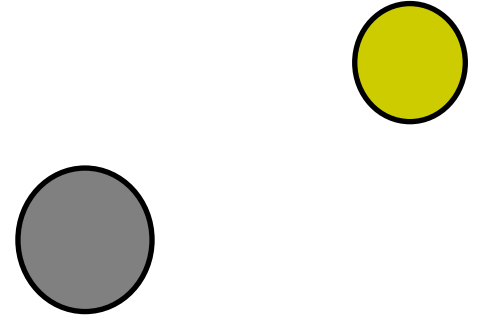


# Мир атомных ядер

# Взаимодействие частиц

# Взаимодействие. Классическая физика

## Дальнодействие

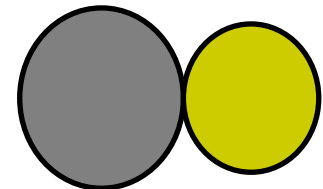


В классической физике, несмотря на разнообразие сил, действующих между телами, взаимодействия между ними описываются двумя фундаментальными взаимодействиями:

- 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.

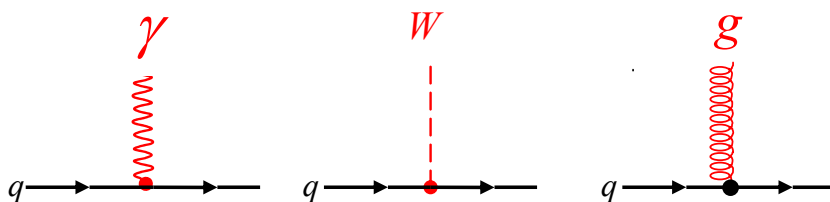
# Взаимодействие частиц

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 взаимодействии.

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**)

# 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  $\Delta t$ , то ее энергия может флюктуировать на величину  $\hbar / \Delta t$ , а если она находится в области размером  $\Delta x$ , то ее импульс флюктуировает на величину  $\hbar / \Delta x$ . В течение малых промежутков времени  $\Delta t$  и на малых расстояниях  $\Delta x$  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

$$R = \hbar / mc.$$

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.

# Квантовая теория поля



**Sin-Itiro Tomonaga**  
(1906-1979)



**Julian Schwinger**  
(1918-1994)



**Richard P. Feynman**  
(1918-1988)

## Нобелевская премия по физике

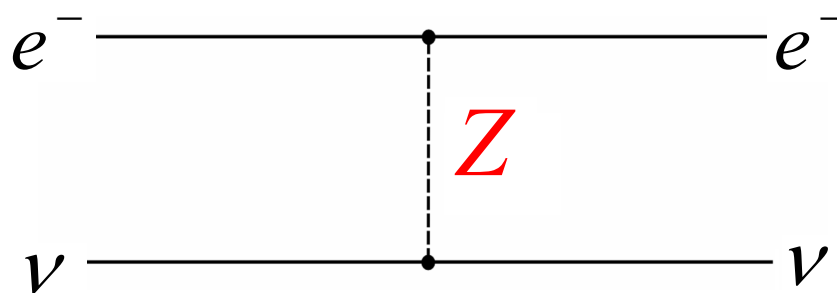
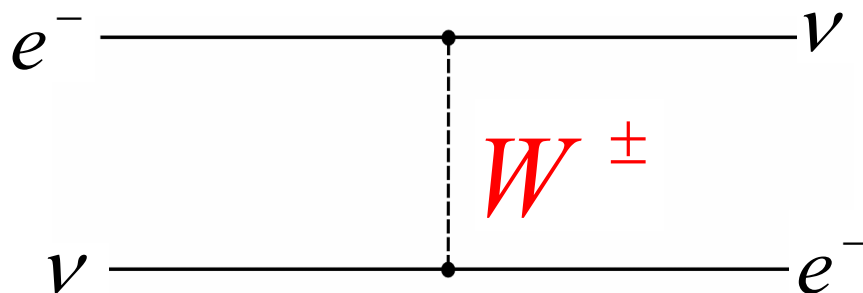
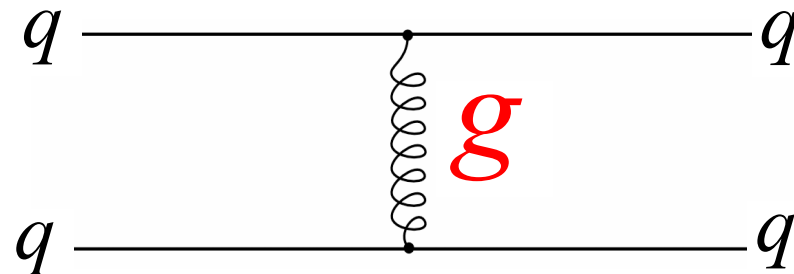
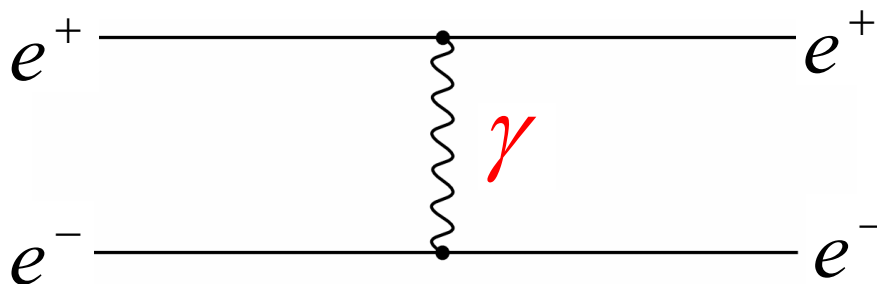
**1965 г.** — С. Томонага, Ю. Швингер и Р. Фейнман

За фундаментальные работы в области квантовой теории поля с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц.

# Взаимодействия

Спин  $J=1$

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, безмассовые.	$1 \text{ ФМ} = 1/m_\pi$	1
Электромагнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, безмассовый.	$\infty$	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	$W^+, W^-, Z$ , $m(W^\pm) = 80 \text{ ГэВ}$ , $m(Z) = 91 \text{ ГэВ}$ .	$10^{-2} \text{ ФМ} = 1/m_W$	$\sim 1/30$
Гравитационное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J = 2$ , безмассовый	$\infty$	$10^{-38}$



# 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. Человеку для того, чтобы оторваться от Земли, отправить спутник в космическое пространство, необходимо затратить большие усилия. И они определяются необходимостью преодолевать 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.



# Константы связи

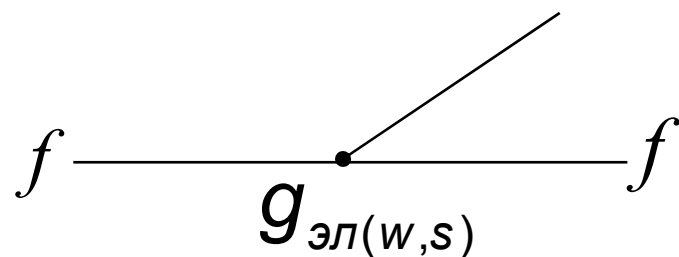
Константы связи определяют интенсивность тех преобразований, которые вызываются элементарными амплитудами. Эти константы обычно выбираются безразмерными и обозначаются через  $\alpha_e$ ,  $\alpha_w$ ,  $\alpha_s$ . В элементарные амплитуды непосредственно входят квадратные корни из этих величин:

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

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

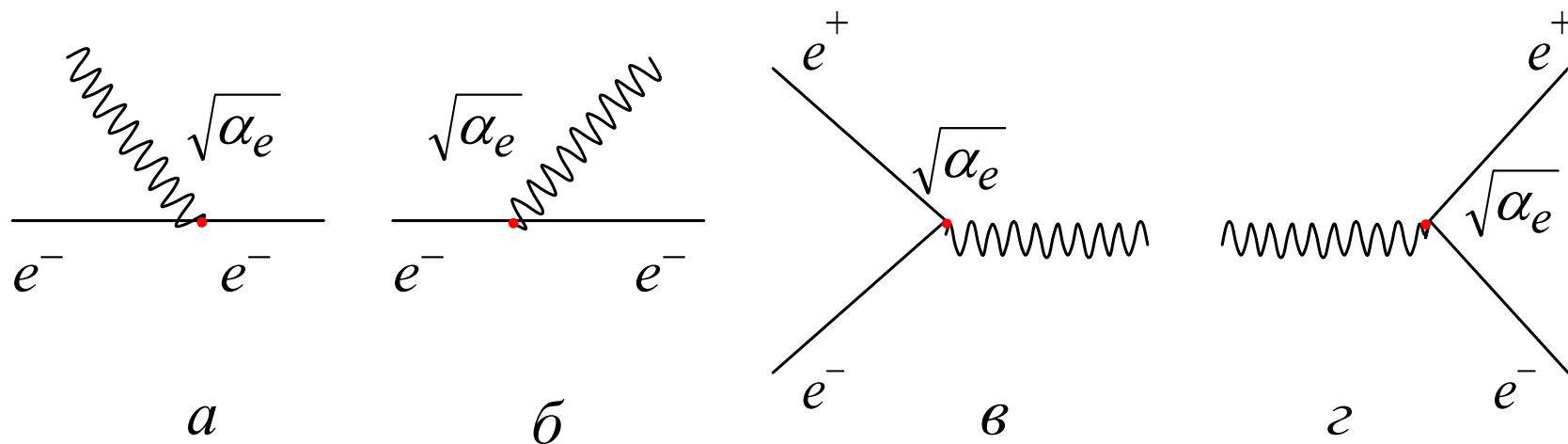
$g_s = \sqrt{\alpha_s}$  – элементарная амплитуда сильного взаимодействия.

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

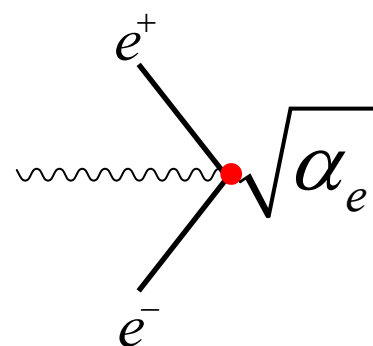
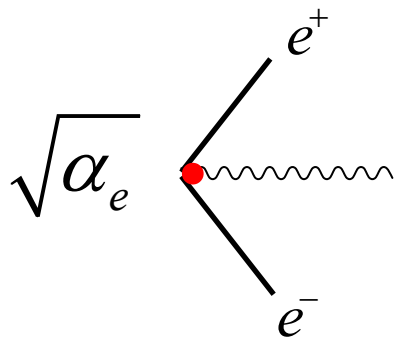


$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

# 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.

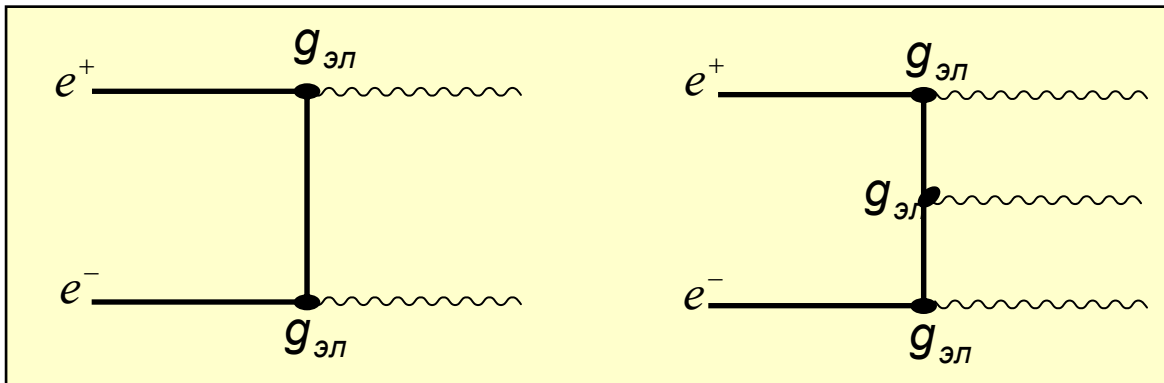


$$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$$

# 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  $g_{эл}^n$

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.



