

ЛНСь пентаварки Интерпретации

В.Петров

Сессия ОФВЭ

24 декабря 2015

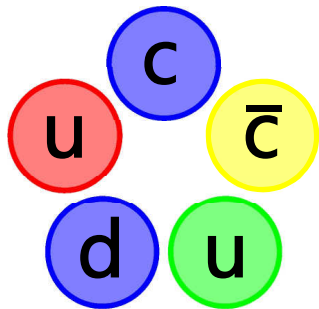
Эксперимент

2 резонанса. Массы

$$M_1 = 4380 \pm 37 \text{ MeV}, \quad \Gamma = 205 \pm 104 \text{ MeV}$$

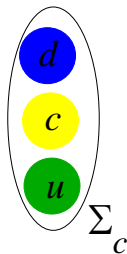
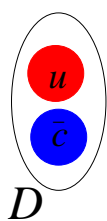
$$M_2 = 4450 \pm 5 \text{ MeV}, \quad \Gamma = 39 \pm 24 \text{ MeV}$$

Спин-четность $(\frac{3}{2}^-, \frac{5}{2}^+)$, но может быть и $(\frac{5}{2}^+, \frac{3}{2}^-)$.



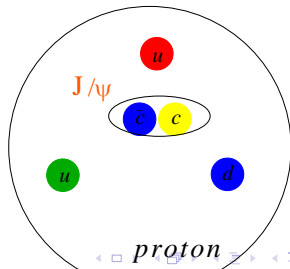
Атом или молекула: 2 **тяжелых** **кварка** — далеко или близко? Приближение Борна-Оппенгеймера — **терм** с-кварков — потенциальная энергия легких кварков при прибитых гвоздями **c** и **c̄**

Открытый или закрытый чарм?



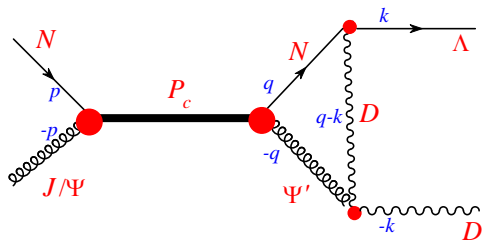
Молекула Σ_c -барион + D -мезон
Расстояние между $c\bar{c}$ ~ 1 ферми

Атом (**hadrocharmonium**). В центре **чармониум** — "ядро" атома вокруг которого обращаются кварки протона. Расстояние между $c\bar{c}$ \sim размер **чармония**



Либо-либо. Связь каналов.

Каналы **слабо связаны**.
Переход требует обмена **тяжелым** D -мезоном в t -канале. **Конstituенты** должны сойтись на расстояние $1/m_c$.



Ширина распада

$$\Gamma = \frac{g_{\Psi' DD}^2 g_{\Lambda p D}^2}{4\pi} \frac{M_N}{M_{P_c} M_D} \frac{|\Psi(0)|^2 |k|}{M_D^2 - (M_N - M_\Lambda)^2} \frac{(k^2)^2}{3M_\Lambda^2}$$

Хотя константы неизвестны, ширина вряд ли превышает **сотню** **кэВ**

Branching дает ответ об **устройстве**

2 состояния. Невозможность вращения

2 состояния $\frac{3}{2}^-$ и $\frac{5}{2}^+$ намекают на то, что это — **вращательное состояние** другого — $L = 0$ и $L = 1$ (четности как раз *противоположны*).

Однако, вращательная энергия оказывается слишком **велика!**

$$\left\langle \left\langle \frac{L(L+1)}{2Mr^2} \right\rangle \right\rangle \geq 200 \text{ MeV}$$

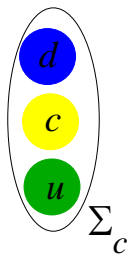
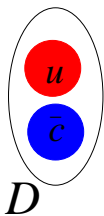
а не 70 Mev.

