



КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^-

μ^-

τ^-

ν_e

ν_μ

ν_τ

u

c

t

d

s

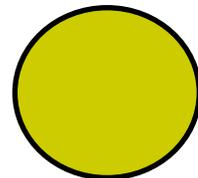
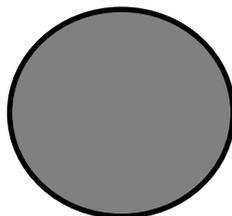
b

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

Взаимодействие.

Классическая физика

Дальнодействие

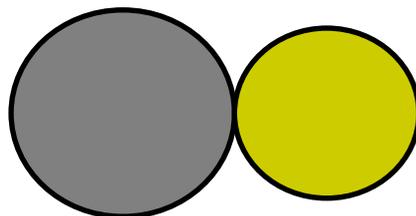


В классической физике, несмотря на разнообразие сил, действующих между телами, взаимодействия между ними описываются двумя фундаментальными взаимодействиями:

- 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.

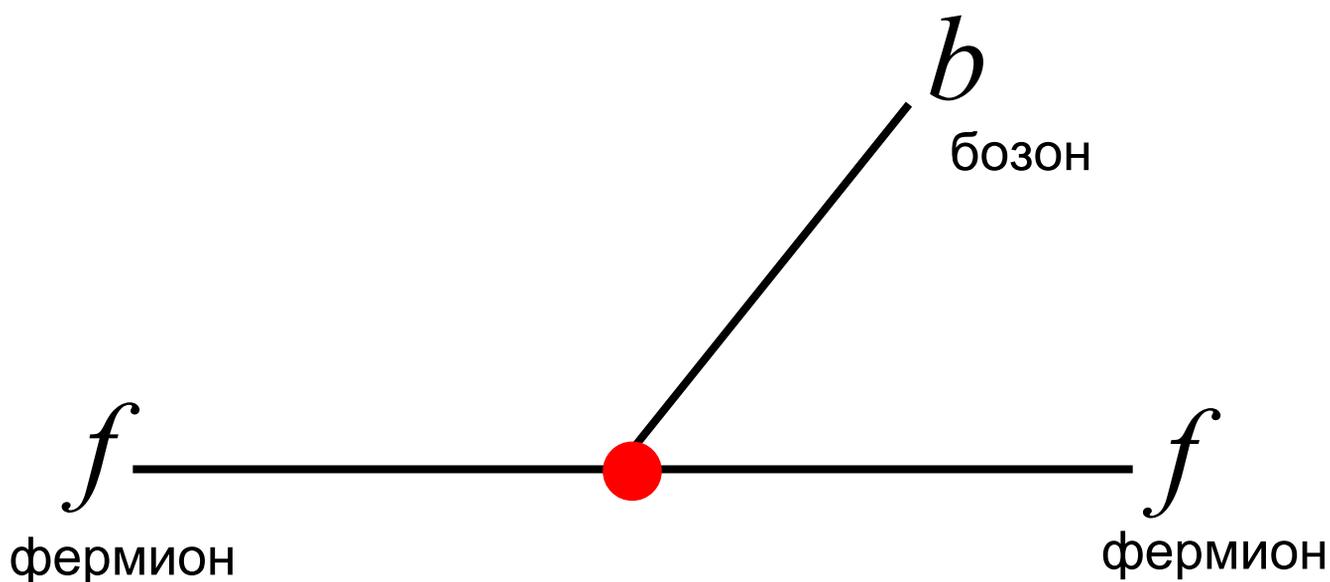
Близкодействие



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

Взаимодействие Квантовая физика

Локальное взаимодействие в точке



Фундаментальная вершина описывающая локальное взаимодействие в квантовой теории. Фундаментальный фермион (кварк, лептон) испускает или поглощает виртуальный бозон – переносчик взаимодействия (фотон, глюон, промежуточный бозон).

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. Поэтому в физике частиц, в которой рождение и поглощение частиц является главной ее особенностью, нужен другой способ описания взаимодействия. Таким способом описания взаимодействия является **амплитудный**, в котором задаются не потенциалы, а **амплитуды** различных преобразований частиц.

Взаимодействие частиц

Мир квантовых явлений описывается с помощью волновой функции $\psi(\vec{r})$, которую называют **амплитудой вероятности** найти квантовую частицу в точке с координатой \vec{r} (если волновая функция задается как функция координат). Вероятность найти частицу в точке \vec{r} дается квадратом модуля амплитуды вероятности, т. е. квадратом модуля волновой функции. Наряду с такой амплитудой вероятности, квантовые явления можно характеризовать с помощью еще одной фундаментальной величины – **амплитуды перехода**. Эта характеристика непосредственно определяет вероятность преобразования частиц. **Квадрат модуля амплитуды** любого процесса описывает **вероятность перехода w из начального состояния в конечное в единицу времени и в единице объема**. Эта вероятность непосредственно связана с эффективным сечением процесса. Существует алгоритм, с помощью которого **полная амплитуда** процесса может быть записана в терминах **элементарных амплитуд**. Элементарные амплитуды являются фундаментальными величинами. Их вид не следует из каких-либо более фундаментальных положений.

Элементарная амплитуда $M(\vec{p}', \vec{p})$ рассеяния двух частиц,

$$M(\vec{p}', \vec{p}) \sim \int e^{-i\vec{p}'\vec{r}/\hbar} V(\vec{r}) e^{i\vec{p}\vec{r}/\hbar} dV$$
$$\vec{p}_1, \vec{p}_2 \rightarrow \vec{p}'_1, \vec{p}'_2$$

взаимодействующих через потенциал $V(\vec{r})$, с точностью до множителя совпадает с матричным элементом от потенциала $V(\vec{r})$ по функциям относительного движения. $\vec{p} = \vec{p}_1 - \vec{p}_2$, $\vec{p}' = \vec{p}'_1 - \vec{p}'_2$ – относительные импульсы начальных и конечных частиц

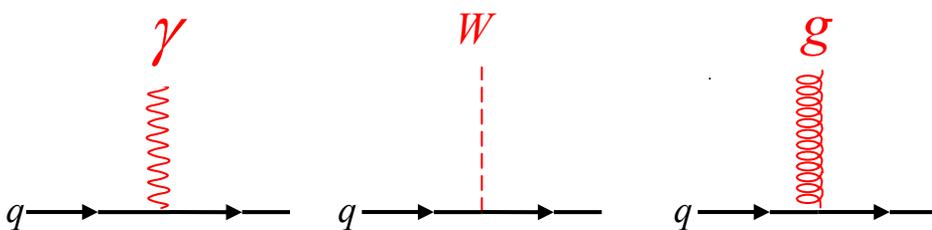
Взаимодействие частиц

Взаимодействия в Стандартной Модели описываются с помощью релятивистски-инвариантных амплитуд **пространственно-точечных превращений частиц**. Теории с точечным превращением частиц называют **локальными**. Стандартная Модель является локальной теорией. Структура и содержание теории определяется видом элементарных амплитуд. 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**. В зависимости от того, что **испускает и поглощает** фундаментальный фермион, говорят о **сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях**.

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.



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

Виртуальная частица



Свободный электрон не может испустить или поглотить фотон, т.к. при этом не будут выполняться законы сохранения энергии и импульса. Это легко показать, рассматривая процесс поглощения фотона в системе координат, в которой электрон покоится после поглощения фотона. В этой системе импульсы электрона p и фотона k до поглощения равны по абсолютной величине и противоположны по направлению

$$|p| = |k|.$$

Из закона сохранения энергии следует

$$\sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4} + c|k| = mc^2 \quad (*)$$

где m — масса электрона. Соотношение (*) выполняется только в случае $p = k = 0$. То есть свободный электрон не может испустить фотон. Однако из соотношения неопределенности следует, что виртуально такой процесс возможен.

Имеется существенное различие между реальными фотонами и виртуальными фотонами, возникающими при описании процессов электромагнитного взаимодействия. Реальный фотон может иметь только поперечную поляризацию. Виртуальные фотоны могут иметь как поперечную, так и продольную поляризацию.

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.

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

Частицы, для которых нарушается это соотношение 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

$$R = \hbar / mc .$$

Чем больше масса виртуальной частицы, тем меньше радиус действия сил, обусловленных обменом этой частицей. Электромагнитное взаимодействие происходит с помощью обмена фотонами. Радиус электромагнитного взаимодействия бесконечен.

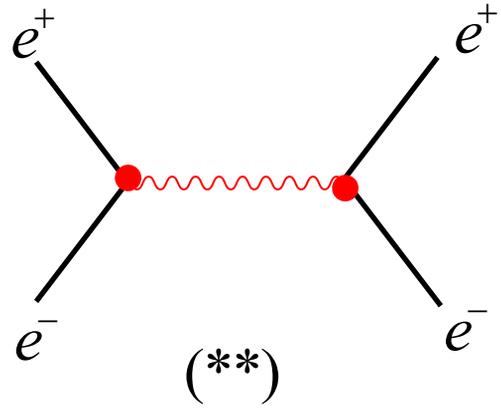
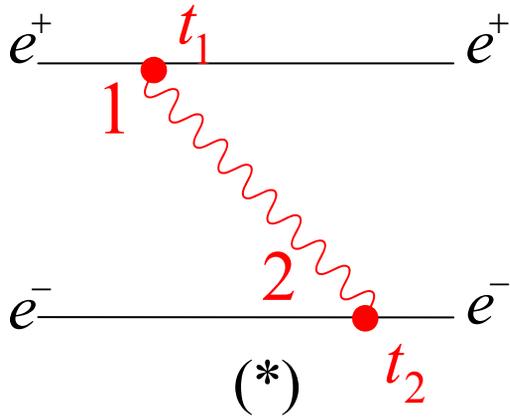
Диаграммы Фейнмана



Для описания различных процессов с участием частиц используют диаграммы Фейнмана. На этих диаграммах линиям со свободными концами отвечают реальные частицы, а внутренним линиям — виртуальные частицы. Точка, в которой рождается или поглощается виртуальная частица, называется **вершиной диаграммы**. Вершины диаграмм содержат основную информацию о процессе — типе фундаментального взаимодействия и его вероятности. Линиям виртуальных частиц сопоставляются функции распространения этих частиц, называемые **пропагаторами**. Пропагатор для частицы, переносящей взаимодействие и имеющей массу m , имеет вид $1/(m^2c^2 - q^2)$, где q — четырехмерный импульс частицы переносящей взаимодействие. Пропагатор входит множителем в амплитуду вероятности процесса.

Для того, чтобы рассчитать вероятность процесса, необходимо, прежде всего, нарисовать для него все возможные диаграммы, и вычислить амплитуду вероятности для каждой диаграммы. Амплитуды вероятности испускания (поглощения) частицы, которое происходит в результате определенного взаимодействия, пропорциональна константе **g** , которая называется константой связи. Полная вероятность процесса равна квадрату модуля суммы амплитуд всех возможных диаграмм. Диаграммы Фейнмана содержат алгоритм расчета амплитуды процесса.

Диаграммы Фейнмана



На рис. (*) показана простейшая диаграмма Фейнмана рассеяния электрона и позитрона, которое происходит в результате электромагнитного взаимодействия. Ось времени t направлена слева направо. До взаимодействия ($t < t_1$) сближались две свободные частицы электрон e^- и позитрон e^+ . Им отвечают незамкнутые слева линии. В вершине 1, в момент t_1 позитрон e^+ испустил фотон — переносчик электромагнитного взаимодействия. Фотон, изображенный волнистой линией, распространяется в сторону электрона e^- и в вершине 2 в момент t_2 поглощается им. Далее электрон и позитрон разлетаются, не испытывая больше никаких взаимодействий. Каждому элементу диаграммы отвечает известная функция или множитель, из которых по определённым правилам строятся в математические выражения, дающие вероятность процесса взаимодействия двух частиц.

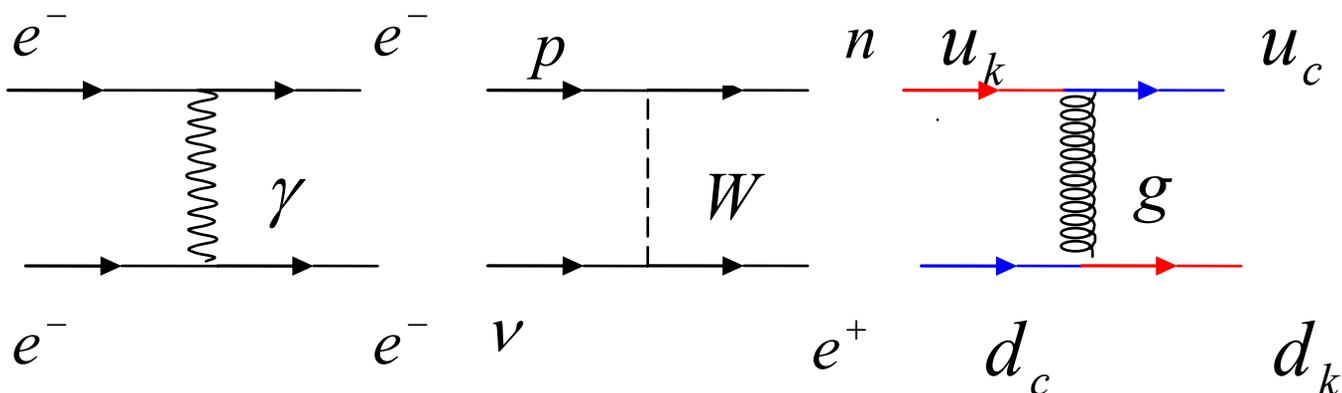
На рис. (**) показан процесс e^+e^- взаимодействия, который происходит в результате e^+e^- аннигиляции с образованием виртуального фотона который затем исчезает, рождая e^+e^- пару.

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 взаимодействие

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия имеют бесконечный радиус т.к. они 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. Человеку для того, чтобы оторваться от Земли, отправить спутник в космическое пространство, необходимо затратить большие усилия. И они определяются необходимостью преодолеть гравитационное взаимодействие.

Происходит это потому, что несмотря на то, что электромагнитное взаимодействие имеет 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.

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;

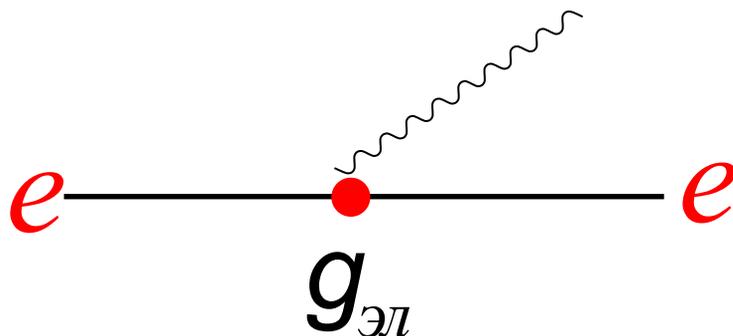
$g_s = \sqrt{\alpha_s}$ – элементарную амплитуду
сильного взаимодействия.

