

**КВАРКИ.  
АДРОНЫ**

# Фундаментальные частицы Стандартной Модели

$e^-$  (1897)       $\mu^-$  (1937)       $\tau^-$  (1975)

$\nu_e$  (1956)       $\nu_\mu$  (1962)       $\nu_\tau$  (2000)

$u$  (1963)       $c$  (1974)       $t$  (1995)

$d$  (1963)       $s$  (1963)       $b$  (1977)

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

$H$  – бозон Хиггса

# Адроны — элементарные частицы?

$n$  (939.6  $MэВ$ )

$p$  (938.3  $MэВ$ )

$\Lambda$  (1116  $MэВ$ )

$\Sigma^+$  (1189  $MэВ$ )

$\Sigma^-$  (1197  $MэВ$ )

$\Sigma^0$  (1193  $MэВ$ )

$\Xi^0$  (1315  $MэВ$ )

$\Xi^-$  (1321  $MэВ$ )

$\pi^+$  (139  $MэВ$ )

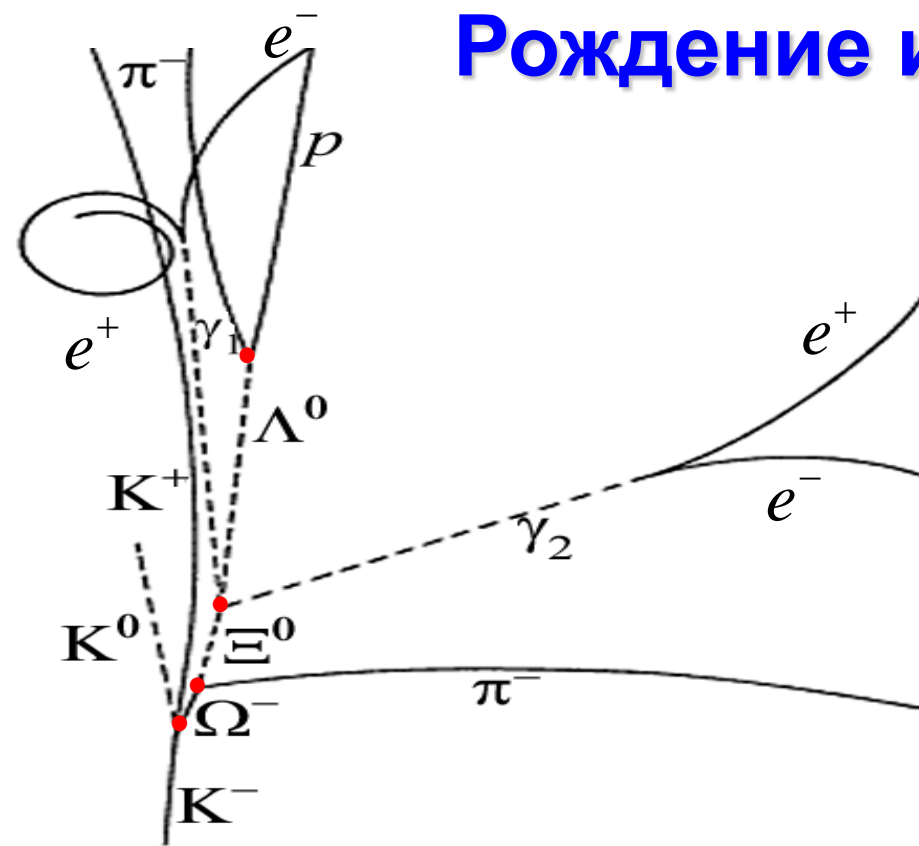
$\pi^-$  (139  $MэВ$ )

$\pi^0$  (134  $MэВ$ )

$K^+$  (494  $MэВ$ )

$K^-$  (494  $MэВ$ )

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



$$M(\Omega) = 1672,5 \text{ МэВ}$$

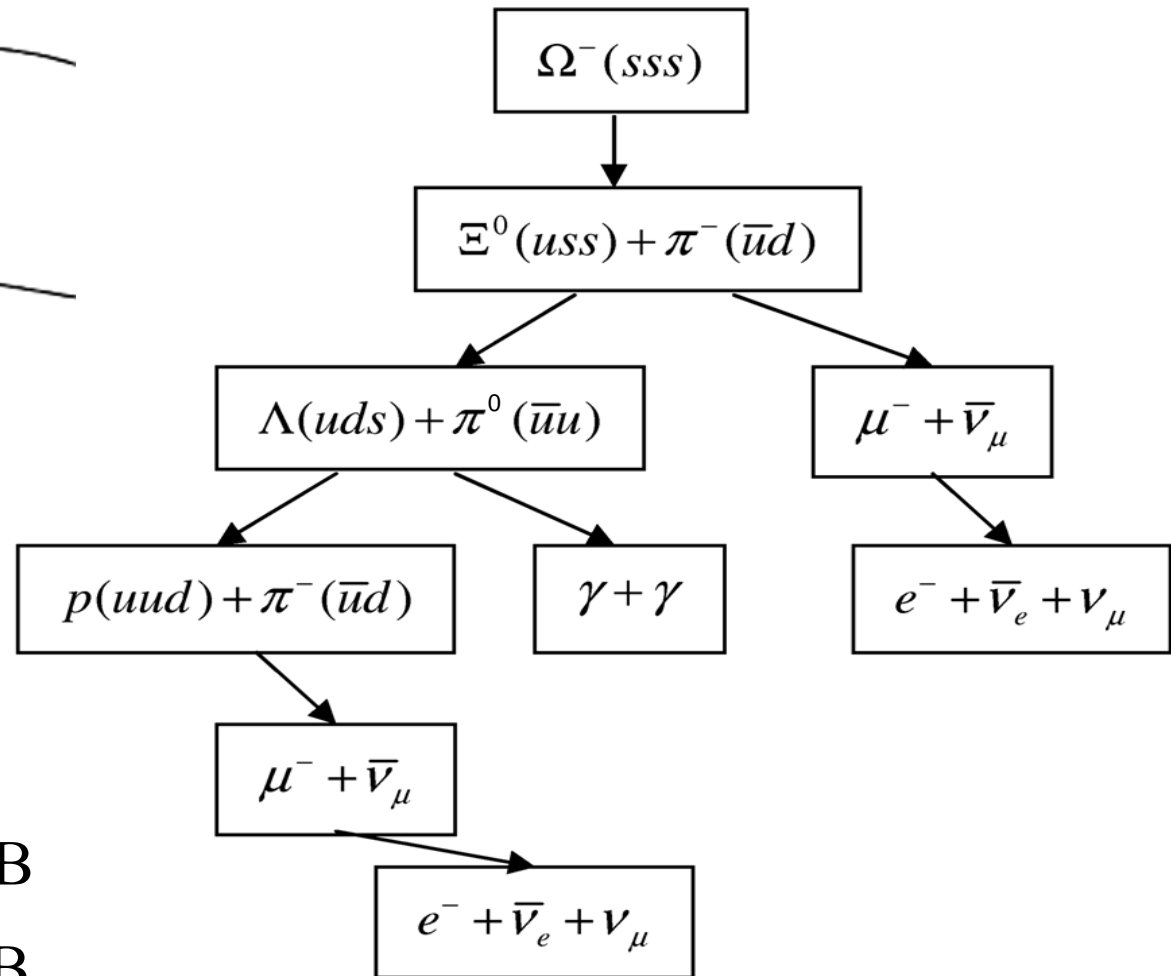
$$M(\Xi^0) = 1314,9 \text{ МэВ}$$

$$M(\Lambda) = 1115,6 \text{ МэВ}$$

$$M(p) = 938,3 \text{ МэВ}$$

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

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



# Кварки

1963 г. М. Гелл-Манн, Г. Цвейг

*u*

*d*      *s*

Все обнаруженные до 1974 г. адроны можно было описать, составляя их из кварков трех типов — *u*, *d*, *s*. Каждой комбинации кварков соответствовала экспериментально наблюдаемая частица

Наблюдались только связанные состояния кварка в адронах. Возникла проблема — **отсутствие кварков в свободном состоянии.**

# Кварковая структура адронов

$$\begin{array}{ll} p & (uud) \\ n & (udd) \\ \Lambda & (uds) \\ \Xi^0 & (uss) \\ \Xi^- & (dss) \end{array} \quad Q(u) = +\frac{2}{3}e$$
$$Q(d, s) = -\frac{1}{3}e$$

