

## Кварковая структура адронов

### 0.1. Краткий диалог

– Играли ли Вы в кубики в детстве?

*Если да, то из кубиков Вы составляли картинки с изображением домов, автомобилей и т.п.*

**Теперь Вы узнаете, как сконструировать наблюдаемые элементарные частицы из кварков так же, как из кубиков картинки.**

– Играли ли Вы в кубик Рубика?

*Если да, то Вы почти специалист в физике элементарных частиц.*

**Вы можете составить комбинацию белого цвета из цветных кварков и построить протон, пион и т.д.**

Мы предлагаем Вам интересную игру под названием «Построение элементарных частиц из кварков».

### 0.2. Аннотация

Занятие 2 знакомит читателя с основными понятиями кварковой структуры адронов.

Часть 1 «Открытие кварков» посвящена истории открытия кварков и не содержит упражнений.

Части 2-4 вводят основные понятия и свойства адронов и содержат набор упражнений. Если Вы даете неверный ответ, то компьютер возвращает Вас к началу раздела для более внимательного его изучения.

### 0.3. Полезная литература

Мы рекомендуем для чтения следующие учебники и книги.

1. Д.Перкинс. Введение в физику высоких энергий. М., «Энергоиздат», 1991.
2. Ю.М.Широков, Н.П.Юдин. Ядерная физика. М., «Наука», 1980.
3. Ш.Ли Глэшоу. Очарование физики. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002.

## 1.1. Гипотеза Гелл-Манна и Цвейга

В 1964 году американские физики Гелл-Манн и Цвейг предположили, что

все адроны (мезоны и барионы) являются сложными системами и состоят из кварков:

барион – из трех кварков:  $B = qqq$ .

мезон – из кварка и антикварка  $M = q\bar{q}$ .

Имя «кварк» Гелл-Манн взял из повести Дж.Джойса, герой которой часто повторяет мистическую фразу: «Три кварка, три кварка для мистера Марка».

Чтобы объяснить существовавшие в то время адроны, пришлось присвоить кваркам особые квантовые числа, в том числе дробный заряд в единицах заряда электрона. Три кварка  $u$ ,  $d$ , и  $s$  должны иметь следующие квантовые числа:

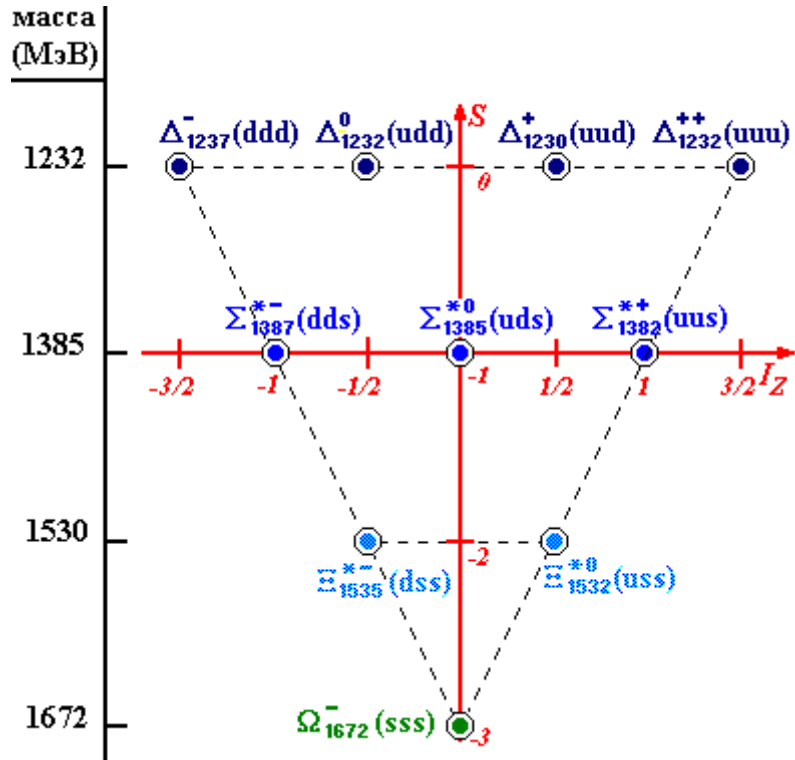
	$u$	$d$	$s$
$Q$ , доля электрического заряда ( $z/e$ )	2/3	-1/3	-1/3
$I_z$ , проекция изоспина	1/2	-1/2	0
$s$ , странность	0	0	-1
$J$ , спин	1/2	1/2	1/2

Ярким результатом правильности модели явилось предсказание  $\Omega$ -бариона с массой  $m(\Omega) = 1672$  МэВ и странностью  $s = -3$ . Частица была обнаружена в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) в том же 1964 году. Существование этой частицы явилось поводом для введения квантового числа «цвет», приписываемого каждому кварку.

Известная к тому времени группа частиц была разделена на три подгруппы с близкими массами. Отличие масс  $\Delta m$  в разных подгруппах ( $\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$ ), ( $\Sigma^{*-}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*+}$ ), ( $\Xi^{*-}, \Xi^{*0}$ ) составляло 142 МэВ. Каждая подгруппа имела свое квантовое число  $s = 0, -1, -2$  (странность), изменяющееся по мере роста масс частиц. Внутри подгрупп частицы располагались по их электрическому заряду от минуса к плюсу и нумеровались квантовым числом  $I_z = -3/2, -1/2, 0, 1/2, 3/2$  (проекция изоспина).

Итак на следующем рисунке мы видим перевернутую пирамиду.