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

Электромагнитное взаимодействие



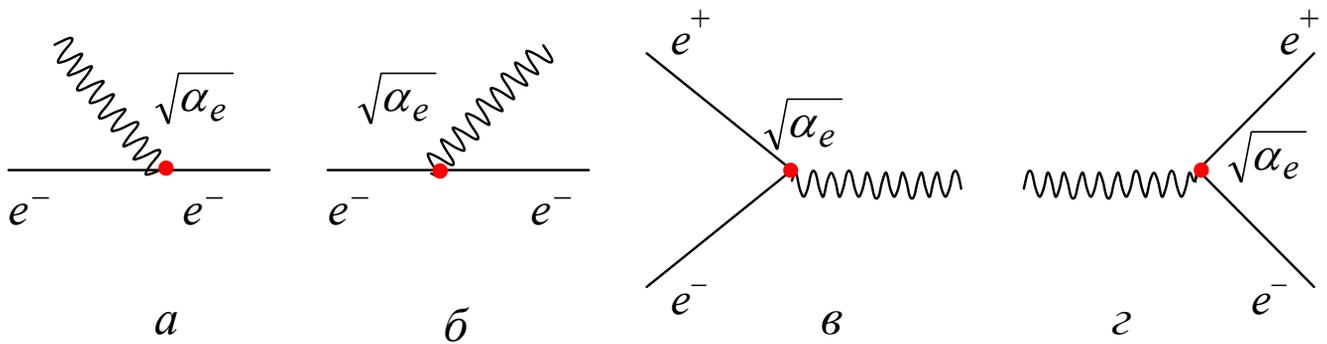
В квантовой электродинамике важную роль играет безразмерная величина, называемая постоянной тонкой структуры

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

Величина α характеризует вероятность испускания или поглощения фотона, вероятность превращения фотона в пару «электрон-позитрон» или аннигиляции этой пары в фотон. Эти три процесса описываются с помощью одного элементарного узла. Все процессы в квантовой электродинамике описываются с помощью различных комбинаций этого элементарного узла. Амплитуды вероятности испускания или поглощения частицы, которое происходит в результате электромагнитного взаимодействия, пропорциональна константе $g_{эл}$, которая называется константой связи. Для электромагнитного взаимодействия соответствующая константа равна корню квадратному из постоянной тонкой структуры

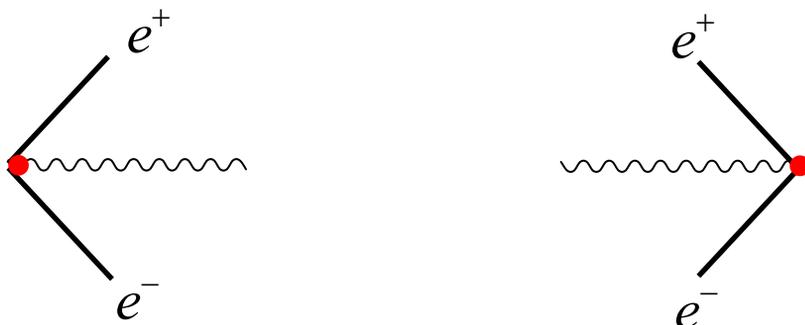
$$g_{эл} = (e^2 / \hbar c)^{1/2} = (1/137)^{1/2}.$$

Вершины электромагнитного взаимодействия



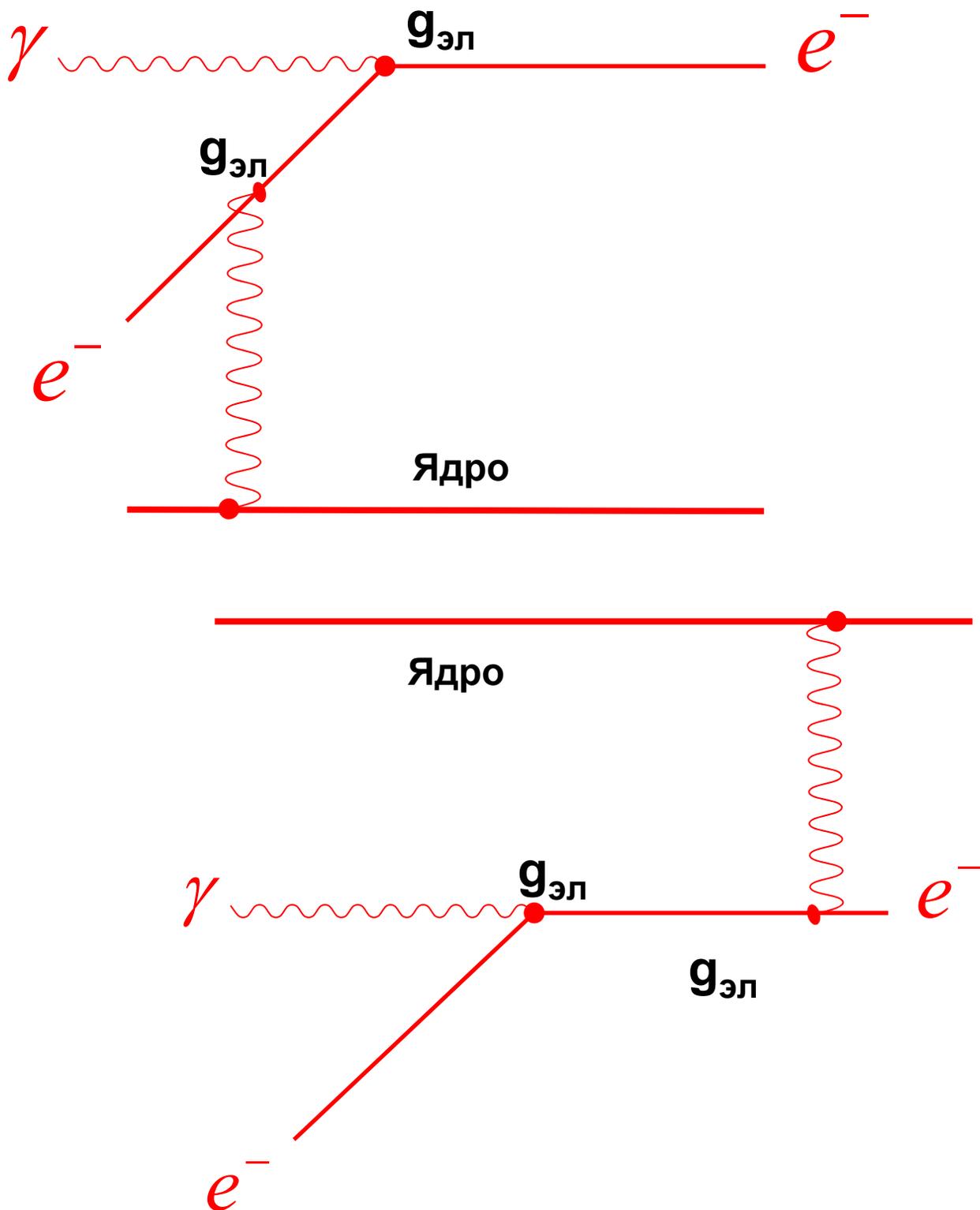
Константа связи не изменяется при любой ориентации линий частиц относительно оси времени.

Все вершины диаграмм, получающиеся одна из другой изменением ориентаций образующих вершину линий частиц, характеризуются одной и той же константой связи $g_{эл}$. Это означает что константа связи электромагнитного взаимодействия характеризует не только поглощение (*a*) и испускание (*б*) фотона электроном, но и виртуальную аннигиляцию электрон-позитронной пары в один фотон (*в*) и виртуальное рождение e^+e^- пары фотоном (*г*). Этой же константой описываются процессы рождения или поглощения трёх частиц вакуумом.

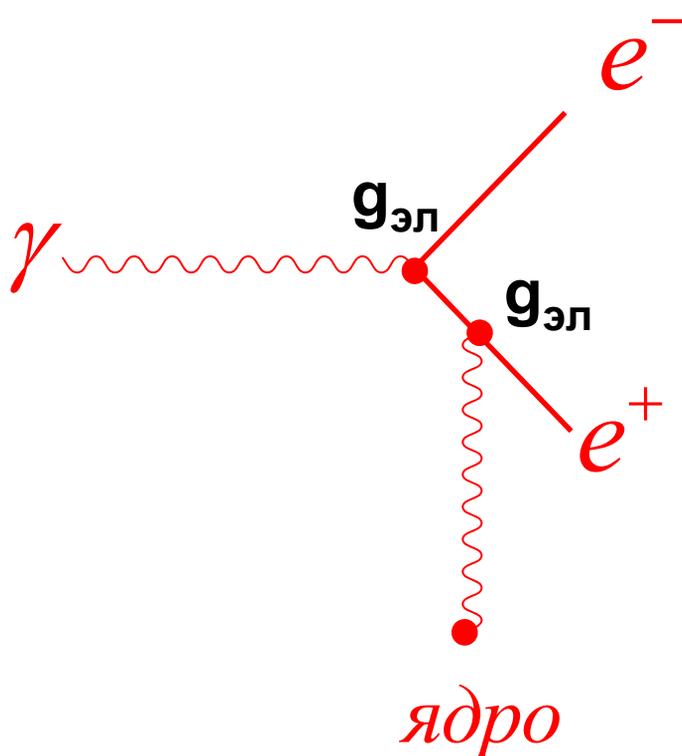
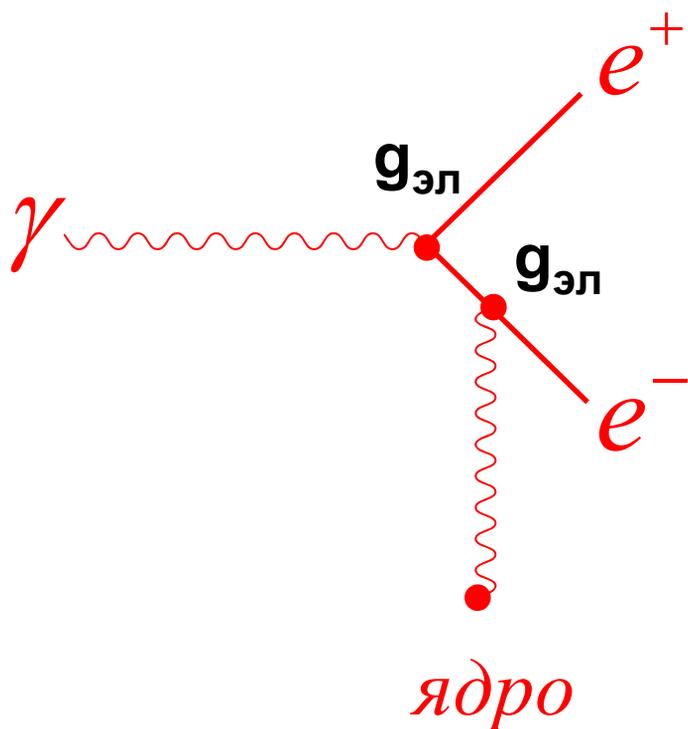


Пример. Фотоэффект

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

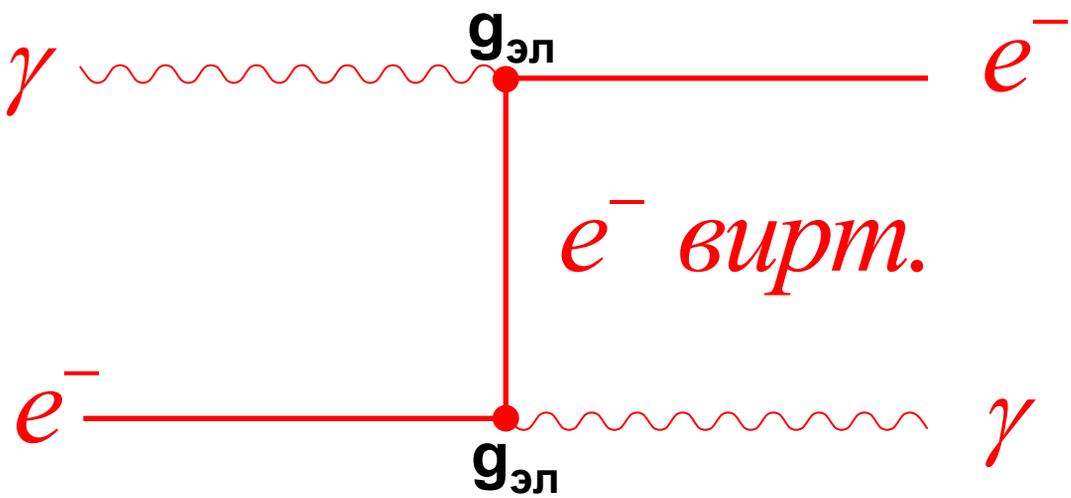


Пример. Образование фотоном e^+e^- пары в поле ядра



Пример. Эффект Комптона

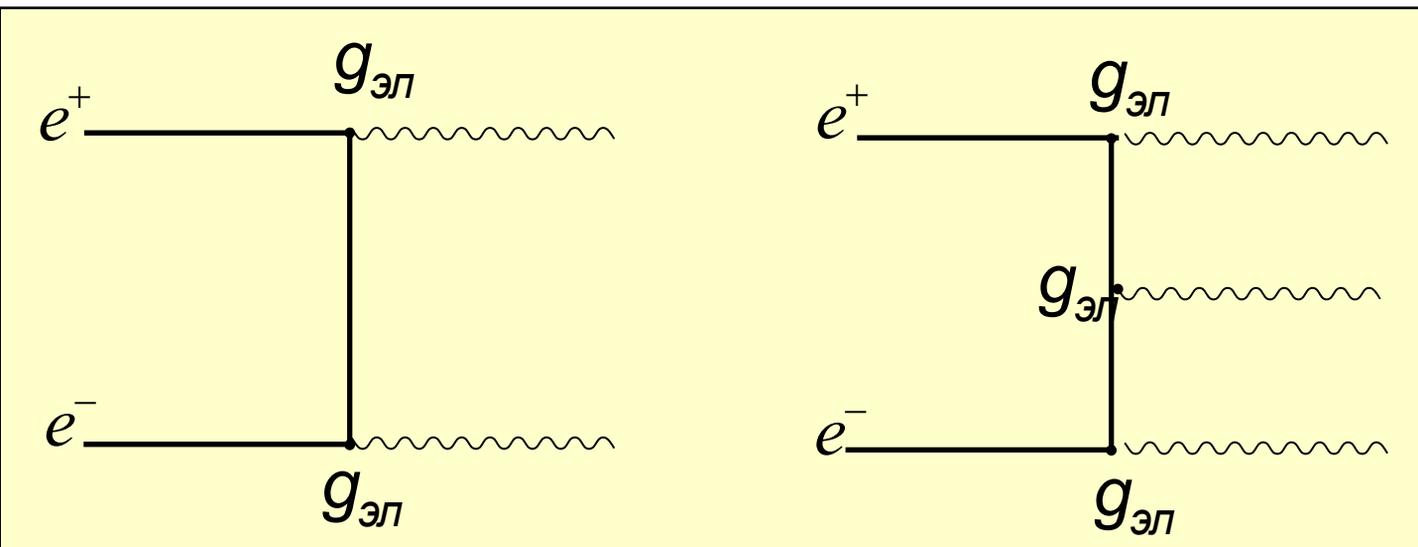
Рассеяние фотона на свободном электроне



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.