Можно делать на **сверхтонком расщеплении**. Нужный порядок, но четность **не меняется!**



Молекула

Молекула — слабо связанное состояние D -мезона и Σ_c -бариона. Кандидаты:



D -мезоны: uc или dc

D_c : 0^- , $I = 1/2$, $M = 1865$ MeV

D_c^* : 1^- , $I = 1/2$, $M = 2008$ MeV

Барионы: udc или uuc

Λ_c : $\frac{1}{2}^+$, $I = 0$, $M = 2286$ MeV

Σ_c : $\frac{1}{2}^+$, $I = 1$, $M = 2453$ MeV

Σ_c^* : $\frac{3}{2}^+$, $I = 1$, $M = 2517$ MeV

Гипотеза, (R.Chen, X.Liu, X.Li, S.Zhu, 1507.0370)

Легкий: $\Sigma + D^*$, $\epsilon_{bound} = -81$ MeV

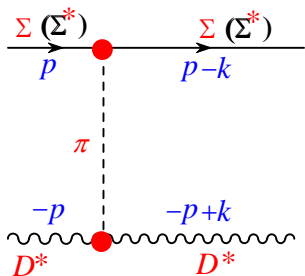
Тяжелый: $\Sigma^* + D^*$, $\epsilon_{bound} = -75$ MeV

Возможны $I = 1/2, 3/2$

Молекула

Идея Связывается за счет однопионного обмена

Coupling constants



$$g_{D^*D^*\pi} = 0.59$$

$$g_{D^*D^*\pi} = 0.94$$

фиксируются по *heavy quark symmetry* из распадов

1-пион в киральном пределе $1/r^3$ — падает.

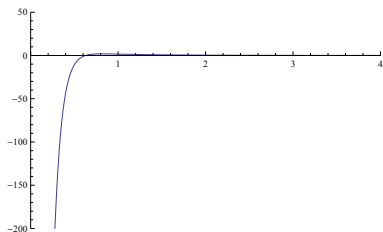
$$Y = \int d^3q e^{-i\vec{q}\cdot\vec{r}} \frac{1}{q^2 + m_\pi^2} \frac{\Lambda^2}{q^2 + \Lambda^2}$$

Потенциал $V = \nabla^2 Y$. Формфактор.

$\Lambda = 2.35 \text{ GeV}$ (!) (ΣD^*), $\Lambda = 1.77 \text{ GeV}$ (!) ($\Sigma^* D^*$)

Патология

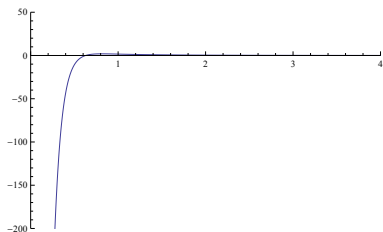
- Предсказаний - нет. Только лишь **фит Λ** . Они неправдоподобно большие — правильно $\Lambda \leq 1 \text{ GeV}$.
- В s -состоянии **средний** потенциал = 0 в киральном пределе. Вклад $\sim m_q$.



1pion exchange = яма глубиной **2.5 MeV** на расстоянии 1-2 fm и мощный **кор** на 0.1 фм высотой 1 GeV. **Ничего нельзя связать....**

Патология

- Предсказаний - нет. Только лишь **фит Λ** . Они неправдоподобно большие — правильно $\Lambda \leq 1 \text{ GeV}$.
- В s -состоянии **средний** потенциал $= 0$ в киральном пределе. Вклад $\sim m_q$.



1 pion exchange = яма глубиной **2.5 MeV** на расстоянии 1-2 fm и мощный **кор** на 0.1 фм высотой 1 GeV. **Ничего нельзя связать....**

- Канал — **отталкивание** и свяжем на **коре!!!** Радиус потенциала = **0.07 fm**, глубина = 700 -1000 MeV
- Радиус связанного состояния = 0.3 fm



Задача из **ядерной физики** — нужен центральный потенциал.

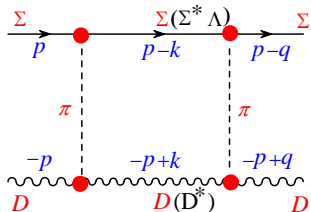


Диаграмма расходится. Нужна многоканальная задача — все комбинации $\Sigma_c, \Sigma_c^*, \Lambda_c$ и D, D^* . $\varepsilon \approx 70 - 80 \text{ MeV} \Rightarrow$ **ядерной физике**.

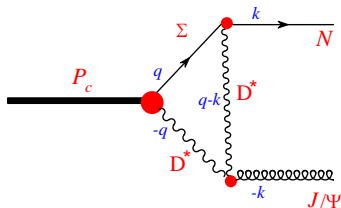
- Состояния с $I = 1/2$ и с $I = 3/2$ — **почти вырождены**
- Состояния с $S = 5/2$ должно иметь **четность** как $S = 3/2$, так как $L = 0$.
- Скорее всего есть связанные состояния **всех** комбинаций!!!
Где они?



