

Новости о пентакварках с тяжелыми кварками

М. Эйдес + М.Поляков+V.P.

Семинар ОФВЭ-ОТФ

30 мая 2019 г



Эксперименты LHCb

- In 2015 LHCb discovered 2 **exotic pentaquarks**:

$$\begin{aligned} M_1 &= 4380 \pm 37 \text{ MeV}, & \Gamma &= 205 \pm 104 \text{ MeV} \\ M_1 &= 4450 \pm 5 \text{ MeV}, & \Gamma &= 39 \pm 24 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- Spin-parity ($\frac{3}{2}^-, \frac{5}{2}^+$) but it could be ($\frac{5}{2}^+, \frac{3}{2}^-$).
- Новые измерения говорят, что

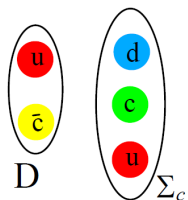
| State | M [MeV] | Γ [MeV] | (95% CL) | а) Спин - четности могут быть любые |
|---------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|---|
| $P_c(4312)^+$ | $4311.9 \pm 0.7_{-0.6}^{+6.8}$ | $9.8 \pm 2.7_{-4.5}^{+3.7}$ | (< 27) | б) Статус $P_c(4380)$ неопределенный |
| $P_c(4440)^+$ | $4440.3 \pm 1.3_{-4.7}^{+4.1}$ | $20.6 \pm 4.9_{-10.1}^{+8.7}$ | (< 49) | |
| $P_c(4457)^+$ | $4457.3 \pm 0.6_{-1.7}^{+4.1}$ | $6.4 \pm 2.0_{-1.9}^{+5.7}$ | (< 20) | |

Довольно *принципиальные изменения!*

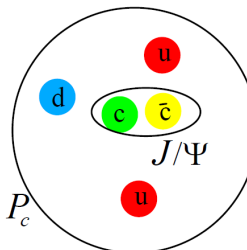
Как их можно принять в модели **молекулы** или **hadrocharmonium**?

What is the nature of LHCb pentaquark

- Quark contents $udu\bar{c}$



a)

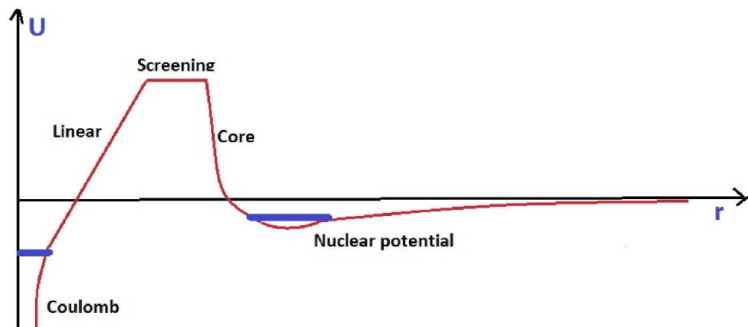


b)

- a) molecule $\Sigma_c + \bar{D}$ — distance between $c\bar{c}$ is **large**
- b) hadrocharmonium, $\Psi_{2s} + \text{Proton}$ — distance between $c\bar{c}$ is **small**.



Born-Oppenheimer approximation



- In **Born-Oppenheimer** approximation mass of c, \bar{c} is infinite. Light quark are moving in the **static field** of heavy quarks.
 - a) molecule $\Sigma_c + \bar{D}$ — distance between $c\bar{c}$ is **large**
 - b) hadrocharmonium, $\Psi_{2S} + \text{Proton}$ — distance between $c\bar{c}$ is **small**.

Молекула

- В работе LHCb новые данные названы **триумфом молекулярной модели**.
- Основанием для такого суждения служит близость состояний к двум порогам:

$$M_{\Sigma_c} + M_D = 2455 + 1865 = 4320 \quad (1)$$

$$M_{\Sigma_c} + M_{D^*} = 2455 + 2010 = 4465$$

Молекула

- В работе LHCb новые данные названы **триумфом молекулярной модели**.
- Основанием для такого суждения служит близость состояний к двум порогам:

$$\begin{aligned}M_{\Sigma_c} + M_D &= 2455 + 1865 = 4320 & (1) \\M_{\Sigma_c} + M_{D^*} &= 2455 + 2010 = 4465\end{aligned}$$

- Как возникают **ДВА** близких состояния в системе $\Sigma_c + D^*$?
Нет понятия сверхтонкого расщепления, поскольку π -мезонное взаимодействие **зависит от спина**.

$$V_\pi = \vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2 V = \begin{cases} V, & S = 3/2 \\ -2V & S = 1/2 \end{cases}$$

Пробовали — не получается....