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

$$\sigma \approx A^2$$

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

Пример

Двухфотонная аннигиляция быстрого позитрона с энергией E_0 приводит к появлению двух фотонов с энергиями

$$E_{\gamma 1} = \frac{mc^2}{\left[1 - \left(\frac{E_0 - mc^2}{E_0 + mc^2} \right)^{1/2} \cos \theta \right]},$$

$$E_{\gamma 2} = E_0 - E_{\gamma 1} + mc^2,$$

θ — угол между направлением испускания первого фотона и направлением движения позитрона.

Наиболее вероятно испускание двух фотонов в противоположных направлениях под углами близкими к 0° и 180° относительно направления движения позитрона.

Фотон, испущенный под углом 0° , уносит практически всю энергию.

$$E_{\gamma 1}(0^\circ) = \frac{mc^2}{1 - \left(\frac{E_0 - mc^2}{E_0 + mc^2} \right)^{1/2}} \approx E_0 + \frac{mc^2}{2},$$

$$E_{\gamma 2}(180^\circ) \approx \frac{mc^2}{2}.$$

Двухфотонная аннигиляция ускоренного пучка позитронов используется для получения квазимонохроматических фотонов.

Сильное взаимодействие

Цветные кварки

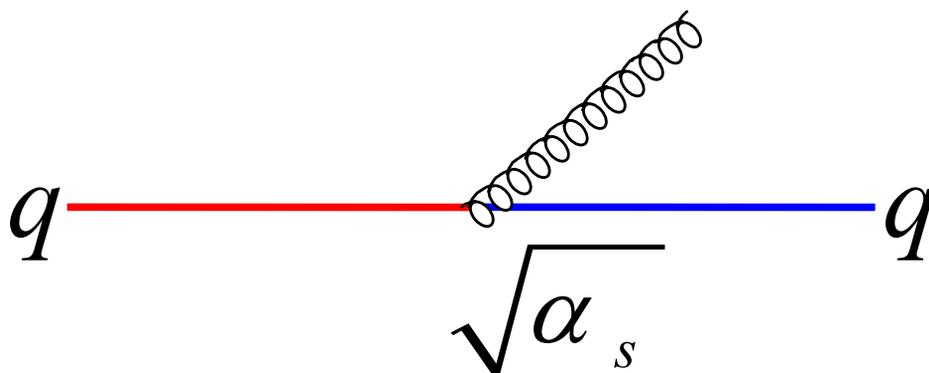
u u u c c c t t t

d d d s s s b b b

18 цветных кварков

Сильное цветное взаимодействие кварков

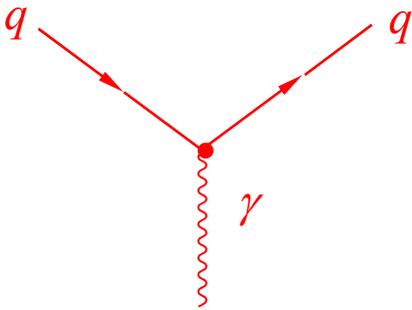
В квантовой хромодинамике наличие трёх цветов кварков приводит к появлению поля цветного взаимодействия. Элементарная вершина сильного взаимодействия между цветными кварками и глюоном описывается диаграммой



Константа $\sqrt{\alpha_s}$ характеризует вероятность испускания или поглощения глюона цветными зарядами кварка, вероятность рождения глюоном пары кварк-антикварк или аннигиляции пары кварков в глюон.

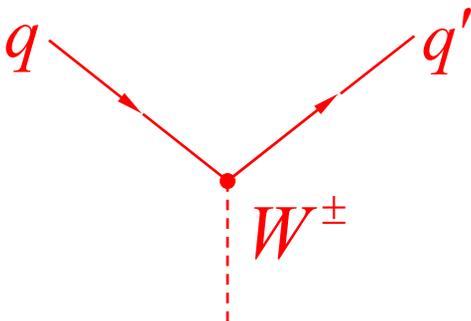
Взаимодействие кварков

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



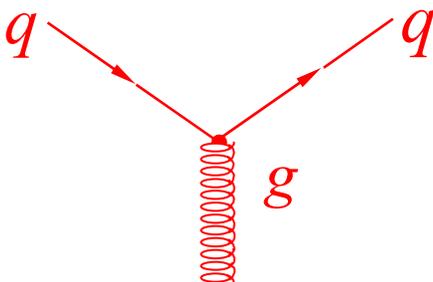
Вершина электромагнитного взаимодействия кварков

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



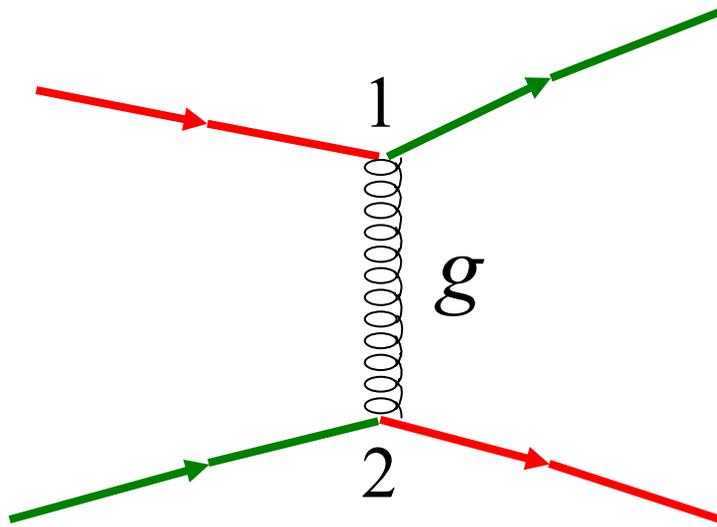
Вершина слабого взаимодействия кварков

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.

$$J^P = 1^-$$

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

Эти 9 парных комбинаций цвет-антицвет разбиваются на 6 недиагональных явно окрашенных и 3 диагональных, обладающих скрытым цветом: $k\bar{k}$, $z\bar{z}$ и $s\bar{s}$. Цветовые заряды, как и электрические, сохраняются. Поэтому 6 недиагональных явно окрашенных пар не смешиваются между собой. Что касается трёх диагональных пар, то сохранение цветового заряда не препятствует переходам типа $k\bar{k} \leftrightarrow z\bar{z} \leftrightarrow s\bar{s}$, т. е. диагональные пары смешиваются. В результате этих переходов вместо трёх цветовых сочетаний $k\bar{k}$, $z\bar{z}$ и $s\bar{s}$ возникают три другие, являющиеся их линейными комбинациями.

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

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

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

Однако из этих трех комбинаций кварков только две последние связаны с цветными 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.

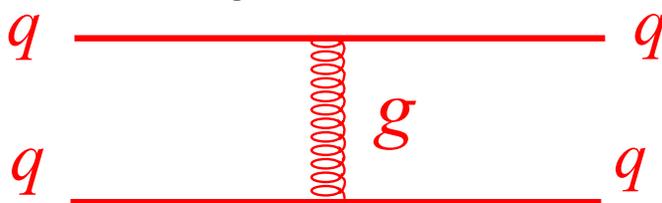
Цветное взаимодействие

8 цветных глюонов переносят сильное взаимодействие между кварками

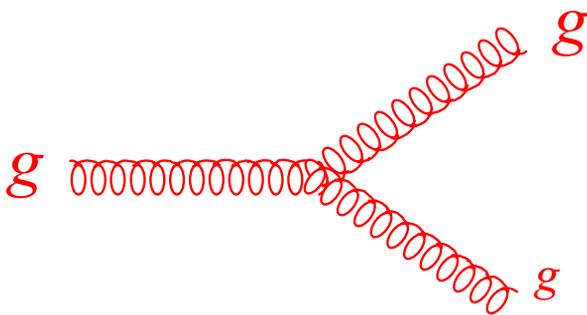
$K\bar{3}, K\bar{C}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(K\bar{K} + 3\bar{3} + c\bar{c})$
$3\bar{K}, 3\bar{C}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(K\bar{K} - 3\bar{3})$
$C\bar{K}, C\bar{3}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(K\bar{K} + 3\bar{3} - 2c\bar{c})$

Глюоны – переносчики сильного взаимодействия

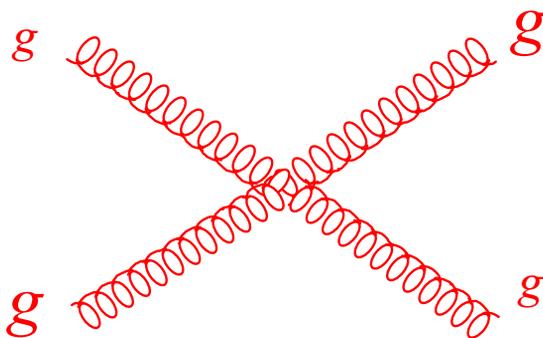
Глюоны в отличие от фотонов обладают цветом, поэтому для них наряду с одноглюонным обменом



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**.

Глюоны

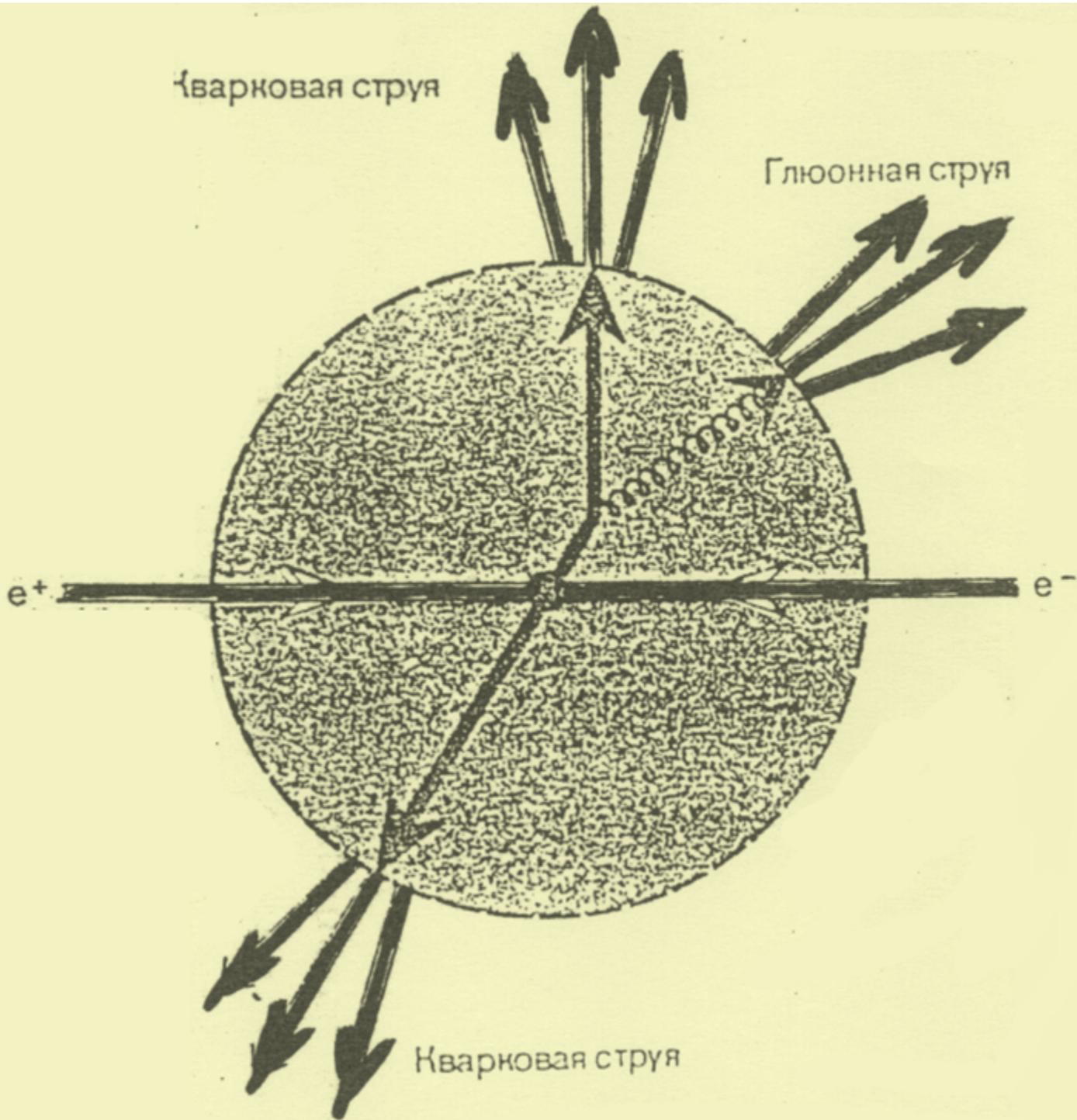
Квантовая хромодинамика предсказывает, что с увеличением энергии образующиеся в e^+e^- -взаимодействии кварки будут обладать достаточной энергией, и они могут испускать глюоны. В этом случае вместо двух струй адронов будут наблюдаться три струи адронов, одна из которых порождена глюоном. Открытие в 1978 г. трехструйного события служит доказательством реального существования глюонов.

Глюоны наблюдались в виде узких адронных струй, возникающих при взаимодействии частиц высоких энергий.

Глюоны играют существенную роль в формировании внутренней структуры адронов. Анализ процессов глубоко неупругого рассеяния частиц на нуклонах показывает, что примерно половина энергии нуклона приходится на глюоны.