Молекула

- Главная проблема:

Парциальная ширина распада на $J/\psi + p$ — **мала**
($\sim |\Psi(0)|^2$)



Обмен **тяжелым** D^* -мезоном в t -канале

$$\Gamma_{P_c \rightarrow J/\psi N} = \frac{g_{\Sigma D^* N}^2 g_{J/\psi D^* D^*}^2}{4\pi} \frac{M_{\Sigma}}{M_{P_c} M_{J/\psi}} \frac{|k| |\Psi(0)|^2}{[M_{D^*}^2 - (M_{\Sigma} - M_N)^2]^2} |\Xi|^2$$

Это в лучшем случае сотня keV! Хотя это — **парциальная ширина**, спрашивается, **как же пентакварк наблюдают?**

Молекула

$$|\Xi|^2 = \left[\frac{2M_{D^*}}{M_\Sigma + M_{D^*}} (V(0) - \varepsilon) \right]^2 + \frac{4}{3} \left[\frac{2M_{D^*}}{M_\Sigma + M_{D^*}} (V(0) - \varepsilon) \right] \frac{k^2}{M_N} + \frac{k^4}{M_N^2}$$

Не все понятно и с **полной шириной**, которая определяется распадами

$$P_c \rightarrow \Sigma_c + D$$

$$P_c \rightarrow \Lambda_c + D$$



Проблема 2х состояний

- Почему более тяжелое состояние уже?
- **Измеренные** спин-четность $\frac{3}{2}^-$, $\frac{5}{2}^+$ намекают на **вращательное возбуждение** $L = 0, 1$. Можно оценить среднее расстояние в молекуле, чтобы центробежная энергия имела бы нужный порядок

$$\frac{L(L+1)}{2\mu r^2} \approx 70 \text{ MeV} \quad \longrightarrow \quad \bar{r} = 0.71 \text{ fm}$$

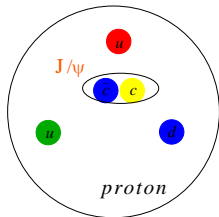
что не является диким. Если $\Sigma^* D^*$ потенциал имеет глубину $\approx 200 \text{ MeV}$, то возможно интерпретировать пентакварки как $L = 0, 1$ состояния $\Sigma^* D^*$. Но

- 1 Куда девать связанное состояние ΣD^*
 - 2 Можно по-другому сложить спины, есть другие состояния
- Сверхтонкое vs вращательное — это **четность**



Hadrocharmonium (Polyakov+Eides+V.P.)

Кто на что распадается, тот из того и состоит!

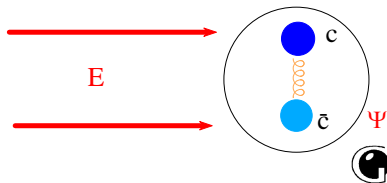


Чармониум — есть **слабо** взаимодействующее состояние **малого размера**, сидит **в центре протона** и вокруг **легкие кварки**

Взаимодействие чармония происходит посредством **2-глюонного обмена** (Волошин и др).

Энергия в однородном, медленно меняющемся **цветном** поле

$$V = \frac{1}{2} \alpha \mathbf{E}^a \cdot \mathbf{E}^a$$



Hadrocharmonium

α — хромозлектрическая поляризуемость чармония. Источник цветного поля — поля **внутри протона**.

Размер протона » **размер Ψ** .

Имеем

$$E_{ia}^2 = \frac{1}{2}(E^2 + H^2) + \frac{1}{2}(E^2 - H^2) = g^2 \Theta_{00} + G_{\mu\nu}^2$$

Θ — плотность тензора энергии-импульса. **Конформная аномалия**

$$\Theta_{\mu}^{\mu} \sim b G_{\mu\nu}^2$$

b — Gell-Mann-Low coefficient

$$b = \frac{11}{3} N_c - \frac{2}{3} N_f$$



Hadrocharmonium

Effective потенциал

$$V(x) = \frac{1}{2} g_\psi^2 \alpha \left[\Theta_{00}^{(G)}(\vec{x}) + \frac{8\pi^2}{bg_s^2} \Theta_\mu^\mu(\vec{x}) \right]$$

$c\bar{c}$ — пробник плотности тензора энергии-импульса в протоне.