Вершина пирамиды не была известна. Кварковая структура (на рис. в скобках) именно такова, чтобы описать квантовые числа барионов  $I_z$  и  $s$ . (Проверьте это самостоятельно, используя квантовые числа кварков.)



Неизвестная частица в вершине пирамиды с кварковой структурой ( $sss$ ) была названа  $\Omega$ -барионом. Были предсказаны его масса  $m = 1670$  МэВ, изоспин  $I = 0$  и странность  $S = -3$ . Эти свойства были подтверждены экспериментом.

### 1.1. Эксперименты, подтверждающие свойства кварков

Наиболее экзотическое свойство кварка – его дробный электрический заряд:  $Q_q = \pm e/3, \pm 2/3e$ . Эксперименты, в которых пытались найти дробный заряд частицы, оказались безуспешными. Свободные кварки не были обнаружены.

Однако имеются эксперименты, результаты которых обнаруживают некоторые свойства кварков, подтверждают кварковую структуру адронов и образование их при столкновении частиц.

Приведем результаты таких экспериментов.

1. Относительный кварковый состав мезонов и барионов. Кварковая гипотеза предсказывает отношение сечений взаимодействия пионов ( $\pi$ ) и протонов ( $p$ ) с протоном. Оно должно быть равно отношению числа кварков в пионе и протоне.

$$\frac{\sigma_{\pi p}}{\sigma_{pp}} = \frac{2}{3}.$$

Эксперимент подтверждает это предсказание:

$$\left( \frac{\sigma_{\pi p}}{\sigma_{pp}} \right)_{\text{experiment}} = \frac{27mb}{38mb} \cong \frac{2}{3}.$$

## 2. Дробность заряда кварка

Отношение вероятностей (ширин) распада для  $\rho^0$ -,  $\omega$ - и  $\varphi$ -мезонов зависит от электрических зарядов кварков в соответствии с кварковым составом мезонов:

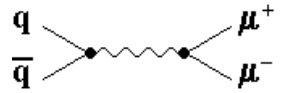
$$\Gamma(\rho^0): \Gamma(\omega): \Gamma(\varphi) = 9:1:2.$$

Экспериментальный результат

$$\Gamma(\rho^0): \Gamma(\omega): \Gamma(\varphi) = (8.8 \pm 2.6):1:(1.7 \pm 0.41)$$

подтверждает это заключение.

Рождение пары  $\mu^+\mu^-$  на ядре  $^{12}\text{C}$  пропорционально квадрату заряда антикварка в механизме Дрелла-Яна. Механизм Дрелла-Яна описывается простейшей диаграммой



Поскольку  $\pi^- = (d\bar{u})$  и  $\pi^+ = (u\bar{d})$ , то

$$\frac{\sigma(\pi^- + ^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+\mu^- + \dots)}{\sigma(\pi^+ + ^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+\mu^- + \dots)} = \frac{Q_{\bar{u}}^2}{Q_{\bar{d}}^2} = 4.$$

## 3. Рождение нового кваркового поколения

При создании кварковой модели было достаточно трех кварков:  $u$ ,  $d$  и  $s$ . Теперь известны экспериментальные доказательства существования еще трех кварков:  $c$ ,  $b$  и  $t$ .

Возможность образования адронов с кварками новых поколений появляется с ростом энергии сталкивающихся частиц, т.к. массы новых кварков больше.

Отношение сечений рождения адронов и  $\mu^+\mu^-$ -пар в  $e^+e^-$ -столкновениях равно сумме квадратов электрических зарядов  $Q_q$  кварков, которые могут родиться при заданной полной энергии  $E_{CM}$ . Эта сумма включает в себя также суммирование по цвету кварка  $\alpha = 1, 2, 3$ .

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum_{\alpha} \sum_{q} Q_q^2(\alpha).$$

Из рис. 2 мы видим, что отношение достигает значений 2, 10/3, 11/3 и 5, которые становятся возможными с генерацией новых кварков ( $u, d, s$ ),  $c, b, t$ .

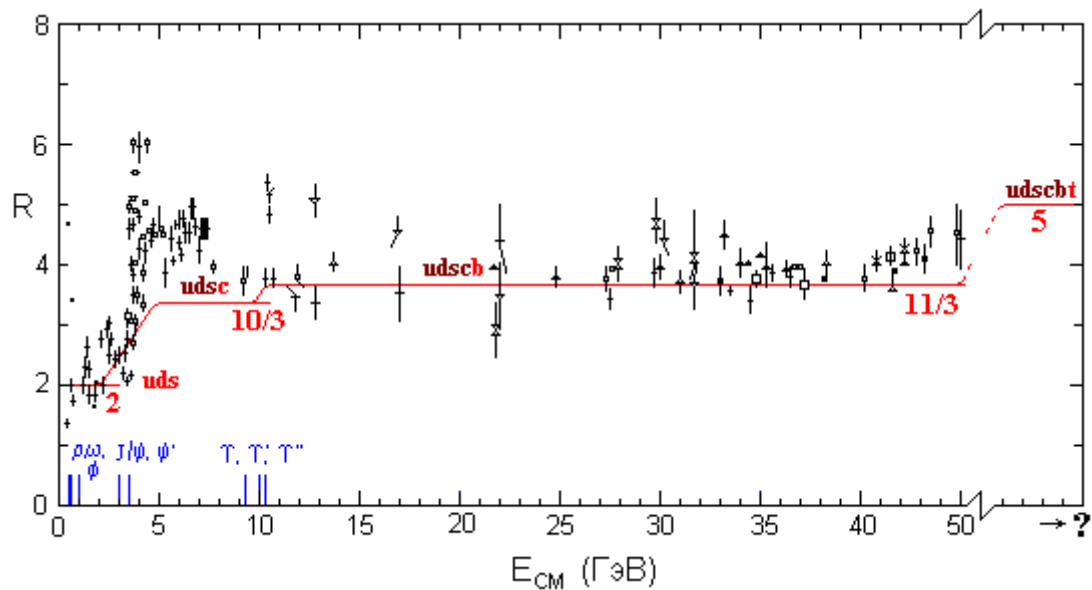


Рис. 2. Зависимость отношения  $R$  от полной энергии в системе центра масс  $E_{CM}$ . Корреляция  $R$  с новыми поколениями кварков подтверждена до рождения  $b$ -кварка. Рождение  $t$ -кварка в  $e^+e^-$  при этих энергиях не достигнуто.