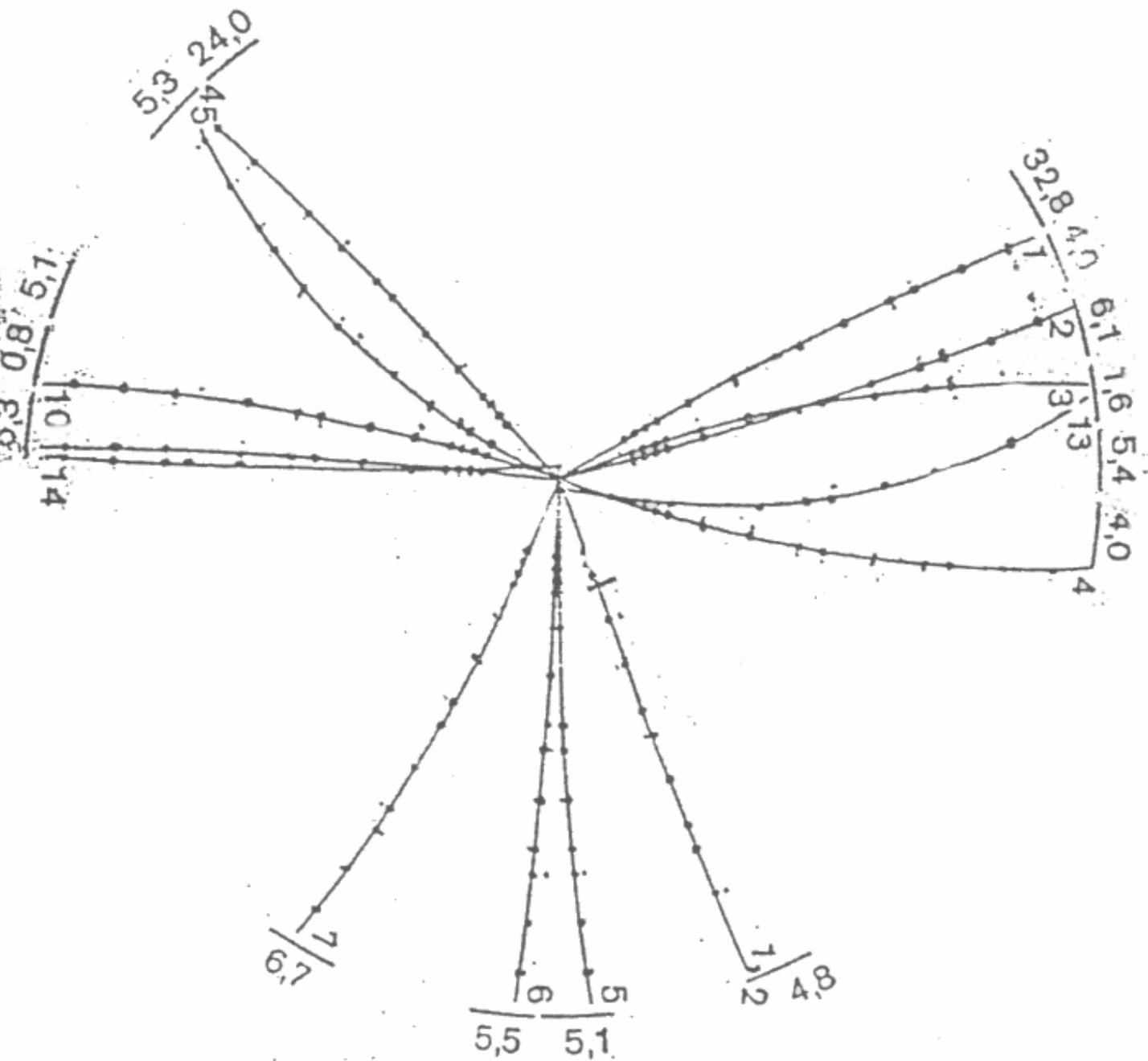
Цветовые заряды кварков являются источниками цветовых глюонных полей. На этом основании кварки часто называют материей, а глюоны просто полями. Эта терминология, однако, имеет ограниченный смысл: цветные заряды глюонов также могут быть источниками глюонов и кварков. Глюон электрически нейтрален. Поэтому он может породить кварки только $q\bar{q}$ парами.

Адронные струи



Образование глюонов при аннигиляции электрона и позитрона. Конечное адронное состояние — три струи, одна из которых глюонная. Глюон испущен одним из кварков, который при этом изменил направление импульса и цвет.

Глюоны

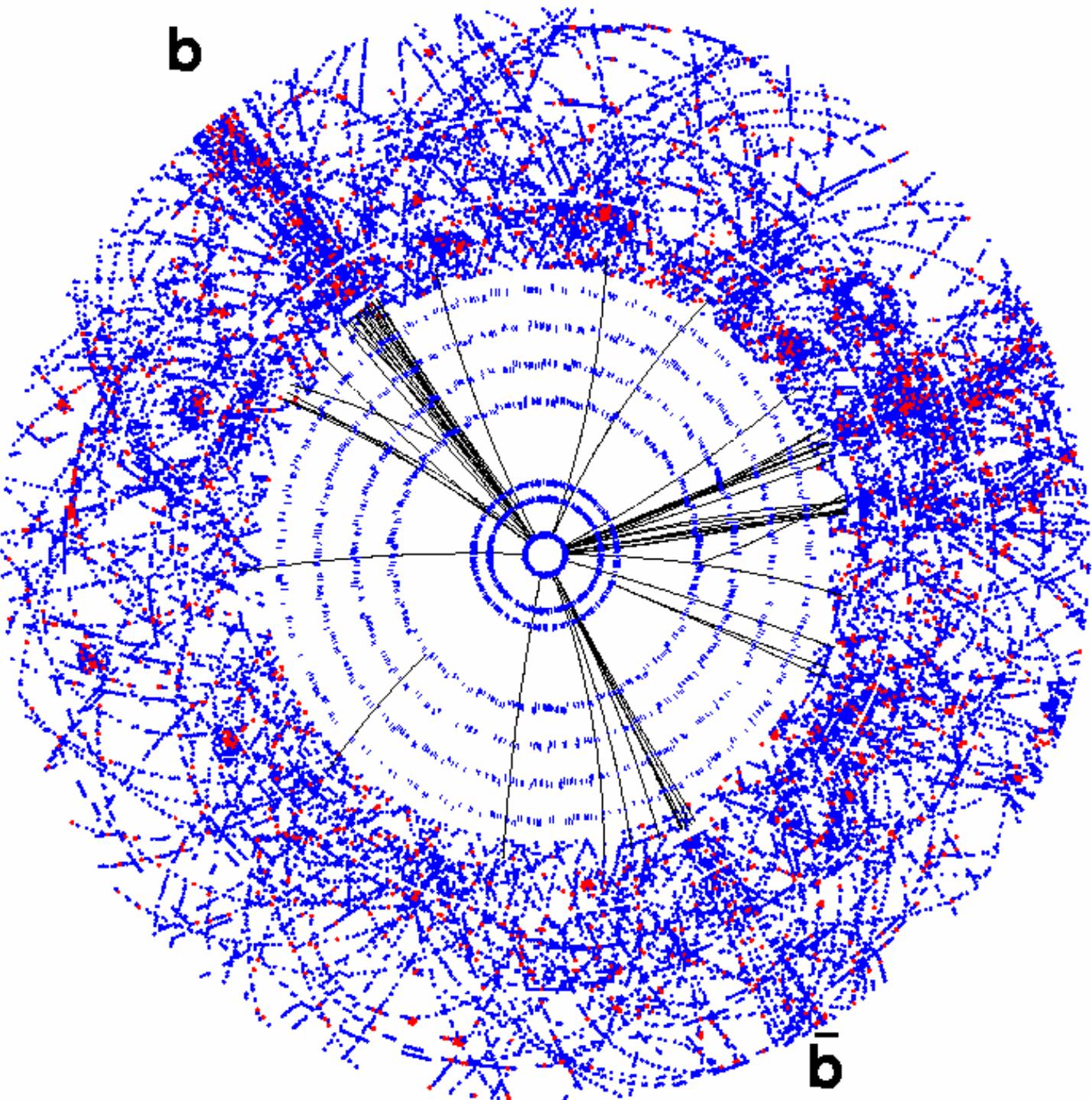


Одно из трёхструйных событий в процессе электрон-позитронной аннигиляции, зарегистрированное на детекторе TASSO в 1980г. Отчётливо видны три струи частиц.

Пример

ATLAS Barrel Inner Detector

$H \rightarrow b\bar{b}$

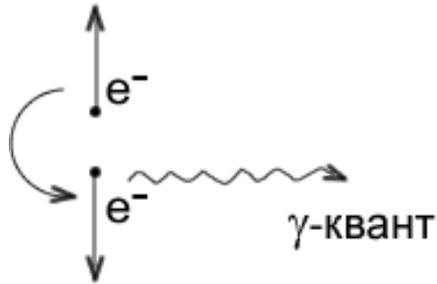


Реконструированное событие, в котором наблюдаются адронные струи.

Слабое взаимодействие

Электромагнитные и слабые взаимодействия

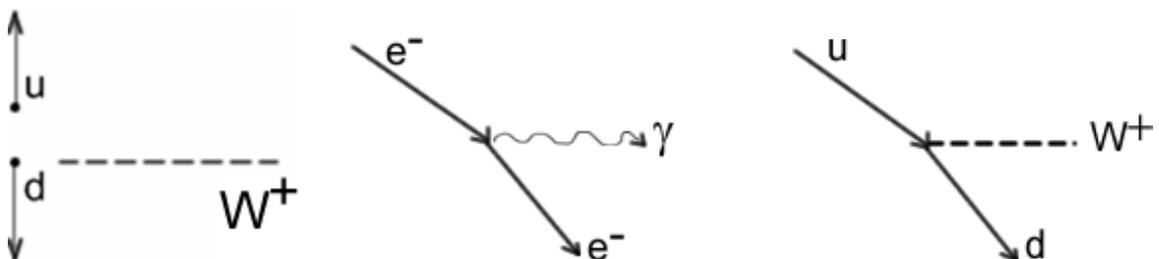
Описание процесса переворота спина электрона на языке квантовой теории поля означает уничтожение электрона в состоянии со спином «вверх» и рождение электрона со спином «вниз». При этом рождается квант электромагнитного поля.



Переворот спина электрона отвечает взаимодействию с электромагнитным полем. Квант электромагнитного поля взаимодействует с электрическим зарядом, но сам не имеет электрического заряда. Поле,

соответствующее электромагнитным переходам, является электрически нейтральным.

При перевороте изоспина кварка — превращении u -кварка в d -кварк — происходит изменение электрического заряда кварка. При этом рождается квант поля, который уносит электрический заряд. Поле, связанное с таким переходом, электрически заряженное. Его кванты имеют электрический заряд. Это кванты слабого поля — W^+ -, W^- -бозоны. Т.е. процессы слабого взаимодействия описываются аналогично процессам электромагнитного взаимодействия. Развитие симметрии между электромагнитным и слабым взаимодействиями привело к единой теории электрослабого взаимодействия.



W^+ , W^- , Z - бозоны

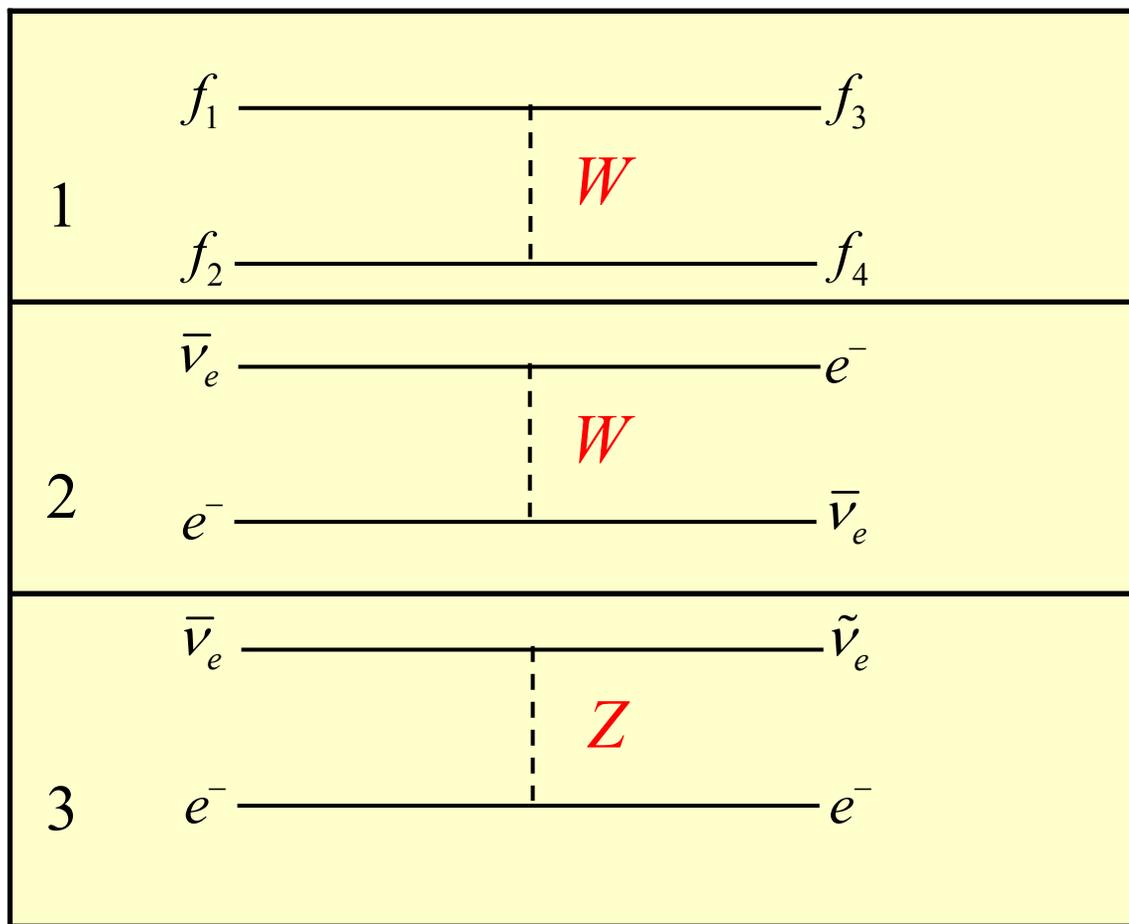
Переносчиками слабого взаимодействия являются W^+ , W^- , Z бозоны которые часто называют промежуточными бозонами. Бозоны W и Z были предсказаны теоретически задолго до их экспериментального обнаружения как «промежуточные» частицы, переносящие слабое взаимодействие. Слабое взаимодействие, также как и 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.

W^+ , W^- , Z - бозоны

Диаграмма 1 описывает слабые взаимодействия фермионов (они обозначены $f_{1,2,3,4}$) посредством обмена заряженным промежуточным бозоном W .

Диаграмма 2 описывает случай рассеяния электронного антинейтрино на электроном.

