$$mc^2 \cdot T \approx \hbar$$

$$R = \frac{\hbar}{mc}$$



Фундаментальная вершина описывающая локальное взаимодействие в квантовой теории.

Фундаментальный фермион (кварк, лептон) испускает или поглощает виртуальный бозон – переносчик взаимодействия (фотон, глюон, промежуточный бозон).

Константы связи

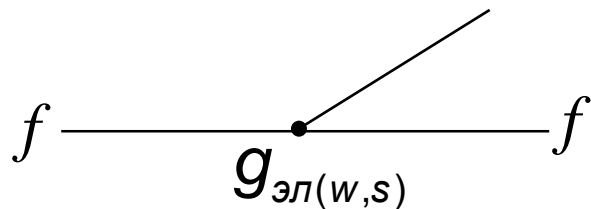
Константы связи определяют интенсивность тех преобразований, которые вызываются элементарными амплитудами. Эти константы обычно выбираются безразмерными и обозначаются через α_e , α_w , α_s . В элементарные амплитуды непосредственно входят квадратные корни из этих величин:

$g_{эл} = \sqrt{\alpha_e}$ – элементарная амплитуда электромагнитного взаимодействия;

$g_w = \sqrt{\alpha_w}$ – элементарная амплитуда слабого взаимодействия;

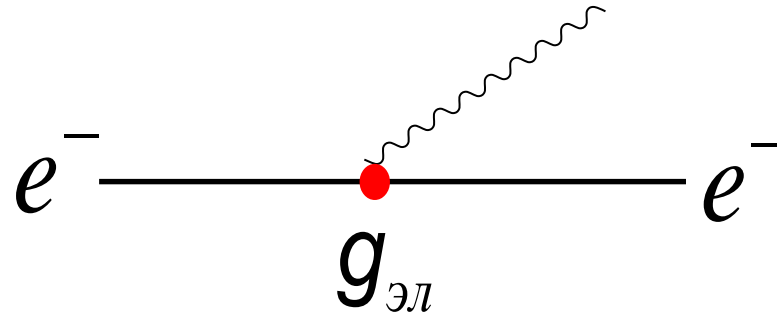
$g_s = \sqrt{\alpha_s}$ – элементарная амплитуду сильного взаимодействия.

Величина константы электромагнитного взаимодействия определяется квадратом заряда электрона, обезразмеренного с помощью мировой постоянной ($\hbar c$):



$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

Электромагнитное взаимодействие



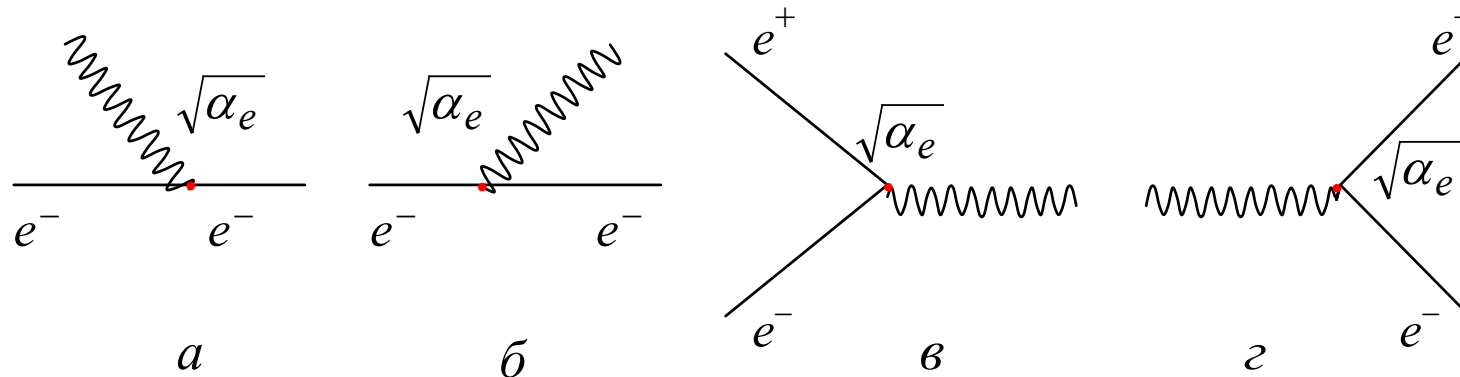
Постоянная тонкой структуры

$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}.$$

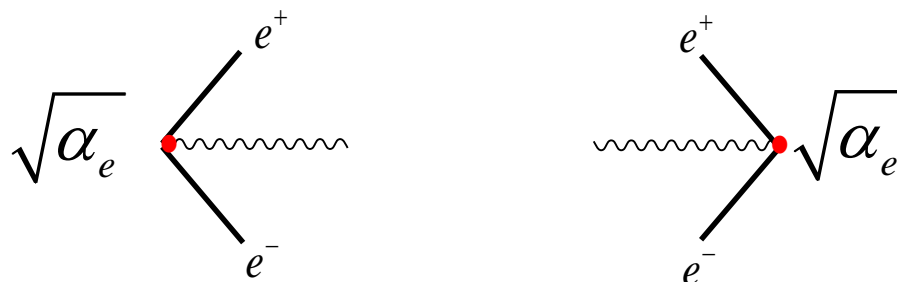
Амплитуда вероятности испускания или поглощения частицы, которое происходит в результате электромагнитного взаимодействия, пропорциональна константе связи $g_{эл}$.

