

# Пентакварки со скрытым очарованием в модели Скирма

докладчик  
**Пантелеева Юлия**

Научный руководитель:  
профессор **Поляков Максим Владимирович**  
Соруководитель:  
к.ф.-м.н. **Перевалова Ирина Александровна**

12 сентября 2017

## О пентакварках

Экспериментально наблюдаются в основном связанные состояния 2 или 3 кварков: мезоны и барионы. **Пентакварки** — представители экзотических частиц, которые состоят из пяти кварков;

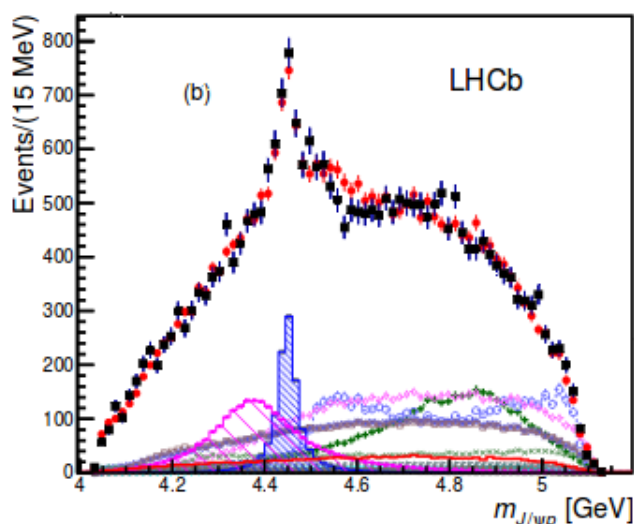


Рис. 1: Инвариантная масса  $J/\psi$  и протона. [LHCb Collaboration. Observation of  $J/\psi p$  resonances consistent with pentaquark states in  $\Lambda^0 \rightarrow J/\psi K^- p$  decays]

- 13 июля 2015 коллаборация LHCb, сообщила об открытии двух новых адронов, которые являются пентакварками:  $P_c^+(4450)$ ,  $P_c^+(4380)$ ;
- Обнаружены при изучении распада тяжелого бариона  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ ; Ширины распада:  
 $P_c^+(4380)$ :  $\Gamma=205$  Mev,  
 $P_c^+(4450)$ :  $\Gamma=39$  Mev;

Цель:

**Основная цель:** описать обнаруженный пентакварк и предсказать массы семейства пентакварков со скрытым очарованием!

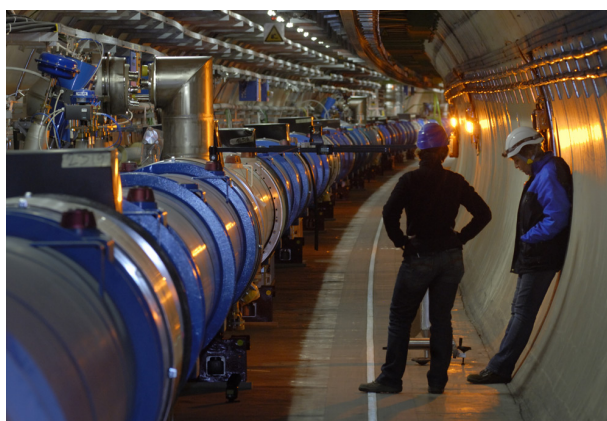


Рис. 2: Экспериментаторы, которые ждут предсказанных масс пентакварков

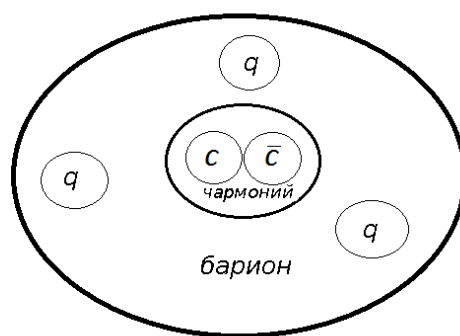
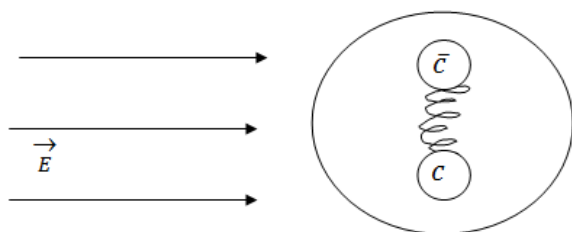


Рис. 3: Связанное состояние чармония и бариона

## Чармоний-адронное взаимодействие



Гамильтониан малого  
дипольного возмущения

$$H_d = -\vec{d}\vec{E}^a(t_1^a - t_2^a), \quad (1)$$

Рис. 4: Взаимодействие чармония с  
адронным полем

где  $\vec{d} = \vec{r}/2$  – дипольный момент,  $\vec{E}^a$  – хромозлектрическое поле адрона,  $t^a = \frac{\lambda^a}{2}$  – генераторы цветовой группы SU(3).