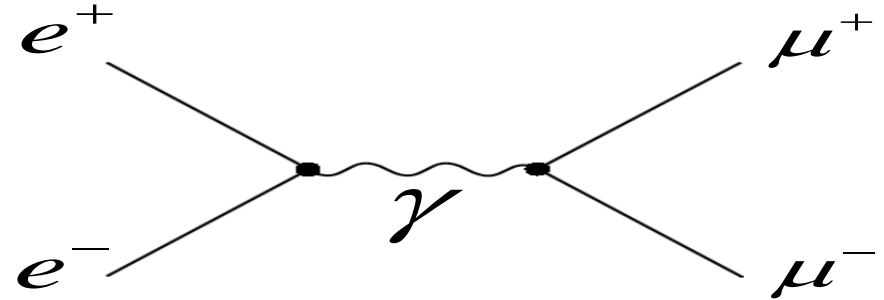
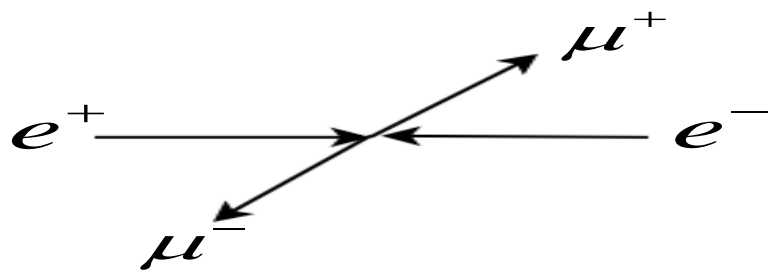
Кварки должны иметь дробный электрический заряд

$$\begin{array}{ll} \pi^+ & (u\bar{d}) \\ \pi^- & (\bar{u}d) \end{array} \quad \begin{array}{ll} K^+ & (u\bar{s}) \\ K^- & (\bar{u}s) \end{array}$$

Кварки имеют спин

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

# $e^+ e^-$ аннигиляция



Для точечных частиц со спином  $J=1/2$  сечение образования фермионов в реакции однофотонной аннигиляции:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4s} \beta \left[ 1 + \cos^2 \theta + (1 - \beta^2) \sin^2 \theta \right] Q_f^2$$

$\beta$  - скорость фермионов в конечном состоянии

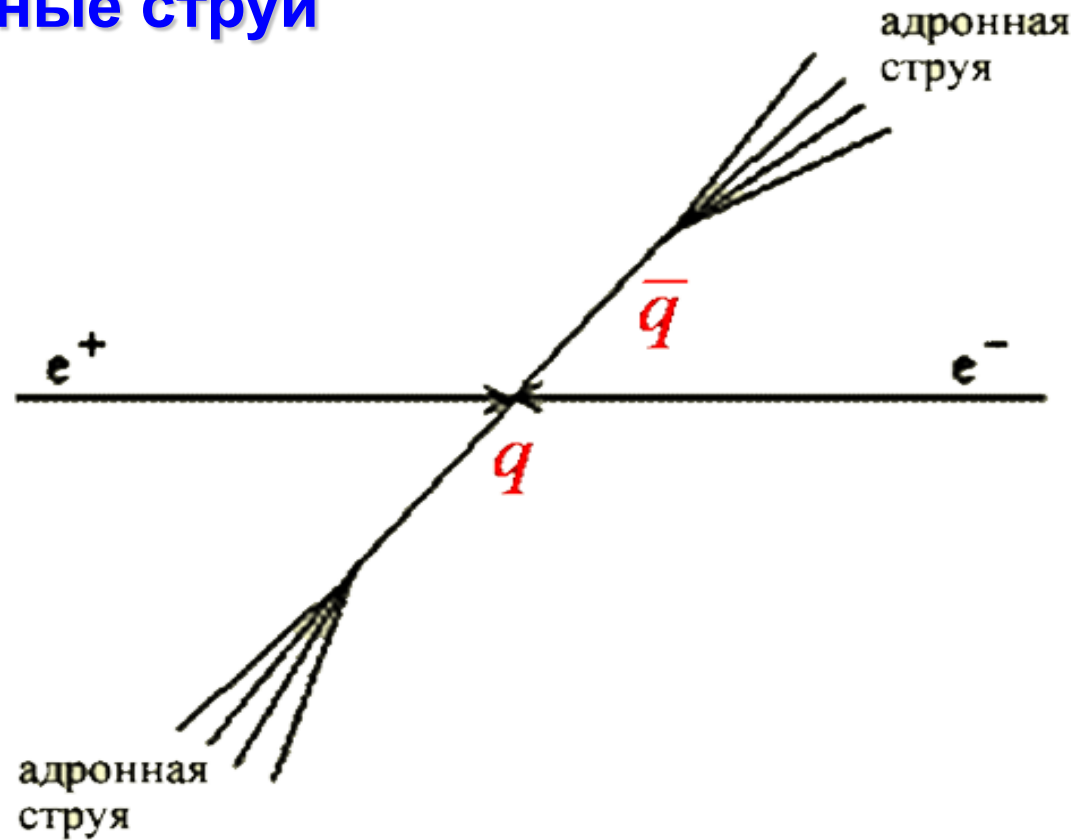
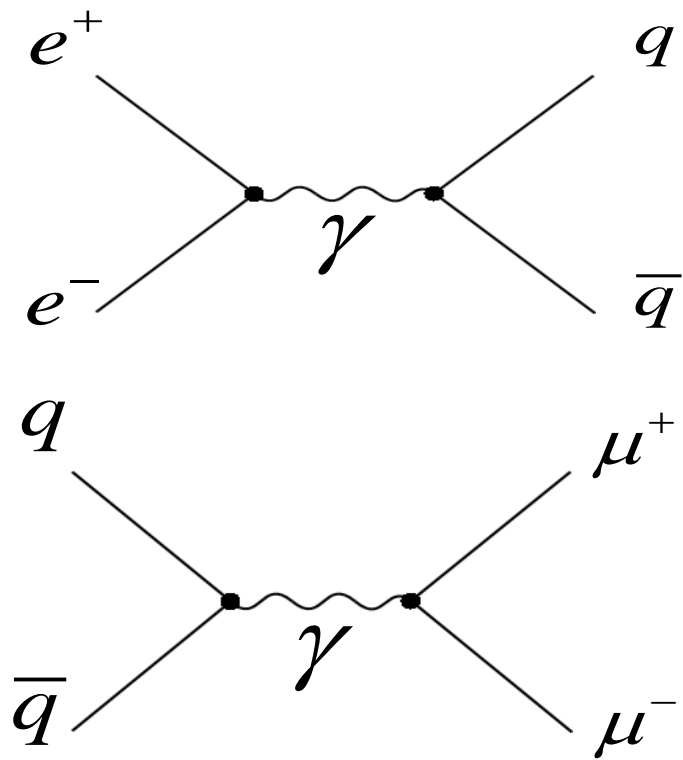
$Q_f$  - заряд фермионов в единицах заряда протона

$$s = (E_{e^-} + E_{e^+})^2$$

При  $\beta \approx 1$

$$\sigma \approx \frac{4\pi\alpha^2}{3s} Q_f^2 = \frac{86.8 \cdot Q_f^2 \text{ нбарн}}{s (\text{ГэВ}^2)}$$