$\Theta_{00}^{(G)}$ — только глюонная часть

$\Theta : \mu_\mu$ — вся энергия (киральнй предел)

Константы связи: g_ψ^2 — на размере ψ

g_s^2 — на размере протона или там где она замораживается. В инстантонном вакууме ($SU(3)$)

$$\beta = \frac{8\pi^2}{g_s^2} \approx 11 - 12$$

Модель $\Theta_{00}^G \approx \zeta \Theta_{00}$, где $\zeta \approx 0.4$ — доля глюонов в протоне.

Потенциал взаимодействия Ψ и протона

В другой форме

$$V(\vec{x}) = -\frac{4\pi^2}{b}\alpha \left(\varepsilon(\vec{x}) \left[1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi^2} \right] - 3p(\vec{x}) \right),$$

$\varepsilon(\vec{x})$ — плотность энергии в протоне, $p(\vec{x})$ — давление.

Известна **нормировка** потенциала

$$\int d^3x \varepsilon(\vec{x}) = M_N, \quad \int d^3x p(\vec{x}) = 0$$

(условие стабильности протона.

$$\int d^3x V(\vec{x}) = -\alpha \frac{4\pi^2}{b} M_N \left[1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi^2} \right]$$



Потенциал взаимодействия Ψ и протона

$$\int d^3x V(\vec{x}) = -\alpha \frac{4\pi^2}{b} \nu \mathcal{M}_N$$

где

$$\nu = 1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi^2} \approx 1.5$$

используя инстантоны и долю глюонов.

Потенциал имеет универсальную **асимптотику больших расстояний**

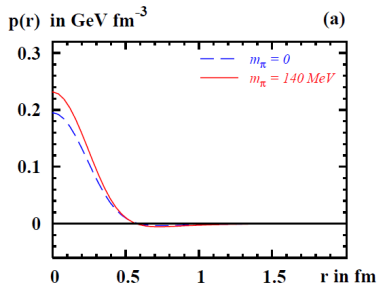
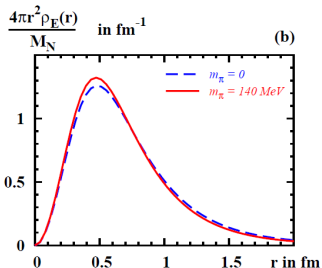
$$V(r) = -\nu\alpha \frac{12\pi^2}{b} \left(\frac{3g_{\pi NN}}{8\pi\mathcal{M}_N} \right)^2 \frac{1}{r^6}$$

(киральный предел, взаимодействие пиона с двумя глюонами)



Потенциал взаимодействия Ψ и протона

На **всех** расстояниях можно вычислить в χ QSM (М.Поляков)



Осталось узнать *масштаб* потенциала — вычислить **хромэлектрическую поляризуемость** Нужна **теория** чармония.



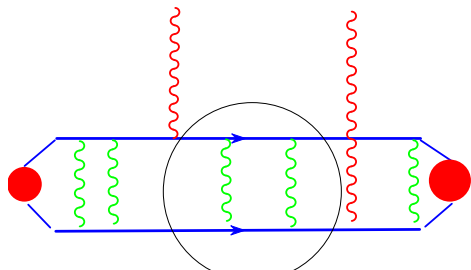
Поляризуемость

IF кулоновская нерелятивистская система с потенциалом

$$U(r) = -\frac{4g^2}{3r}$$

Поляризуемость была вычислена *Пескиным* в 1976 в пределе $N_c \rightarrow \infty$, ответ не такой как в КЭД.

$$\alpha = \frac{g_\psi^2}{3N_c} \langle nS | r \frac{1}{H_a + \epsilon} r | nS \rangle$$



Промежуточное состояние — **октетное**. Взаимодействие c и \bar{c} подавлено по N_c ! Заменяем на **свободные**.

Поляризуемость

Получаем

$$\alpha(1S) = \frac{28\pi}{27g_s^2} a_0^3, \quad \alpha(2S) = \frac{2008\pi}{27g_s^2} a_0^3$$

и переходная

$$\alpha(2S \rightarrow 1S) = \frac{51200\sqrt{2}\pi}{19683g_s^2} a_0^3.$$

Растет как n^6 или R^3 .