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

$$\sigma \approx A^2$$

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

# Проблема цвета

Без введения квантового числа «цвет», принимающего три значения, кварковая структура  $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{-}$ ,  $\Omega^{-}$  противоречит принципу Паули.

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^{-}$ ,  $\Omega^{-}$  состоят из трех тождественных кварков:  $\Delta^{++}$  – (uuu),  $\Delta^{-}$  – (ddd),  $\Omega^{-}$  – (sss). У всех частиц  $J^P = 3/2^{+}$ . Орбитальный момент относительного движения кварков равен нулю. Кварки являются фермионами и имеют спин  $J = 1/2$ . Для них возможны только две проекции спина на выделенное направление:  $+1/2$  и  $-1/2$ . Для того чтобы образовалось состояние  $3/2^{+}$ , все три кварка должны иметь одинаковые проекции спинов. В каждом барионе три тождественных кварка имеют одинаковые квантовые числа. В то же время согласно принципу Паули тождественные фермионы не могут иметь одинаковые квантовые числа. Чтобы выполнялся принцип Паули, необходимо ввести для кварков ещё одно квантовое число – «цвет». Чтобы восстановить принцип Паули, «цвет» должен принимать три разных значения.

$$\Omega^{-} (sss) \begin{array}{c} \uparrow \text{ (red)} \\ \uparrow \text{ (green)} \\ \uparrow \text{ (blue)} \end{array} \quad J^P = \frac{3}{2}^{+}, I = 0$$

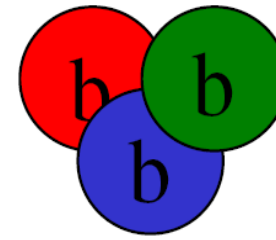
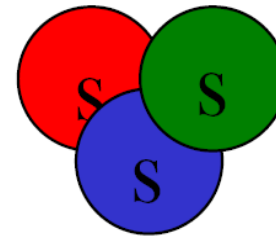
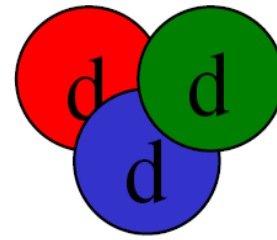
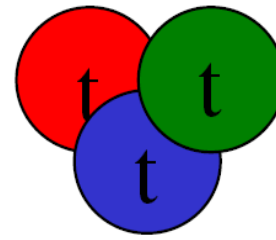
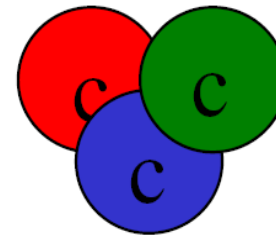
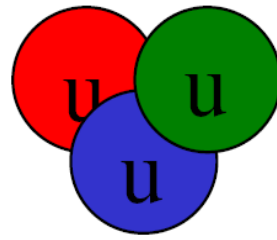
$\Omega^{-}$  состоит из одного красного s-кварка, одного зеленого s-кварка и одного синего s-кварка. Составляющие  $\Omega^{-}$ -частицу s-кварки находятся в разных цветовых состояниях в полном соответствии с принципом Паули.

# Цветные кварки

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

$6 \times 3 = 18$  ЦВЕТНЫХ КВАРКОВ

# Кварки



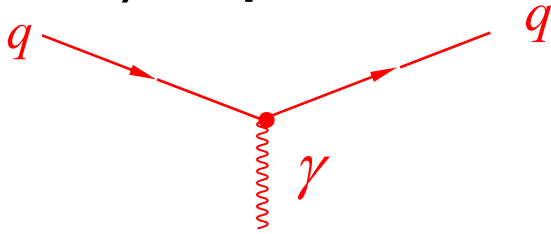
Кварки не существуют в свободном состоянии, а заключены в кварковых системах – адронах. Им нельзя освободиться от взаимодействий с находящимися в том же объеме другими кварками и глюонами.

**Конституэнтные кварки** – это «эффективные» кварки в адронах, движение и взаимодействие которых формирует адрон.

**Токовые кварки** – кварки, не испытывающие взаимодействия.

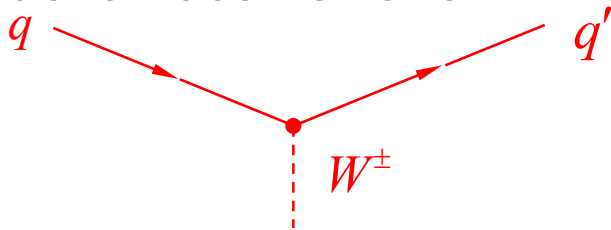
# Взаимодействие кварков

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



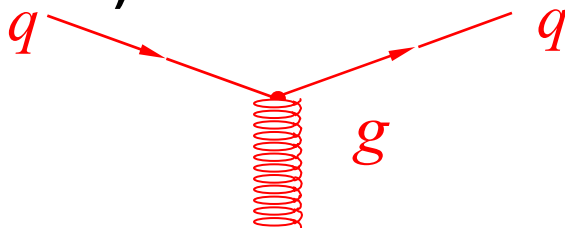
**Вершина электромагнитного взаимодействия кварков**

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



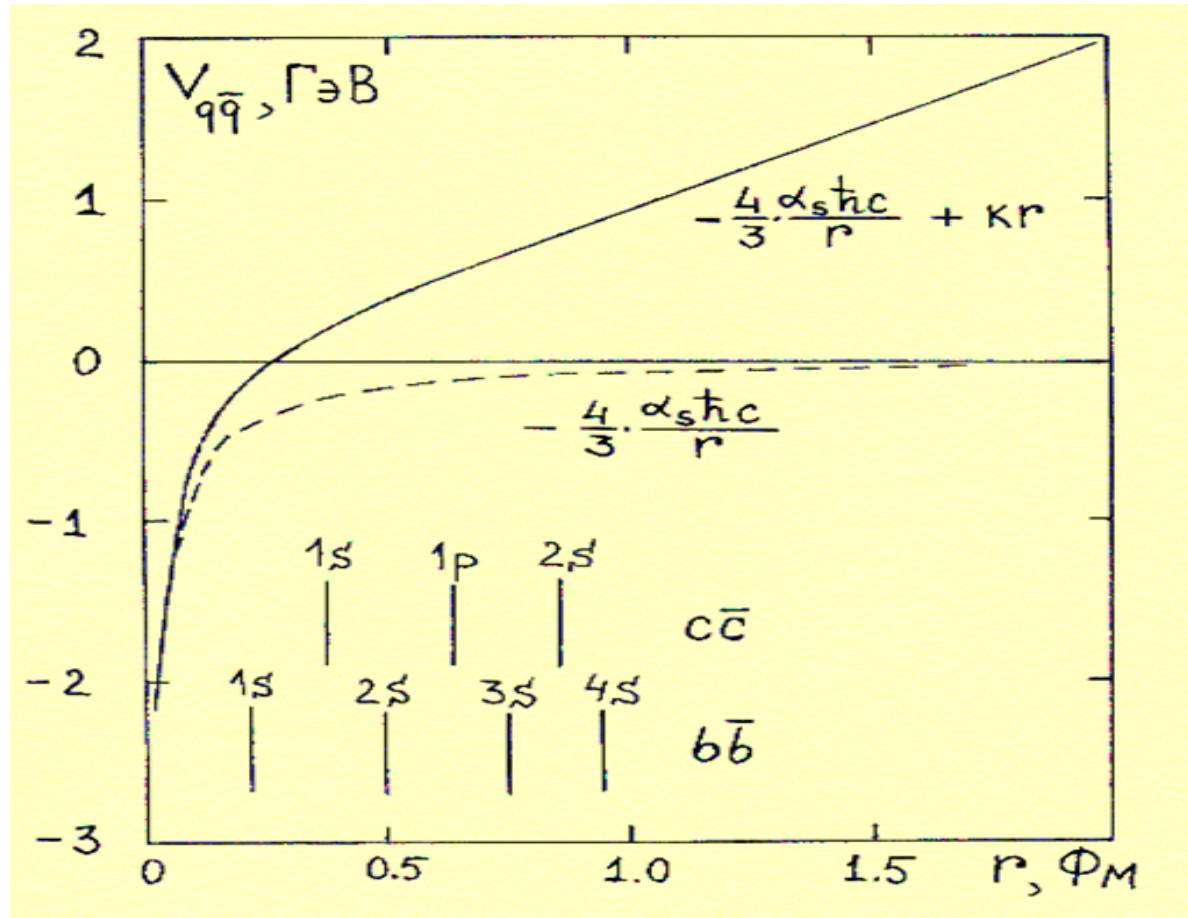
**Вершина слабого взаимодействия кварков**

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.