# Как открывают кварки. Адронные струи

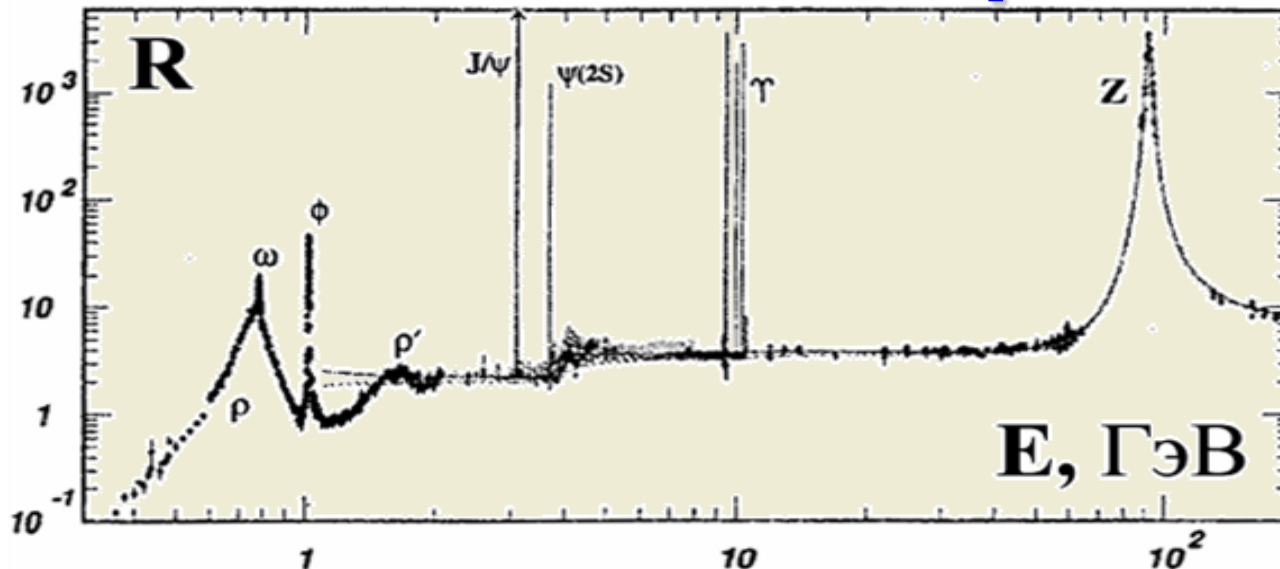


Кварки являются реальными частицами, т.к. имеются наблюдаемые эффекты их существования на малых расстояниях. Один из таких эффектов проявляется в образовании адронных струй.

Адронная струя — это совокупность адронов летящих в одном направлении. Если бы кварки реально не существовали, то адроны, рождающиеся в  $e^+e^-$ -столкновениях, разлетались бы равномерно по всем направлениям.



# 1974 г. с-кварк



Одновременно две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы.

- $p + Be \rightarrow e^+ e^- + \text{остальные частицы}$ .

Резонанс в спектре  $e^+ e^-$  был назван J-частицей.

- $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$ ,  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$ ,  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

Резонанс был назван  $\psi$ -частицей.

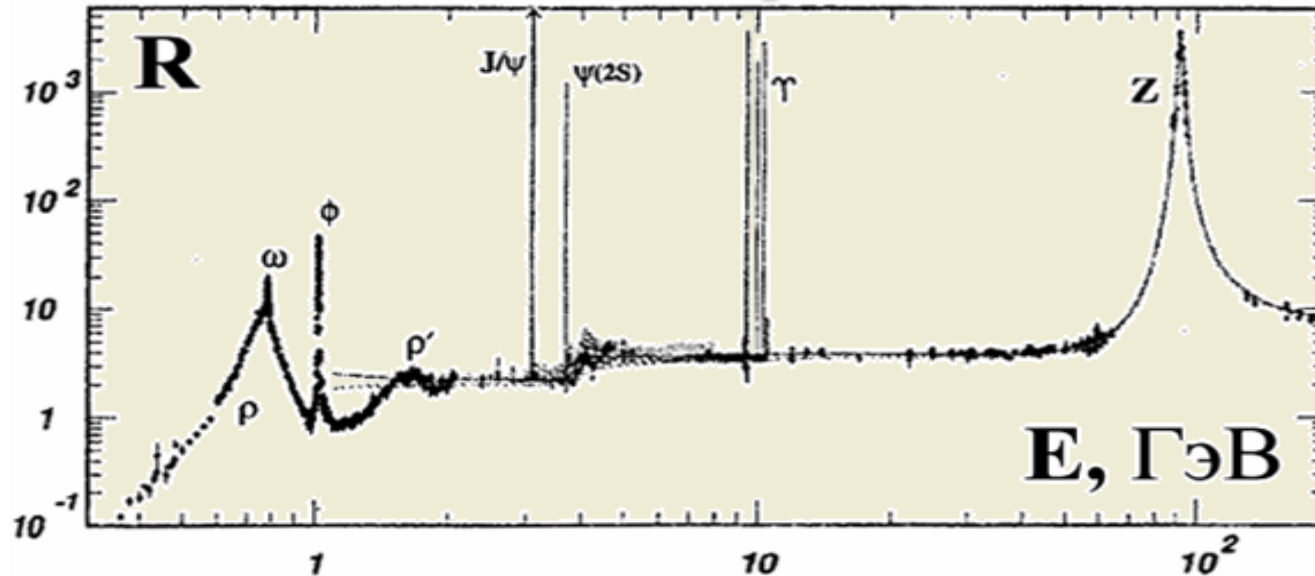
Наиболее интересным свойством новой частицы, окончательно названной  $J/\psi$ -частицей, является узкая ширина резонанса  $\Gamma = 91$  КэВ.  
 $E = 3,1$  ГэВ.

**Нобелевская премия по физике**

1976 г. – Б. Рихтер, С. Тинг.

За открытие тяжелой элементарной частицы нового типа

# с-кварк

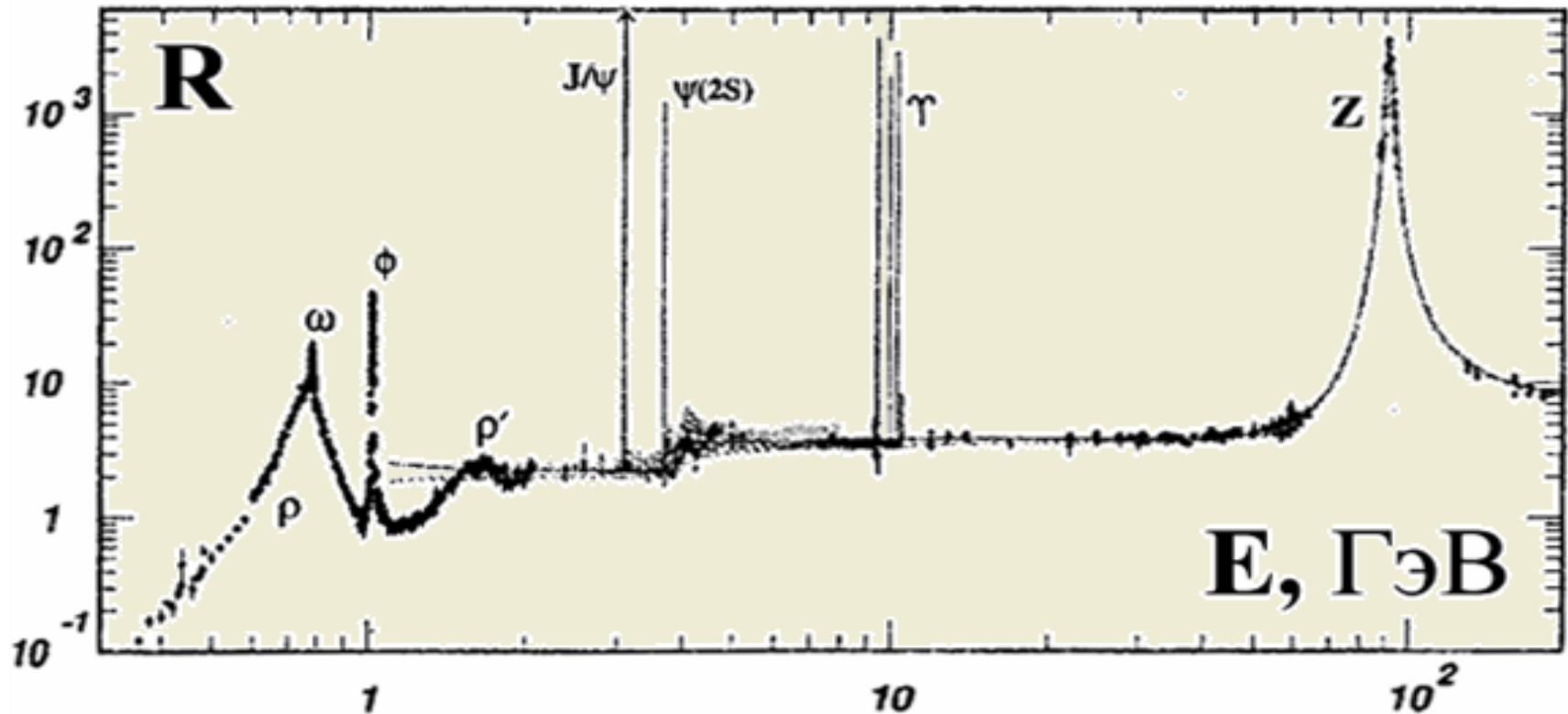


Ширина резонанса характеризует время жизни частицы  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\hbar}{\Gamma}.$$

Время жизни  $J/\psi$ -частицы почти в 1000 раз больше, чем у известных частиц такой массы.  $J/\psi$ -частица — мезон, состоящий из с-кварка и с-антикварка, т.е. частица со скрытым очарованием. с-кварк несет новое квантовое число с, названное «очарованием». Очарованный кварк порождает новое семейство адронов, имеющих в своем составе с-кварк или с-антикварк.