Возможны слабые процессы, в которых происходит обмен нейтральным Z -бозоном. В этом случае электрические заряды взаимодействующих лептонов не изменяются (диаграмма 3).



Пример

Исходя из характеристик переносчиков слабого взаимодействия W^\pm - и Z -бозонов, определить радиус слабых сил.

Массы W - и Z -бозонов: $m_W \approx 80 \text{ ГэВ}/c^2$,
 $m_Z \approx 90 \text{ ГэВ}/c^2$. Радиус действия слабых сил a_W связан с массой переносчиков взаимодействия W - и Z -бозонов соотношением

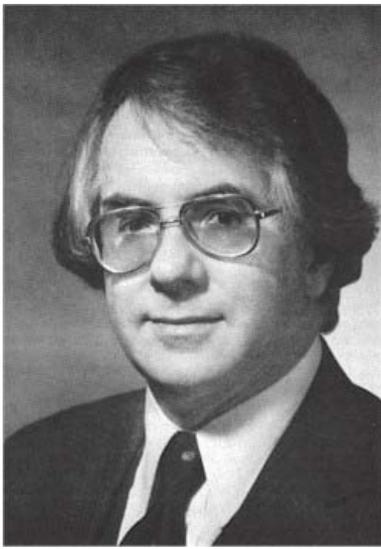
$$a_W \approx \frac{\hbar c}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar c}{m_Z c^2},$$

следующим из соотношения неопределенности $\Delta E \Delta t \approx \hbar$. Действительно, нарушение закона сохранения энергии на величину $\Delta E = m_W c^2 \approx m_Z c^2$ ненаблюдаемы в течение временных интервалов

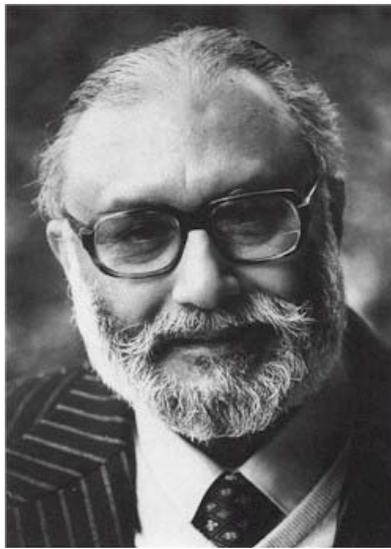
$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m_W c^2} \approx \frac{\hbar}{m_Z c^2}.$$

Так как $m_W \approx m_Z \approx 100 \text{ ГэВ}/c^2$, имеем

$$a_W \approx \frac{0,2 \text{ ГэВ} \cdot \text{ФМ}}{100 \text{ ГэВ}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ ФМ}.$$



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

В 1967. С. Вайнберг, А. Салам и Ш. Глэшоу создали модель электрослабого взаимодействия, объединившую электромагнитное и слабое взаимодействия. Квантами поля, переносящими слабое взаимодействие являются W^+ , W^- и Z бозоны.

Нобелевская премия по физике

1979 г. - Ш. Глэшоу, А. Салам и С. Вайнберг.

За вклад в теорию объединённого слабого и электромагнитного взаимодействия между элементарными частицами, включающий в том числе предсказание слабого нейтрального тока.

CERN 1981

Ускоритель *Sp \bar{p} S* создан в результате модернизации протонного суперсинхротрона *SPS*. *SPS* являлся ускорительным комплексом, состоящим из четырёх последовательных ускорителей. При создании *Sp \bar{p} S* этот комплекс был дополнен системой генерации и ускорения антипротонов.

Ускоритель размещён на глубине 50 м под землёй в тоннеле диаметром 4 м. Радиус кольца ускорителя 1.1 км. По окружности ускорителя расположено в периодической последовательности 108 идентичных структур, состоящих из ~ 800 отклоняющих и более 200 фокусирующих магнитов.

Процесс ускорения начинался с газоразрядного источника ионов. В бустер протоны попадали из линейного ускорителя на 50 МэВ. В бустере энергия протонов достигала 800 МэВ. Затем они инжектировались в *PS*. В ускоритель *SPS* протоны поступали уже ускоренными до энергии 26 ГэВ в протонном синхротроне *PS*.

Антипротоны рождались протонами с энергией 26 ГэВ из *PS*, в результате их взаимодействия с медной мишенью. Доля антипротонов в общем потоке адронов, возникавших в мишени, составляла 10^{-8} . С помощью магнитных и электрических полей отбирались антипротоны с энергией 3.5 ГэВ, которые поступали в накопитель антипротонов. Накопители – это устройства для накопления и длительного удержания (часы, дни) пучка заряженных частиц на стационарной замкнутой орбите при постоянной энергии. Накопленные антипротоны с энергией 3.5 ГэВ направлялись в *PS* и затем в *SPS*, где они, как и протоны, ускорялись до 270 ГэВ, двигаясь в одной и той же ускорительной камере в противоположных направлениях.

Образование W и Z бозонов

W- и Z-бозоны рождались в $p\bar{p}$ -столкновениях:

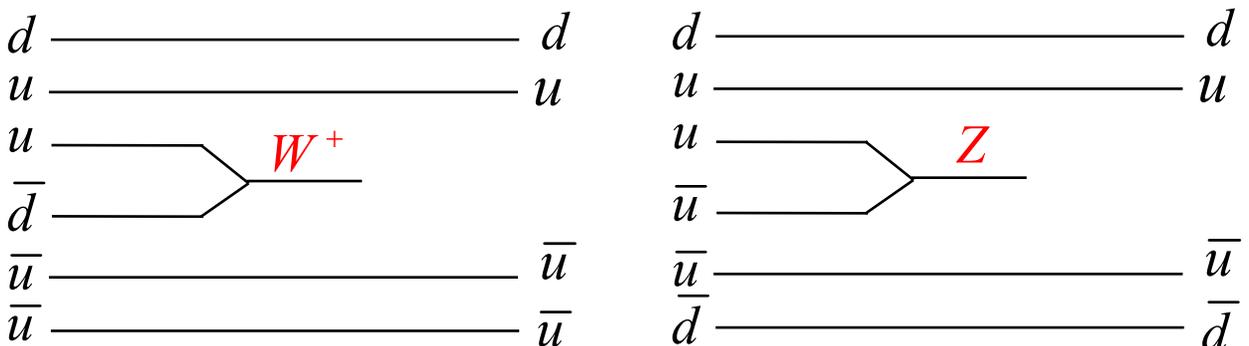


X – совокупность других частиц, рождающихся при $p\bar{p}$ -взаимодействии.

Протон и антипротон состоят соответственно из трёх кварков ($p= uud$) и трёх антикварков ($\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$). Промежуточные бозоны рождаются в кварк-антикварковом взаимодействии

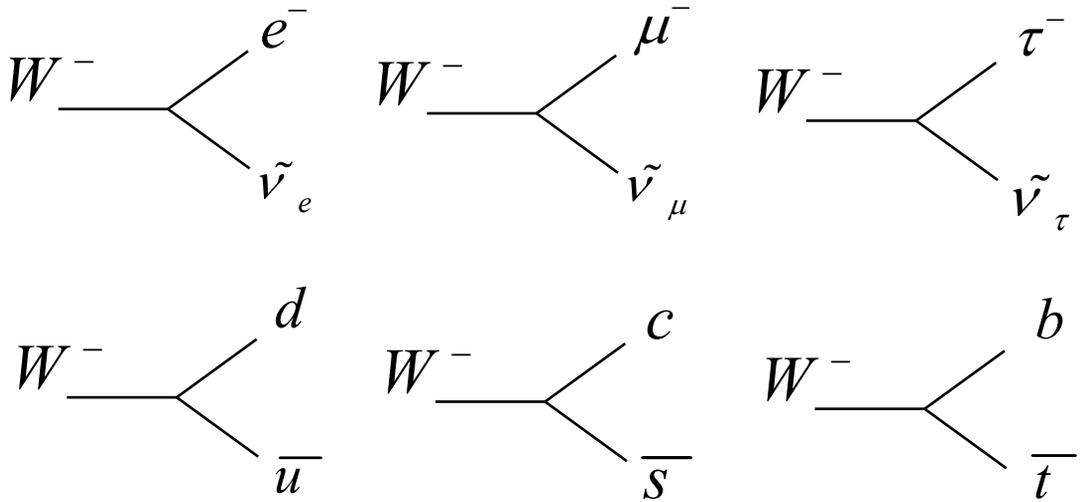


Оставшиеся два кварка протона и два антикварка антипротона при каждом $p\bar{p}$ -столкновении с рождением промежуточного бозона и продолжают своё движение в направлении движения первичных $p\bar{p}$ -пучков, формируя струи адронов и антиадронов.



Распады W^- бозона

$$M(W^-) = 80.419 \pm 0.056 \text{ ГэВ}$$



Время жизни промежуточного бозона $\approx 3 \cdot 10^{-25}$ с и зафиксировать его рождение можно лишь по результату его распада. В большинстве случаев промежуточный бозон распадается на пару кварк-антикварк, разлетающуюся в противоположные стороны. Искать W и Z -бозоны по кварк-антикварковой ветви их распада нецелесообразно, так как кварк и антикварк распада W^- и Z -бозонов «тонут» в огромном фоне кварков и антикварков, не участвующих в рождении W^- и Z -бозонов и превращающихся в струи адронов и антиадронов.

Из адронного фона более надежно выделяются распады W^- и Z -бозонов на лептоны, в результате которых эти лептоны вылетают в направлениях перпендикулярных или близких к ним относительно линии столкновения протона и антипротона

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \quad Z \rightarrow e^+ + e^- \quad (*)$$

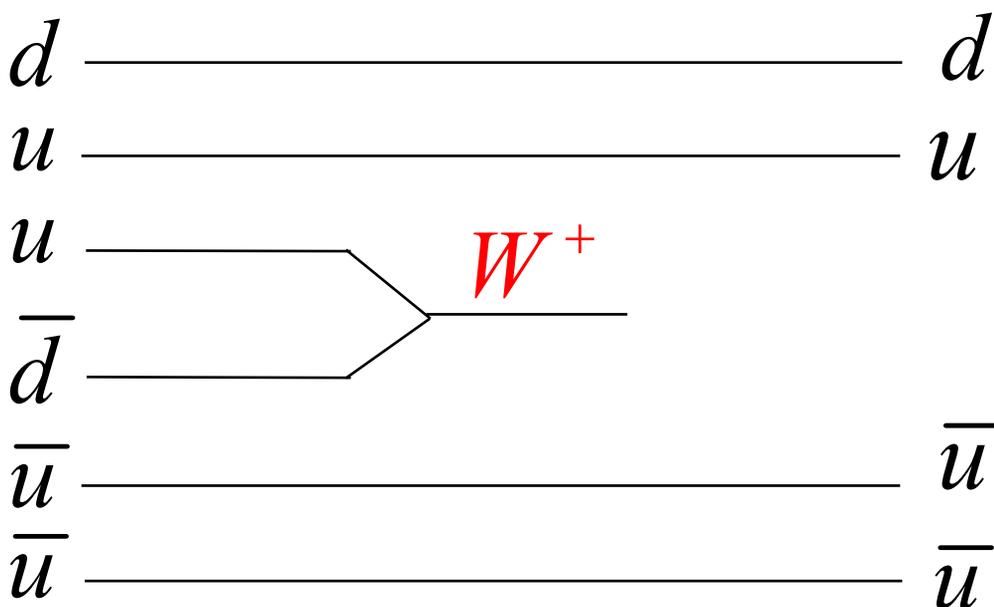
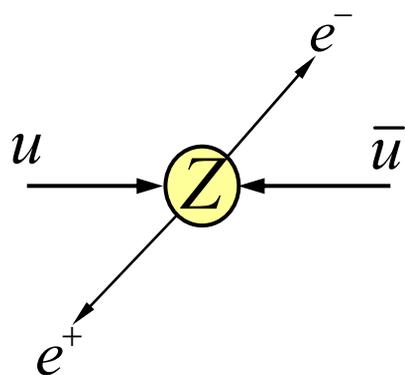
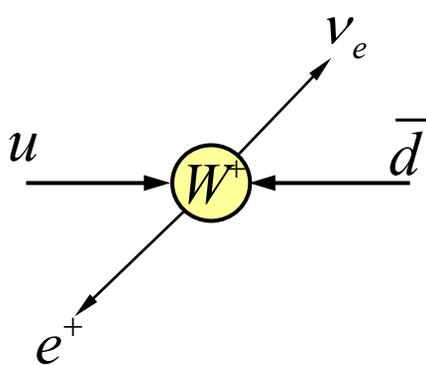
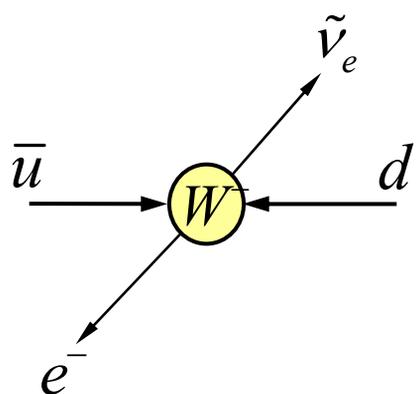
Вероятности рождения W^\pm и Z в $p\bar{p}$ -столкновениях с последующим их распадом по лептонным каналам (*) составляют 10^{-8} от полной вероятности всех процессов $p\bar{p}$ -столкновений.

W^- и Z -бозоны искали по их распадам на электроны и позитроны, летящие под углами близкими к 90° относительно направления движения сталкивающихся $p\bar{p}$ -пучков.

Регистрация Z и W[±] бозонов

$P(ud)$

$\bar{P}(\bar{u}\bar{d})$



Регистрация W и Z бозонов

Имеющие почти одинаковые массы и скорости \bar{u} и d -кварки испытывают лобовое столкновение. W^- -бозон рождается в состоянии покоя с $m_W c^2 \approx 80$ ГэВ.

W^- -бозон распадается на электрон и электронное антинейтрино. Они летят в поперечном направлении с одинаковыми импульсами и практически одинаковыми энергиями $E(e) \approx E(\bar{\nu}_e) \approx \frac{m_W c^2}{2} \approx 40$ ГэВ. Никаких других частиц, летящих в поперечном направлении, при таком распаде W^- -бозона не должно быть. Детектирующая установка должна зарегистрировать электрон с энергией 40 ГэВ, летящий в поперечном направлении. Антинейтрино не регистрируется детектором.

Доказательством распада W^- -бозона является событие с одним электроном, летящим с энергией 40 ГэВ в поперечном направлении и с недостающим поперечным

импульсом $P_{\perp} = \frac{E(\bar{\nu}_e)}{c} \approx 40$ ГэВ/с в противоположном

относительно электрона направлению. Никакой другой процесс, кроме распада W^- -бозона, не может оставить такой след в экспериментальной установке.