Молекула

- А в системе $\Sigma_c + D$ (для $P_c(4312)$) вообще **нет однопионного обмена**.
- Таким образом идея **пентакварка как дейтона** не проходит!
- Возможно все же, что они представляют собой связанные состояния **ядерного типа** (потенциал за счет обмена σ, ρ, ω -мезона). Но тогда энергии связи порядка 50 MeV, **Размер 1fm**. Нету картины **слабосвязанной молекулы большого размера**
- А тогда при чем **близость** к порогу? И как объяснить **дублет** состояний?



Hadrocharmonium

- Потенциал взаимодействия между нуклоном и маленьким ψ' получается из **мультипольного разложения** для ψ'

$$V(\mathbf{x}) = -\alpha \frac{4\pi^2}{b} \left(\frac{g^2}{g_s^2} \right) \left[\rho_E(\mathbf{x}) \left(1 + \xi \frac{b g_s^2}{8\pi^2} \right) - 3p(\mathbf{x}) \right]$$

$\rho_E(\mathbf{x})$ — плотность энергии в нуклоне, $p(\mathbf{x})$ — давление, α — **поляризуемость** чармония.

- Потенциал **не зависит от спинов** чармония и нуклона. Поэтому для связи $\Psi(2S) + N$ есть **два вырожденных** состояния со спинами $S = \frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^-$
- Потенциал $V(\mathbf{x})$ выведен для предела $m_c \rightarrow \infty$. С учетом поправок по $1/m_c$ вырождение снимается — **сверхтонкое расщепление**.

Сверхтонкое расщепление в Hadrocharmonium

- Взаимодействие сверхтонкого расщепления определяется поляризуемостью и средним хромоэлектрическим E и хромомагнитным полем B по нуклону:

$$H_{\text{eff}} = -\frac{\alpha}{2m_Q} S_j \langle N(p') | E_i^a (D_i B_j)^a | N(p) \rangle,$$

- выражается через $G\tilde{G}$ по нуклону, а это среднее выражается через **синглетную аксиальную константу нуклона**.
Окончательная формула:

$$H_{\text{eff}} = \frac{\alpha}{m_Q} \frac{4\pi^2}{3N_f} g_A^{(0)}(-q^2) (S \cdot q) (S_N \cdot q),$$

- S – спин чармония, S_N – спин нуклона



Сверхтонкое расщепление в Hadrocharmonium

- α фиксирована из положения центра пента-дублета ($\alpha = 17.2 \text{ GeV}^{-3}$).
- **Синглетная** g_a известна хорошо $g_a^{(0)} \approx 0.3$ из данных по поляризованному deep inelastic.
- К сожалению, плохо известен ее формфактор. Принимая

$$g_A^{(0)}(-q^2) = \frac{g_A^{(0)}}{(1 + q^2/M_A^2)^2}, M_A = 800 \text{ MeV}$$

(соответствует нашей модели нуклона) получаем

$$\Delta M_{HF} \approx \mathbf{21.1 \text{ MeV}} \text{ vs } \mathbf{17 \text{ MeV (LHCb)}}$$



Третий пентакварк

- Откуда взять **3й пентакварк**? Нужен **другой** чармоний, который имеет *примерно такой же размер*
- В кулоновской картине имеют одинаковую энергию возбужденные состояния $2S$ и $1P$ ($l = 1$). Это чармоний называется χ_c , его квантовые числа 0^+ .
- Рассмотрим связанное состояние χ_{c0} и нуклона. Потенциал такой же, только входит **поляризуемость** χ_{c0} . Она **неизвестна** и считать ее мы не умеем.
- Умели бы если бы задача была **кулоновской**. Вычисляя, в кулоновской задаче

$$x = \frac{\alpha(1P)}{\alpha(2S)} = \frac{159}{251} \approx 0.63$$

- Если принять такое *отношение*

$$M_{P_c} \approx 4298 \text{ MeV}$$



Третий пентакварк

- LHCb число (4312) получается для $x \approx 0.58$
- Внимание: При hadrocharmonium интерпретации $P_c(4312)$ имеет **четность плюс** — именно $\frac{1}{2}^+$
- при молекулярной интерпретации **четность минус** — $\frac{1}{2}^-$.



Распады в дублете пентакварков

- У компонент **пента-дублета** должна быть **одинаковая ширина** (??), а по данным LHCb она отличается **в 3 раза!**
- Действительно, ширины распадов *распадов в закрытый чарм* $P_c \rightarrow J/\psi + p$ **одинаковы**.
- Мы сосчитали ширины из $3/2$ раньше, а из $1/2$ - теперь

TABLE II. Decay widths of the spin doublet hadrocharmonium pentaquarks $P_c(4440)$ and $P_c(4457)$

| Decay mode | $\Gamma\left(\frac{1}{2}^-\right)^a$ | $\Gamma\left(\frac{3}{2}^-\right)^b$ |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $P_c \rightarrow J/\psi N$ | 11 | 11 |
| $P_c \rightarrow \Lambda_c \bar{D}$ | 18.7 | 0.6 |
| $P_c \rightarrow \Sigma_c \bar{D}$ | 1.4 | 0.04 |
| $P_c \rightarrow \Lambda_c \bar{D}^*$ | 13.7 | 4.2 |
| $P_c \rightarrow \Sigma_c^* \bar{D}$ | 0.004 | 0.4 |
| Total width | 44.8 | 16.2 |

- Ширины из $1/2$ **больше**, поскольку становится доступной волна с $L = 0$.