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

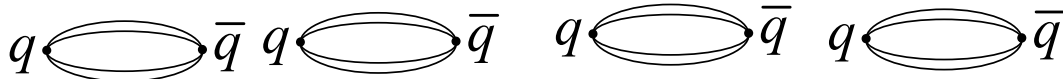


# q-q потенциал

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

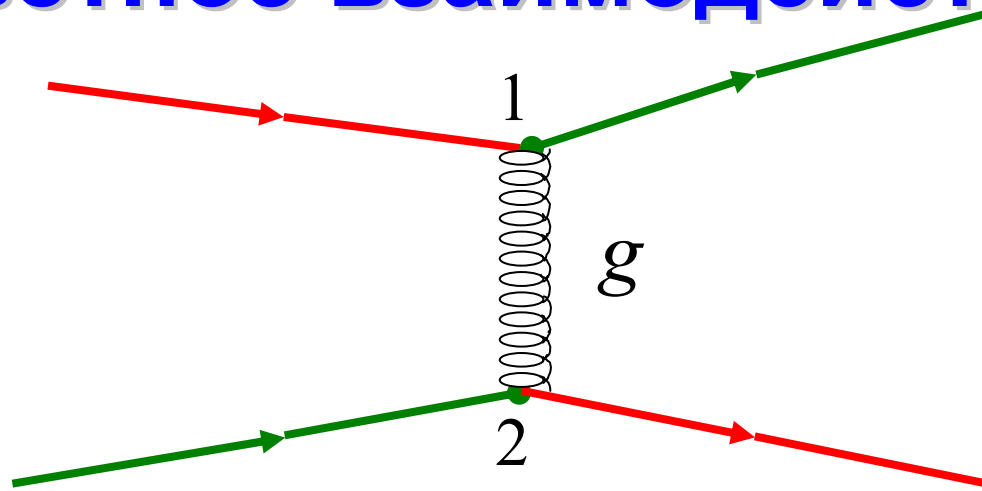


Такая картина  $q\bar{q}$ -потенциала позволяет объяснить, почему в результате  $e^+e^-$ -аннигиляции рождаются бесцветные адроны. Связано это с тем, что по мере разлёта  $q\bar{q}$ -кварков их потенциальная энергия растёт и в некоторый момент превышает порог рождения новой пары кварк-антикварк. При 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

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

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

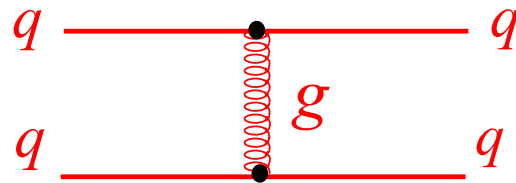
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (k\bar{k} - s\bar{s})$$

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

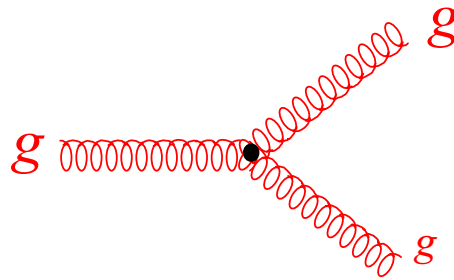
Из этих трех комбинаций кварков только две последние связаны с цветными превращениями. Полностью симметричная по цвету комбинация соответствует переходу между кварками одного и того же цвета, при котором глюон не различает цвета кварков. Поэтому существует только 8 известных глюонов, переносящих цветные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

# Глюоны – переносчики сильного взаимодействия

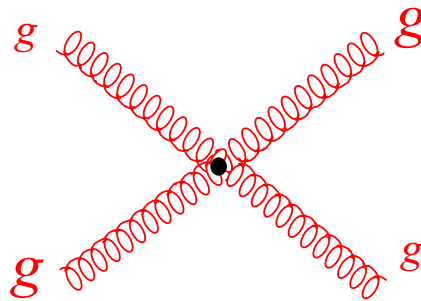
Глюоны в отличие от фотонов обладают цветом, поэтому для них наряду с одноглюонным обменом



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

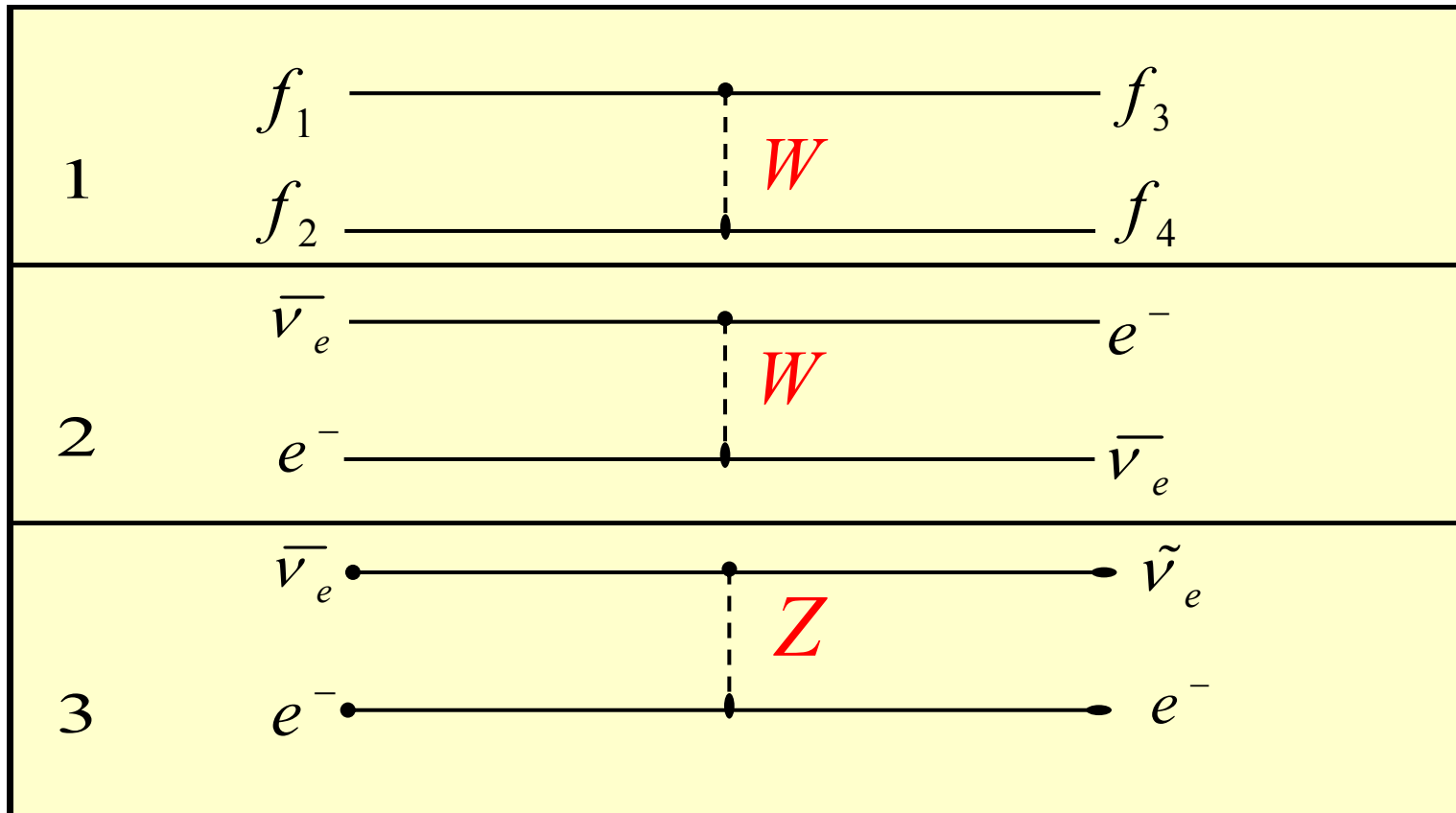
Переносчиками слабого взаимодействия являются  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  бозоны которые называют промежуточными бозонами. Бозоны  $W$  и  $Z$  были предсказаны теоретически задолго до их экспериментального обнаружения как «промежуточные» частицы, переносящие слабое взаимодействие. Слабое взаимодействие,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

# $W^+$ , $W^-$ , $Z$ - бозоны

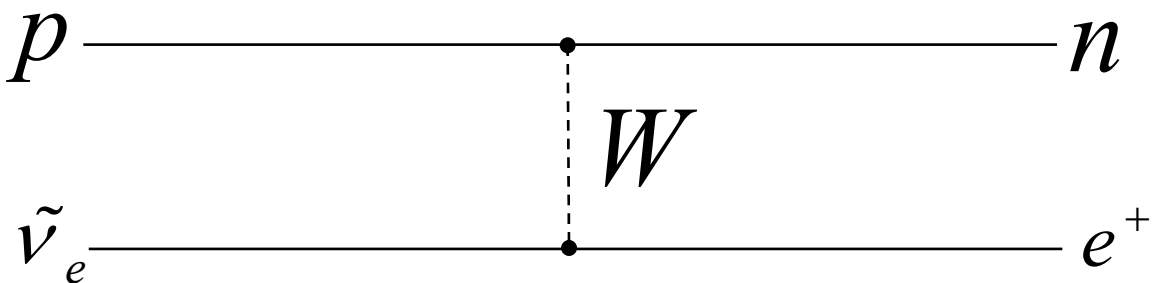
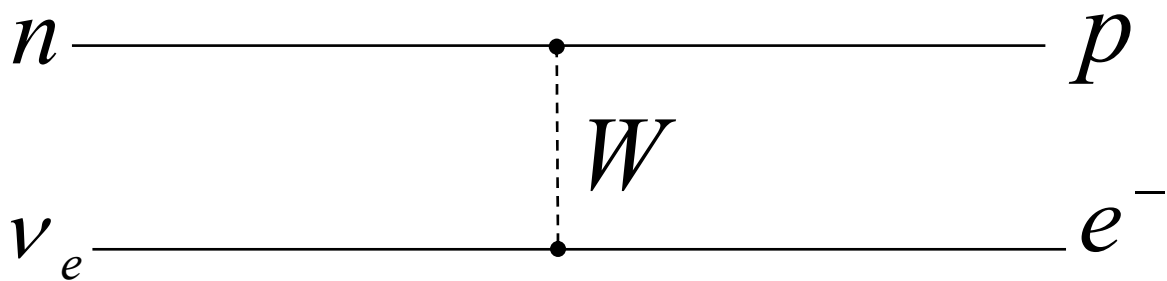
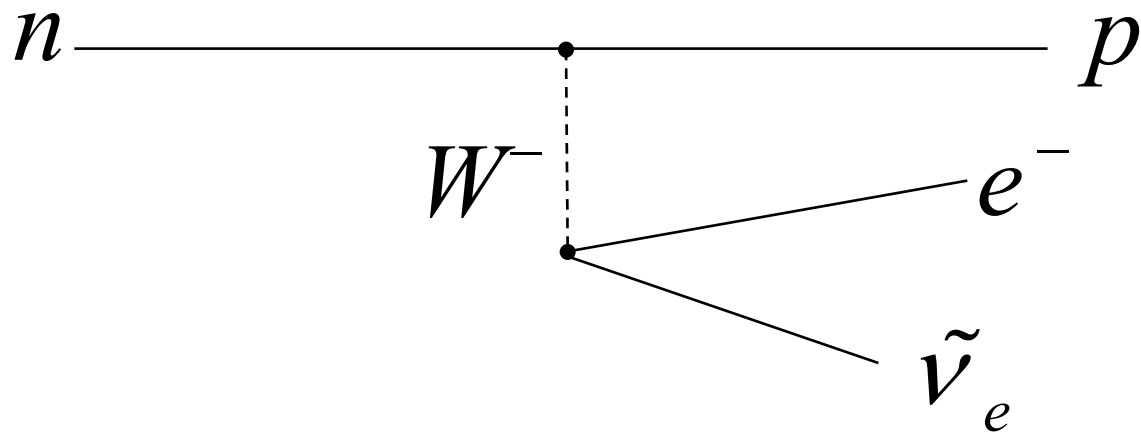
Диаграмма 1 описывает слабые взаимодействия фермионов (они обозначены  $f_{1,2,3,4}$ ) посредством обмена заряженным промежуточным бозоном  $W$ .

Диаграмма 2 описывает рассеяние электронного антинейтрино на электроне.