$$H_{eff} = -\frac{\alpha}{2}\vec{E}^a\vec{E}^a, \quad (2)$$

$\alpha$  – хромозлектрическая поляризуемость [Voloshin M.B. *Precoulombic Asymptotics for Energy Levels of Heavy Quarkonium*].

$$\vec{E}^2 = \frac{\vec{E}^2 + \vec{H}^2}{2} + \frac{\vec{E}^2 - \vec{H}^2}{2} = -\frac{G^2}{4} + g^2 T_{00}^G = g^2 \left( \frac{8\pi^2}{bg_s^2} T_{\mu}^{\mu} + T_{00}^G \right) \quad (3)$$

Глюонная часть ТЭИ

Тензор  
напряженности

Конформная  
аномалия

$$g^2 T_{00}^G = \frac{\vec{E}^2 + \vec{H}^2}{2},$$

$$G^2 = 2(\vec{E}^2 - \vec{H}^2),$$

$$T_{\mu}^{\mu} = -\frac{bg_s^2}{32g^2\pi^2} G^2.$$

$$T_{\mu}^{\mu} = \rho_E(r) - 3p(r), [Eides M.I., Petrov V.Y., Polyakov M.V.] \quad (4)$$

$$\alpha V_{eff}(r) = -\alpha \frac{4\pi^2}{b} \left( \frac{g^2}{g_s^2} \right) \left[ \rho_E(r) \left( 1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi} \right) - 3p(r) \right] \quad (5)$$

$\alpha$  – хромоэлектрическая поляризуемость кваркония;

$g^2 = 4\pi\alpha_s$ ,  $g_s^2 = 4\pi\alpha_S$  – константы сильной связи, определяются на масштабе радиуса кваркония и нуклона,  $\alpha_s = 0.3$ ,  $\alpha_S = 0.5$ ;

$\nu = 1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi} = 1.5$  в  $\chi QSM$  для нуклона;

$p(r)$  – пространственное распределение давления внутри адрона;

$\rho_E(r)$  – распределение плотности энергии;



## Вычисление ТЭИ в модели Скирма

$$S[U] = \int d^4x \left[ \frac{F_\pi^2}{16} \text{Tr} (\partial_\mu U \partial_\mu U^\dagger) + \frac{1}{32e^2} \text{Tr} \left( [U^\dagger \partial_\mu U, U^\dagger \partial_\nu U]^2 \right) + \right. \\ \left. + a \text{Tr}(U + U^\dagger - 2) + b \text{Tr} (\lambda_8 (U + U^\dagger)) \right]$$

$F_\pi$  – константа пионного распада,

$e$  – безразмерный параметр,  $a$  и

$b \in m_\pi, m_\eta, m_K$ .

$U(r) = e^{i\sigma^a \pi^a} = e^{i\sigma^a n^a F(r)}$  –

киральный солитон,  $\pi^a$  – пионное

поле,  $F(r)$  – профильная функция

солитона. [Skirme T.H.R. *A unified theory of mesons and baryons*]

Тензор энергии-импульса, где  $\mathcal{L}$  – Лагранжиан Скирма,

$L_\mu = U^\dagger \partial_\mu U$

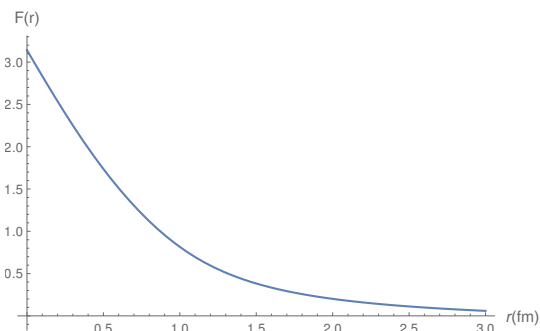


Рис. 5: Профильная функция солитона  $F(r)$

$$T_{\nu\alpha} = -\frac{F_\pi^2}{8} \text{Tr}(L_\nu L_\alpha) + \frac{1}{8e^2} \text{Tr}([L_\beta, [L_\nu, L_\beta]] L_\alpha) - g_{\nu\alpha} \mathcal{L}, \quad (6)$$