$$g_{эл} = (e^2 / \hbar c)^{1/2} = (1 / 137)^{1/2}.$$

Вершины электромагнитного взаимодействия

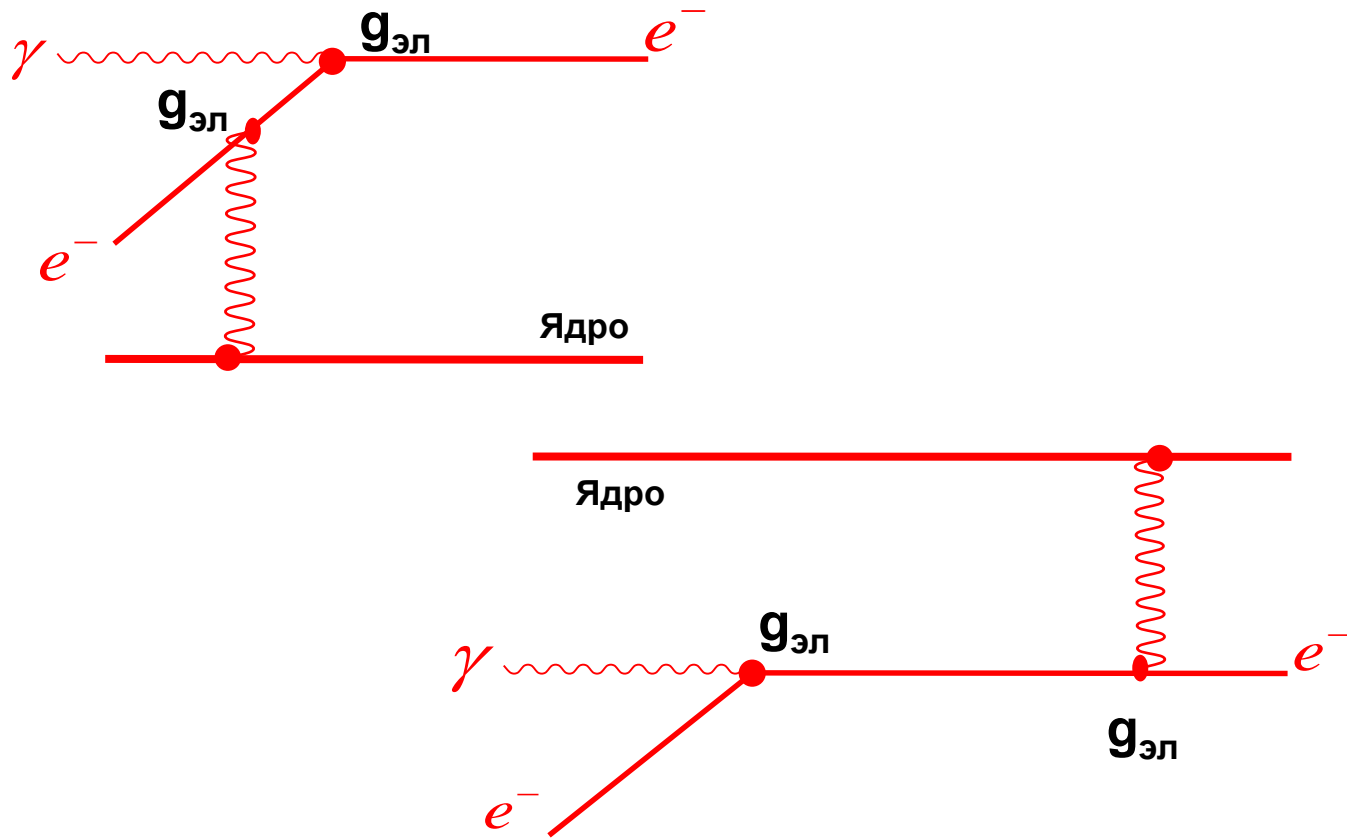


Все вершины диаграмм, получающиеся одна из другой изменением ориентаций образующих вершину линий частиц, характеризуются одной и той же константой связи $g_{эл}$. Этой же константой описываются процессы рождения или поглощения трёх частиц в вакууме.



Пример. Фотоэффект

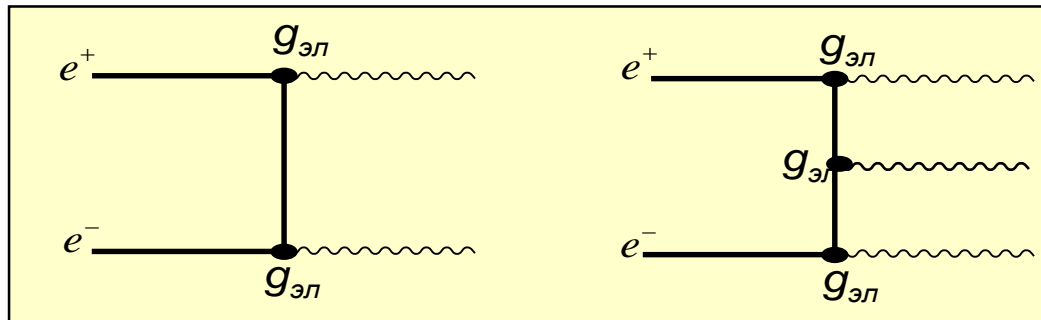
Поглощение γ -кванта атомом с вылетом одного из атомных электронов e^- .