# 1977 г. b-кварк



Было открыто несколько мезонов с массами в районе  $10 \text{ ГэВ}/c^2$ , которые получили название ипсилон-мезонов. Так же, как и  $J/\psi$ -мезоны, они наблюдались в реакции образования мюонных пар в протон-ядерных столкновениях и на электронно-позитронных коллайдерах. Также как  $J/\psi$ -мезоны это были долгоживущие частицы — ширина распада  $\Upsilon$ -мезона  $52 \text{ кэВ}$ . Это означало существование пятого кварка  $b$  (beauty).

В состав  $\Upsilon$ -мезона входят  $b$ -кварк и  $\bar{b}$ -антикварк, поэтому он обладает скрытой красотой.

# **t – кварк. 1995 г.**

**b-кварк нарушил симметрию в семействе кварков**

|            |          |          |          |
|------------|----------|----------|----------|
| $Q = +2/3$ | <i>u</i> | <i>c</i> |          |
| $Q = -1/3$ | <i>d</i> | <i>s</i> | <i>b</i> |

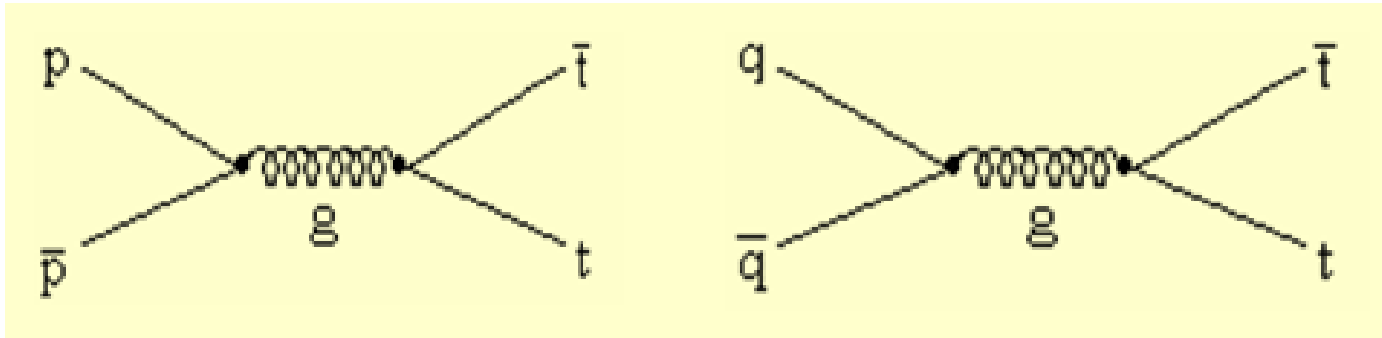
Казалось вполне естественным существование шестого кварка с зарядом  $Q = +2/3$ . Уверенность в этом возросла после наблюдения  $\tau$ -лептона (1975 г.). Симметрия в мире кварков и лептонов служит указанием на то, что в природе существует три семейства кварков и лептонов.

**Недостающий кварк был назван t-кварком.**

Начались активные попытки обнаружить t-кварк.

# Открытие t-кварка

t-кварк был открыт в 1995 г. в столкновении пучков протонов и антипротонов (Теватрон, Фермилаб, США)



Один из кварков, входящих в состав протона, в результате сильного взаимодействия с одним из антикварков антипротона образует глюон  $g$  — квант сильного поля, который затем порождает пару  $t\bar{t}$ . По оценкам, вероятность рождения пары  $t\bar{t}$ -кварков в столкновении протона и антипротона с энергиями  $\approx 1$  ТэВ должна была составлять  $10^{-9}$ - $10^{-10}$  от общего числа наблюдаемых событий. Поэтому потребовалось несколько месяцев измерений и тщательного анализа событий, чтобы убедиться в существовании t-кварка и определить его характеристики.

# t-кварк

|                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| Масса, $mc^2$                       | $171.2 \pm 2.1$ ГэВ |
| Электрический заряд, $e$            | $+2/3$              |
| Барионное число $B$                 | $+1/3$              |
| Спин                                | $+1/2$              |
| Квантовое число $t$                 | $+1$                |
| Изоспин и квантовые числа $s, c, b$ | $0$                 |

$t$ -кварк имеет время жизни  $\tau \approx 10^{-25}$  с, поэтому он не успевает образовать семейства адронов, содержащих этот кварк. Столь малое время жизни  $t$ -кварка обусловлено большим энерговыделением  $Q$  при распаде  $t$ -кварка.

Среднее время жизни частицы, распадающейся в результате слабого взаимодействия, обратно пропорционально энергии распада  $Q$  в пятой степени:

$$\tau \sim Q^{-5}$$

# Кварки

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

На современном этапе развития наших представлений о структуре материи на первый план выходят «новые элементарные частицы» — кварки. Все адроны состоят из различных комбинаций  $qqq, q\bar{q}, \bar{q}\bar{q}\bar{q}$  этих шести кварков.

Есть достаточно серьезные основания считать, что число кварков не должно быть больше шести.

Кварки являются фундаментальными частицами из которых состоят все сильновзаимодействующие частицы.

Кварки не существуют в свободном состоянии.

Они **заключены** в адронах.

Силы, связывающие кварки в адронах, растут с увеличением расстояния между кварками. Это называют удержанием кварков в адронах или конфайнментом.

# Спин кварков $J$

Кварки являются фермионами

$$J(q) = \frac{1}{2}$$

$$J(\bar{q}) = \frac{1}{2}$$



# Чётность P

$$P(q) = +1$$

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

В квантовой физике под понятием чётности частицы подразумевают квантовое число характеризующее симметрию волновой функции  $\psi(r)$  относительно операции зеркального отражения.

$$P\psi(r) \rightarrow \psi(-r)$$

Внутренняя чётность частицы может быть положительной ( $P=+1$ ) или отрицательной ( $P=-1$ ).

Чётность кварков  $P(q) = +1$

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

# Электрические заряды кварков $Q(e)$

|     |     |     |                |
|-----|-----|-----|----------------|
| $u$ | $c$ | $t$ | $+\frac{2}{3}$ |
| $d$ | $s$ | $b$ | $-\frac{1}{3}$ |

