

## СЕМИНАР 6

1. Для распада  $\Delta^+ \rightarrow p + \gamma$  из покоящегося состояния найти относительный орбитальный момент  $L$ , с которыми двигаются после распада протон и фотон? Нарисовать диаграмму распада.

Решение: Используем законы сохранения момента количества движения (углового момента) и чётности. Сохранение углового момента обеспечивается векторным равенством:

$$\vec{J}_\Delta = \vec{J}_p + \vec{J}_\gamma + \vec{L}, \text{ т.е. } \frac{3}{2} = \frac{1}{2} + 1 + \vec{L}.$$

Здесь  $\frac{3}{2}$  – спин  $\Delta^+$ ,  $\frac{1}{2}$  – спин протона, 1 – спин фотона.

Из вышеприведённого векторного равенства следует, что для минимально возможного значения  $L$  имеем

$$L_{min} = J_\Delta - J_p - J_\gamma = \frac{3}{2} - \frac{1}{2} - 1 = 0.$$

Для максимально возможного значения  $L$  получаем

$$L_{max} = J_\Delta + J_p + J_\gamma = \frac{3}{2} + \frac{1}{2} + 1 = 3.$$

Итак, все возможные значения  $L$  лежат в следующих границах:

$$0 \leq L \leq 3$$

или  $L = 0, 1, 2, 3$ .

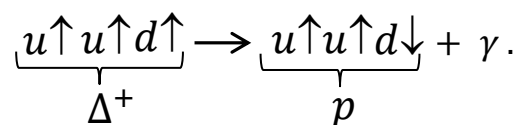
Переходим к определению чётности.

Так как распад электромагнитный, то выполняется закон сохранения чётности:

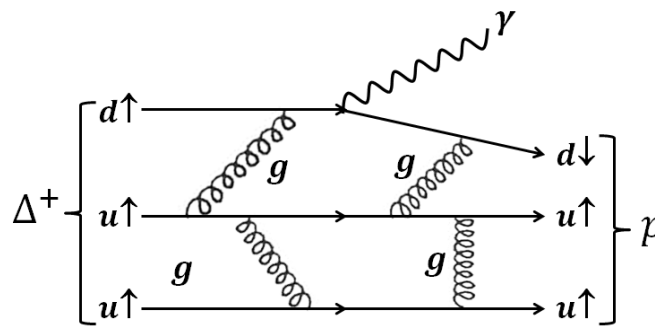
$$\pi_\Delta = \pi_p \cdot \pi_\gamma \cdot (-1)^L, \text{ т.е. } +1 = (+1) \cdot (-1) \cdot (-1)^L.$$

Обоим законам сохранения (углового момента и чётности) удовлетворят только  $L = 1, 3$ .

На кварковом уровне рассматриваемая реакция может быть изображена следующим образом, где стрелки указывают направление спинов кварков



Простейшая диаграмма процесса ( $g$  – глюон) выглядит так:



На месте глюона может быть фотон или квант слабого поля  $Z$ .

2. Нарисовать кварковую диаграмму распада  $\Delta^{++}$ -резонанса. Какое взаимодействие ответственно за распад?

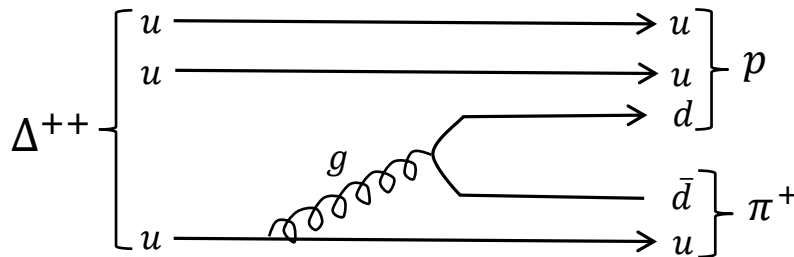
Решение:  $\Delta^{++}$ -резонанс распадается следующим образом:



Для определения типа взаимодействия оценим время жизни  $\Delta$ -резонансов по их табличной ширине распадов ( $\Gamma=114 \div 120$  МэВ):

$$\tau_{\Delta} = \frac{\hbar}{\Gamma_{\Delta}} = \frac{\hbar c}{\Gamma_{\Delta} c} = \frac{197 \text{ МэВ} \cdot 10^{-13} \text{ см}}{(114 \div 120) \text{ МэВ} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}} \approx 0,6 \cdot 10^{-23} \text{ сек.}$$

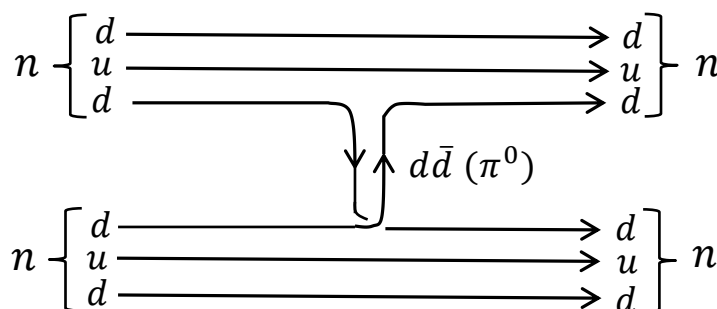
Очевидно взаимодействие, ответственное за распад  $\Delta$ -резонанса, – сильное. Диаграмма распада имеет следующий вид. Показан глюон, родивший пару кварк-антикварк (глюоны на кварковых диаграммах обычно не показывают):



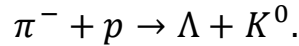
3. Нарисовать кварковые диаграммы распада  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$  и  $\Delta^-$ -резонансов (решается самостоятельно).

4. Нарисовать кварковую диаграмму  $nn$ -взаимодействия.

Решение:

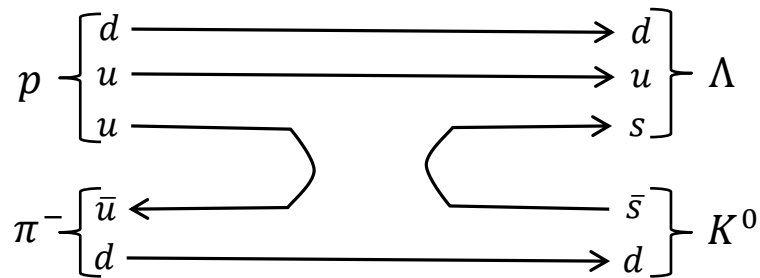


5. Нарисовать диаграммы  $pp$ - и  $np$ -взаимодействий (решается самостоятельно).
6. Проверить выполнение законов сохранения и построить кварковую диаграмму реакции

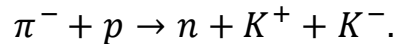


Какое взаимодействие ответственно за этот процесс?

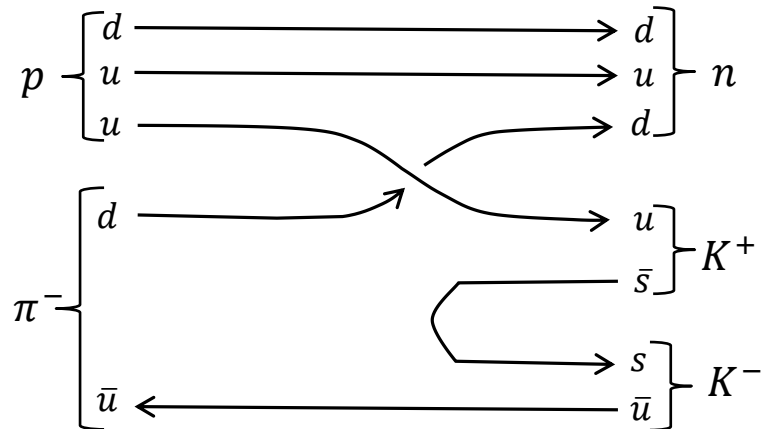
Решение:  $p = uud$ ,  $\pi^- = d\bar{u}$ ,  $\Lambda = uds$ ,  $K^0 = d\bar{s}$ . Если число кварков одного аромата слева (до реакции) равно числу кварков этого же аромата справа (после реакции), то выполняются все законы сохранения и реакция идёт за счёт сильного взаимодействия. В данном случае это так. Приведём вариант диаграммы:



7. Проверить выполнение законов сохранения и построить кварковую диаграмму реакции

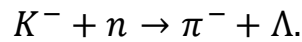
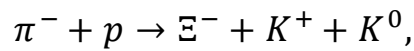
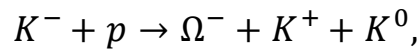


Решение:  $\pi^- = d\bar{u}$ ,  $p = uud$ ,  $n = udd$ ,  $K^+ = u\bar{s}$ ,  $K^- = \bar{u}s$ . Все ароматы в реакции сохраняются. Поэтому реакция идёт за счёт сильного взаимодействия. Кварковая диаграмма имеет вид



Петлю  $s\bar{s}$  могут дать также электромагнитное ( $\gamma$ ) и слабое и ( $Z$ ) взаимодействие. Но успевают произойти сильные.

8. Проверить выполнение законов сохранения и построить кварковые диаграммы следующих реакций (решается самостоятельно)



9. Что представляет собой распад  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  с точки зрения кварковой структуры? Нарисовать диаграмму распада. Какое взаимодействие ответственно за распад?

Решение:

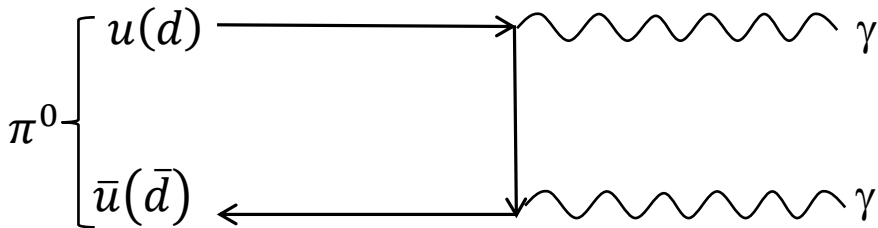
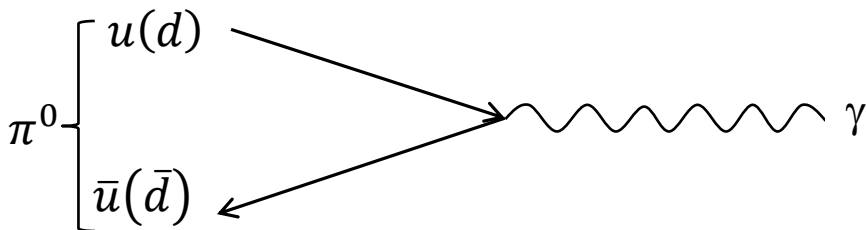


Диаграмма с одним фотоном, т.е. диаграмма с одним узлом



запрещена законами сохранения энергии и импульса. Действительно, рассмотрим эквивалентный процесс с электроном и позитроном вместо кварка и антикварка:  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$ . Для него можем записать систему уравнений

$$\begin{cases} 2m_e c^2 + T_- + T_+ = E_\gamma, \\ \vec{p}_- + \vec{p}_+ = \vec{p}_\gamma, \end{cases}$$

где  $T_-$ ,  $T_+$  — кинетические энергии электрона и позитрона,  $\vec{p}_-$ ,  $\vec{p}_+$  — их импульсы, а  $E_\gamma$  и  $\vec{p}_\gamma$  — энергия и импульс фотона. Пользуясь равноправием всех инерциальных систем отсчёта, выберем систему, где суммарный импульс электрона и позитрона нулевой. Нулевым будет в