#### 4. Рождение адронных струй

Адронная струя (см. рис. 3) – яркое доказательство существования кварка. Это наблюдаемая форма проявления кварка.

Редкие события рождения адронных струй наблюдались в  $e^+e^-$  и  $p\bar{p}$  столкновениях при высоких энергиях.

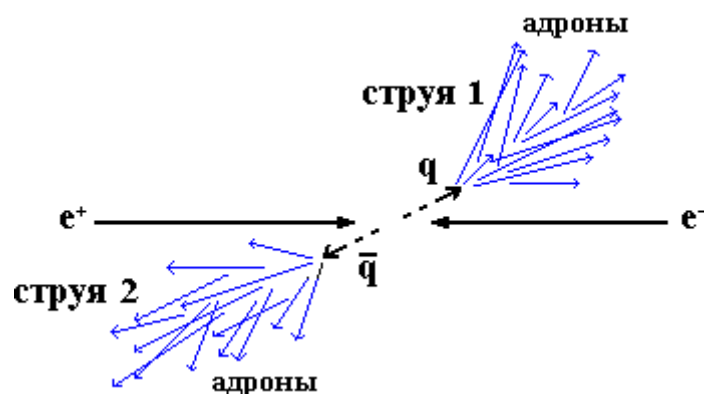


Рис. 3. Кварковые струи, состоящие из адронов.

Группировка направлений движения адронов в струе позволяет понять, что они образовались из одной частицы – кварка.

Теория предсказывает, что сначала рождается пара кварк-антикварк в противоположных направлениях, а затем адронная струя образуется вследствие адронизации кварков. Эксперименты в DESY (Германия) и SLAC (США) по рождению струй дают наиболее явное доказательство существования кварков.

### 1.3. Гипотеза ненаблюдаемости свободных кварков

Необходимость объяснения отсутствия свободных кварков привела к гипотезе невылетания кварков.

Теория сильных взаимодействий (КХД) описывает взаимодействие кварков посредством цветового глюонного поля. Это аналогично тому, как электрические заряды взаимодействуют посредством электрического поля. Ярким отличием цветового поля является рост его потенциала взаимодействия с увеличением расстояния между кварками. Как только два кварка удалятся на расстояние, где энергия цветового поля будет достаточной, чтобы образовать адронную пару, эта пара частиц образуется. При больших энергиях удаляющихся кварков могут родиться струи.

Каждый кварк имеет цветовой заряд. Но адрон имеет нейтральный заряд (белый цвет). Все адроны бесцветны.

Гипотеза ненаблюдаемости кварков:

**Невозможно наблюдать  
свободные цветные объекты микромира  
(цветовой конфайнмент).  
Можно наблюдать только бесцветные объекты – адроны.**

### 2.1. Таблица квантовых чисел кварков

Элементарные частицы (адроны) состоят из кварков  $q$  и антикварков  $\bar{q}$ . Имеется 6 видов кварков:

$$q = u, d, s, c, b, t,$$

которые отличаются ароматом. В табл. 1 представлены: ароматы кварков, их электрические заряды ( $Q$ ), проекции изоспина ( $I_Z$ ), странность ( $s$ ), очарование ( $c$ ), прелесть ( $b$ ), истинность ( $t$ ), барионные заряды ( $B$ ), гиперзаряды ( $Y$ ).

Таблица 1. Квантовые числа кварков.

Аромат	$Q$	$I_z$	$s$	$c$	$b$	$t$	$B$	$Y$
$u$ -quark, (330 МэВ)	+2/3	+1/2	0	0	0	0	1/3	1/3
$d$ -quark, (330 МэВ)	-1/3	-1/2	0	0	0	0	1/3	1/3
$s$ -quark, (500 МэВ)	-1/3	0	-1	0	0	0	1/3	-2/3
$c$ -quark, (1500 МэВ)	+2/3	0	0	+1	0	0	1/3	-2/3
$b$ -quark, (5000 МэВ)	-1/3	0	0	0	-1	0	1/3	-2/3
$t$ -quark, (174000 МэВ)	+2/3	0	0	0	0	+1	1/3	-2/3

Первые шесть столбцов представляют главные квантовые числа. Последние два – зависящие от них квантовые числа. Они вычисляются с помощью соотношений:

$$B = 2(Q - I) - (s + c + b + t);$$

$$Y = B + s - c + b - t.$$

Эти уравнения справедливы также для мезонных и барионных квантовых чисел.

Каждый кварк имеет свой собственный антикварк с противоположным знаком аддитивного квантового числа.

Кварк и антикварк имеют один и тот же спин 1/2, но противоположную четность

$$P_q = -P_{\bar{q}}.$$

Квантовые числа  $q$  и  $\bar{q}$  представлены в табл. 2.

Таблица 2. Квантовые числа кварков и антикварков.