# Распределение плотности энергии и давления внутри бариона

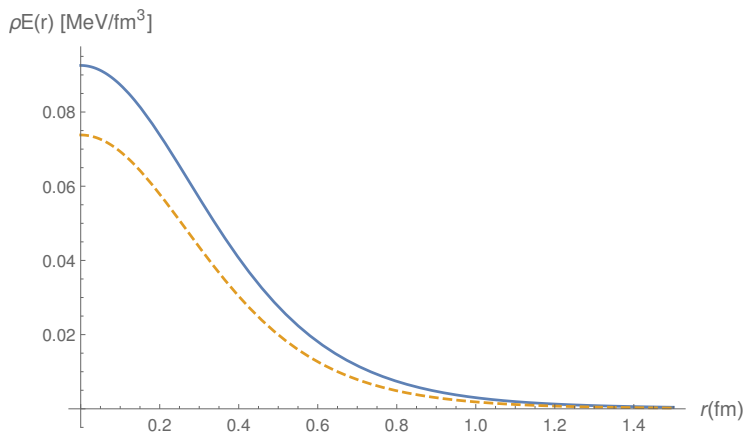


Рис. 6: Сплошной: распределение плотности энергии стационарного солитона  $\rho_E(r)$ ; Штрихованный: распределение плотности энергии вращающегося солитона

$$\rho_E(r) + \rho_E^{rot}(r); M_s = \int_0^{\infty} dr r^2 \rho_E(r)$$

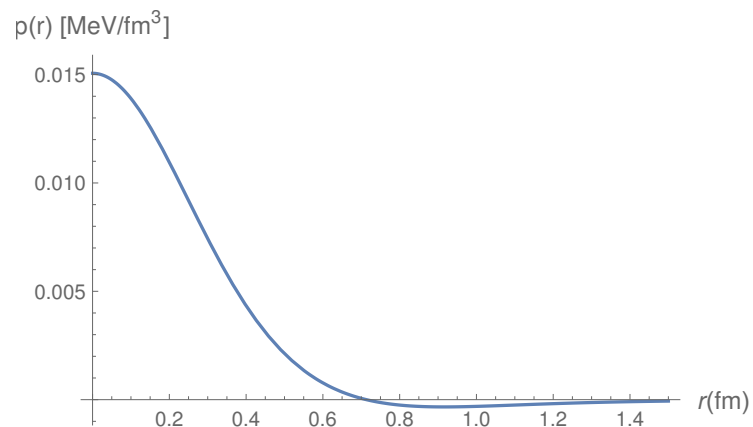


Рис. 7: Распределение давления внутри солитона.

## Квантование солитона

Поворот в пространстве ароматов  $U(x, t) = R(t)U_0(x)R^+(t)$ .  
 $\Omega(t) = R(t)\dot{R}(t)^+$  – угловая скорость,  $\Omega^i = J^i/I_1$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  
 $\Omega^a = J^a/I_2$  ( $a = 4, \dots, 7$ ), Условия квантования:

- $Y_R = 2\frac{J_8}{\sqrt{3}} = \frac{N_c B}{3} = 1$ , определяет мультиплеты барионов;
- $\sum_{i=1}^3 J^i J^i = J(J+1)$ ,  $J$  – определяет спин;
- $\sum_{a=1}^8 J^a J^a = \frac{1}{3}(p^2 + pq + q^2) + p + q$   
( $p, q$ ) – определяют представление бариона,  $p$  и  $q$  – количество кварков и антикварков в представлении;

Спектр энергии вращения солитона [*Diakonov D., Petrov V., Polyakov M.V. Exotic Anti-Decuplet of Baryons: Prediction from Chiral Solitons*]

$$E^{rot} = \frac{1}{2I_2} \left( p + q + \frac{1}{3}(p^2 + pq + q^2) \right) + \left( \frac{1}{2I_1} - \frac{1}{2I_2} \right) J(J+1) - \frac{N_c^2 B^2}{24I_2}. \quad (7)$$

где  $I_1, I_2$  – моменты инерции.



$$\alpha V_{eff}(r) = -\alpha \frac{4\pi^2}{b} \left( \frac{g^2}{g_s^2} \right) \left[ \rho_E(r) \left( 1 + \xi \frac{bg_s^2}{8\pi} \right) - 3p(r) \right] \quad (8)$$

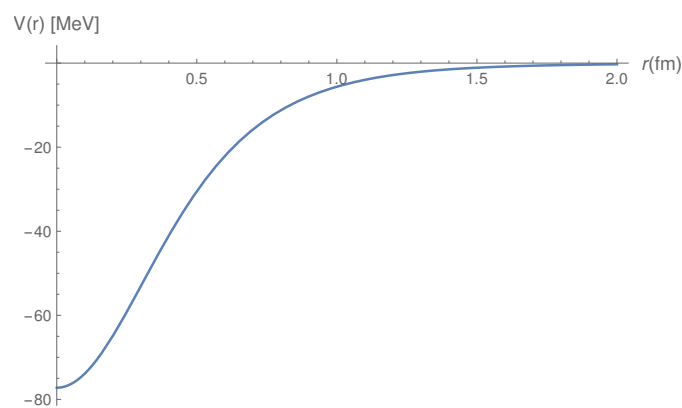


Рис. 8: Потенциал взаимодействия  $\psi(2S)$  и октета барионов

Возможные связанные состояния определяются решением уравнения Шредингера

$$\frac{d^2\chi}{dr^2} + \left( 2\mu[E_{bound} - \alpha V_{eff}(r)] - \frac{l(l+1)}{r^2} \right) \chi = 0, \quad (9)$$

где  $l$  – значения орбитального момента,  $\mu$  – приведенная масса чармония и адрона,  $E_{bound}$  – энергия связи.