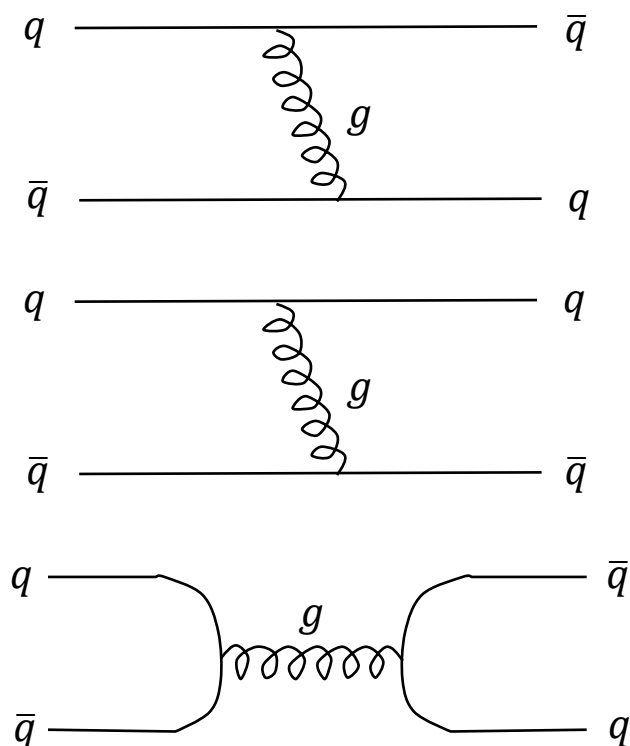
этой системе и импульс единственного конечного фотона. Такой фотон будет иметь и нулевую энергию (так как для фотона существует связь  $E_\gamma = p_\gamma c$ ). В этом случае невозможно сохранение энергии:  $2m_e c^2 + T_- + T_+ \neq 0$ . Т.е. рассматриваемый случай невозможен. Как минимум необходимо появление в конечном состоянии 2-х фотонов (возможно появление 3-х, 4-х и большего числа фотонов). Процесс с двумя фотонами в конечном состоянии наиболее вероятен.

10. Нарисовать основные диаграммы Фейнмана для следующих процессов:

- Рассеяние электрона на электроне.
- Эффект Комптона.
- Электрон-позитронная аннигиляция.
- Фотоэффект в кулоновском поле ядра.
- Образование электрон-позитронной пары в кулоновском поле ядра.

Решение: см. книгу Гончаровой, Ишханова, Капитонова «Частицы и атомные ядра. Задачи с решениями и комментариями». сс. 214-215, задача 2.5.4.

11. Какая из диаграмм взаимодействия кварка ( $q$ ) и антикварка ( $\bar{q}$ ) возможна? Для возможных диаграмм укажите цветовой тип глюона – какой он, – с явным или скрытым цветом? (Решать после Лекции 7).



Решение: Первая диаграмма невозможна, так как в узлах не сохраняются электрический ( $Q$ ) и барионный ( $B$ ) заряды, а также прочие кварковые квантовые числа ( $I_3, S, C, B, T$ ). Две другие диаграммы возможны. Для средней диаграммы подходит только глюон со скрытым цветом. Для нижней диаграммы возможен любой цветовой тип глюона.

12. Построить из кварков протон и нейтрон.

Решение: Это барионы, т. е. состоят из трёх кварков. Из аддитивных квантовых чисел они (помимо барионного заряда  $+1$ ) наделены лишь электрическим зарядом ( $+1e$  или  $0$ ) и проекцией изоспина. То-есть в их состав могут входить только кварки  $u$  и  $d$ . Зная электрические заряды этих кварков и заряды нуклонов, можно составить уравнения из числа  $u$ -кварков ( $x$ ) и  $d$ -кварков ( $y$ ). Для протона эти уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} x \cdot \left(+\frac{2}{3}\right) + y \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) = 1, \\ x + y = 3. \end{cases}$$

Отсюда получаем кварковый состав протона  $p = uud$ . Аналогично для нейтрона будет получен кварковый состав  $n = udd$ .