	$Q$	$I_z$	$s$	$c$	$b$	$t$
$u$	+2/3	+1/2	0	0	0	0
$d$	-1/3	-1/2	0	0	0	0
$s$	-1/3	0	-1	0	0	0
$c$	+2/3	0	0	+1	0	0
$b$	-1/3	0	0	0	-1	0
$t$	+2/3	0	0	0	0	+1

	$Q$	$I_z$	$s$	$c$	$b$	$t$
$\bar{u}$	-2/3	-1/2	0	0	0	0
$\bar{d}$	+1/3	+1/2	0	0	0	0
$\bar{s}$	+1/3	0	+1	0	0	0
$\bar{c}$	-2/3	0	0	-1	0	0
$\bar{b}$	+1/3	0	0	0	+1	0
$\bar{t}$	-2/3	0	0	0	0	-1

## Контрольные вопросы

4. Барийонный заряд кварка?
5. Спин кварка?
6. Барийонный заряд антикварка?
7. Четность кварка?
8. Спин антикварка?
9. Четность антикварка?
10. Изоспиновая проекция  $u$ -кварка?
11. Изоспиновая проекция  $v$ -кварка?
12. Изоспиновая проекция  $s$ -,  $c$ -,  $b$ - и  $t$ -кварка?
13. Очарованность  $s$ -кварка?

## 2.2. Сложение квантовых чисел кварков

Квантовое число  $N(h)$  адрона  $h$  равно сумме квантовых чисел составляющих его кварков  $n_{q_i}$ .

Примечание:

Спин  $S$  и четность  $P$  являются исключением из этого правила.

### Примеры:

Найдем квантовые числа  $\pi^+ = (u\bar{d})$ :

Кварки	Электрический заряд $Q$	Изоспиновая проекция $I_z$	Странность
$u$	+2/3	+1/2	0
$\bar{d}$	+1/3	+1/2	0
$\pi^+$	+1	+1	0

Найдем квантовые числа  $K^- = (s\bar{u})$ :

Кварки	Электрический заряд $Q$	Изоспиновая проекция $I_z$	Странность
$s$	-1/3	0	-1
$\bar{u}$	-2/3	-1/2	0
$K^-$	-1	-1/2	-1

Найдем квантовые числа  $\Delta^0 = (udd)$ :

Кварки	Электрический заряд $Q$	Изоспиновая проекция $I_z$	Странность
$u$	+2/3	+1/2	0
$d$	-1/3	-1/2	0
$d$	-1/3	-1/2	0
$\Delta^0$	0	-1/2	0

### Контрольные вопросы

Определите квантовые числа следующих адронов

согласно их кварковому составу:

$$K^+ = (u\bar{s}), \quad n = (udd), \quad \Omega^- = (sss), \quad Y = (b\bar{b}),$$

$$\pi^- = (d\bar{u}), \quad p = (uud), \quad \bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d}).$$

### 3.1. Квантовые числа адронов

Адроны являются сильно взаимодействующими частицами. Адроны с электрическим зарядом взаимодействуют также электромагнитным образом. Все адроны можно разделить на два класса: мезоны и барионы.

	Кварковая структура	Барионный заряд $B$	Спин $S$
Мезоны	$M = (q_i, \bar{q}_j)$	0	0, 1, 2, ... (Бозоны)
Барионы	$B = (q_i, q_j, q_k)$	+1, -1	1/2, 3/2, ... (Фермионы)

#### Примеры:

$$\text{Пион: } \pi^- (140 \text{ МэВ}) = (d\bar{u}) \quad B_{\pi^-} = 0, \quad J_{\pi^-} = 0$$

$$\text{Протон: } p (938 \text{ МэВ}) = (uud) \quad B_p = 1, \quad J_p = 1/2$$

Общепринятым обозначением адрона является формула

$$h^Q(m)I(J^P),$$

где  $h$  – название адрона,  $m$  – масса в МэВ/ $c^2$ ,  $Q$  – электрический заряд в единицах заряда электрона,  $I$  – изоспин,  $J$  – спин,  $P$  – четность.

**Примеры:**

$\pi^-$  (140 МэВ) $1(0^-)$ ;  
 $p$  (938 МэВ) $1/2(1/2^+)$ .

(См. табл. 2.)

**Контрольные вопросы**

Определите кварковую структуру следующих мезонов и барионов:

Частица	$B$	$Q$	$s$
$\Delta^{++}$ (1232)	1	2	0
$K^0$ (498)	0	0	1
$\pi^-$ (140)	0	-1	0
$\Omega^-$ (1672)	1	-1	-3
$p$ (938)	1	1	0
$\pi^+$ (140)	0	1	0

**3.2. Мезоны из  $u$ ,  $d$  и  $s$  кварков**

Неаддитивными квантовыми числами адронов являются его спин  $\vec{J}$ , изоспин  $\vec{I}$  и четность  $P$ .

$\vec{J}$  – Спин

Спин адрона определяется векторной суммой

$$\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}.$$

Здесь  $\vec{S}$  - векторная сумма спинов кварков

Для мезонов  $M = (q_1\bar{q}_2)$ .

$$\begin{array}{cc} \uparrow q_1 & \uparrow \bar{q}_2 \\ \uparrow q_1 & \downarrow \bar{q}_2 \end{array}$$

$$S = 1/2 + 1/2 = \boxed{1} \quad S = 1/2 - 1/2 = \boxed{0}$$

Для барионов  $B = (q_1 q_2 q_3)$ .

$$\begin{array}{ccc} \uparrow q_1 & \uparrow q_2 & \uparrow q_3 \\ \uparrow q_1 & \uparrow q_2 & \downarrow q_3 \end{array}$$

$$S = 1/2 + 1/2 + 1/2 = \boxed{3/2} \quad S = 1/2 + 1/2 - 1/2 = \boxed{1/2}$$

$\vec{L}$  – орбитальный угловой момент.