Полная теория строится как комбинация кулоновского и **линейного** потенциала. Несмотря на 20 лет находится в *плачевном* состоянии... (3 петли, релятивизм — половина и т.д.).

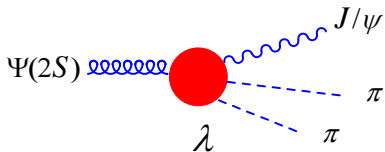
[Эксперимент???](#)



Распад $\Psi(2S) \rightarrow J/\psi + 2\pi$

Этот распад вычислил Волошин (и поправил Шифман).
Вершина взаимодействия

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \lambda V_{\mu}^{(J/\psi)} V_{\nu}^{(\psi(2S))} \partial_{\mu} \pi^a \partial_{\nu} \pi^a$$



Чтобы вычислить λ усредним тензор Θ по 2м π -мезонам

$$\begin{aligned} & \langle \pi(k_1) \pi(k_2) | \Theta_{\mu\nu}(k_1+k_2) | 0 \rangle \\ & = 2\mathbf{k}_{1\mu} \mathbf{k}_{2\nu} \end{aligned}$$

(киральный предел)

Распад $\Psi(2S) \rightarrow J/\psi + 2\pi$

находим λ , сравнивая с Лагранжианом

$$\lambda = \alpha(M_{J/\psi} + M_{\psi'})\nu \frac{8\pi^2}{bg^2}$$

Вычисляем ширину распада, находим $\alpha(2S \rightarrow 1S)$

$$\nu\alpha(2S \rightarrow 1S) \approx 2\text{Gev}^{-3}$$

По кулоновским формулам получаем

$$\alpha(1S) = .16\text{Gev}^{-3} \quad \alpha(2S) = 11.6\text{Gev}^{-3}$$

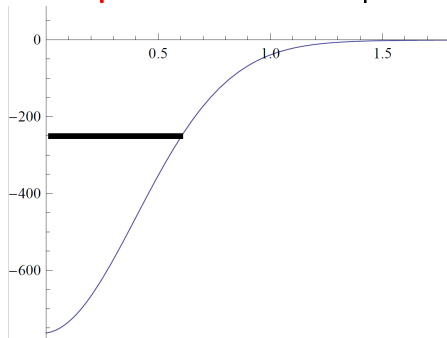
и **переходную α**

$$\alpha(2S \rightarrow 1S) = -0.65\text{Gev}^{-3}$$



Потенциал J/ψ и протона

Эксперимент почти в 2 раза больше Кулона

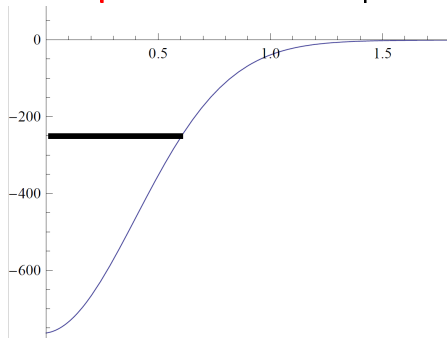


Потенциал взаимодействия
 J/ψ и протона в χ QSM
 r в ферми
 $U(r)$ в МэВ

$$\alpha(1S) = 17.5, \quad \alpha_{Coulomb} = 11.6$$

Потенциал J/ψ и протона

Эксперимент почти в 2 раза больше Кулона



Потенциал взаимодействия
 J/ψ и протона в χ QSM
 r в ферми
 $U(r)$ в МэВ

$$\alpha(1S) = 17.5, \quad \alpha_{Coulomb} = 11.6$$

Уровень отвечает *тяжелому пентакварку*

При $\alpha(2S) \approx 22.5$ — легкому, но не получить ширину...