## Определение $\alpha(2S)$

Энергия связи  $E_{bound} = M_{pent} - (M_{\psi(2S)} + M_n)$

- Масса пентакварка  $P_c^+(4450)$ :  $M_{pent} = 4450$  МэВ;
- Масса  $\psi(2S)$ :  $M_{\psi(2S)} = 3686$  МэВ;
- Масса протона:  $M_n = 940$  МэВ;

Энергия связи протона и  $\psi(2S)$ :  $E_i = -176$  МэВ. Тогда хромоэлектрическая поляризуемость:  $\alpha = 17.8 \text{ GeV}^{-3}$ .

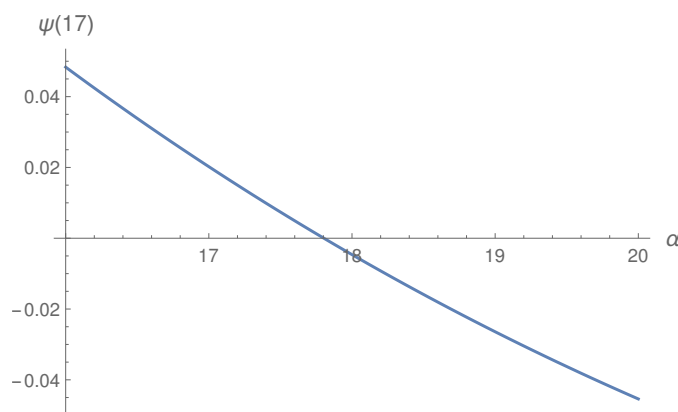


Рис. 9: Решение уравнения Шредингера с  $E_{bound} = -176$  МэВ

Хромоэлектрическая поляризуемость в Кулоновском приближении  
 $\alpha = 12 \text{ GeV}^{-3}$  *M. E. Peskin, Nucl. Phys. B, 156, 365 (1979)*

## Предсказание масс пентакварков

- $\psi(2S)$  и октет барионов ( $p = 1, q = 1, J = 1/2$ )
  - для  $s$ -волны:  
 $M_{penta1} = 4.33 \text{ GeV}, E_{bound1} = -0.50 \text{ GeV}$   
 $M_{penta2} = 4.82 \text{ GeV}, E_{bound2} = -0.02 \text{ GeV}$
  - для  $p$ -волны  
 $M_{penta} = 4.72 \text{ GeV}, E_{bound} = -0.12 \text{ GeV}$
- $\psi(2S)$  и декуплет барионов ( $p = 3, q = 0, J = 3/2$ )
  - для  $s$ -волны:  
 $M_{penta2} = 4.38 \text{ GeV}, E_{bound1} = -0.69 \text{ GeV}$   
 $M_{penta1} = 5.00 \text{ GeV}, E_{bound2} = -0.06 \text{ GeV}$
  - для  $p$ -волны  
 $M_{penta1} = 4.82 \text{ GeV}, E_{bound} = -0.25 \text{ GeV}$
- $\psi(2S)$  и анти-декуплет барионов ( $p = 0, q = 3, J = 1/2$ )
  - для  $s$ -волны:  
 $M_{penta} = 5.26 \text{ GeV}, E_{bound} = -0.22 \text{ GeV}$
  - для  $p$ -волны  
 $M_{penta1} = 4.974 \text{ GeV}, E_{bound1} = -0.51 \text{ GeV}$   
 $M_{penta2} = 5.46 \text{ GeV}, E_{bound2} = -0.02 \text{ GeV}$

## Итоги:

1. Описали обнаруженный пентакварк  $P_c(4450)$ , как связанное состояние  $\psi(2S)$  и нуклона;
2. Определили потенциал взаимодействия в терминах хромoeлектрической поляризуемости и тензора энергии-импульса;
3. Вычислили тензор энергии-импульса (плотность энергии и давление) и его ротационную поправку, используя модель Скирма;
4. Определили значение хромoeлектрической поляризуемости второго возбужденного состояния чармония  $\psi(2S)$ ;
5. Предсказали массы новых пентакварков;



Рис. 10: Экспериментатор ищет семейство пентакварков

Спасибо за внимание!