Двух- и трёх- фотонная e^+e^- аннигиляция

Амплитуда процесса A пропорциональна произведению констант связи, описывающих каждый узел. Поэтому амплитуда электромагнитных процессов, описываемых с помощью n узлов, будет пропорциональна $g_{\text{эл}}^n$

Сравнивая количество узлов диаграмм Фейнмана для двух- и трехфотонной аннигиляции легко получить, что сечение двухфотонной e^+e^- аннигиляции приблизительно в 100 раз больше сечения трехфотонной аннигиляции.



$$\frac{A(2g_{\text{эл}})}{A(3g_{\text{эл}})} \sim \frac{1}{g_{\text{эл}}}$$

$$\sigma \approx A^2$$

$$\frac{\sigma(2\gamma)}{\sigma(3\gamma)} \approx \frac{1}{g_{\text{эл}}^2} \approx 100$$

Упругое рассеяние электрона на протоне

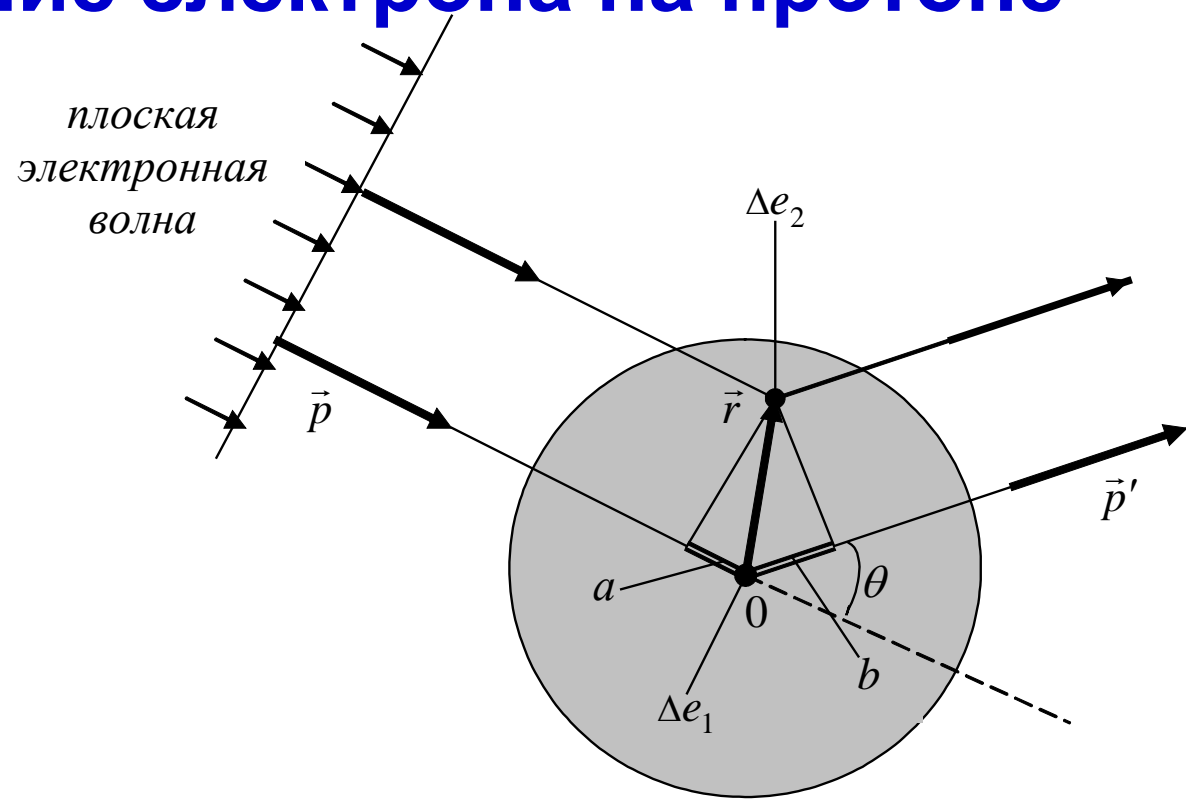
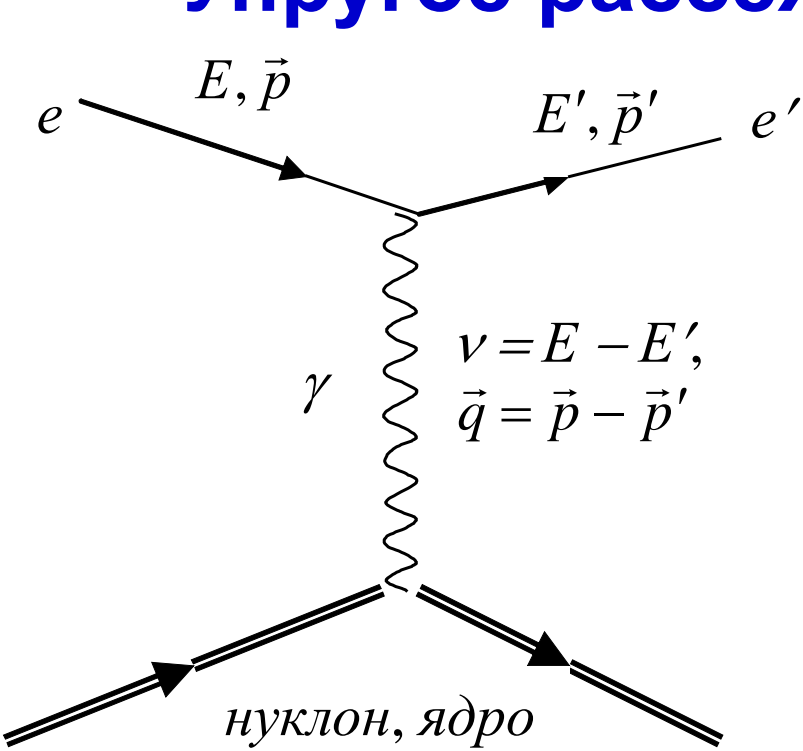


Диаграмма упругого рассеяния электрона на нуклоне (ядре).