**Так же, как в случае лептонов, известно  
3 поколения кварков**

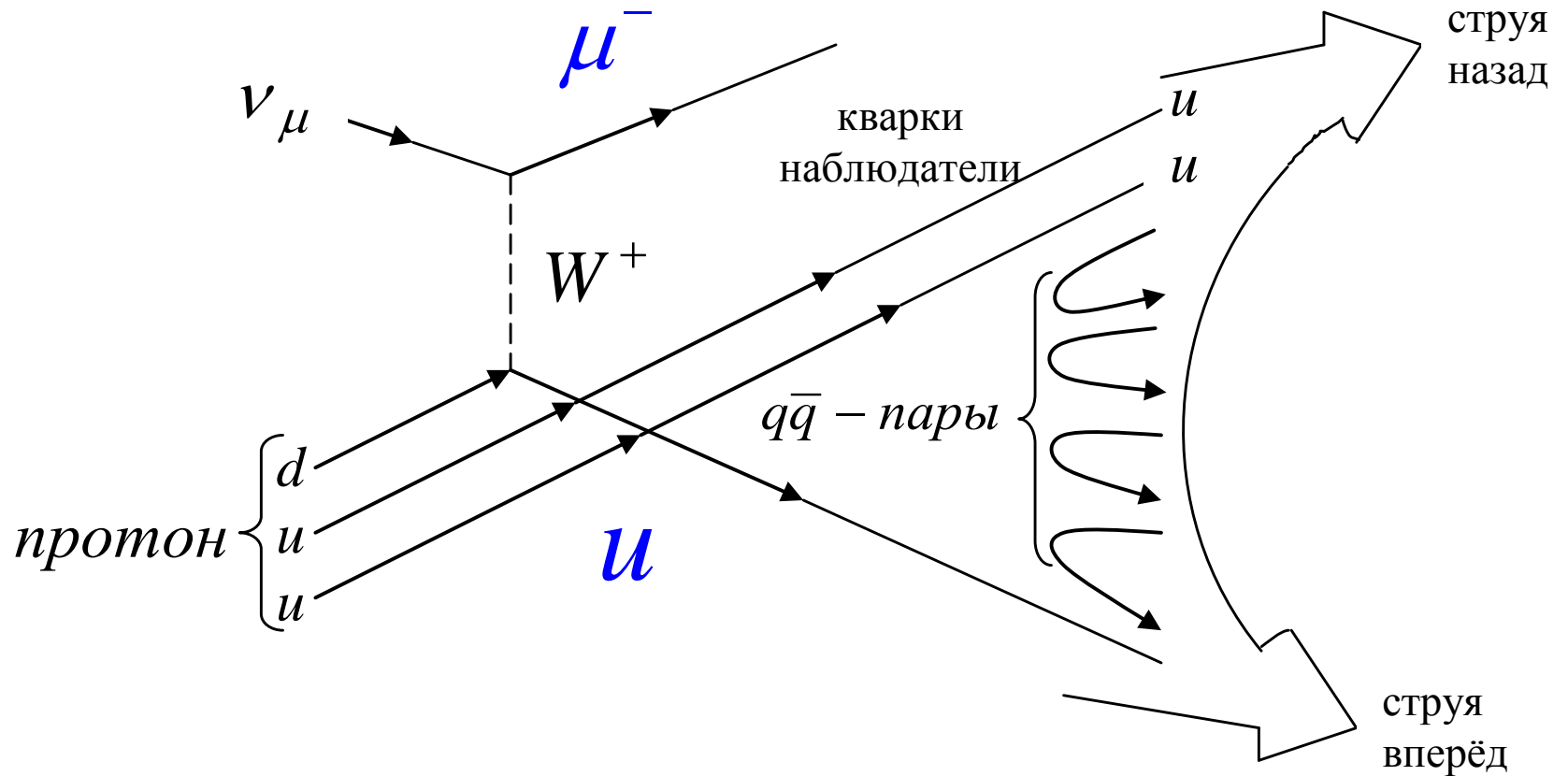
$u, c, t$  кварки имеют электрический заряд  $+2/3$

$d, s, b$  кварки имеют электрический заряд  $-1/3$

$\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}$  антикварки имеют электрический заряд  $-2/3$

$\bar{d}, \bar{s}, \bar{b}$  антикварки имеют электрический заряд  $+1/3$

# Электрические заряды кварков

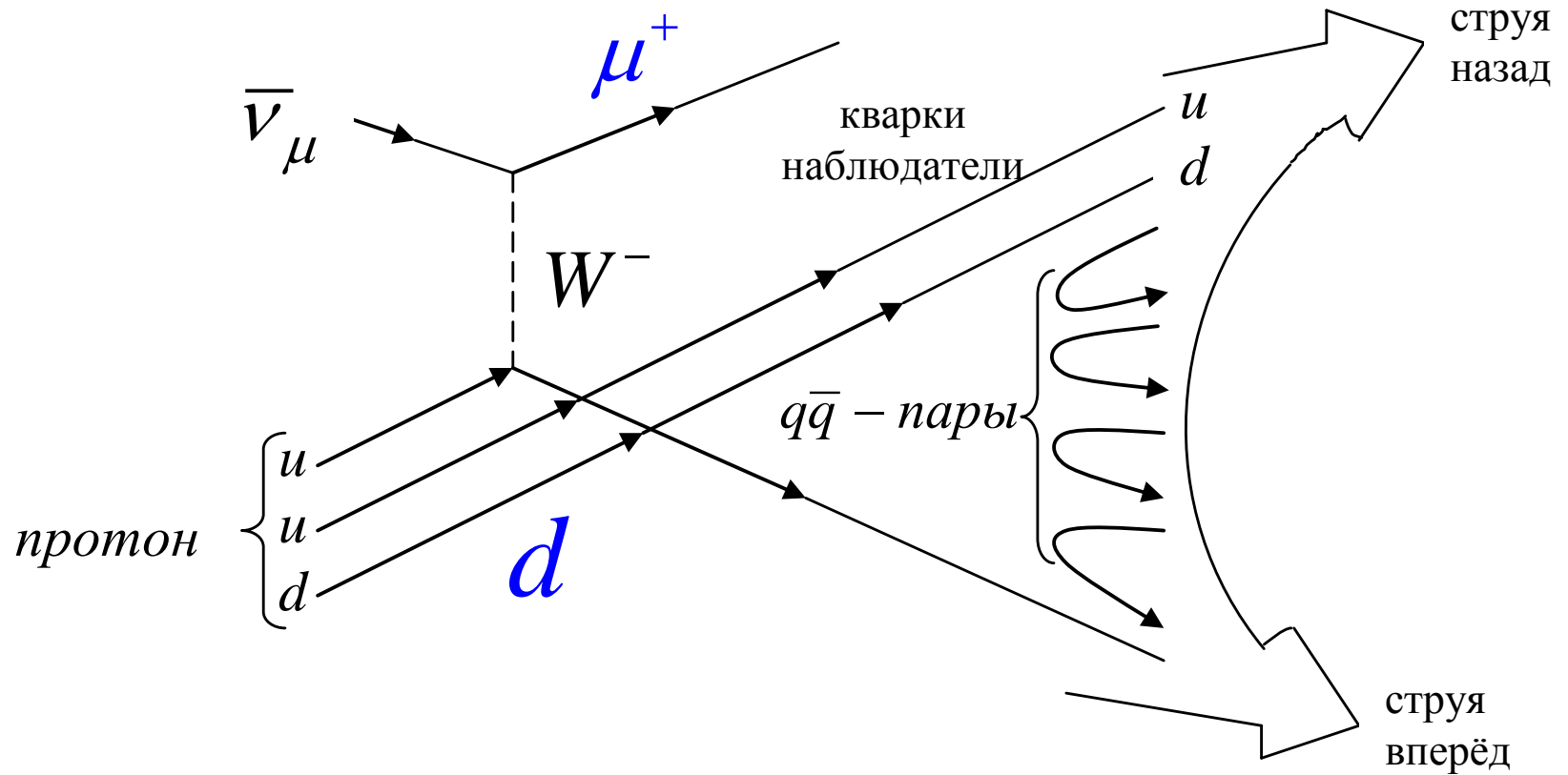


$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \text{струи адронов}$$

$$\nu_\mu + d \rightarrow \mu^- + u$$

$$Q(u) = 0.65 \pm 0.12$$

# Электрические заряды кварков



$$\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + \text{струи адронов}$$

$$\bar{\nu}_\mu + u \rightarrow \mu^+ + d$$

$$Q(d) = -0.33 \pm 0.09$$

## Барионный заряд кварка

$$B(q) = +1/3$$

## Барионный заряд антикварка

$$B(\bar{q}) = -1/3$$

# Барионный заряд кварков $B$

Стандартная Модель приписывает лептонам три лептонных заряда  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Аналогичной характеристикой кварков – но одной и той же для всех кварков – является барионный заряд  $B$ . Барионный заряд кварков  $B(q)=+1/3$ . Барионный заряд антикварков  $B(\bar{q})=-1/3$ .

Барионный заряд является аддитивным сохраняющимся квантовым числом. Не обнаружено каких-либо указаний на его несохранение.

Адроны, состоящие из трех кварков, имеют барионный заряд  $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$  и называются барионами.

Антибарионы, состоящие из трех антикварков, имеют барионный заряд  $B = -1/3 + (-1/3) + (-1/3) = -1$ .