Ширина пентакварка

Правильно решать **двухканальную задачу**

$$\begin{cases} \left[-\frac{\nabla^2}{2\mu_1} + V_{J/\psi, J/\psi}(r) - E \right] \Psi_1 + V_{\psi' J/\psi}(r) \Psi_2 = 0 \\ \left[-\frac{\nabla^2}{2\mu_2} + V_{\psi', \psi'}(r) - E + \Delta \right] \Psi_2 + V_{\psi' J/\psi}(r) \Psi_1 = 0 \end{cases}$$

Ψ_1 — волновая ф-ция $J/\Psi + p$, Ψ_2 — волновая ф-ция $\Psi' + p$

Потенциалы пропорциональны **поляризуемостям**

$$V_{\psi'\psi'}(r) \equiv V(r), \quad V_{J/\psi, J/\psi}(r) = \frac{\alpha_{J/\psi, J/\psi}}{\alpha_{\psi'\psi'}} V(r),$$

$$V_{\psi' J/\psi}(r) = \frac{\alpha_{\psi', J/\psi}}{\alpha_{\psi'\psi'}} V(r)$$



Ширина пентакварка

Можно решать численно (полюс в комплексной плоскости в амплитуде $J/\psi + p$, а можно по т.в. поскольку $V_{J/\psi, J/\psi}(r)$ — мал.

$$\Gamma = \left(\frac{\alpha_{\psi' J/\psi}}{\alpha_{\psi' \psi'}} \right)^2 \frac{4\mu_2 P}{(2l+1)} \left| \int d^3r \chi_R(r) V(r) j_l(Pr) \right|^2$$

Получаем — уже все фиксировано!!!

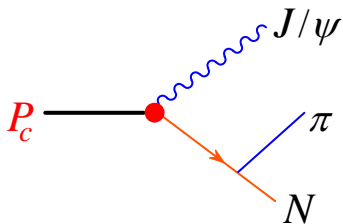
$$\Gamma = 13.2 \text{ MeV}$$

Парциальная ширина. А что еще?



Ширина пентакварка

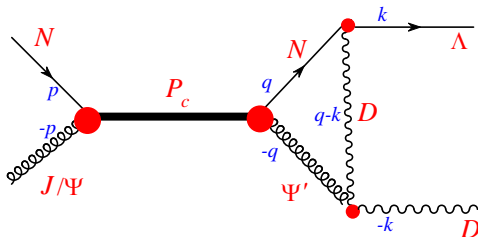
Испускание π -мезона



$$\frac{\Gamma_3}{\Gamma_2} = \frac{g_{\pi NN}^2 \Delta^2}{15\pi^2 M_1^2} \frac{1}{1 + \frac{M_1}{2M_{J/\psi}}}$$

Примерно **в 40 раз меньше**, чем основной процесс.

Распад в состоянии с **открытым** чармом



В лучшем случае ~ 0.1 MeV

Сверхтонкое расщепление

Можно сложить спины J/ψ и протона по-другому и получить $\frac{1}{2}^-$ состояния. **Сверхтонкое расщепление**. Релятивистская поправка, 1 электрический, 1 магнитный глюон

$$H_E = -\frac{1}{2}(t_1 - t_2), \quad H_M = \frac{1}{4m_c} S_j r_i (D_i B_j)^a$$

Эффективный гамильтониан

$$H_{eff} = \alpha \frac{q_i}{2m_c} \langle N' | G \tilde{G} | N \rangle \varepsilon_{ijk} \zeta_j \zeta_k$$

(ζ — поляризация) где α — та же самая поляризуемость.

$$\langle N' | G \tilde{G} | N \rangle = \frac{32\pi^2}{12N_f} g_a^{(0)} (\vec{S} \cdot \vec{q})$$

вычисляется до конца. Составляет 10-15 MeV.

- Можно связаться с **барионом из таблиц** — все **устроены одинаково**.
- Больше возбужденных состояний чармония, свехтонкое расщепление
- Боттониум — то же самое ?

Легкий пентакварк. Противоположная четность...

Есть в таблице частица χ_{c2} . Масса 3556 Mev, квантовые числа 2^+ . Это $2P$ состояние чармония. Она может **связаться** с протоном — дает $P_c(\frac{5}{2}^+)$ Масса будет 4380 Mev если

$$\alpha \approx 14 \text{Gev}^{-3}$$

что похоже на правду...

Откуда такая ширина? Рядом χ_{c1} с массой на 40 Mev меньше... Тоже дает связанное состояние, но будет $P_c[\frac{3}{2}^+]$, и еще h тут же с неизвестными квантовыми числами....

А еще сверхтонкое расщепление... Не могут ли все вместе эти резонансы дать картину широкого резонанса при **естественной** ширине $\sim 15 \text{ MeV}$?