Механизм рассеяния электронов на распределенном заряде.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |M_0|^2 \left| \sum_n \Delta e_n \cdot e^{i\frac{\vec{q}\vec{r}_n}{\hbar}} \right|^2 = \frac{d\sigma_M}{d\Omega} \left| \frac{1}{Ze} \int \rho(\vec{r}) e^{i\frac{\vec{q}\vec{r}}{\hbar}} dV \right|^2.$$

$$F(\vec{q}) = \frac{1}{Ze} \int \rho(\vec{r}) e^{i\frac{\vec{q}\vec{r}}{\hbar}} dV,$$

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

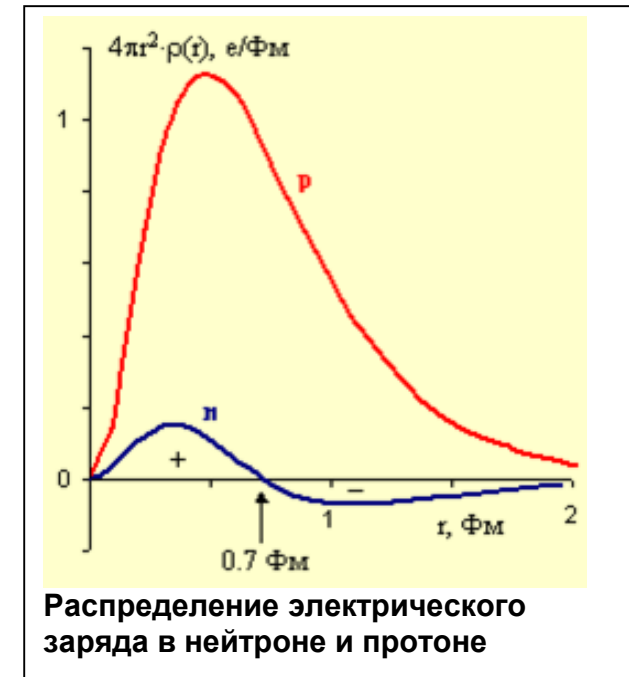
$$\langle r_E^2 \rangle_n^{1/2} = (0.10 \pm 0.01) \text{ Фм}. \quad \langle r_M^2 \rangle_n^{1/2} = (0.89 \pm 0.07) \text{ Фм}.$$

- 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

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

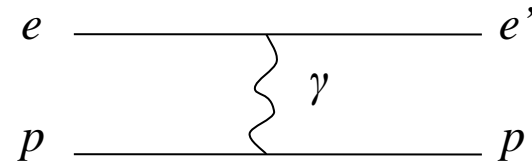
- Отличие величины $\langle r_E^2 \rangle_n^{1/2}$ от нуля означает, что заряд нейтрона только после усреднения по всему объему нейтрона равен нулю.
- В нейтроне центральная часть ($r < 0.7$ Фм) заряжена положительно, периферийная часть — отрицательно.
- Распределения магнитных моментов протона и нейтрона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

Размеры протона и нейтрона

Сечение упругого рассеяния электрона на точечном протоне описывается формулой Мотта



$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\text{Мотт}} = \left(\frac{e^2}{2\varepsilon} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \cdot \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \frac{2\varepsilon}{mc^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

Пространственное распределение электрического заряда и магнитного момента в протоне описывается с помощью двух формфакторов — электрического (G_E) и магнитного (G_M).

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{экс}} = \left[\frac{G_E^2(q^2) + bG_M^2(q^2)}{1+b} + 2bG_M^2 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Мотт}}, \quad b = \frac{-q^2}{4m^2c^2}, \quad q \text{ — четырехимпульс,}$$

который электрон передает нуклону, m — масса нуклона, θ — угол рассеяния электрона, $G_E(q^2)$, $G_M(q^2)$ — электрический и магнитный формфакторы.

Зависимость электрического и магнитного формфакторов от квадрата переданного импульса гамма-кванта

$$G_E^p(q^2) \approx \frac{G_M^p(q^2)}{2,79} = \frac{G_M^n(q^2)}{1,91} = \frac{1}{(1 + q^2 / q_0^2)^2},$$