Для идентификации Z-бозона установка должна зарегистрировать электрон и позитрон, летящие в противоположные стороны в поперечном направлении с

одинаковыми энергиями $E(e^+) \approx E(e^-) \approx \frac{m_Z c^2}{2} \approx 45$ ГэВ.

Никаких других частиц не должно быть.

Наблюдение W и Z бозонов

Сечение рождения W-бозонов в $p\bar{p}$ -столкновении $\approx 5 \cdot 10^{-33}$ см². Лишь примерно 8% родившихся W-бозонов распадаются по каналу $W \rightarrow e + \nu$, который необходимо было обнаружить. Рождение Z-бозонов и их распад по каналу $Z \rightarrow e^+ + e^-$ происходило почти в 10 раз реже.

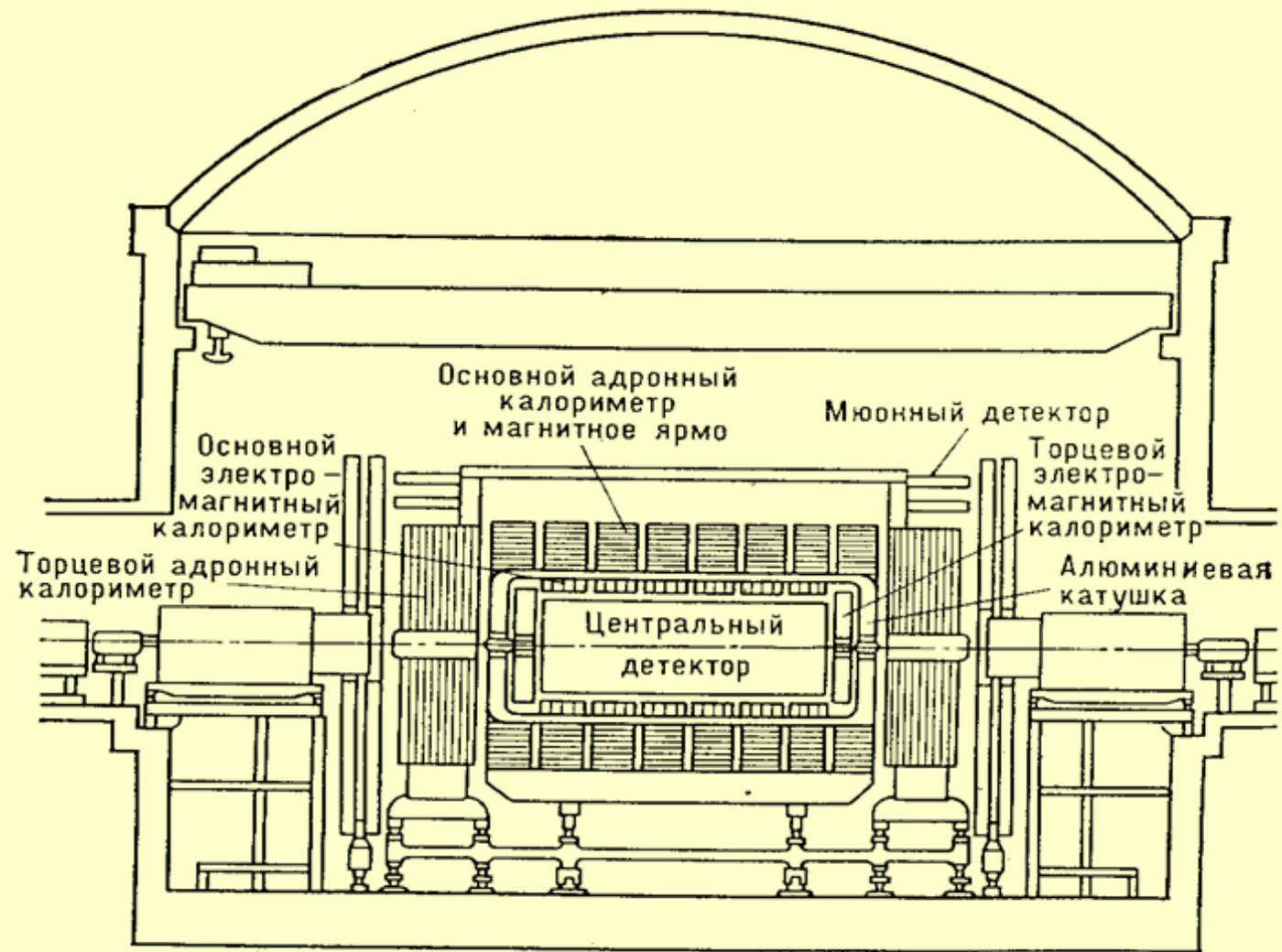
В 30-дневном сеансе в ноябре-декабре 1982 г. в результате анализа 1 млрд $p\bar{p}$ -соударений было зафиксировано 6 событий $W \rightarrow e + \nu$. Последовательность выделения этих шести событий из 10^9 $p\bar{p}$ -соударений была следующей. Вначале было отобрано около 10^6 событий, в которых вылетающие частицы имели большие (> 10 ГэВ/с) импульсы в поперечном направлении относительно оси $p\bar{p}$ -пучков. Далее были оставлены 140 000 событий, содержащих электрон или позитрон. События идентифицировались по характеру ливня в электромагнитном калориметре. Из них выбрали 28 000 случаев, отвечавших появлению в электромагнитном калориметре ливня с поперечным импульсом > 15 ГэВ/с. Затем оставили 2125 событий, в которых ливни в электромагнитном калориметре являлись продолжением чёткого одиночного трека заряженной частицы в центральном детекторе с поперечным импульсом > 7 ГэВ/с. В результате применения ещё нескольких критериев из этого числа было оставлено 39 самых надёжных событий, каждое из которых анализировалось «индивидуально». Конечный итог всего анализа – 6 событий образования и распада $W \rightarrow e + \nu$.

В следующих экспериментальных сеансах (1983 г.) было получено уже несколько десятков событий рождения и распада W-бозонов. Кроме того, были обнаружены первые 13 случаев рождения и распада Z-бозонов. Данные этих экспериментов позволили определить массы W- и Z-бозонов:

$$m_W c^2 = (81 \pm 2) \text{ ГэВ}, \quad m_Z c^2 = (93 \pm 2) \text{ ГэВ},$$

которые практически совпали с предсказаниями электрослабой теории.

Установка UA1



Пучки протонов и антипротонов влетают в детектор с диаметрально противоположных сторон (справа и слева) и, двигаясь навстречу вдоль оси вакуумной трубы, сталкиваются в середине центрального детектора

Установка UA1

UA1 является системой детекторов различного типа с общими размерами $10 \times 5 \times 10 \text{ м}^3$ и массой 2000 тонн.. Управление работой детектора и обработка информации с него осуществлялась 24-мя ЭВМ. Пучки протонов и антипротонов попадали в детектор с двух противоположных сторон и сталкивались в его центре. Точка соударения $p\bar{p}$ -пучков находилась внутри центрального детектора, имевшего форму цилиндра длиной 5.8 м и диаметром 2.3 м.

В центральной части детектора располагались большие дрейфовые камеры, помещённые в магнитное поле. Общее число проволочек в этих камерах было равно 23 000. Магнитное поле 0.7 Тл создавалось в объёме $7 \times 3.5 \times 3.5 \text{ м}^3$. Центральный детектор позволял восстановить траектории частиц, рождавшихся при $p\bar{p}$ -столкновениях, определять их импульсы и ионизационную способность.

Центральный детектор окружён электромагнитным калориметром, состоявшим из чередующихся слоёв свинца и сцинтиллятора. В калориметре поглощались электроны, позитроны и фотоны, и измерялась их энергия. Электромагнитный калориметр в сочетании с центральным детектором позволял различить электроны, позитроны и адроны.

Энергичные адроны проходили через электромагнитный калориметр и попадали в адронный калориметр, которым служило железное ярмо магнита, проложенное слоями сцинтилляторов. Информация с адронного и электромагнитного калориметров позволяла определить энергию и направление движения частиц.

За пределы адронного калориметра из заряженных частиц могли выйти только мюоны (μ^\pm). Для их регистрации предназначался мюонный детектор, который являлся внешней детектирующей оболочкой UA1. Мюонный детектор представлял собой несколько слоёв дрейфовых камер.

Детектор UA1 регистрировал и идентифицировал все частицы (кроме нейтрино и антинейтрино), вылетающие во всех направлениях, кроме тех, которые образуют углы $\leq 0.2^\circ$ относительно оси сталкивающихся $p\bar{p}$ -пучков. Уникальные возможности UA1 позволяли регистрировать и реконструировать картину всех событий взаимодействия протонов и антипротонов.



Carlo Rubbia



Simon van der Meer

1983 г. — Карло Руббиа и Симон ван дер Меер (Carlo Rubbia, Simon van der Meer) с коллаборацией CERN UA-1 открыли векторные W- и Z-бозоны.

Нобелевская премия по физике

1984 г. - К. Руббиа и С. ван дер Меер

За решающий вклад в большой проект, который привёл к открытию полевых частиц, переносчиков слабого взаимодействия.

W бозон

Заряд	$Q = \pm 1e$
Спин	$J = 1$
Масса	$m = 80.419 \pm 0.056 \text{ ГэВ}$
	$m_{W^+} - m_{W^-} = 0.2 \pm 0.6 \text{ ГэВ}$
	$m_Z - m_W = 10.76 \pm 0.05 \text{ ГэВ}$
Полная ширина	$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$
Среднее число заряженных частиц	$\langle N \rangle = 19.3 \pm 0.4$

Каналы распада

$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	$(10.66 \pm 0.20)\%$
$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	$(10.49 \pm 0.29)\%$
$W^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	$(10.4 \pm 0.4)\%$
$W^+ \rightarrow \text{адроны}$	$(68.5 \pm 0.6)\%$

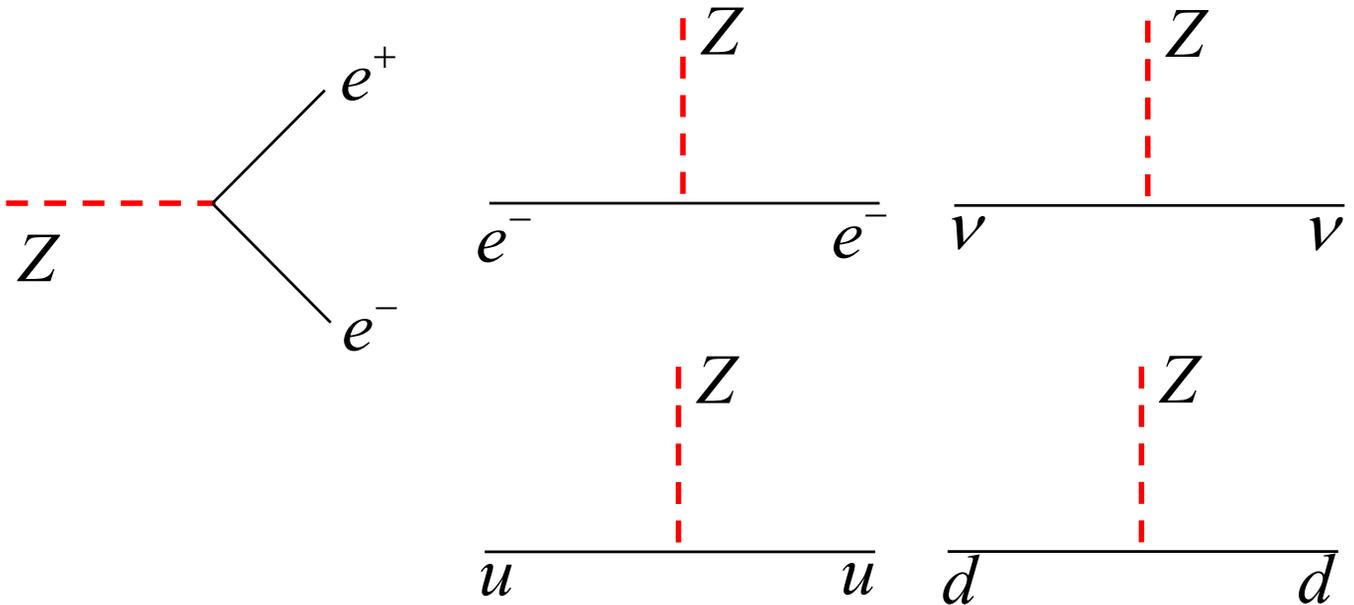
Z бозон

Заряд	$Q = 0$
Спин	$J = 1$
Масса	$m = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ ГэВ}$
Полная ширина	$\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023 \text{ ГэВ}$
	$\Gamma(\text{адроны}) = 1.7444 \pm 0.002 \text{ ГэВ}$
	$\Gamma(e^+e^-) = 84.00057 \text{ МэВ}$
	$\frac{\Gamma(\mu^+\mu^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 0.9999 \pm 0.0032$
	$\frac{\Gamma(\tau^+\tau^-)}{\Gamma(e^+e^-)} = 1.0012 \pm 0.0036$
	$\Gamma(\text{inv}) = 499.0 \pm 1.5 \text{ МэВ}$
Среднее число заряженных частиц	$\langle N \rangle = 21.07 \pm 0.11$

Каналы распада

$Z \rightarrow e^+e^-$	$(3.367 \pm 0.005)\%$
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$	$(3.367 \pm 0.008)\%$
$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$	$(3.371 \pm 0.009)\%$
$Z \rightarrow \text{inv}$	$(20.02 \pm 0.006)\%$
$Z \rightarrow \text{адроны}$	$(69.84 \pm 0.07)\%$

Нейтральные слабые токи



Элементарные узлы связи нейтрального бозона с каждым лептоном и каждым кварком

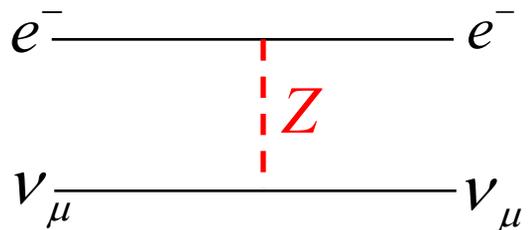
$$l Z l \quad q Z q$$

При взаимодействии высокоэнергетичных нейтрино, рождающихся на ускорителях, наряду с процессами, в которых нейтрино превращается в заряженный лептон, должны наблюдаться события другого типа — процессы упругого и неупругого рассеяния нейтрино без его превращения в заряженные лептоны. Такие процессы, происходящие при участии Z-бозона, называют нейтральными слабыми токами.