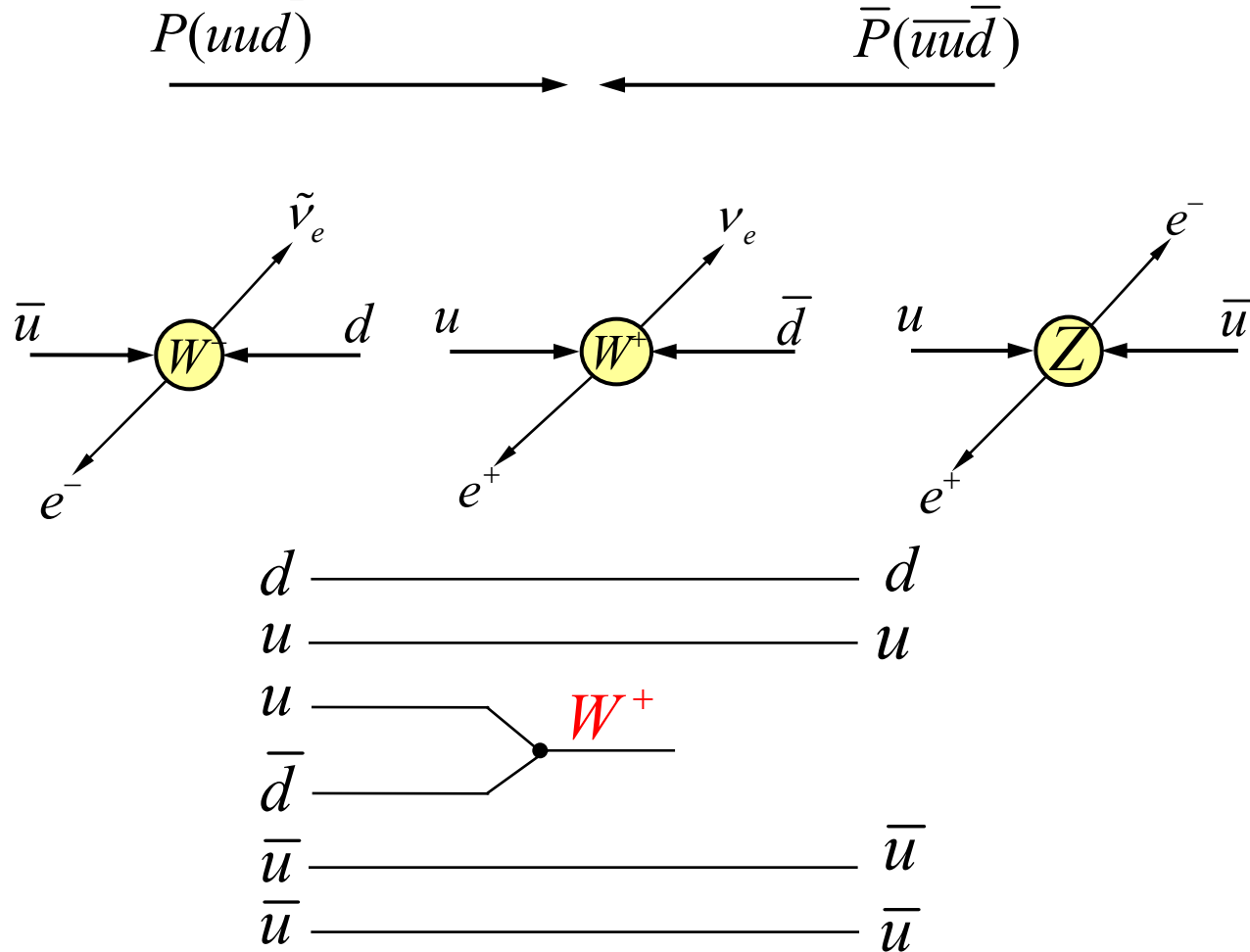
Возможны слабые процессы, в которых происходит обмен нейтральным  $Z$ -бозоном. В этом случае электрические заряды взаимодействующих лептонов не изменяются (диаграмма 3).



# Распад нейтрона



# Регистрация Z и W<sup>±</sup> бозонов



**Нобелевская премия по физике**

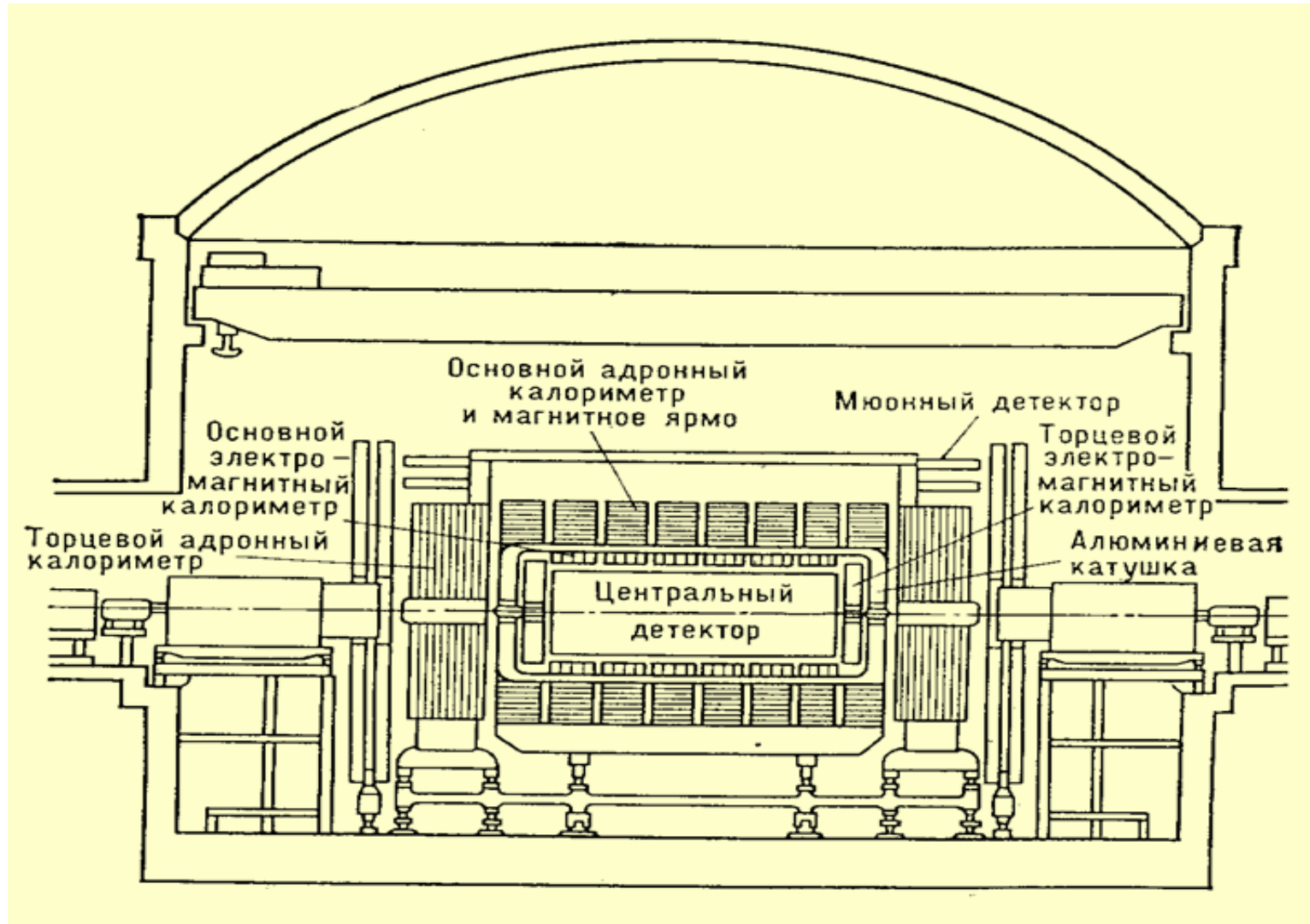
**1984 г. – К. Руббиа, С. Ван дер Меер.**

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



1982 г.

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

$$E_p = E_{\bar{p}} = 270 \text{ ГэВ} \quad \sigma(W^\pm) = 10^{-33} \text{ см}^2 \quad 10^9 \text{ } p\bar{p} \text{ столкновений} \rightarrow 6W^\pm$$

# 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

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

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

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

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

# 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

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

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

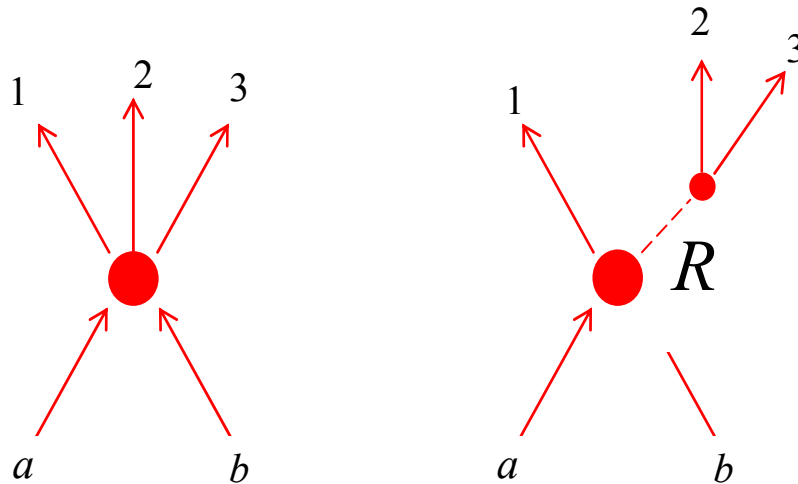
$$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \quad (3.371 \pm 0.009)\%$$

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

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

# 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).

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

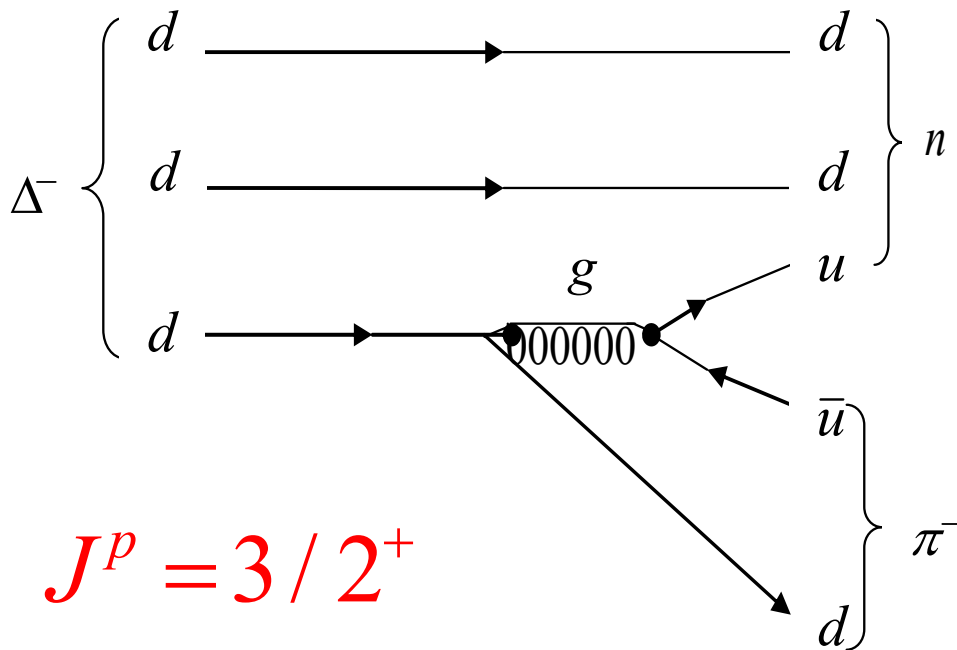
Наблюдая отдельные события в трековом детекторе, можно для каждого события получить величину инвариантной массы системы частиц 2 и 3 и затем построить распределение этих масс  $N(m_{23}c^2)$ . Если реакция идет без образования резонанса (левая часть), то корреляции между парой частиц 2, 3 и частицей 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