Для адронов с наименьшими массами  $L = 0$ . В этой лекции мы будем рассматривать только состояния с  $L = 0$ .

$P$  – четность

Четность вычисляется по следующим формулам:

$$P_M = \pi_{q_1} \pi_{q_2} (-1)^L = (-1)^{L+1} = \begin{cases} +1, & L = \text{even} \\ -1, & L = \text{odd} \end{cases}$$

$$P_B = \pi_{q_1} \pi_{q_2} \pi_{q_3} (-1)^L = \begin{cases} -1^L, & \text{for } B \\ -1^{L+1}, & \text{for } \bar{B} \end{cases}$$

$\vec{I}$  – изоспин адрона,  $I_Z$  – проекция изоспина

Изоспин определяется формулами

$$\begin{aligned} \vec{I} &= \sum_i \vec{I}_{q_i} \\ I_Z &= \sum_i (I_Z)_{q_i} \\ |I| &\leq I \end{aligned}$$

Напомним:

1. Только  $u$  и  $d$  кварки имеют изоспин.
2.  $q$  и  $\bar{q}$  имеют противоположные направления вектора изоспина.

Поэтому:

Изоспин мезонов  $\vec{I}_M = 0$ .

Изоспин барионов  $\vec{I}_B = 0, 1/2, 3/2$ .

Теперь можно построить схему мезонных нонетов с  $L = 0$  (см. следующее упр.).

Псевдоскалярный нонет соответствует  $J^P = 0^-$ , когда спины  $q$  и  $\bar{q}$  антипараллельны и .

Нонет векторных мезонов соответствует  $J^P = 1^-$ , когда спины  $q$  и  $\bar{q}$  параллельны и .

### Упражнение

Последовательно отвечая на следующие вопросы, построить мезонные нонеты.

1. Какова кварковая структура  $\pi^+$  и  $\rho^+$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
2. Какова кварковая структура  $K^+$  и  $K^{*+}$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
3. Какова кварковая структура  $K^0$  и  $K^{*0}$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
4. Какова кварковая структура  $\pi^-$  и  $\rho^-$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
5. Какова кварковая структура  $K^-$  и  $K^{*-}$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
6. Какова кварковая структура  $\bar{K}^0$  и  $\bar{K}^{*0}$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»
7. Какова кварковая структура  $\eta$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$ ,  $\rho^0$  и  $\phi$  мезонов, представленных на рис. со знаком «?»»



Подсказки для упражнения

1. Определите  $I_z$  и  $S$  мезонов в соответствии с их расположением по осям  $I_z$  и  $S$  на рисунке и запомните или запишите их.
2. Используйте табл. 3 «Квантовые числа кварков и антикварков».
3. Выберите такие  $q$  и  $\bar{q}$ , чтобы сумма их квантовых чисел была равна  $(I_z)_M$  и  $S_M$ .
4. Выберите эту комбинацию ( $q\bar{q}$ ) из списка.

Сравните вычисленные Вами значения  $Q_M$ ,  $(I_z)_M$  и  $S_M$  со значениями в следующей таблице.

	$Q$	$I_z$	$S$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$\bar{u}$	$-2/3$	$-1/2$	$0$
<b>Мезон</b>	$-1$	$-1$	$0$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$\bar{s}$	$1/3$	$0$	$1$
<b>Мезон</b>	$1$	$1/2$	$1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$\bar{d}$	$1/3$	$1/2$	$0$
<b>Мезон</b>	$0$	$1/2$	$-1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$\bar{s}$	$1/3$	$0$	$1$
<b>Мезон</b>	$0$	$-1/2$	$1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$\bar{u}$	$-2/3$	$-1/2$	$0$
<b>Мезон</b>	$-1$	$-1/2$	$-1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$\bar{d}$	$1/3$	$1/2$	$0$
<b>Мезон</b>	$1$	$1$	$0$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u(d, s)$	$2/3 (-1/3, -1/3)$	$1/2 (-1/2, 0)$	$0 (0, -1)$
$\bar{u}(\bar{d}, \bar{s})$	$-2/3 (1/3, 1/3)$	$-1/2 (1/2, 0)$	$0 (0, 1)$
<b>Мезон</b>	$0 (0, 0)$	$0 (0, 0)$	$0 (0, 0)$

### 3.3. Барионы из $u$ , $d$ и $s$ кварков

Барионы состоят из трех любых кварков, т.е.  $B = (q_1 q_2 q_3)$ :

$$\begin{array}{ccc}
 \uparrow q_1 & \uparrow q_2 & \uparrow q_3 \\
 \mathbf{S} = 1/2 + 1/2 + 1/2 = \mathbf{3/2} & & \uparrow q_1 & \uparrow q_2 & \downarrow q_3 \\
 \mathbf{S} = 1/2 + 1/2 - 1/2 = \mathbf{1/2}
 \end{array}$$

Спин бариона  $\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}$ , поэтому он равен  $1/2, 3/2, \dots$  и т.д.