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + \text{адроны}$$

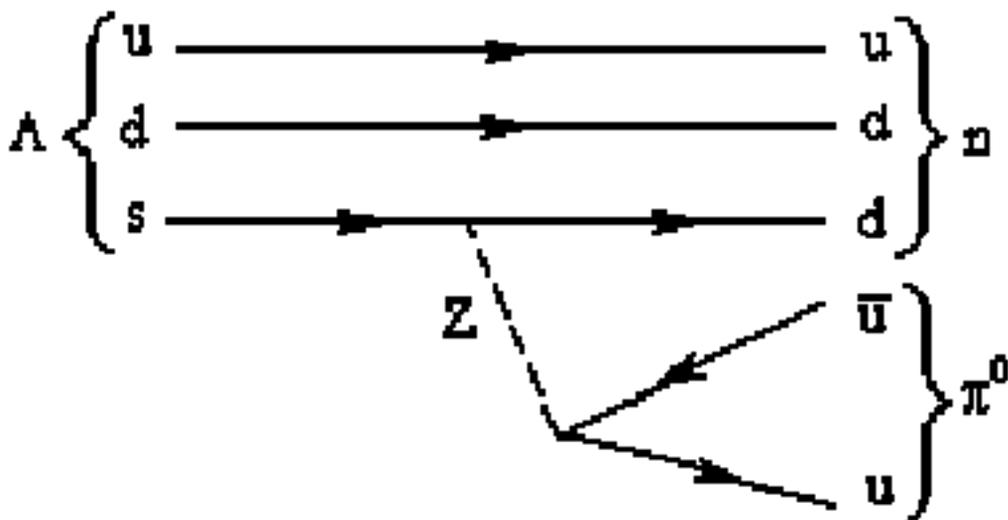
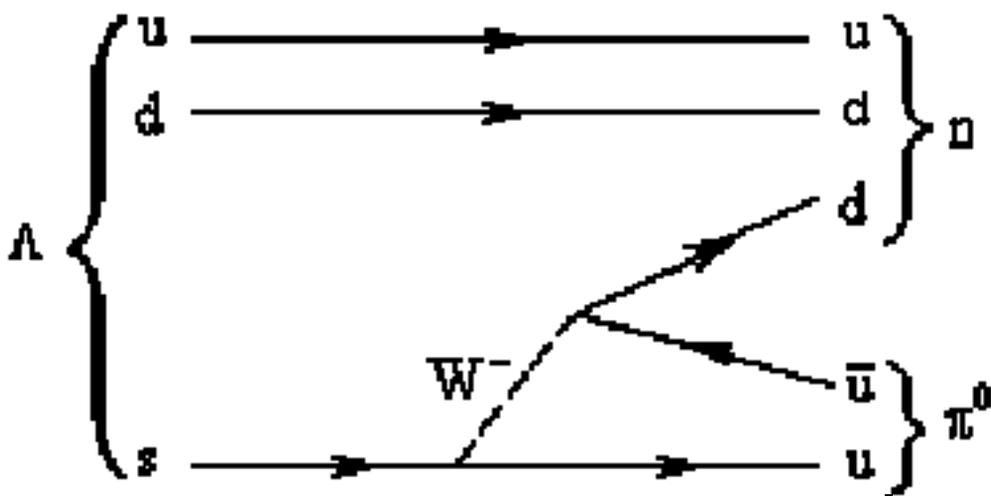
$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \bar{\nu}_\mu + p$$



Пример

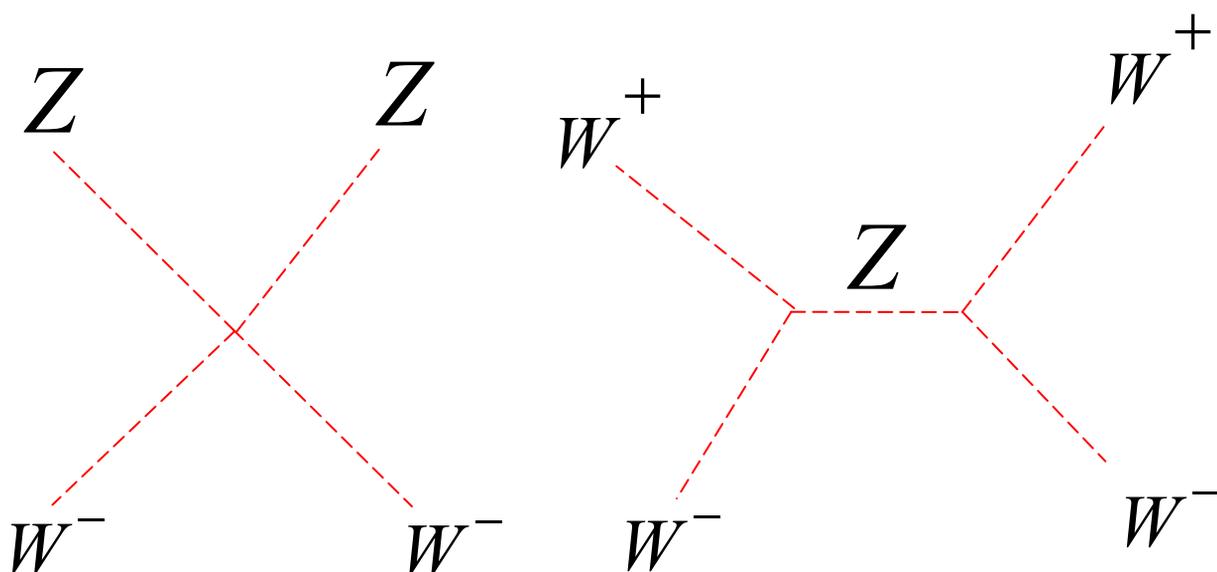
Одна из следующих двух диаграмм, описывающих распад $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$, неправильная. Какая?



Нижняя диаграмма неправильная. Z -бозон фигурирует в нейтральных слабых токах, не изменяющих ароматы кварков, т.е. никаких связанных с кварками квантовых чисел. В нижней диаграмме испускание Z -бозона сопровождается переходом s -кварка в d , при котором изменяется странность и изоспин.

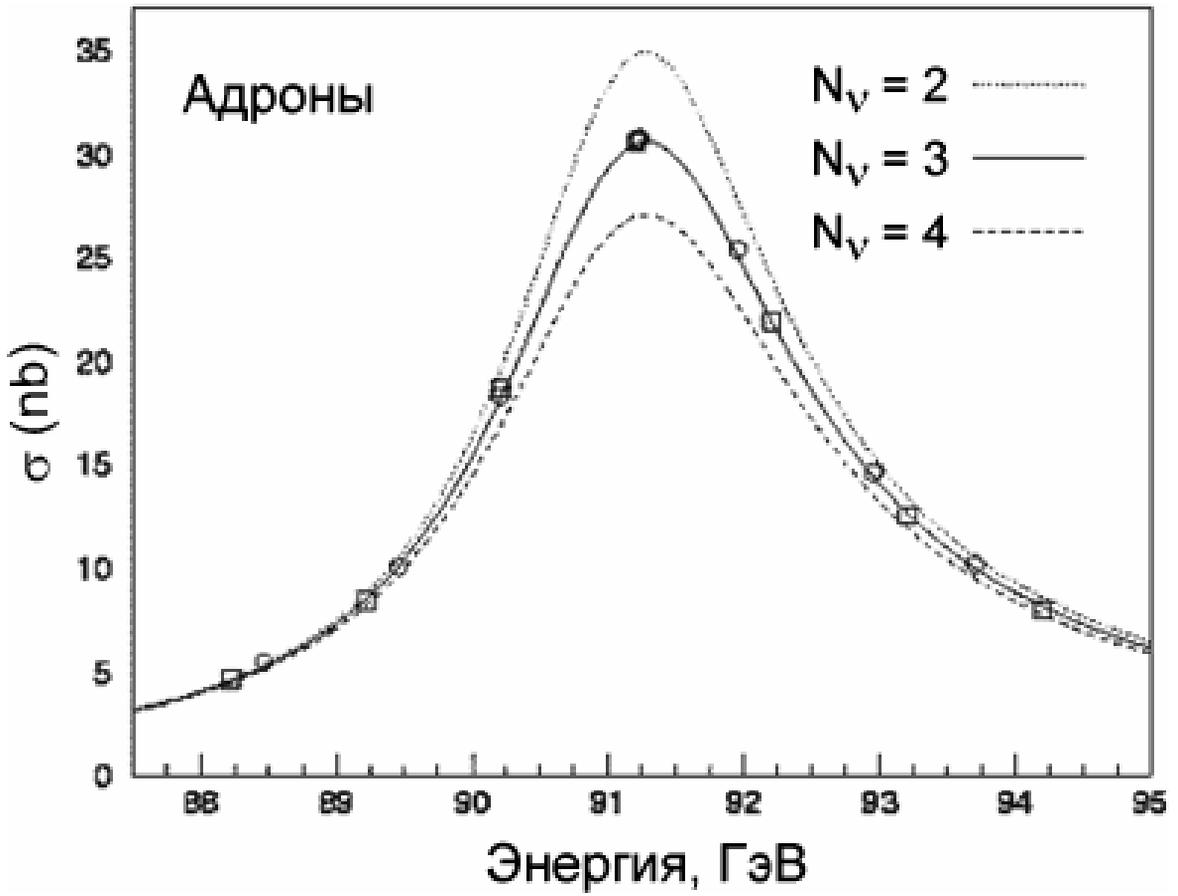
Промежуточные бозоны

Промежуточные бозоны W^+ , W^- , Z имеют **слабый заряд** – источник поля, переносчиками которого они являются. В этом отношении они аналогичны глюонам, имеющим цветной заряд. Поэтому промежуточные бозоны сами способны породить другие промежуточные бозоны и рассеиваться друг на друге.



Число поколений фундаментальных фермионов

Z - бозон



Резонансная кривая распада Z-бозона с образованием адронов показывает что число поколений кварков и лептонов $N = 3$.

Характеристика	Эксперимент		Стандартная Модель
$m_Z c^2$, ГэВ	91.1876±0.0021		91.1874±0.0021
Γ_Z , ГэВ	2.4952±0.0023		2.4972±0.0012
Γ_{hadron} , ГэВ	1.7444±0.0020		1.7435±0.0011
Γ_ℓ , МэВ	$e^+ e^-$	83.91±0.12	84.024±0.025
	$\mu^+ \mu^-$	83.99±0.18	
	$\tau^+ \tau^-$	84.08±0.22	
$\Gamma_{e\mu\tau}$, МэВ	251.95±0.26		252.072±0.075
Γ_{inv} , МэВ	499.0±1.5		501.81±0.13
$\frac{\Gamma_\nu}{\Gamma_\ell}$	-		1.991±0.001

Число поколений фундаментальных фермионов

Прецизионные измерения времени жизни Z-бозона были выполнены в e^+e^- столкновениях. Время жизни Z-бозона $\approx 10^{-25}$ с, поэтому его можно наблюдать только по распаду на другие частицы. Z-бозоны распадаются на кварк-антикварковые ($q\bar{q}$) пары с участием всех кварков, кроме t , и пары лептон-антилептон всех поколений:

$$Z \rightarrow q + \bar{q}, \quad \text{где } q = d, u, s, c, b$$
$$Z \rightarrow \begin{cases} e^+ + e^-, \\ \mu^+ + \mu^-, \\ \tau^+ + \tau^-. \end{cases} \quad Z \rightarrow \begin{cases} \nu_e + \bar{\nu}_e, \\ \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu, \\ \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau. \end{cases}$$

Z-бозон наблюдается в виде резонанса в зависимости числа распадов Z-бозона от энергии столкновения e^+e^- . Максимум числа распадов приходится на энергию $E_{e^+} + E_{e^-} = m_Z c^2 \approx 91$ ГэВ. Ширина Γ резонанса связана с его временем жизни τ соотношением

$$\Gamma \cdot \tau \approx \hbar.$$

Каналы распада характеризуются шириной Γ_{hadron} , $\Gamma_{e\mu\tau}$, $\Gamma_{neutrino}$. Полная ширина распада Z-бозона Γ_Z :

$$\Gamma_Z = \Gamma_{hadron} + \Gamma_{e\mu\tau} + \Gamma_{neutrino}.$$

Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{адроны}$:

$$\sigma_h(E) = \sigma_{e^+e^-} \frac{\left(\frac{\Gamma_Z}{2}\right)^2}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_Z}{2}\right)^2} \cdot \frac{\Gamma_{hadron}}{\Gamma_Z},$$

Число поколений фундаментальных фермионов

Полное сечение образования Z-бозона $\sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z)$ представляет собой сумму сечений трех процессов

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z) = & \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{адроны}) + \\ & + \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{заряженные лептоны}) + \\ & + \sigma_{\text{полн}}(e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \text{нейтрино}). \end{aligned}$$

Ширина резонанса и величина сечения в максимуме связаны с числом различных типов нейтрино, на которые распадается Z-бозон. При увеличении числа типов нейтрино, т.е. количества поколений, резонансная ширина распада Z-бозона увеличивается, а величина сечения в максимуме уменьшается. Таким образом, число типов нейтрино определяется по двум независимым параметрам — величине сечения в максимуме и ширине резонансной кривой e^+e^- аннигиляции в Z-бозон.