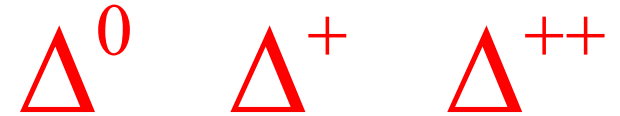
$$E_R = E_2 + E_3, \quad \vec{p}_R = \vec{p}_2 + \vec{p}_3$$

# Сильные распады адронов

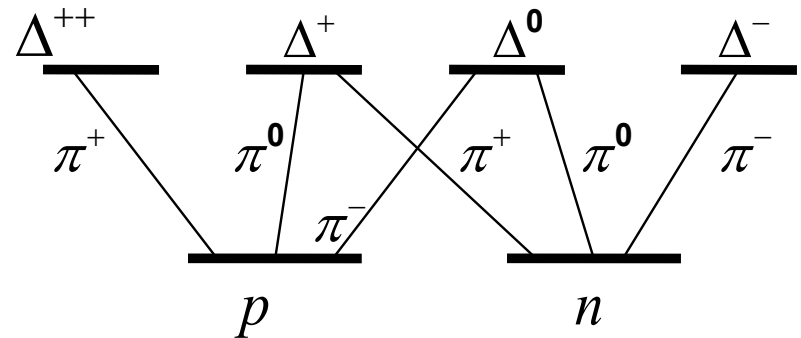
Все адроны за исключением протона являются *нестабильными частицами* и характеризуются способом распада и средним временем жизни  $\tau$ . Определяющим для скорости распада является фундаментальное взаимодействие, ответственное за распад адрона. Быстрее всех – за характерное время  $\approx 10^{-23}$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



$$J^P = 3/2^+$$

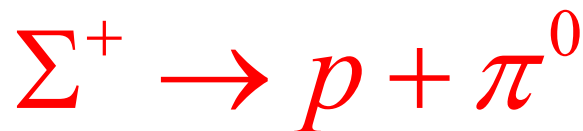
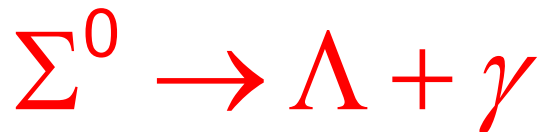


$$M(\Delta) = 1232 \text{ МэВ}$$



# Электромагнитные и слабые распады адронов

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

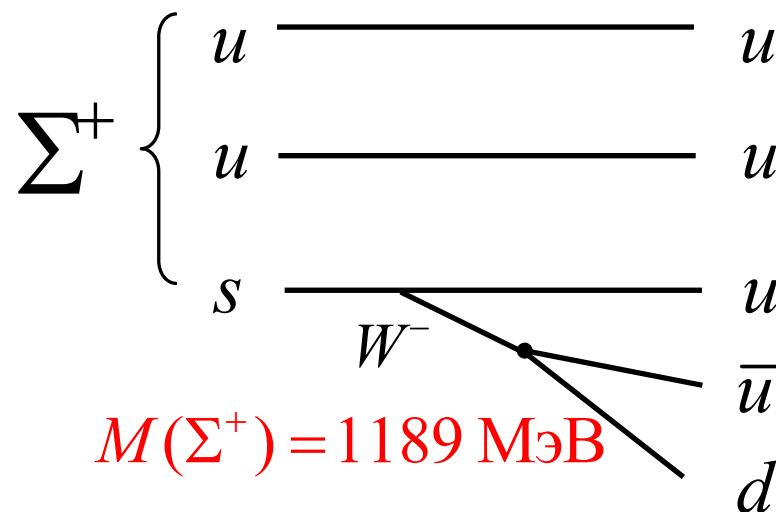
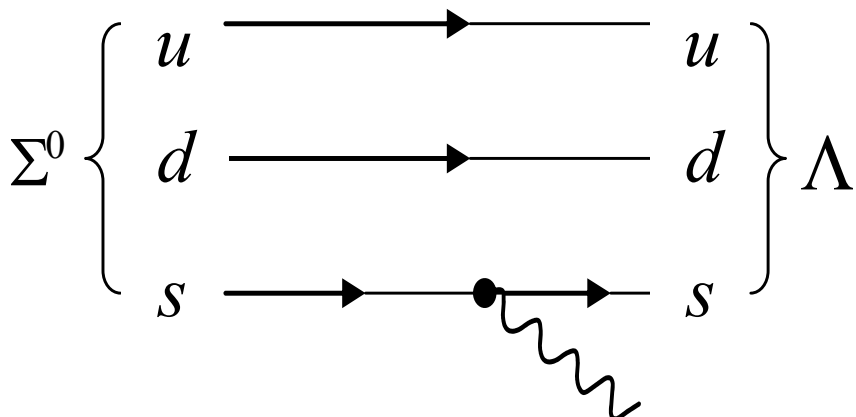


электромагнитный распад

слабый распад

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

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



$$M(\Sigma^0) = 1193 \text{ МэВ}$$

$$M(\Sigma^+) = 1189 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1116 \text{ МэВ}$$

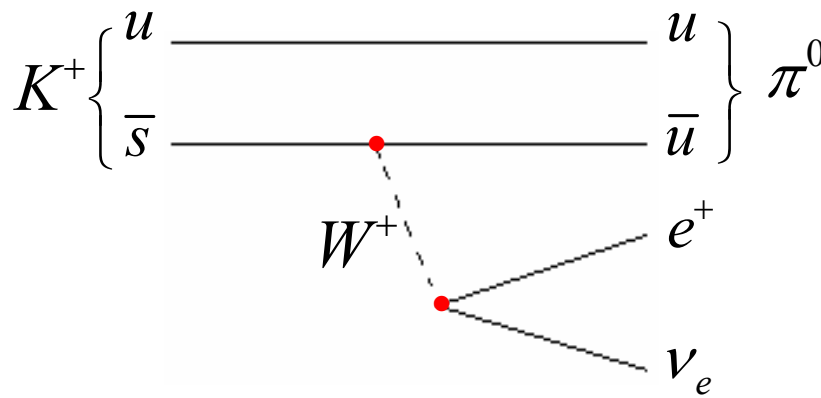
$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

# Распад s-кварка

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

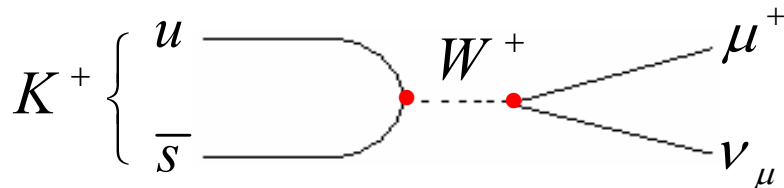
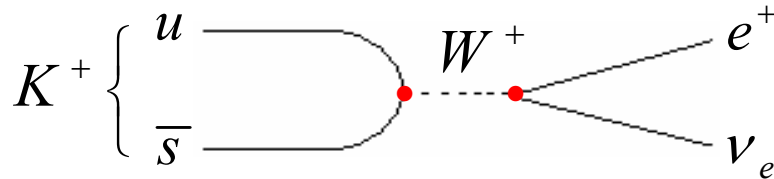
*u*    *c*    *t*  
*d*    *s*    *b*