Изоспин бариона  $I = 1/2, 3/2, \dots$

Четность бариона вычисляется следующим образом:

$$P_B = \pi_{q_1} \pi_{q_2} \pi_{q_3} (-1)^L = \begin{cases} -1^L, & \text{for } B \\ -1^{L+1}, & \text{for } \bar{B} \end{cases}$$

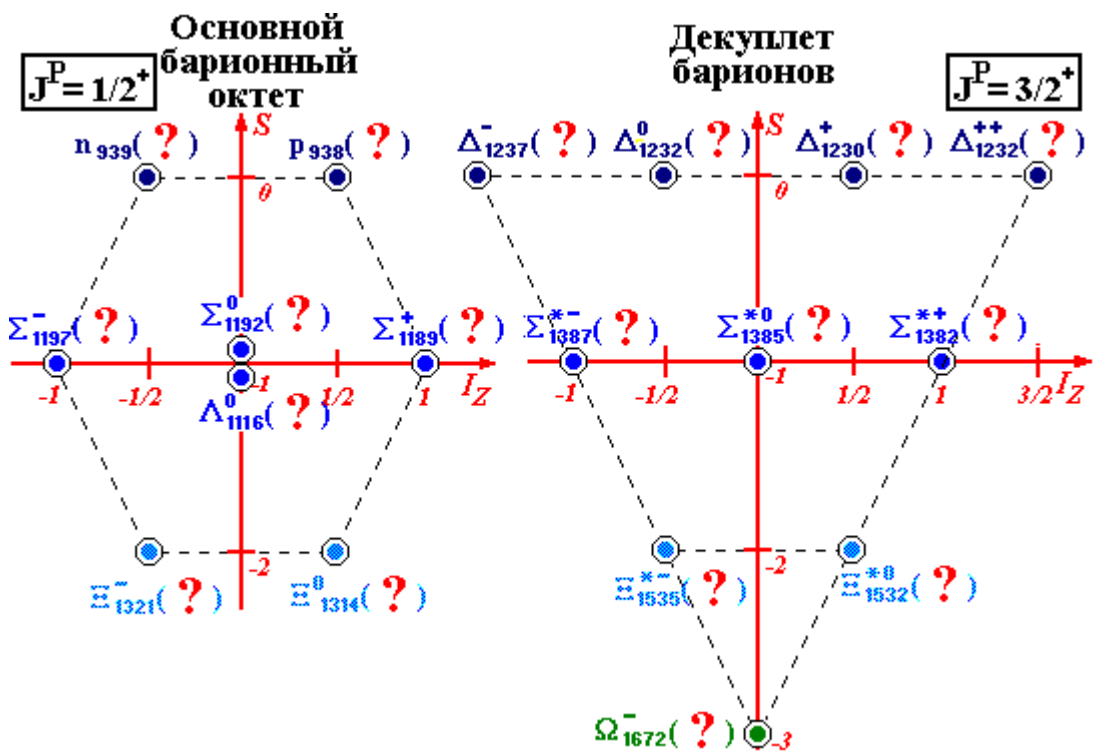
Теперь мы можем построить схему октета ( $\vec{J}_B = 1/2$ ) и декуплета ( $\vec{J}_B = 3/2$ ) с  $L = 0$  в следующем компьютерном упражнении.

Октет соответствует сумме спинов кварков  $\vec{S} = 1/2$ , декуплет –  $\vec{S} = 3/2$ .

### **Упражнение**

Последовательно отвечая на следующие вопросы, построить барионные октет и декуплет.

1. Какова кварковая структура барионов  $p$  и  $\Delta^+$ , представленных на рис. со знаком «?»»
2. Какова кварковая структура барионов  $n$  и  $\Delta^0$ , представленных на рис. со знаком «?»»
3. Какова кварковая структура бариона  $\Delta^{++}$ , представленного на рис. со знаком «?»»
4. Какова кварковая структура бариона  $\Delta^-$ , представленного на рис. со знаком «?»»
5. Какова кварковая структура барионов  $\Sigma^+$  и  $\Sigma^{*+}$ , представленных на рис. со знаком «?»»
6. Какова кварковая структура барионов  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^0$  и  $\Sigma^{*0}$ , представленных на рис. со знаком «?»»
7. Какова кварковая структура барионов  $\Sigma^-$  и  $\Sigma^{*-}$ , представленных на рис. со знаком «?»»
8. Какова кварковая структура барионов  $\Xi^0$  и  $\Xi^{*0}$ , представленных на рис. со знаком «?»»
9. Какова кварковая структура барионов  $\Xi^-$  и  $\Xi^{*-}$ , представленных на рис. со знаком «?»»
10. Какова кварковая структура бариона  $p$  и  $\Omega^-$ , представленного на рис. со знаком «?»»



Подсказки для упражнения

1. Определите  $I_Z$  и  $S$  барионов в соответствии с их расположением по осям  $I_Z$  и  $S$  на рисунке и запомните или запишите их.
2. Используйте табл. 3 «Квантовые числа кварков и антикварков».
3. Выберите такие  $q_1, q_2$  и  $q_3$ , чтобы сумма их квантовых чисел была равна  $(I_Z)_B$  и  $S_B$ .
4. Выберите эту комбинацию ( $q_1, q_2$  и  $q_3$ ) из списка.

Сравните вычисленные Вами значения  $Q_B, (I_Z)_B$  и  $S_B$  со значениями в следующей таблице.