$$q_0^2 = 0,71 \text{ ГэВ}^2/c^2.$$

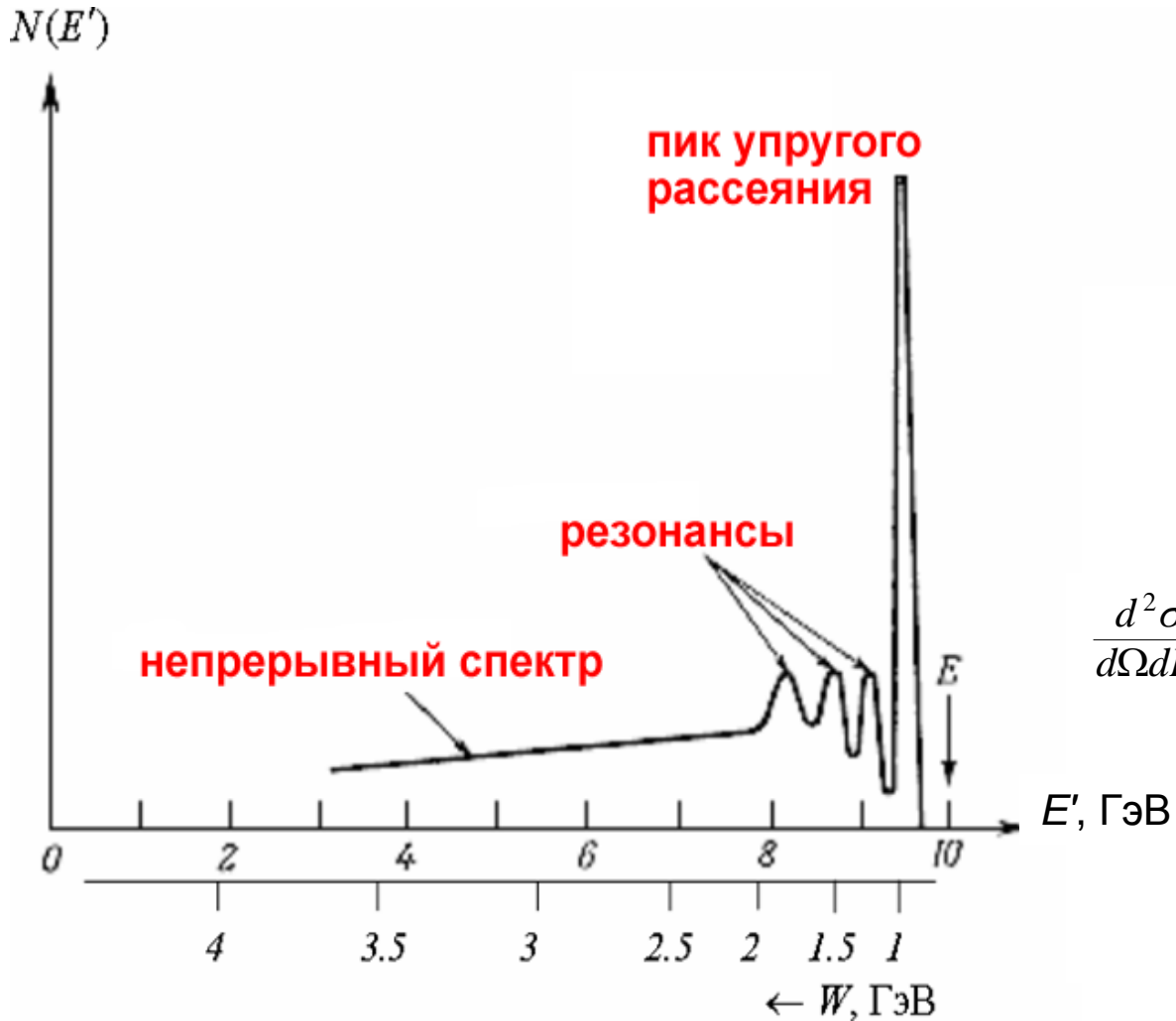
Для протона и нейтрона $G_E(0)$ и $G_M(0)$ имеют значения:

$$G_E^p(0) = 1, \quad G_E^n(0) = 0, \quad G_M^p = 2,79, \quad G_M^n = -1,91,$$

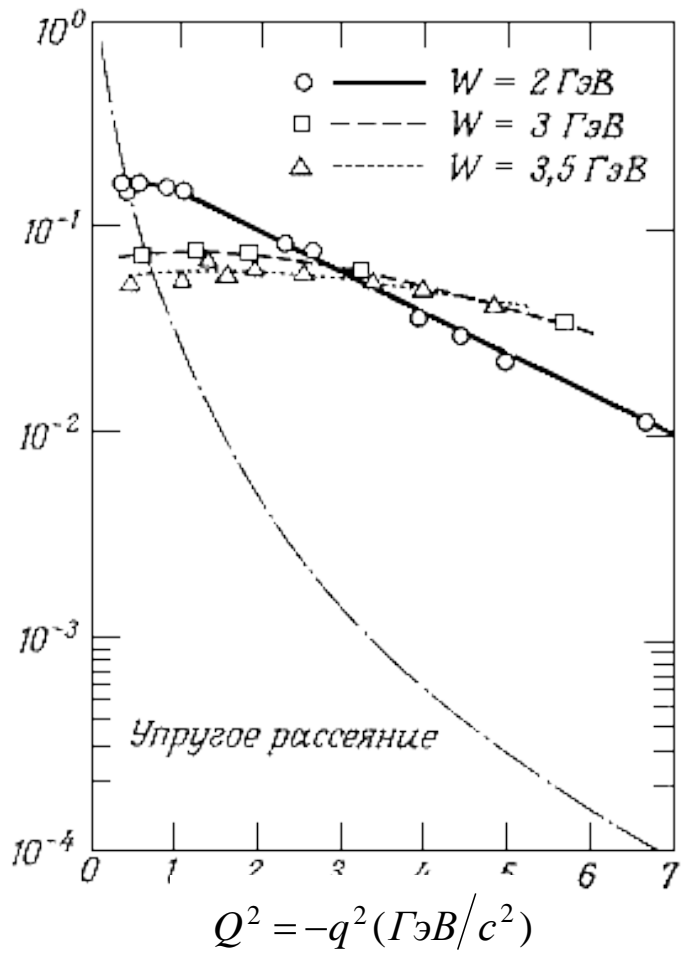
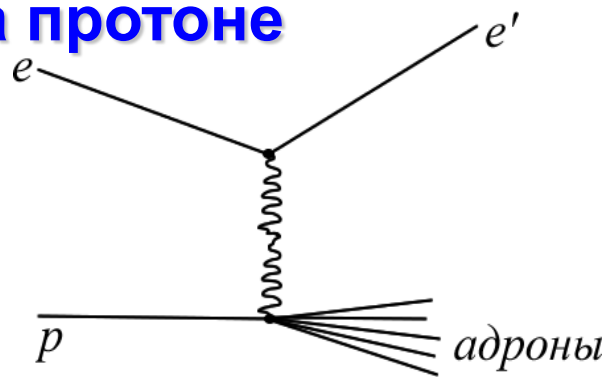
$G_E(0) = Q/e$ (Q — электрический заряд нуклона),

$G_M(0) = \mu/\mu_N$ (μ — магнитный момент нуклона, μ_N - ядерный магнетон).