$$M(K^+) = 4,94 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ МэВ}$$

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



# Распад с-кварка

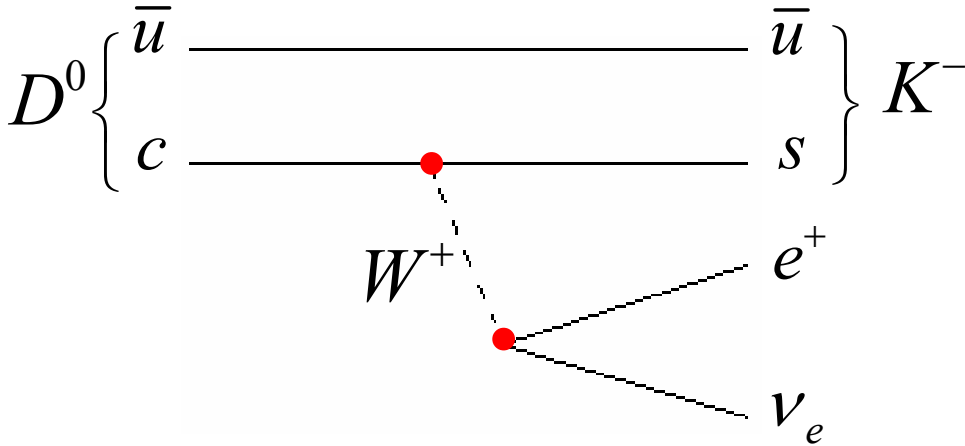
$$M(D^0) = 1864.5 \text{ МэВ}$$

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

*u c t*

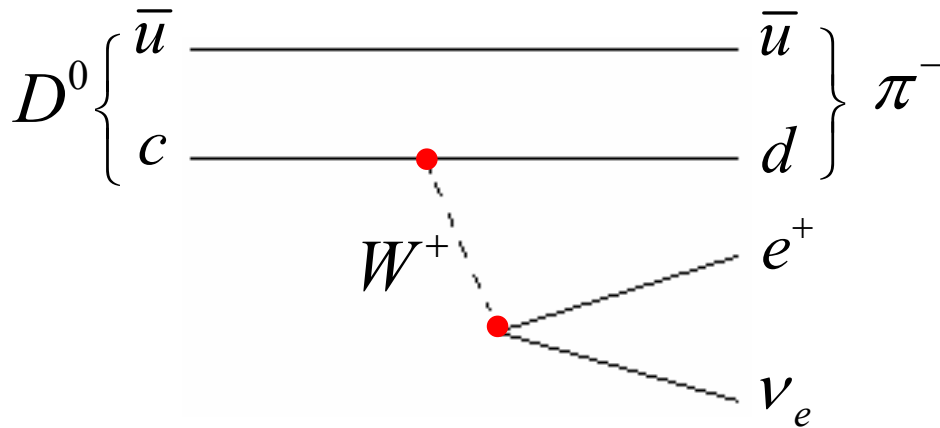
$$D^0(c\bar{u})$$

*d s b*



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

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



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

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

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



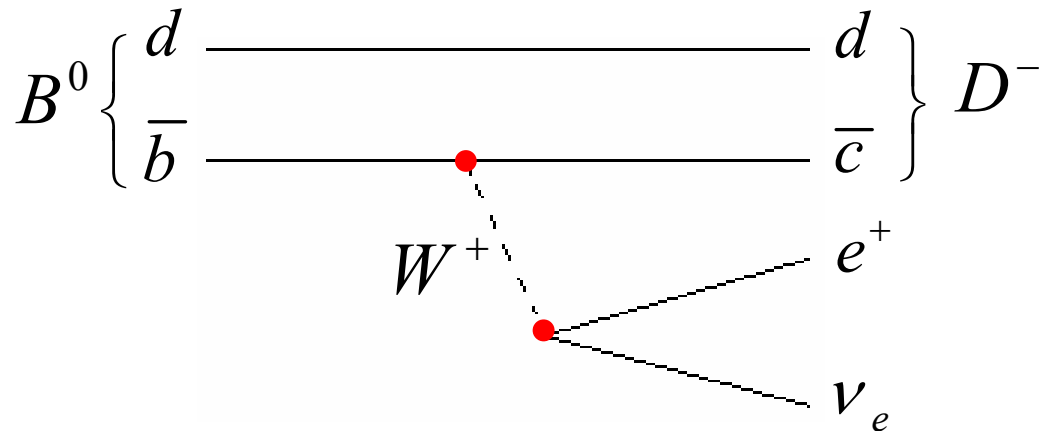
# Распад $b$ -кварка

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

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

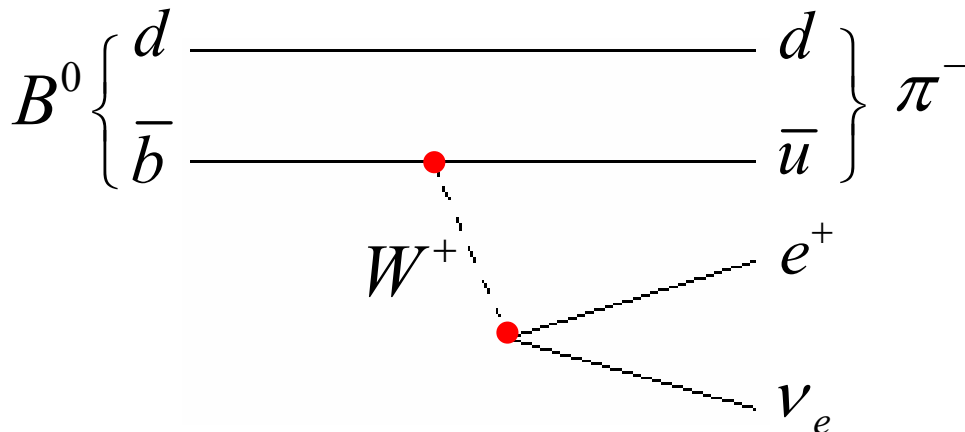
$$\tau(B^0) = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ сек}$$

$u$     $c$     $t$   
 $d$     $s$     $b$



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

$(2.10 \pm 0.19)\%$

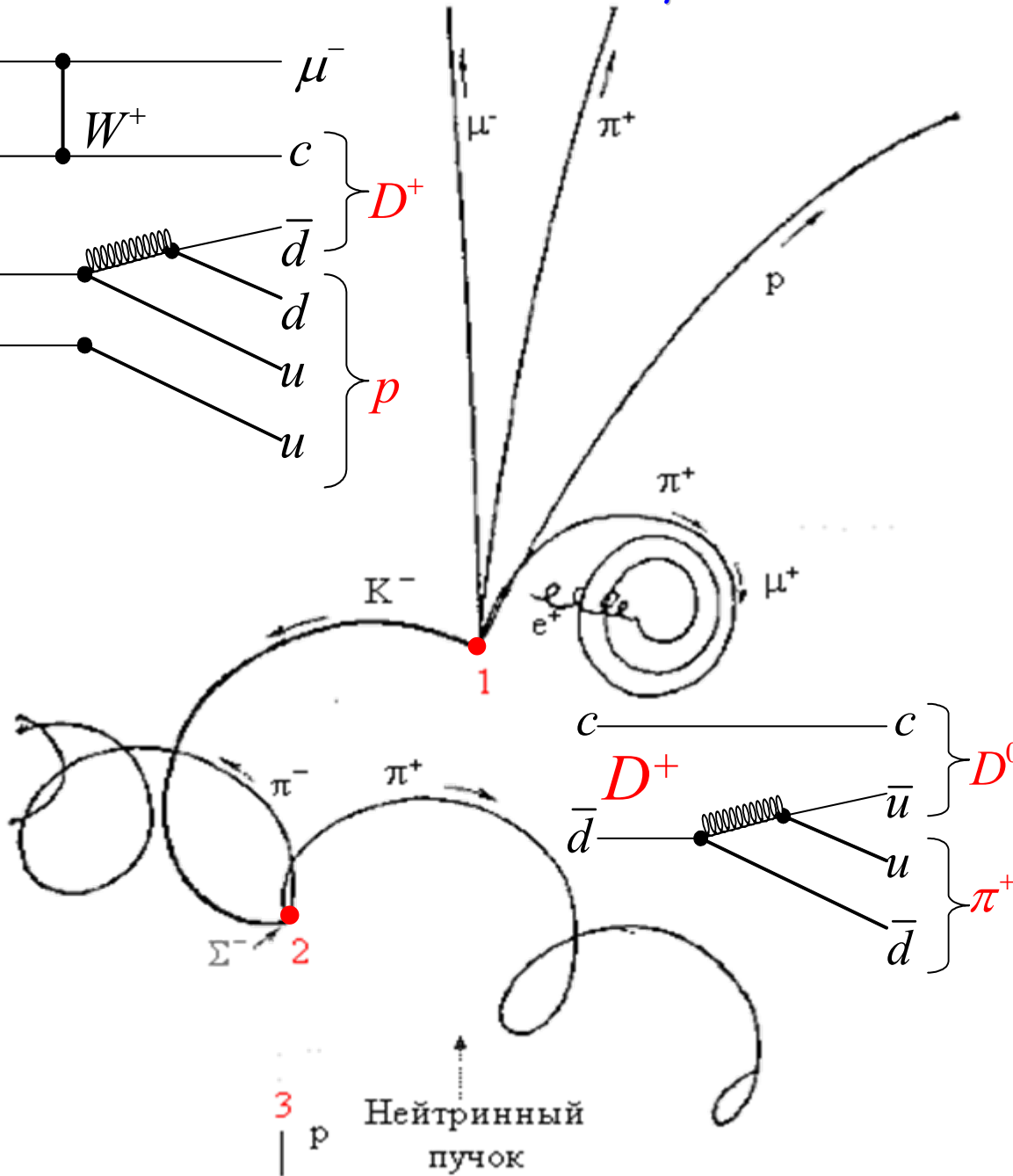
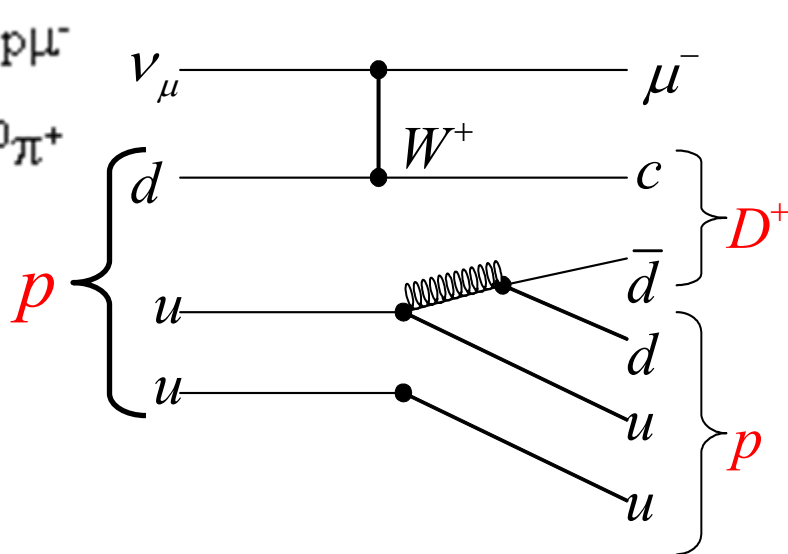
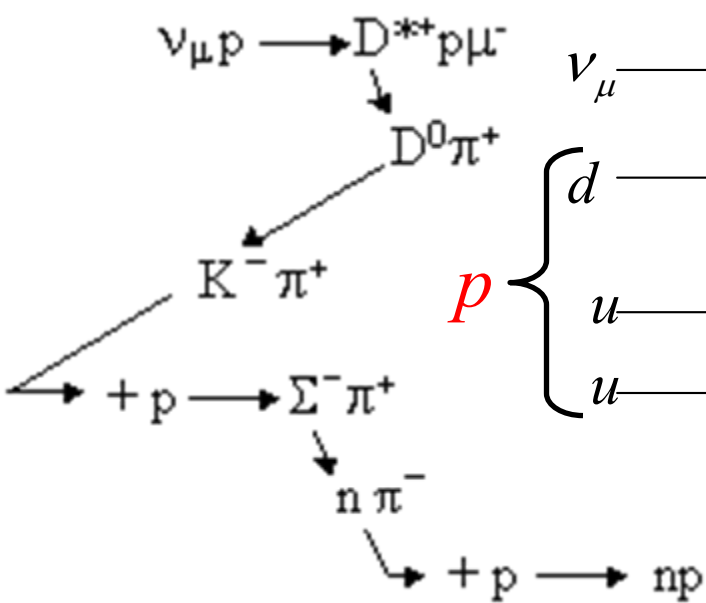


$$B^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

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

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

# Образование $D^{*+}$ резонанса в реакции $\nu_\mu + p$



$$M(D^{*+})(c\bar{d}) = 2010 \text{ МэВ}$$

$$M(D^0)(c\bar{u}) = 1864 \text{ МэВ}$$

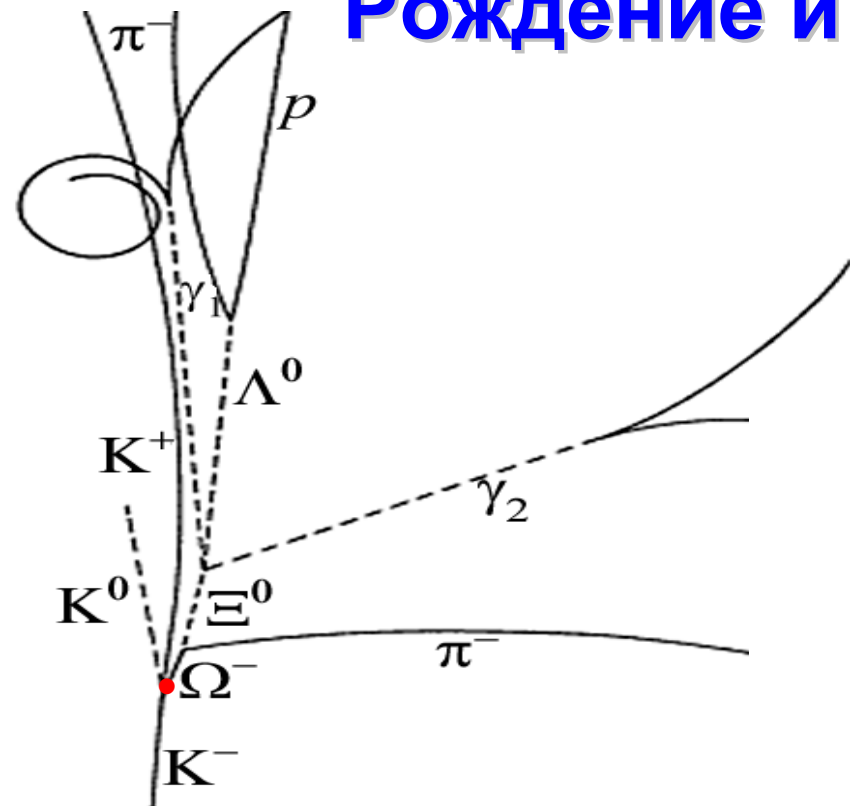
$$M(\mu^-) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$

$$M(K^-) = 493,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\Sigma^-) = 1197,3 \text{ МэВ}$$