	$Q$	$I_z$	$S$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$-1$	$0$	$-3$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$0$	$0$	$-1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$0$	$1/2$	$-2$

	$Q$	$I_z$	$S$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
<b>Барион</b>	$-1$	$-3/2$	$0$

	$Q$	$I_z$	$S$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$-1$	$-1/2$	$-2$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
<b>Барион</b>	$1$	$-1/2$	$0$

	$Q$	$I_z$	$S$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$-1$	$-1$	$-1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$d$	$-1/3$	$-1/2$	$0$
<b>Барион</b>	$1$	$1/2$	$0$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$s$	$-1/3$	$0$	$-1$
<b>Барион</b>	$1$	$1$	$-1$

	$Q$	$I_z$	$S$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
$u$	$2/3$	$1/2$	$0$
<b>Барион</b>	$2$	$3/2$	$0$

#### 4.1. Цветные кварки

В дополнение к электрическому заряду кварки имеют цветовой заряд – дополнительное аддитивное квантовое число.

Кварк данного аромата может существовать в трех цветовых состояниях:

$$\begin{array}{ll}
 \text{красный (к)} & u_k, d_k, s_k, c_k, b_k, t_k \\
 \text{синий (с)} & u_c, d_c, s_c, c_c, b_c, t_c \\
 \text{зеленый (з)} & u_z, d_z, s_z, c_z, b_z, t_z
 \end{array}$$

Антикварк имеет антицвет:

$$\begin{array}{ll}
 \text{антикрасный (ак)} & \bar{u}_{ак}, \bar{d}_{ак}, \bar{s}_{ак}, \bar{c}_{ак}, \bar{b}_{ак}, \bar{t}_{ак} \\
 \text{антисиний (ас)} & \bar{u}_{ас}, \bar{d}_{ас}, \bar{s}_{ас}, \bar{c}_{ас}, \bar{b}_{ас}, \bar{t}_{ас} \\
 \text{антизеленый (аз)} & \bar{u}_{аз}, \bar{d}_{аз}, \bar{s}_{аз}, \bar{c}_{аз}, \bar{b}_{аз}, \bar{t}_{аз}
 \end{array}$$

Адроны не имеют цвета, поэтому цвета составляющих их кварков и антикварков должны погашать друг друга. Белым цветом считается сочетание ( $k-ak$ ), ( $c-ac$ ), ( $z-az$ ) и ( $k,c,z$ ), ( $ак, ас, аз$ ). Таким образом, адроны существуют в цвето-синглетном состоянии.

Например:

$$\pi^+ = (u_K \bar{d}_{AK})(u_3 \bar{d}_{A3})$$

$$K^0 = (d_C \bar{s}_{AC})$$

$$p = (u_K u_3 d_C)$$

$$\Delta^{++} = (u_K u_3 u_C)$$

$$\bar{n} = (\bar{u}_{AK} \bar{d}_{A3} \bar{d}_{AC})$$

Сильные взаимодействия между кварками передаются глюонами, имеющими спин  $S = 1$  и массу  $m_g = 0$ .

Глюоны также являются цветными объектами. Существует 8 различных цветовых состояний.

### Цветовые состояния

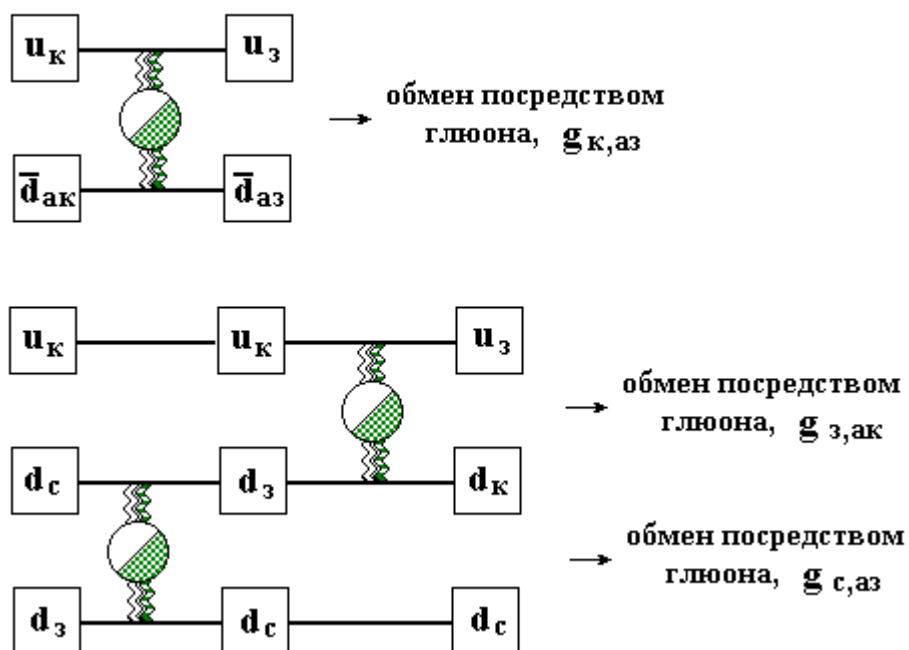
$\frac{1}{\sqrt{6}}(\mathbf{g}_{c,ac} + \mathbf{g}_{z,az} - 2\mathbf{g}_{k,ak})$	$\mathbf{g}_{k,ac}$	$\mathbf{g}_{k,az}$
$\mathbf{g}_{c,ak}$		$\mathbf{g}_{c,az}$
$\mathbf{g}_{z,ak}$	$\mathbf{g}_{z,ac}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{g}_{c,ac} - \mathbf{g}_{z,az})$

Взаимодействие между двумя цветовыми кварками осуществляется при помощи обмена глюоном. Выполняются следующие правила при обмене глюонами:

1. Цвет кварка может быть изменен или остается прежним.
2. Сумма цветов кварков не изменяется после обмена глюоном.