Распады пентакварков

- Действительно, распады из состояния $\frac{1}{2}^-$ **в три раза больше**, чем из состояния $\frac{3}{2}^-$. за счет распадов в открытый чарм.
- Но сами ширины **значительно больше**, чем говорит LHCb (в два раза и более).
- Третьему пентакварку распадаться **некуда**. Распад в **закрытый чарм** $J/\psi + N$ возможен не через 2, а через **3 глюона**. Для вычисления нужно знать

$$\langle N | \frac{G_{\mu\nu}^3}{32\pi^2} | N \rangle$$

Неизвестен экспериментально и теоретически. Открытый чарм подавлен по четности (высшие L).

- Однако, **собственной ширины** χ_{c0} (10 Mev) **достаточно**

Что еще?

- Есть еще много возбужденных состояний чармония. Они могут объяснять преширокий резонанс в области 4380....

TABLE II. Decay widths of the spin doublet hadrocharmonium pentaquarks $P_c(4440)$ and $P_c(4457)$

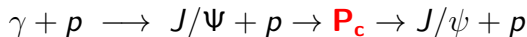
| Decay mode | $\Gamma\left(\frac{1^-}{2}\right)^a$ | $\Gamma\left(\frac{3^-}{2}\right)^b$ |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $P_c \rightarrow J/\psi N$ | 11 | 11 |
| $P_c \rightarrow \Lambda_c \bar{D}$ | 18.7 | 0.6 |
| $P_c \rightarrow \Sigma_c \bar{D}$ | 1.4 | 0.04 |
| $P_c \rightarrow \Lambda_c \bar{D}^*$ | 13.7 | 4.2 |
| $P_c \rightarrow \Sigma_c^* \bar{D}$ | 0.004 | 0.4 |
| Total width | 44.8 | 16.2 |

- **Conclusions:** Оба сценария проходят новые данные LHCb с трудом, но молекулярный — **хуже...**

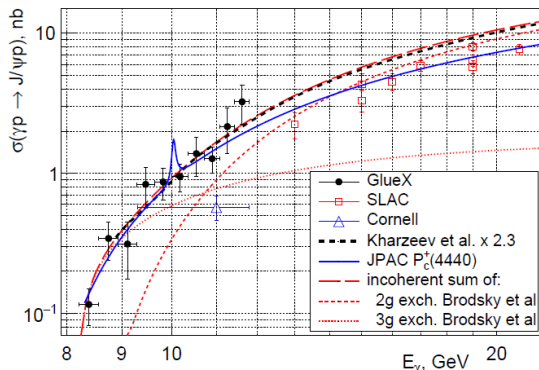


Эксперимент GlueX

- JLAB: коллаборация **GlueX**:



- **Ничего не обнаружено!**

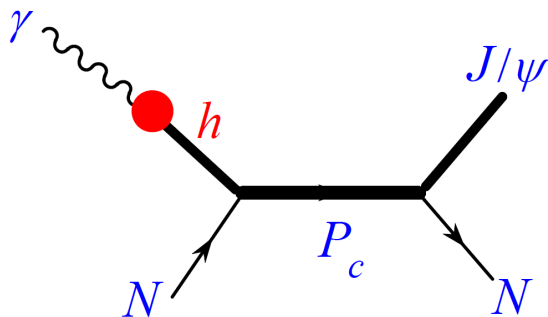


а) Пичок отвечает гипотезе, что

$$Br(P_c \rightarrow J/\psi + p) = \mathbf{2\%}$$

б) принято, что переход γ в J/ψ по **векторной доминантности**

Эксперимент Gluex



- **VDM**: в качестве h можно взять любой адрон - $J/\psi, \psi', \dots$, даже ρ -мезон. Фотон – **реальный**, поэтому далеко от массы J/ψ . Это - модель (Волошин, Кубаровский). Было бы ep , можно было бы измерить **безмодельно**.



Эксперимент GlueX

- Эксперимент GLUEX, скорее всего, прямо противоречит данным LHCb

$$Br[P_c \rightarrow J/\psi + p] = R \left(\frac{Br[\Lambda_b \rightarrow P_c K^-]}{Br[\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-]} \right)^{-1}$$

- Измерения R от LHCb для $P_c(4440)$: $R = 1.11 \pm 0.33\%$.
Чтобы согласовать с GLUEX: **ВСЕ** распады $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ идут через **пентакварк!** (нам надо 0.04!). Это тем более странно, что ширина пентакварка маленькая по GLUEX.