# Рождение и распад $\Omega^-$ -гиперона



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

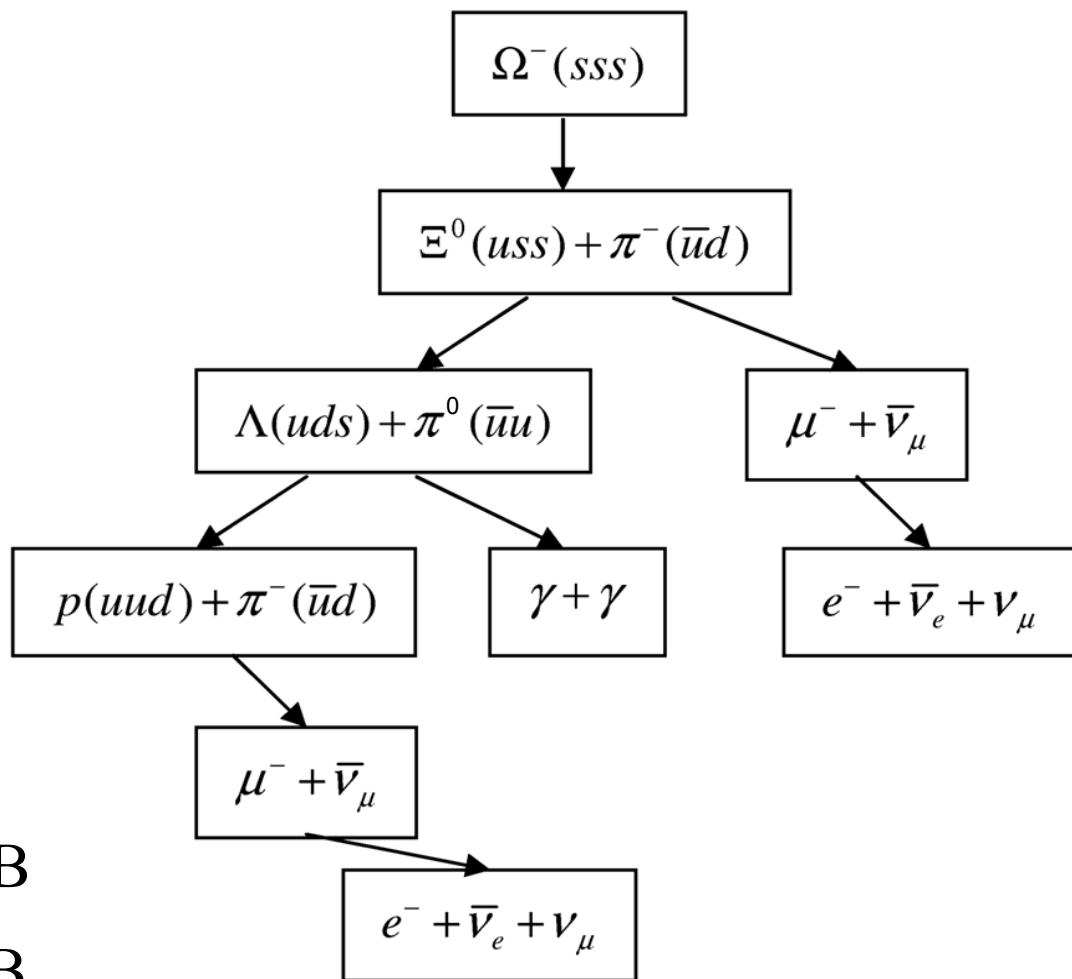
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

$$M(\mu^-, \mu^+) = 105,7 \text{ МэВ}$$

$$M(\pi^+, \pi^-) = 139,6 \text{ МэВ}$$



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

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

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

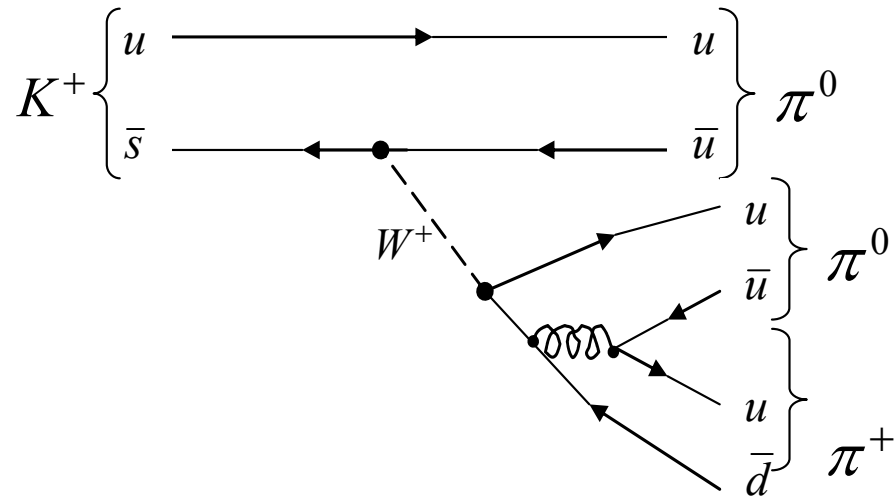
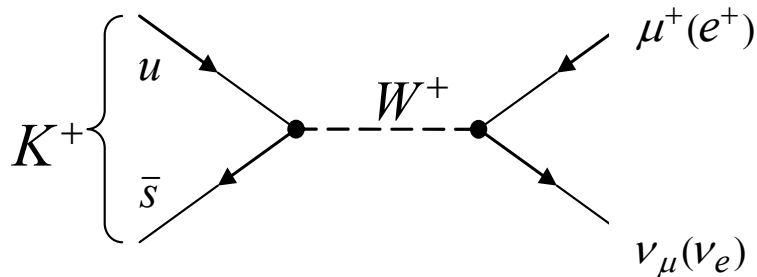
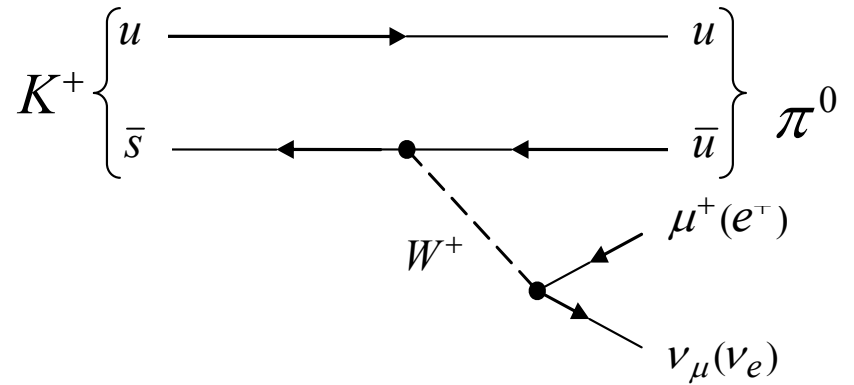
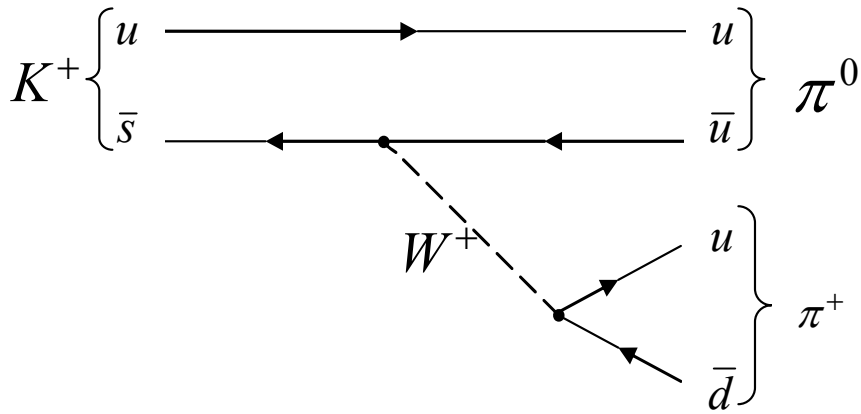
$$J^P(I) = 0^-(1/2)$$

# Распады $K^+$ - мезона

$$M(K^+) = 494 \text{ МэВ}$$

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

$$J^P = 0^-$$



# Распады $\pi$ – мезонов

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

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

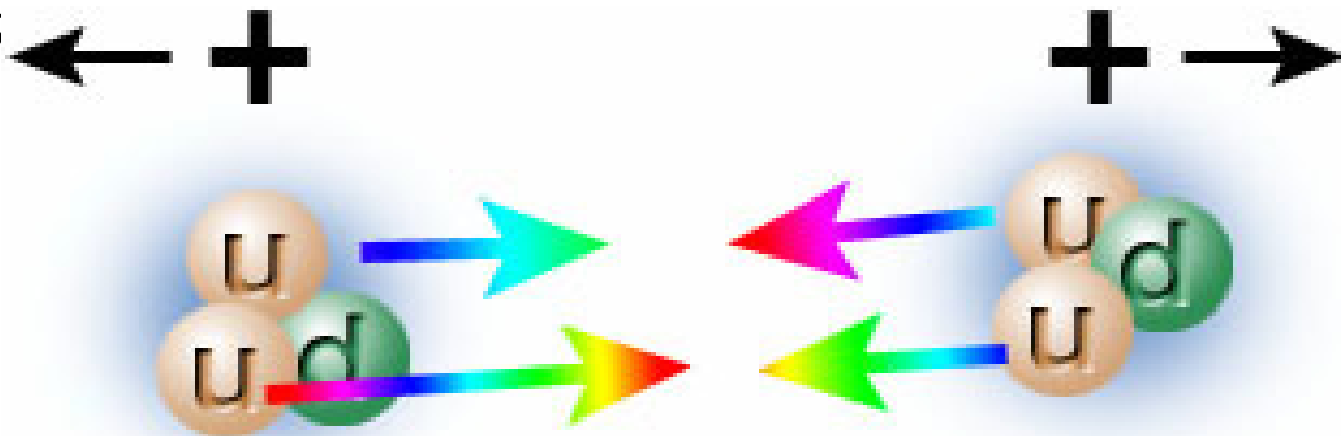
Каналы распада  $\pi^0$ -мезона ( $\tau = 0.84 \cdot 10^{-16}$  с)