Из-за цветового заряда глюоны взаимодействуют между собой. Это объясняет тот факт, что кварк-кварковое взаимодействие становится малым на малых расстояниях (см. 1.3 «Асимптотическая свобода»). Особое свойство цветового взаимодействия – рост потенциальной энергии с увеличением расстояния между кварками – объясняет другое свойство сильных взаимодействий: кварковый конфайнмент.

### Примеры:



### Упражнение 1

Найти сумму квадратов зарядов кварков  $R$  с учетом цвета.

Для  $(u + d + s)$

Для  $(u + d + s + c + b + t)$

Для  $(u + d + s + c)$

Для  $(u + d + s + c + b)$

Подсказка:

Для решения этого упр. см. 2.3 «Рождение нового кваркового поколения»

### Упражнение 2

Выбрать из предложенных вариантов (среди них есть и несуществующие) правильную комбинацию кварков с учетом цвета кварков для следующих адронов:

$$\pi^+, \Sigma^+, \bar{K}^0, \Omega^-, p, \rho^0$$

$s_C \bar{u}_{AC}$	$u_K \bar{d}_{A3}$	$u_3 u_3 s_C$
$s_K s_K \bar{s}_{AK}$	$u_K u_3 d_K$	$s_K \bar{d}_{AK}$
$u_3 \bar{d}_{A3}$	$d_C \bar{d}_{AC}$	$u_3 u_3 d_3$
$\bar{s}_{AC} \bar{s}_{AC} \bar{s}_{AC}$	$s_C \bar{s}_{AC}$	$d_3 \bar{u}_{A3}$
$\bar{u}_{AK} u_3 \bar{s}_{AC}$	$\bar{u}_{AC} \bar{u}_{A3} \bar{d}_{AK}$	$u_K \bar{s}_{AK}$
$u_C u_3 d_K$	$d_3 d_K d_C$	$s_K s_3 s_3$
$u_K \bar{u}_{AK}$	$s_3 s_K s_C$	$u_K u_3 u_C$

#### 4.2. Поле цветового заряда

Все кварки окружены полем цветового заряда. Оно – источник сильного взаимодействия кварков. Взаимодействие между кварками осуществляется путем обмена глюоном.

Рассмотрим аналогию между электромагнитным и сильным взаимодействием.

Электромагнитное взаимодействие	Сильное взаимодействие
Источник: электрический заряд (отталкивание и притяжение)	Источник: цветовой заряд (только притяжение)
Обмен посредством фотона ( $\gamma$ ) (электрически нейтральный)	Обмен посредством глюона ( $g$ ) (имеет цветовой заряд)
Теория: Квантовая электродинамика	Теория: Квантовая хромодинамика
	

Главные свойства сильного взаимодействия:

1. Удержание цвета (конфайнмент)

Мы не можем увидеть свободный цветной кварк. Все частицы (адроны) имеют белый цвет.

2. Асимптотическая свобода

На малых расстояниях ( $r < 0.51$  фм) взаимодействие между кварками ослабевает. Поведение кварков становится поведением почти свободных частиц.

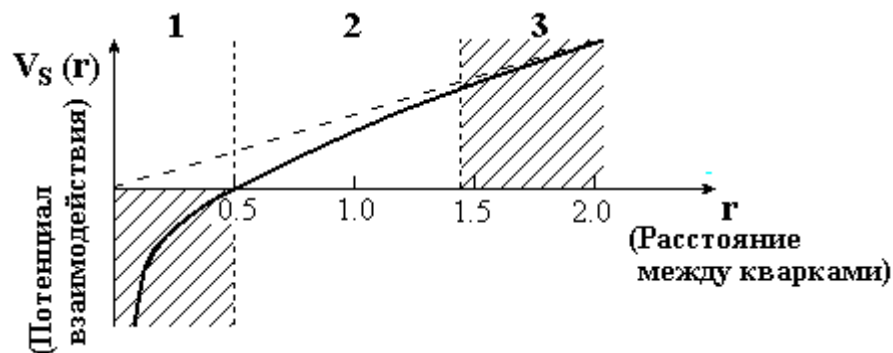
Сильное взаимодействие имеет отличительную особенность – зависимость от расстояния  $r$  между кварками

$$V_S(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_S(r)}{r} + \lambda \cdot r.$$

В области взаимодействия кварков  $r \approx r_p$  ( $r_p$  – радиус протона,  $r_p \approx 1$  фм) потенциал взаимодействия растет с ростом  $r$  как  $\sim \lambda r$ . Это приводит к удержанию кварков в объеме радиуса  $R_c = \hbar c / \Lambda_c$ , где

$$\Lambda_c = 0.2 \div 0.3 \text{ ГэВ}$$

– типичная шкала энергии для сильных взаимодействий.



При малых расстояниях  $r \ll r_p$  взаимодействие между кварками аналогично кулоновскому взаимодействию (всегда притягивающему), но константа взаимодействия

$$\alpha_S \approx \frac{1}{\lg\left(\frac{\hbar c}{\Lambda_c r}\right)}$$

стремится к нулю. Сила между кварками становится бесконечно малой. Поэтому кварки в адронах ведут себя как свободные частицы.

### **Упражнение**

Укажите область взаимодействия между кварками, соответствующую следующим его свойствам:

1. Конфайнмент

$$r < 0.1 \text{ фм?} \quad r \approx 1 \text{ фм?}$$

2. Асимптотическая свобода

$$r < 0.1 \text{ фм?} \quad 0.1 < r < 1 \text{ фм?}$$

---

### **Примечание:**

**На экране компьютера используются различные цвета, что создает дополнительную наглядность изображения. Это особенно важно для последних частей занятия.**

**В черно-белом варианте текста, к сожалению, невозможно добиться такой наглядности.**