Глубоконеупругое рассеяние электрона на протоне

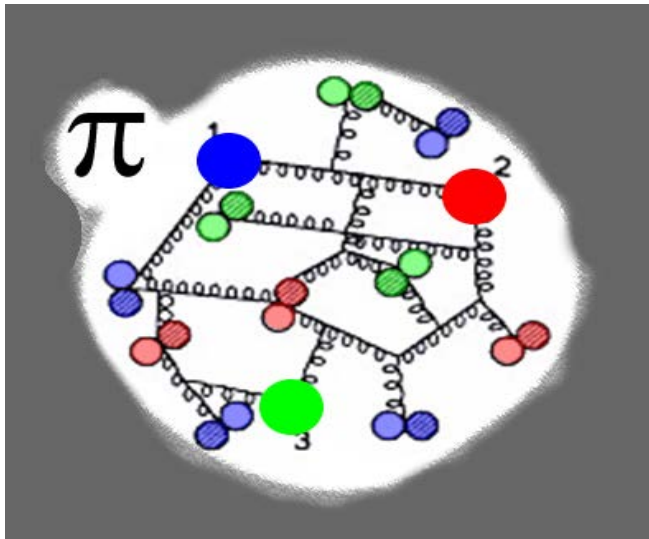


$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} / \frac{d\sigma_M}{d\Omega}$$



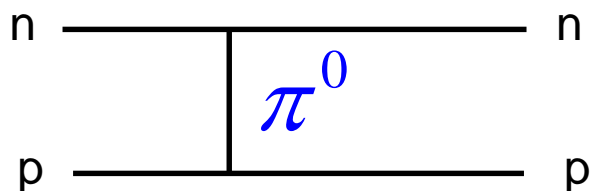
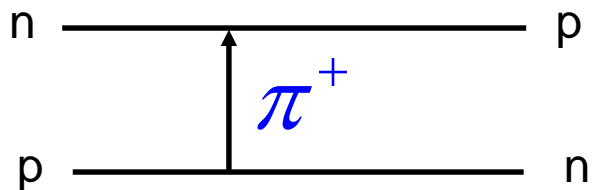
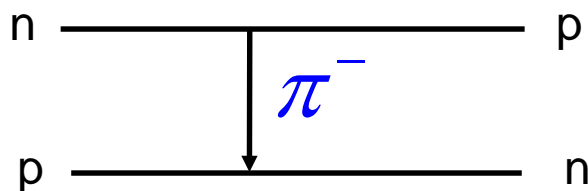
Схематический спектр электронов с энергией $E \approx 10 \text{ ГэВ}$, рассеянных на протоне.

Структура протона



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

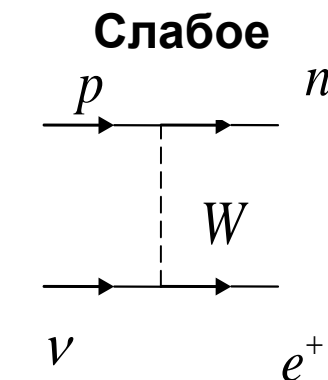
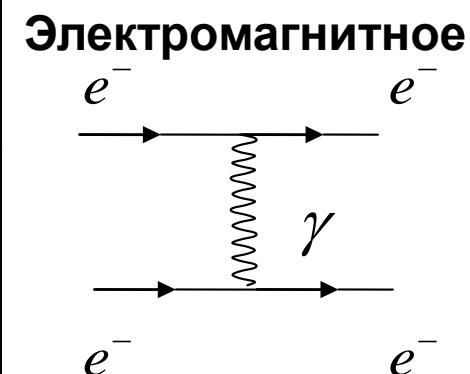
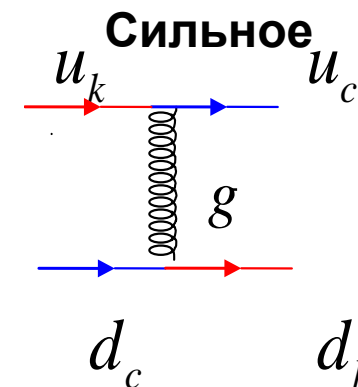
1. Внутри нуклона обнаружены точечноподобные объекты – партоны, в которых сосредоточена вся масса нуклона. Размер партонов $< 10^{-17}$ см.
2. Заряженные партоны имеют характеристики кварков – их спин $1/2$, а заряды в единицах e либо $+2/3$, либо $-1/3$.
3. Нейтральные партоны, отождествляемые с глюонами,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

Фундаментальные взаимодействия. Калибровочные бозоны

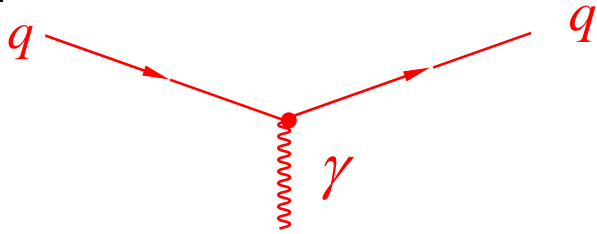
Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны
Сильное	Все цветные частицы	8 безмассовых глюонов, спин $J = 1$
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Безмассовый фотон, спин $J = 1$
Слабое	Кварки, лептоны, калибровочные бозоны W^{\pm}, Z	Массивные бозоны W^+, W^-, Z , спин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



Источником калибровочных бозонов являются заряды соответствующих фундаментальных взаимодействий.