Из эксперимента была получена следующая оценка числа возможных типов нейтрино n

$$n = 2.982 \pm 0.013.$$

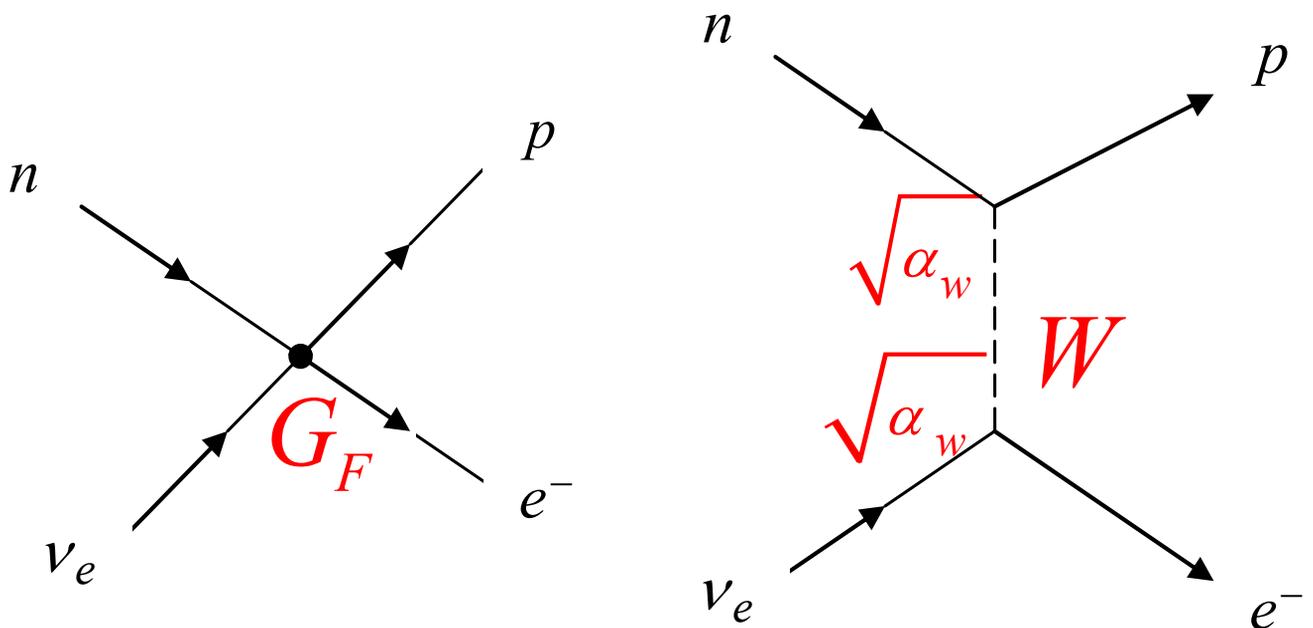
Этот результат согласуется с данными о количестве поколений фундаментальных фермионов, независимо полученными из анализа распространенности водорода и гелия во Вселенной. Так как число типов нейтрино вносит существенный вклад в плотность энергии и скорости остывания Вселенной после Большого взрыва, оно определяет соотношение между количеством нейтронов и протонов, образующихся в момент дозвездного нуклеосинтеза и, следовательно, соотношение между количеством ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^1\text{H}$, образующихся в первые минуты эволюции Вселенной. Наблюдаемое соотношение количества изотопов ${}^4\text{He}/{}^1\text{H} \sim 0.1$ говорит о том, что число легких типов нейтрино может быть два или три и противоречит наличию четырех и более типов нейтрино.

Константы взаимодействий

Константа электромагнитного взаимодействия

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

Константа слабого взаимодействия



В первоначальной теории слабое взаимодействие описывалось в виде четырехфермионного точечного превращения частиц (слева). Современное представление слабого взаимодействия связано с переносчиками взаимодействия W и Z бозонами (справа).

Слабое взаимодействие на начальном этапе развития теории характеризовалось константой G_F , которая носит название *фермиевской константы связи* и является эффективной константой четырехфермионного взаимодействия. По экспериментальным данным она имела величину:

$$G_F = 1.4 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$$

Фермиевская константа G_F связана с константой α_w соотношением:

$$G_F = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \alpha_w \hbar c \left(\frac{\hbar c}{M_W c^2} \right)^2,$$

M_W – масса W -бозона.

Константа сильного взаимодействия?

Оказалось, что значения констант зависят от масштаба относительных расстояний, на которых происходят взаимодействия. Константы α_e и α_w в широкой области энергий имеют значения:

$$\alpha_e = \frac{1}{137} = 0.0073$$

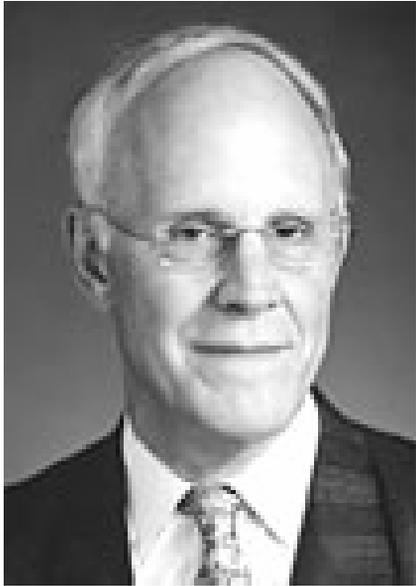
$$\alpha_w = 0.032$$

Константа сильного взаимодействия α_s в области расстояний (≈ 1 Фм) имеет порядок единицы. Эта особенность сильного взаимодействия получила специальное название непертурбативного режима сильного взаимодействия. С уменьшением относительных расстояний константа сильного взаимодействия заметно уменьшается. На расстояниях масштаба 0.1 и 0.001 Фм эта константа имеет соответственно следующие значения

$$\alpha_s(1\text{Фм}) \approx 1 - 2$$

$$\alpha_s(0.1\text{Фм}) \approx 0.31$$

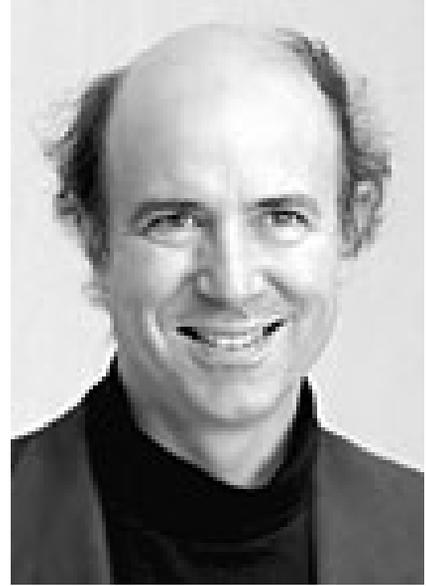
$$\alpha_s(0.001\text{Фм}) \approx 0.105$$



David J. Gross
р. 1941



H. David Politzer
р. 1949



Frank Wilczek
р. 1951

Нобелевская премия по физике

2004 г. — Д. Гросс, Д. Политцер, Ф. Вилчек

**За открытие асимптотической свободы
в теории сильных взаимодействий.**

Молекулы.

Атомы.

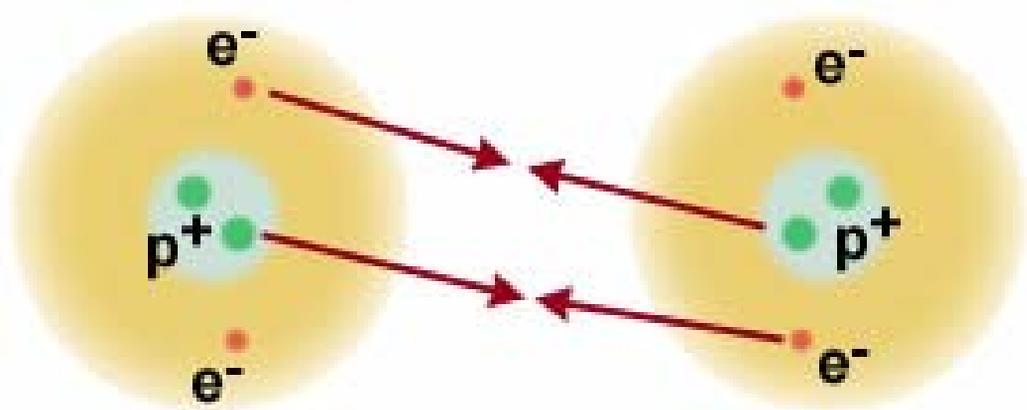
Ядра.

Адроны.

Кварки

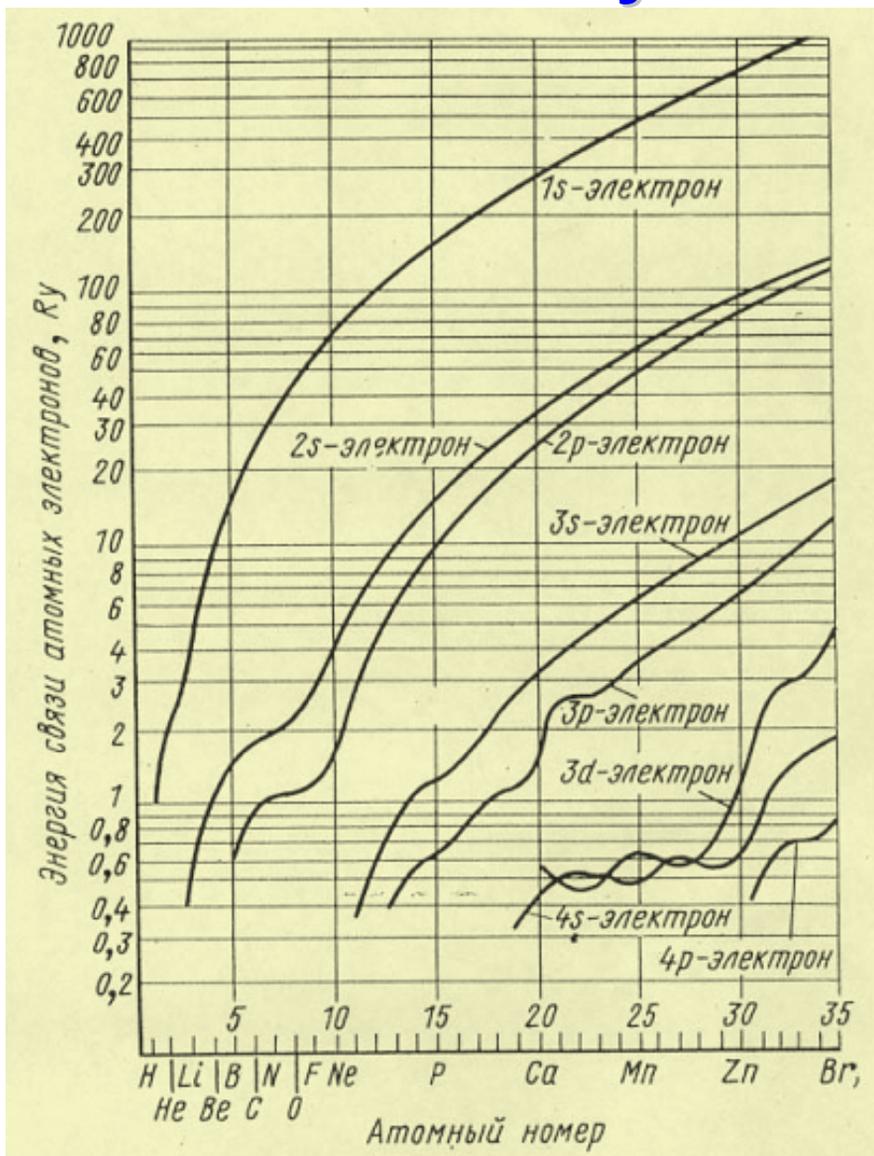
Атомы - Молекулы

Электромагнитное поле атома сосредоточено в области пространства размером 10^{-8} см. Для наблюдателя, находящегося на большом расстоянии, атом представляется нейтральной системой, так как положительный заряд ядра полностью компенсируется отрицательным зарядом электронной оболочки. При образовании молекулы прочно связанные внутренние оболочки атомов практически не изменяются. Химические и физические свойства молекул определяются относительно слабо связанными электронами внешней оболочки. Силы, связывающие атомы в молекулы, имеют электромагнитную природу. Однако это лишь слабый «отголосок» сил, связывающих электроны и атомное ядро.

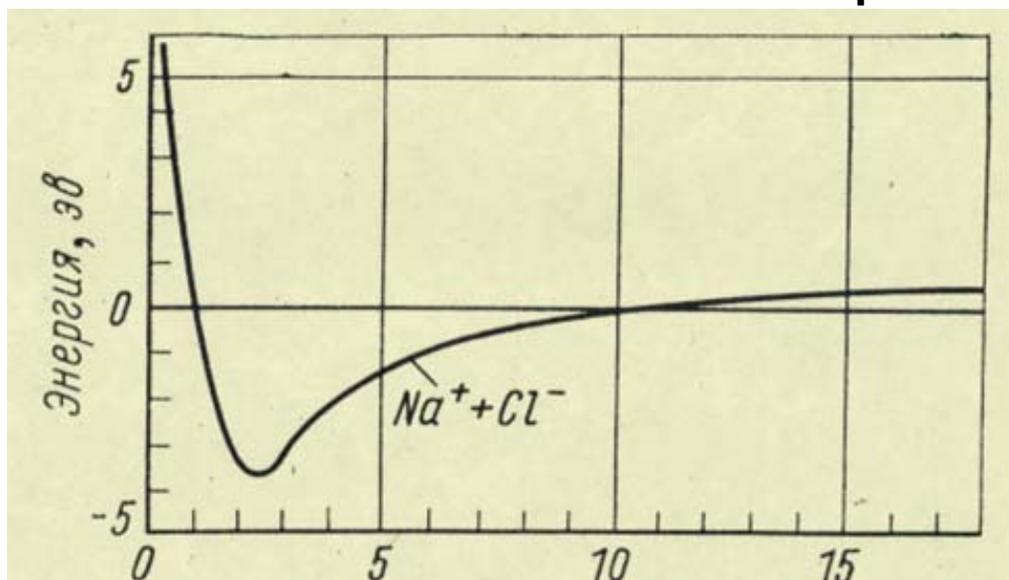


Молекулы

Атомы. Молекулы



Зависимость энергии связи электронов различных оболочек атома от атомного номера.

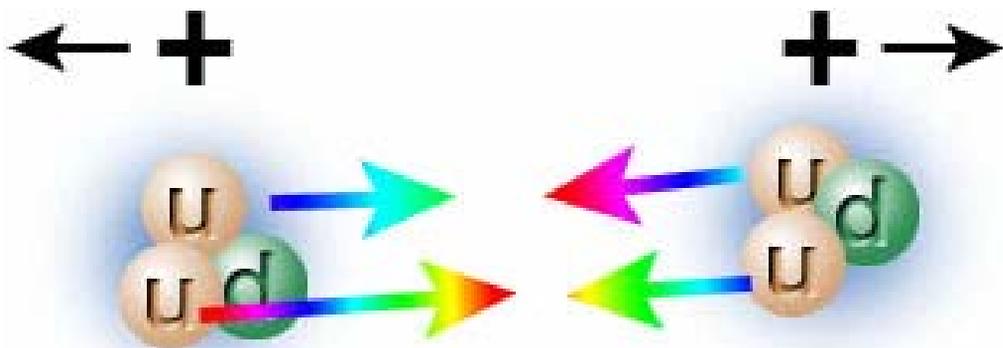


Изменение энергии системы $NaCl$ в зависимости от расстояния (Å) между ионами Na^+ и Cl^-

Кварки – Адроны – Ядра

Расстояние, на котором проявляется цветное взаимодействие ≈ 1 Фм – характерный размер адрона. Цветные взаимодействия кварков и глюонов формируют адрон. Точно так же, как атом, состоящий из заряженных частиц, является электрически нейтральным образованием, адрон, состоящий из цветных объектов, является бесцветным объектом. Цвет проявляется только на расстоянии $< 10^{-13}$ см.

Бесцветные адроны связаны друг с другом ядерными силами, которые являются аналогом сил связывающих нейтральные атомы в молекулы. Ядерные силы – это слабый «отголосок» сильного взаимодействия между цветными кварками в адроне.



Атомные ядра