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

# Кварки – Адроны – Ядра

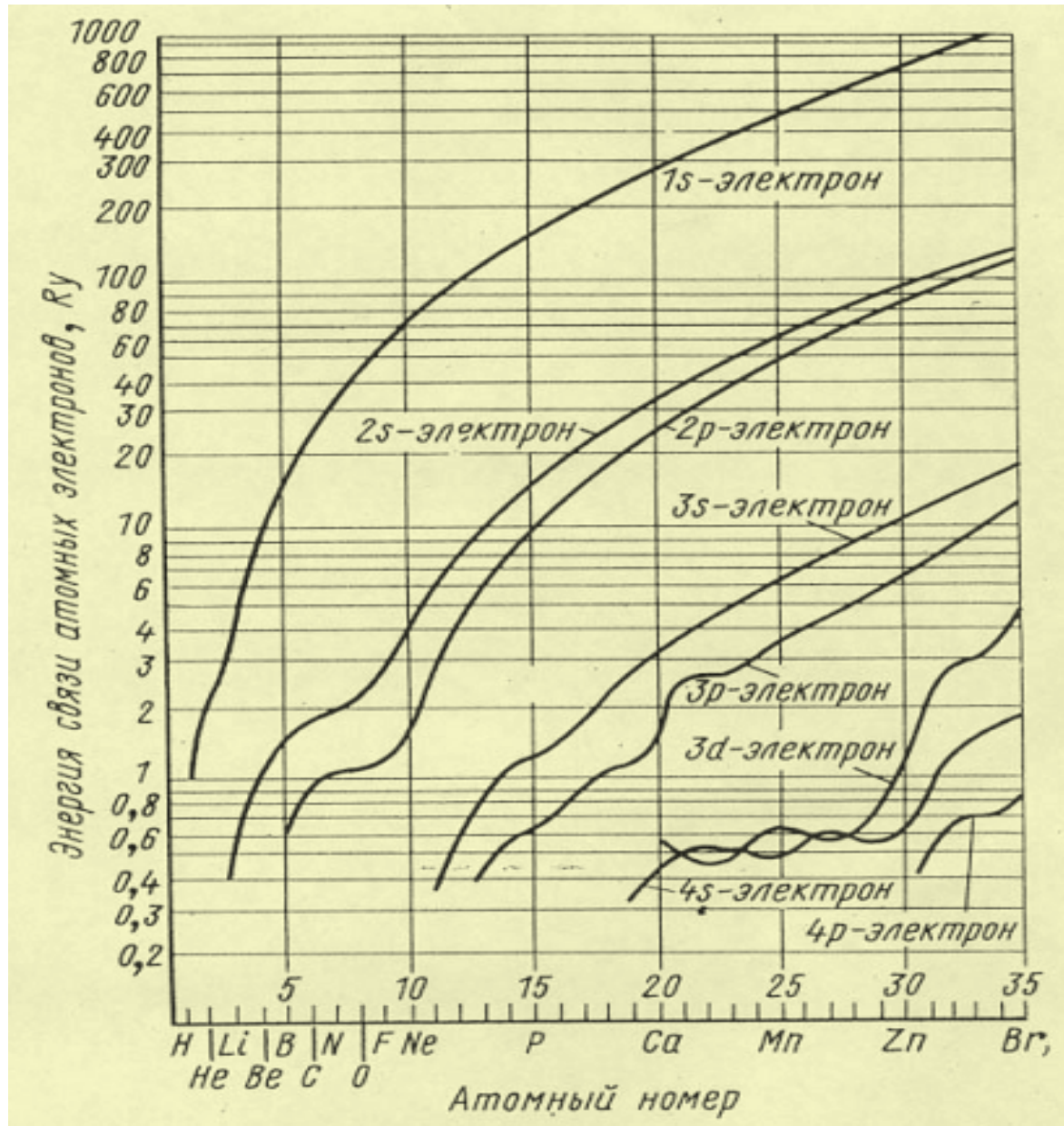
Расстояние, на котором проявляется цветное взаимодействие,  $\approx 1$  Фм – характерный размер адрона. Цветные взаимодействия кварков и глюонов формируют адрон. Точно так же, как атом, состоящий из заряженных частиц, является электрически нейтральным образованием, адрон, состоящий из цветных объектов, 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 взаимодейст



## Атомные ядра

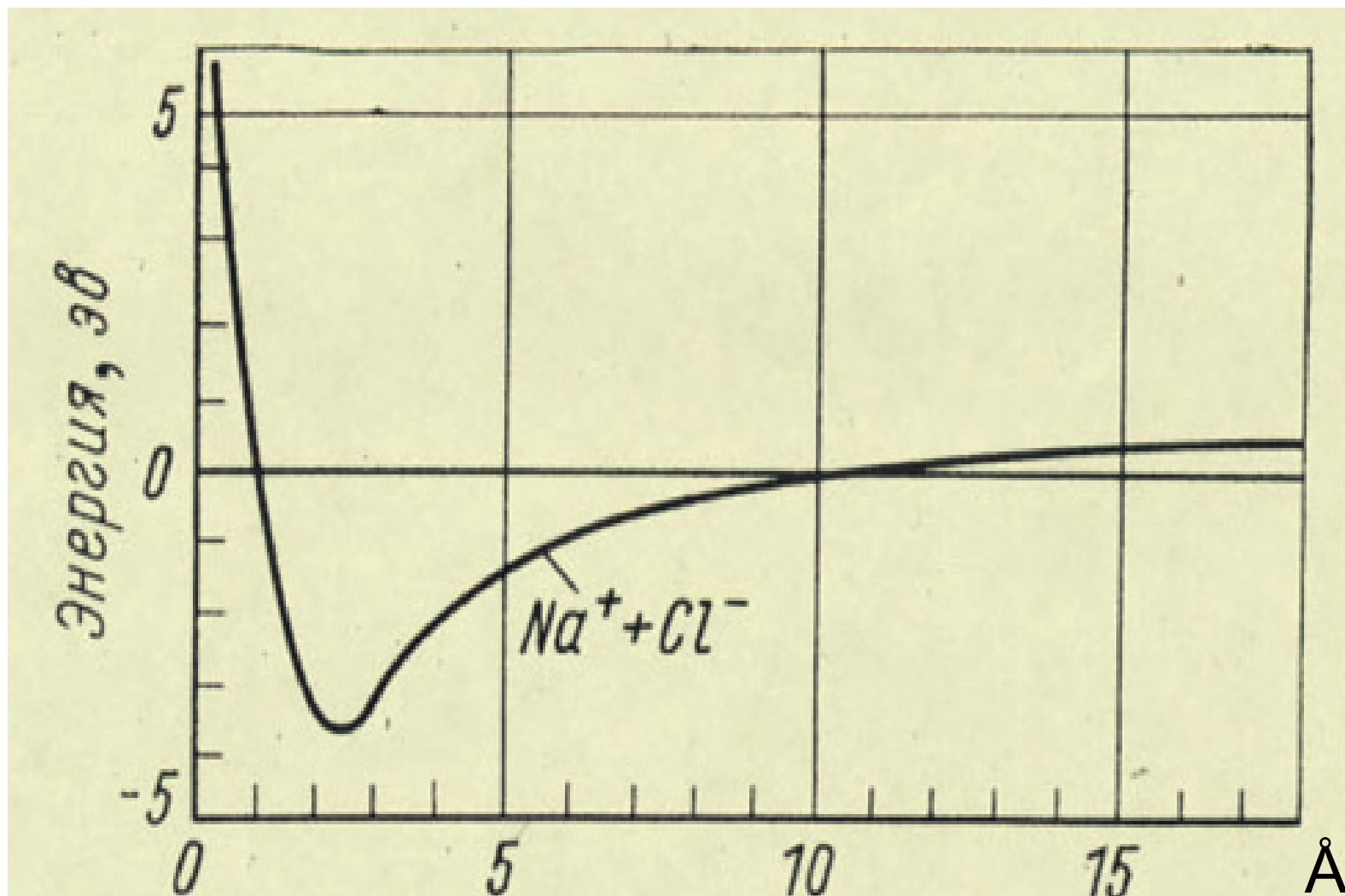
# Атомы. Молекулы



Зависимость энергии связи электронов различных оболочек атома от атомного номера.

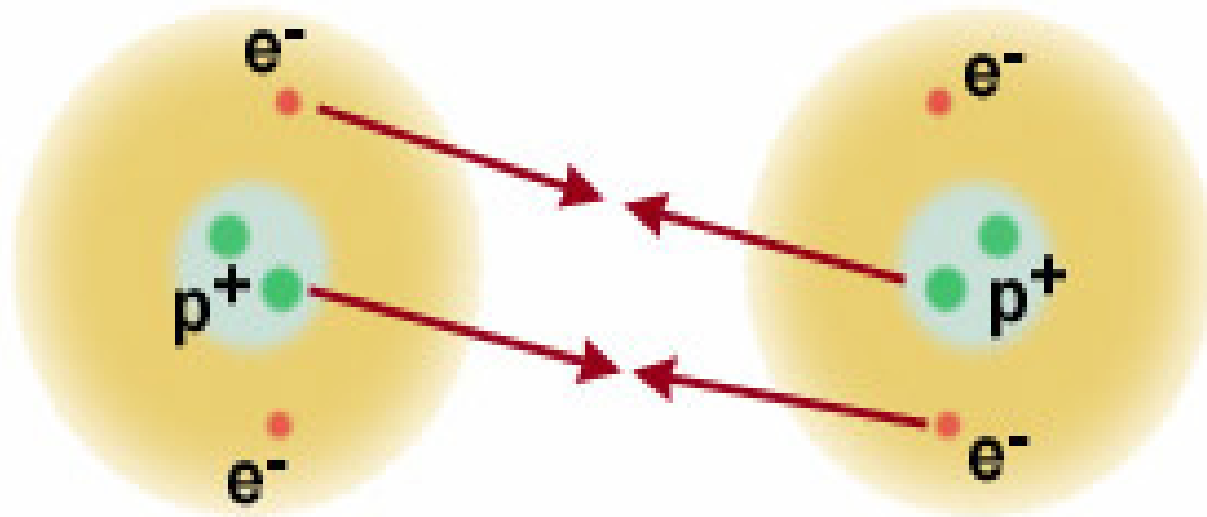


# Атомы. Молекулы



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

# 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.