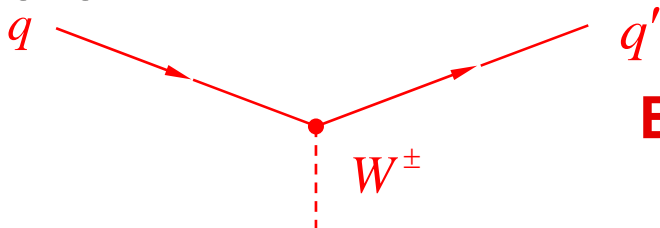
Взаимодействие кварков

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



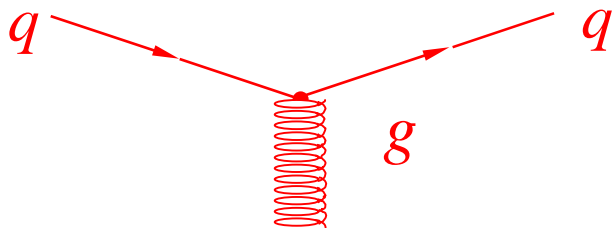
Вершина электромагнитного взаимодействия кварков

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



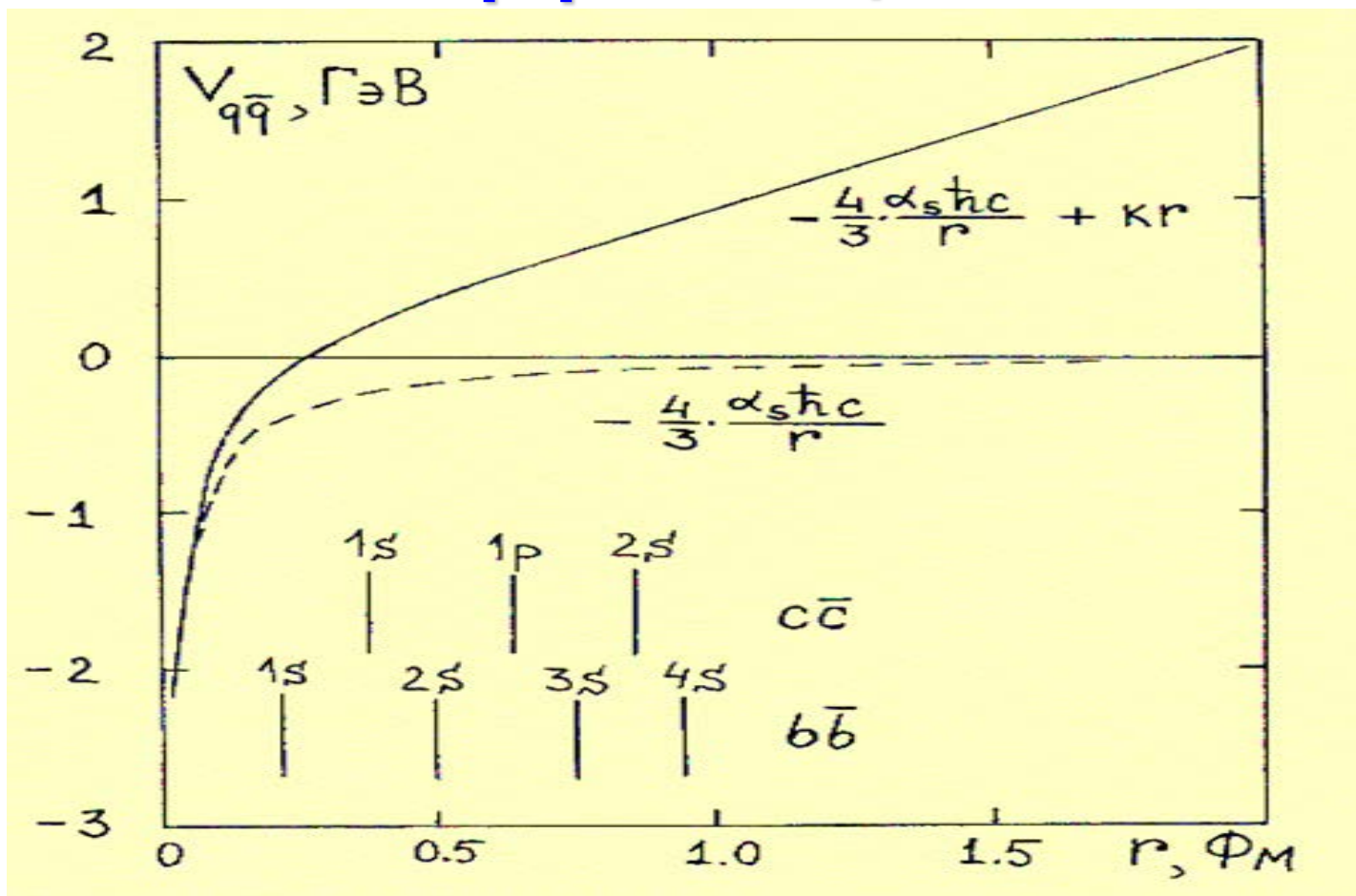
Вершина слабого взаимодействия кварков

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



Вершина сильного взаимодействия кварков

q-q потенциал



Радиальная зависимость потенциала сильного взаимодействия ($\alpha_s = 0.3$ и $k = 1$ ГэВ/Фм). Вертикальные линии показывают радиусы кваркониев в различных состояниях.

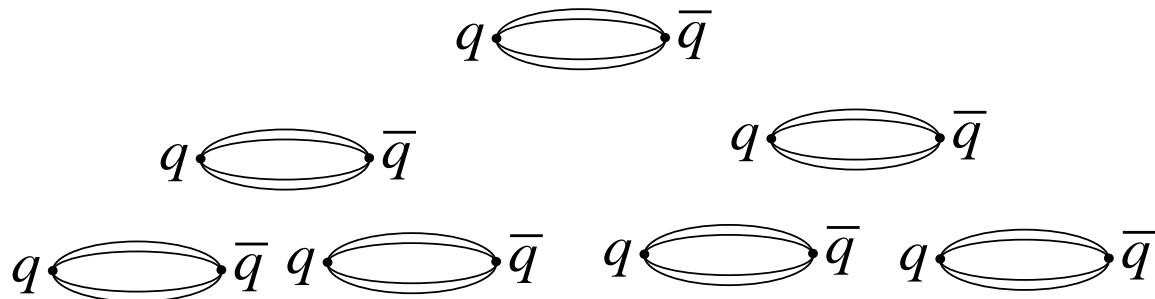
$$V_{q\bar{q}} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + kr$$

q-q потенциал

На больших расстояниях глюонное поле стягивается в трубку, что отвечает линейно растущему с расстоянием потенциалу.