Мезоны, состоящие из одного кварка и одного антикварка, имеют барионный заряд  $B = +1/3 + (-1/3) = 0$ .

$$B(q) = +\frac{1}{3} \qquad B(\bar{q}) = -\frac{1}{3}$$

# Ароматы (типы) кварков

Каждый из шести кварков обладает своим ароматом, который совпадает с названием кварков –  $u, d, s, c, b, t$ .

Для идентификации «ароматных» свойств легчайших кварков  $u$  и  $d$  используется квантовое число  $I$  – **изоспин**.

Ароматы  $s, c, b, t$  задаются специальными аддитивными квантовыми числами. Их названия: **странность** ( $s$ ), **очарование** или **шарм** ( $c$ ), **боттом** ( $b$ ) и **топ** ( $t$ ). У кварков  $s, c, b, t$  эти квантовые числа имеют значения:

$$s(s) = -1, \quad c(c) = +1, \quad b(b) = -1, \quad t(t) = +1$$

у антикварков соответственно

$$s(\bar{s}) = +1, \quad c(\bar{c}) = -1, \quad b(\bar{b}) = +1, \quad t(\bar{t}) = -1$$

Условились считать знаки ароматов  $s, c, b, t$  совпадающими со знаками электрических зарядов кварков.

Изоспин  $I$  и квантовые числа  $s, c, b, t$  сохраняются только в сильных взаимодействиях.

# Изоспин $u$ , $d$ кварков

$u$ - и  $d$ - кваркам приписывается изоспин  $I = 1/2$  с проекциями  $I_3$  на ось квантования в изоспиновом пространстве, равными соответственно  $I_3 = +1/2$  (изоспин направлен вверх) и  $I_3 = -1/2$  (изоспин направлен вниз):

$$u \rightarrow I = 1/2, \quad I_3 = +1/2$$

$$d \rightarrow I = 1/2, \quad I_3 = -1/2$$

$$\bar{u} \rightarrow I = 1/2, \quad I_3 = -1/2$$

$$\bar{d} \rightarrow I = 1/2, \quad I_3 = +1/2$$



# Изоспин $s, c, b, t$ кварков

Изоспин  $s, c, b, t$  кварков равен нулю.

$$I(s, c, b, t) = 0$$

# Изоспин адронов

Изоспиновая симметрия с кваркового уровня переносится на уровень адронов.

Наиболее существенную роль изоспин играет в систематике адронов. Самые известные адроны – протон  $p$  и нейтрон  $n$ , состоящие из  $u$  и  $d$  кварков, имеют изоспин  $I = 1/2$  и различаются знаками проекции  $I_3$ :

$$p \equiv uud \quad (I = 1/2, I_3 = +1/2)$$

$$n \equiv udd \quad (I = 1/2, I_3 = -1/2)$$

Протон и нейтрон есть два разных состояния одной частицы – нуклона

# Изоспиновые мультиплеты

Подобно тому, как состояния с разными проекциями момента количества движения  $J_z = M$  в изотропном пространстве образуют систему вырожденных уровней, число которых равняется  $2J + 1$ , кварковые системы, обладающие определенным изоспином  $I$ , также вырождены по проекции  $I_3$  и, следовательно, по массе. Эти системы частиц называются *изоспиновыми мультиплетами*. Частицы в изоспиновом мультиплете отличаются проекцией  $I_3$  изоспина, поэтому число  $n$  частиц в мультиплете определяется величиной изоспина  $I$ :

$$n = 2I + 1$$

Каждой проекции изоспина соответствует одна частица изоспинового мультиплета

# Пример

## Изоспиновый триплет $I=1$

$$\pi^+ \quad (139.57 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = +1$$

$$\pi^0 \quad (134.98 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = 0$$

$$\pi^- \quad (139.57 \text{ МэВ}) \quad I=1 \quad I_3 = -1$$

$$\pi^+ \quad (u\bar{d}) \quad I_3 = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

$$\pi^0 \quad (u\bar{u} - d\bar{d}) \quad I_3 = +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

$$\pi^- \quad (\bar{u}d) \quad I_3 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -1$$

$$I = 1 \quad \rightarrow$$

$$I_3 = +1 \quad \pi^+$$

$$I_3 = 0 \quad \pi^0$$

$$I_3 = -1 \quad \pi^-$$

# Проблема цвета

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

$m(\Omega^-) = 1672 \text{ МэВ}$

$$\Delta^{++} (uuu) \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^{++}) = 1232 \text{ МэВ}$

$$\Delta^- (ddd) \quad \begin{array}{c} \uparrow \uparrow \uparrow \\ \hline \end{array} \quad J^P = \frac{3^+}{2}, I = \frac{3}{2}$$

$m(\Delta^-) = 1232 \text{ МэВ}$

# 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.

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

$\Omega^{-}$  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

# Цвет

Цвет кварков – это условное название внутренней степени свободы каждого из шести кварков, принимающей три значения, и выполняющей роль заряда сильного взаимодействия. Обычно используют три цвета – **красный** (к), **зеленый** (з) и **синий** (с). Существование цвета означает, что кварков не шесть ( $u, d, s, c, b, t$ ), а восемнадцать, т.к. кварки каждого аромата утраиваются:

$$\begin{aligned} u &\rightarrow u_k, u_c, u_z & c &\rightarrow c_k, c_c, c_z & t &\rightarrow t_k, t_c, t_z \\ d &\rightarrow d_k, d_c, d_z & s &\rightarrow s_k, s_c, s_z & b &\rightarrow b_k, b_c, b_z \end{aligned}$$

Цвет является аддитивным сохраняющимся квантовым числом.

Антикварки ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$ ) характеризуются *антицветом*  $\bar{k}, \bar{z}, \bar{c}$ . Антикварки бывают антикрасными, антисиними и антизелёными. Антикварков с учётом антицвета тоже восемнадцать:

$$\begin{aligned} \bar{u} &\rightarrow \bar{u}_{\bar{k}}, \bar{u}_{\bar{c}}, \bar{u}_{\bar{z}} & \bar{c} &\rightarrow \bar{c}_{\bar{k}}, \bar{c}_{\bar{c}}, \bar{c}_{\bar{z}} & \bar{t} &\rightarrow \bar{t}_{\bar{k}}, \bar{t}_{\bar{c}}, \bar{t}_{\bar{z}} \\ \bar{d} &\rightarrow \bar{d}_{\bar{k}}, \bar{d}_{\bar{c}}, \bar{d}_{\bar{z}} & \bar{s} &\rightarrow \bar{s}_{\bar{k}}, \bar{s}_{\bar{c}}, \bar{s}_{\bar{z}} & \bar{b} &\rightarrow \bar{b}_{\bar{k}}, \bar{b}_{\bar{c}}, \bar{b}_{\bar{z}} \end{aligned}$$

**18 цветных кварков**



# Цвет

С введением цвета  $\Delta^{++}$ -резонанс, можно представить как комбинацию трех  $u$ -кварков в разных цветовых состояниях:  $\Delta^{++} = u_k u_l u_c$ . Однако, ограничиться только трехзначностью цвета кварков было нельзя. Остаётся ещё одна проблема. Если  $u_k u_l u_c$  – это единственный вариант  $\Delta^{++}$ -резонанса, то для протона можно предложить несколько вариантов, не нарушая принципа Паули:  $u_k u_l d_c$ ,  $u_k u_l d_s$ ,  $u_c u_k d_l$  и т. д. Но в природе существует только одно протонное состояние и введение нового квантового числа «цвет» не должно увеличивать число наблюдаемых состояний.

Выходом из этой ситуации явилось принятие постулата о **бесцветности** наблюдаемых квантовых состояний адронов. Бесцветность адронов означает, что кварки разного цвета представлены с равными весами. О таких бесцветных состояниях говорят как о цветовых синглетах. Они инвариантны относительно преобразований в трехмерном цветовом пространстве. Если цветовой индекс кварка принимает три значения  $\alpha = 1, 2, 3$ , преобразования имеют вид

$$q_\alpha = \sum_{\beta=1}^3 u_{\alpha\beta} q_\beta$$

при условии ортонормированности цветовых состояний

$$\sum_{\alpha=1}^3 u_{\alpha\beta} u_{\alpha\gamma}^* = \delta_{\beta\gamma},$$

(\*) означает комплексное сопряжение

В отличие от цветных кварков, адроны – всегда бесцветны.