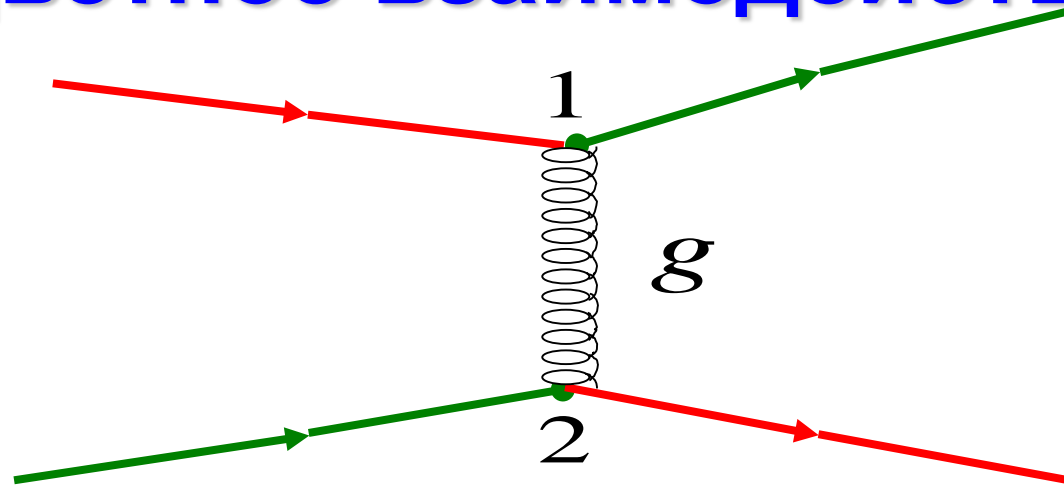


Такая картина $q\bar{q}$ -потенциала позволяет объяснить, почему в результате e^+e^- -аннигиляции рождаются бесцветные адроны. Связано это с тем, что по мере разлёта $q\bar{q}$ -кварков их потенциальная энергия растёт и в некоторый момент превышает порог рождения новой пары кварк-антикварк. При этом трубка разрывается, и на месте разрыва появляются новые пары $q\bar{q}$, которые в свою очередь растягиваются и разрываются, что приводит к рождению новых бесцветных адронов.



Разрывы трубок глюонного поля позволяют наглядно представить, как образуются мезоны в e^+e^- -аннигиляции. Образование барионов происходит аналогично, но при этом необходимо учесть взаимодействие кварков на малых расстояниях, пока разлетающиеся трубки ещё не удалились далеко друг от друга.

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

Каждый глюон имеет пару цветовых зарядов – цвет и антицвет. Всего из трех цветов (k, s, z) и трех антицветов ($\bar{k}, \bar{s}, \bar{z}$) для глюонов можно составить девять возможных парных комбинаций цвет-антицвет:

Парные комбинации цвет-антицвет

	\bar{k}	\bar{s}	\bar{z}
k	$k\bar{k}$	$k\bar{s}$	$k\bar{z}$
s	$s\bar{k}$	$s\bar{s}$	$s\bar{z}$
z	$z\bar{k}$	$z\bar{s}$	$z\bar{z}$

~~$$\frac{1}{\sqrt{6}} (k\bar{k} + s\bar{s} + z\bar{z})$$~~

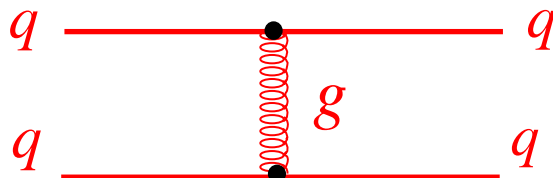
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (k\bar{k} - s\bar{s})$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}} (k\bar{k} + s\bar{s} - 2z\bar{z})$$

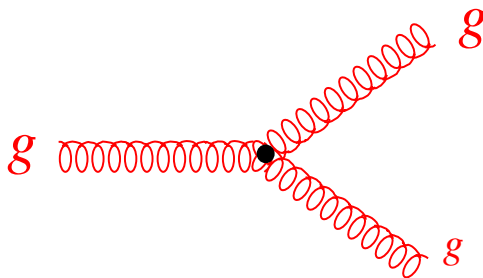
Из этих трех комбинаций кварков только две последние связаны с цветовыми превращениями. Полностью симметричная по цвету комбинация соответствует переходу между кварками одного и того же цвета, при котором глюон не различает цвета кварков. Поэтому существует только 8 известных глюонов, переносящих цветные взаимодействия кварков.

Глюоны – переносчики сильного взаимодействия

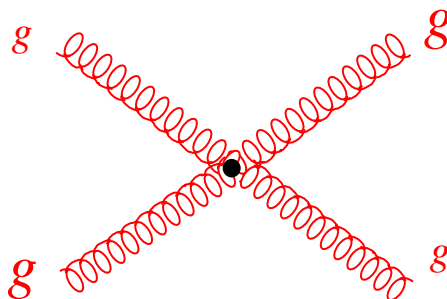
Глюоны в отличие от фотонов обладают цветом, поэтому для них наряду с одноглюонным обменом



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**.

Пример

$$q(\kappa) + g(\bar{\kappa}c) \rightarrow q(c)$$