# Цвет

Все барионы имеют волновые функции, полностью симметричные к одновременной перестановке пространственных координат, спинов и ароматов любых двух кварков. Для того чтобы быть антисимметричной в целом, полная волновая функция  $\Psi$  любого бариона должна содержать антисимметричную цветовую функцию  $\Psi_{\text{цвет}}$ . Нормированная антисимметричная цветовая волновая функция бариона имеет вид

$$\Psi_{\text{цвет}}(\text{барион}) = \frac{1}{\sqrt{6}} (kzc + zck + ckz - kcz - czk - zkc).$$

Такая цветовая функция автоматически обеспечивает выполнение принципа Паули, запрещающего существование бариона, содержащего кварки одного и того же аромата в полностью одинаковых квантовых состояниях.

# Цвет

*Ароматово-цветовая волновая функция  $\Delta^{++}$ -резонанса имеет вид*

$$\Psi_{\text{аромат-цвет}}^{\Delta^{++}} = \frac{1}{\sqrt{6}} (u_K u_3 u_C + u_3 u_C u_K + u_C u_K u_3 - u_K u_C u_3 - u_C u_3 u_K - u_3 u_K u_C). \quad (*)$$

Она антисимметрична по цвету, симметрична по пространственным координатам (орбитальные моменты кварков нулевые) и спинам ( $\uparrow\uparrow\uparrow$ ). Волновая функция  $\Delta^{++}$ -резонанса  $\Psi$  антисимметрична в целом, как и должно быть для систем, содержащих тождественные фермионы. Легко проверить выполнение принципа Паули для состояния (\*). Пусть зелёный  $u$ -кварк стал красным:  $u_3 \rightarrow u_K$ . Тогда в  $\Delta^{++}$ -резонансе имеем два красных  $u$ -кварка в одном и том же состоянии. При этом функция (\*) обращается в нуль.

*Ароматово-цветовая волновая функция протона получается заменой третьего  $u$ -кварка в каждом слагаемом на  $d$ -кварк:*

$$\Psi_{\text{аромат-цвет}}^{\text{протон}} = \frac{1}{\sqrt{6}} (u_K u_3 d_C + u_3 u_C d_K + u_C u_K d_3 - u_K u_C d_3 - u_C u_3 d_K - u_3 u_K d_C).$$

# Цвет

Поскольку адроны бесцветны, то в них цветные кварки должны быть скомпанованы в бесцветные состояния. Так как существуют адроны двух типов – мезоны и барионы, то возникает два варианта «бесцветной компановки». В первом (мезоны) цвет кварка  $\alpha$  компенсируется цветом антикварка  $\bar{\alpha}$ , т. е. ароматово-цветовая структура для всех мезонов выглядит следующим образом

$$|\text{Мезон}\rangle_{\text{аромат-цвет}} \equiv \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{\alpha=1}^3 (q_i^\alpha \bar{q}_k^{\bar{\alpha}}).$$

Вторая бесцветная компановка (барионы) получается в результате полностью антисимметричной смеси цветов. Для всех барионов реализуется ароматово-цветовая волновая функция вида

$$|\text{Барион}\rangle_{\text{аромат-цвет}} \equiv \frac{1}{\sqrt{6}} \sum_{\alpha,\beta,\gamma=1}^3 \left( \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \cdot q_i^\alpha q_k^\beta q_l^\gamma \right),$$

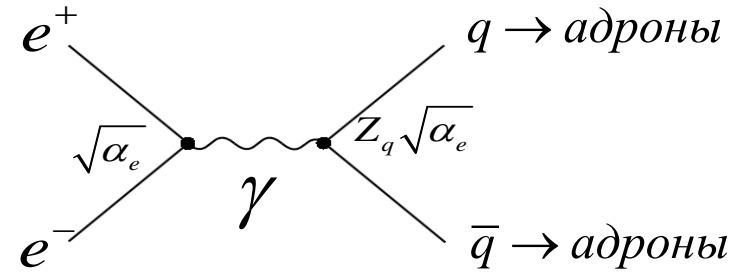
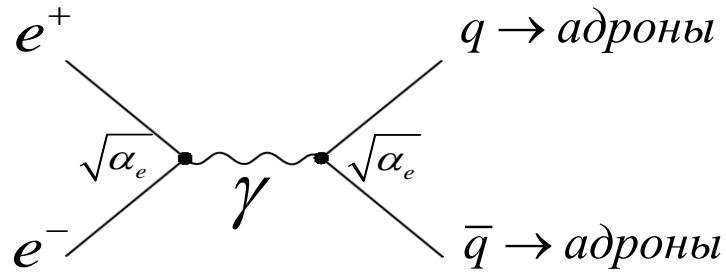
где каждый из цветовых индексов  $\alpha, \beta, \gamma$  принимает значения 1, 2, 3, а  $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma}$  – полностью антисимметричный тензор:

$$\varepsilon_{123} = \varepsilon_{231} = \varepsilon_{312} = 1, \quad \varepsilon_{213} = \varepsilon_{132} = \varepsilon_{321} = -1.$$

Числа  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  и  $\frac{1}{\sqrt{6}}$  – нормировочные множители.

# Цвет кварков

Проявление цвета кварков можно проверить, изучая энергетическую зависимость сечения  $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$ .



Так как сечение  $e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow f\bar{f}$  падает с ростом энергии сталкивающихся частиц, удобнее анализировать величину

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

Теория предсказывает  $R = \sum Q_i^2$

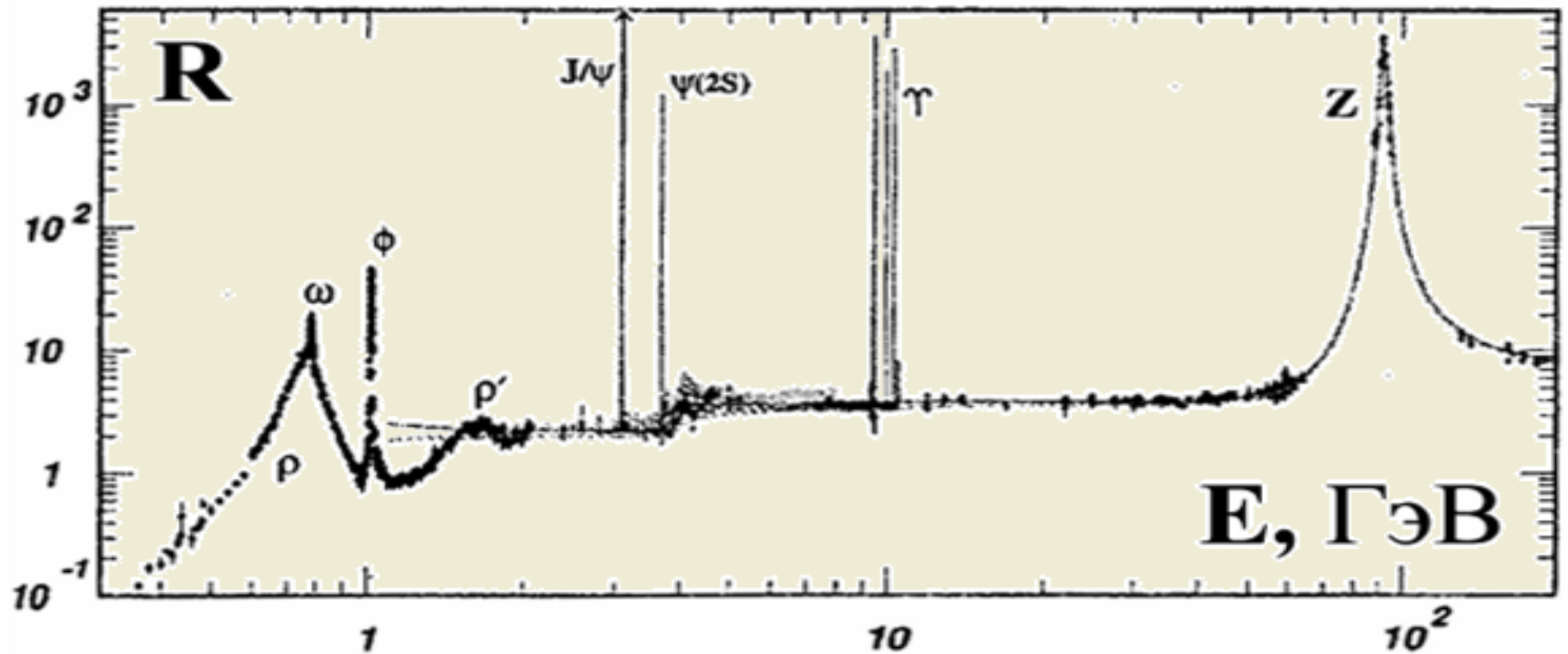
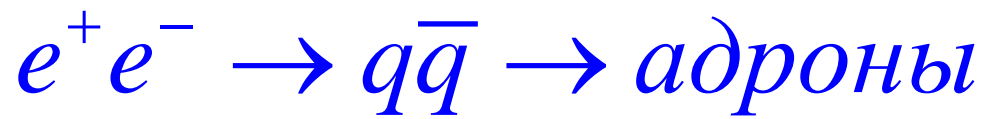
Суммируются заряды всех ароматов кварков, образующихся при данной энергии.

$$E < c\bar{c} : R_1 = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{6}{9} = \frac{2}{3}$$

$$E < b\bar{b} : R_2 = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{10}{9}$$

$$E < t\bar{t} : R_3 = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{11}{9}$$

Если кварки имеют 3 цвета, то величины  $R_1, R_2, R_3$  утраиваются. Результаты эксперимента подтверждают ожидаемые величины зарядов кварков и то, что каждый кварк имеет три цвета.



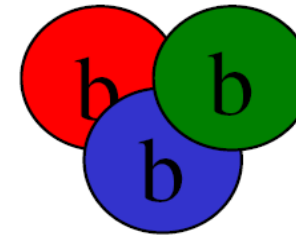
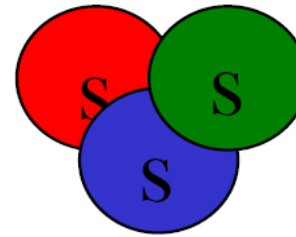
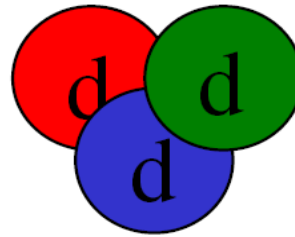
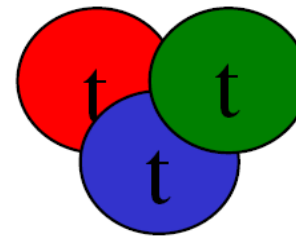
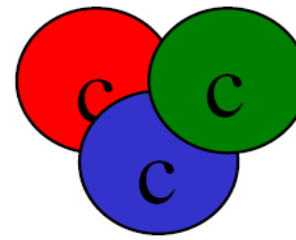
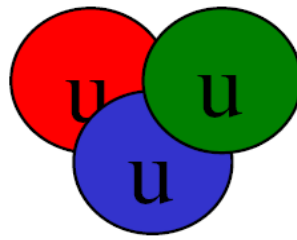
Показана зависимость сечения реакции  $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$  от суммарной энергии электрона и позитрона. Вверху указаны названия резонансов, образующихся в реакции  $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$ . Сечение реакции  $e^+ + e^- \rightarrow \text{адроны}$  нормировано на сечение реакции  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

$$R = \sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{адроны}) / \sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)$$

$$e^+ e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{адроны}$$

**В результате аннигиляции электрона и позитрона рождается виртуальный  $\gamma$ -квант, который рождает пару кварк-антикварк. Эта пара затем превращается в адроны. Вероятность рождения пары кварк-антикварк отличается от вероятности рождения пары  $\mu^+ \mu^-$  только величиной зарядов рождающихся кварков. Поэтому процесс  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$  обычно используют для нормировки сечения  $e^+ e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{адроны}$ .**

# Кварки



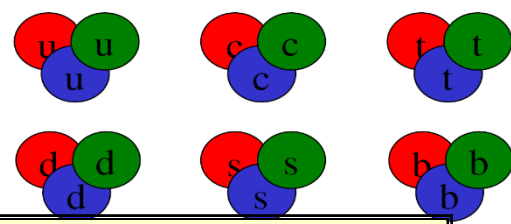
Кварки не существуют в свободном состоянии, а заключены в кварковых системах – адронах. Им нельзя освободиться от взаимодействий с находящимися в том же объеме другими кварками и глюонами.

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

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



# Кварки



| Характеристика                             | Тип кварка (аромат) |              |               |                |                |              |
|--|---------------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
|  | d                   | u            | s             | c              | b              | t            |
| Электрический заряд Q, в единицах e        | -1/3                | +2/3         | -1/3          | +2/3           | -1/3           | +2/3         |
| Барионное число B                          | 1/3                 | +1/3         | +1/3          | +1/3           | +1/3           | +1/3         |
| Спин J                                     | 1/2                 | 1/2          | 1/2           | 1/2            | 1/2            | 1/2          |
| Четность P                                 | +1                  | +1           | +1            | +1             | +1             | +1           |
| Изоспин I                                  | 1/2                 | 1/2          | 0             | 0              | 0              | 0            |
| Проекция изоспина I <sub>3</sub>           | -1/2                | +1/2         | 0             | 0              | 0              | 0            |
| Странность s                               | 0                   | 0            | -1            | 0              | 0              | 0            |
| Очарование (charm) c                       | 0                   | 0            | 0             | +1             | 0              | 0            |
| Bottom b                                   | 0                   | 0            | 0             | 0              | -1             | 0            |
| Top t                                      | 0                   | 0            | 0             | 0              | 0              | +1           |
| Масса конституэнтного кварка $m c^2$ , ГэВ | 0.33                | 0.33         | 0.51          | 1.8            | 5              | 180          |
| Масса токового кварка                      | 4–8<br>МэВ          | 1.5–4<br>МэВ | 80–130<br>МэВ | 1.1-1.4<br>ГэВ | 4.1–4.9<br>ГэВ | 174±5<br>ГэВ |

# Цвет

Взаимодействие между цветными кварками переносятся цветными глюонами. В отличие от кварков глюоны имеют цветовые характеристики – цвет + антицвет. Силы взаимодействия между кварками называют **цветными**. Кварки имеют цветные заряды и объединяются в адроны так, что получаются бесцветные комбинации. Так же как из комбинации отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных ядер получаются нейтральные атомы, так и из цветных кварков получаются бесцветные адроны. В природе допустимы только **бесцветные** состояния составных систем из кварков и глюонов. Поэтому мы не видим отдельные цветные кварки, а видим только их бесцветные комбинации в виде адронов.

# Конфайнмент

Конфайнмент — удержание цветных кварков и глюонов внутри бесцветных адронов. Согласно модели кварков все адроны состоят из кварков. Переносчиками сильного взаимодействия между кварками являются глюоны. Кварки и глюоны характеризуются квантовым числом *цвет*. Однако в природе кварки и глюоны в свободном состоянии в виде цветных объектов не обнаружены. Гипотеза конфайнмента состоит в том, что кварки и глюоны могут существовать только в связанном состоянии внутри адрона. Для того чтобы не дать возможности кваркам покинуть адрон, силы связывающие кварки в адроне должны возрасти с увеличением расстояния между кварками. В то же время известно, что между адронами не действуют такие силы, т.к. адроны существуют изолированно друг от друга.

# Конфайнмент

Структурные составляющие адрона невозможно выделить в свободном состоянии, что принципиально меняет ситуацию, которая наблюдалась в иерархической структуре материи. Молекулы можно расщепить на отдельные атомы, атомы — на ядра и электроны, ядра — на нуклоны. Поэтому, чтобы сделать определенные заключения о свойствах кварков по известным свойствам адронов, необходимы некоторые предположения относительно законов, определяющих поведение кварков. В частности, кварки должны описываться на основе тех же общих принципов, что и наблюдаемые характеристики адронов, т.е. принципов квантовой механики и специальной теории относительности. Квантовые характеристики адронов должны определяться квантовыми характеристиками кварков. Должно существовать несколько типов кварков для объяснения всей наблюдаемой совокупности адронов. Кварки должны обладать полуцелым спином, и на них должен распространяться принцип Паули.