

Распады дважды-тяжелых барионов и внутренний чарм протона

Антон Герасимов

Аспирант 4 года обучения, Младший научный сотрудник

Распады дважды тяжелых барионов

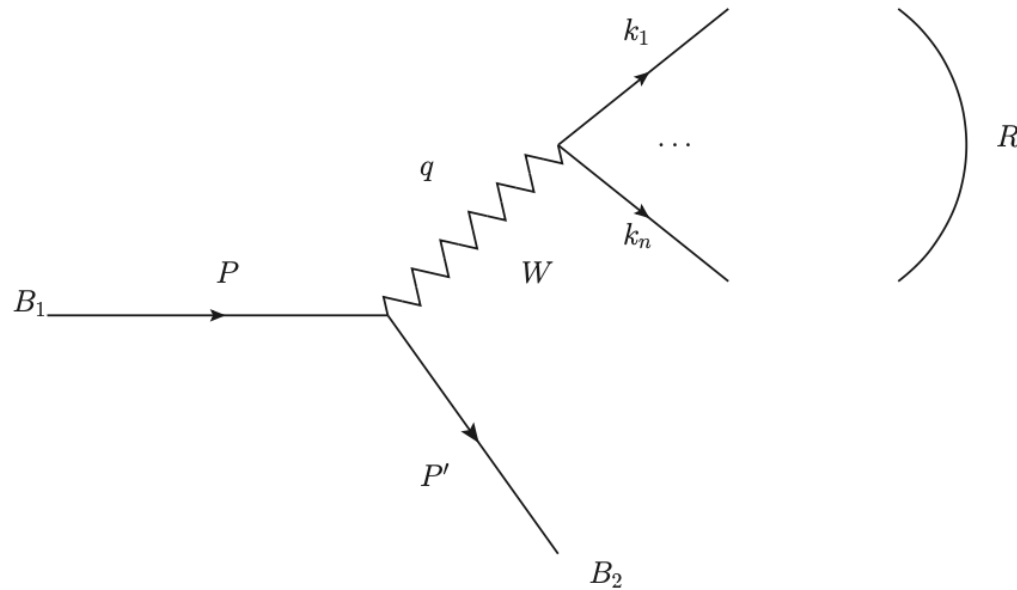
Введение

- Изучение дважды тяжелых барионов имеет важное значение в физике элементарных частиц, потому что изучение этих объектов «позволяет по-новому взглянуть на проблемы рождения и адронизации тяжёлых кварков»
- Ξ_{cc}^{++} в конечном состоянии $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ (LHCb)
- Распад $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$
- Принцип разделения распада на две независимые части (факторизации) применим не только к B_c мезонам, но и к дважды тяжелым барионам

Исследуемые распады

Исследуются распады $B_1 \rightarrow B_2 R$, где R — лептонная пара, π мезон, ρ мезон, 2π мезона, 3π мезона, 5π мезонов

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ij} a_1 H^\mu \varepsilon_\mu$$



Матричный элемент

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ij} a_1 H^\mu \varepsilon_\mu, \quad (2)$$

where G_F is the Fermi constant, V_{ij} the CKM matrix element, constant a_1 describes soft gluon rescattering [3], ε_μ is the effective polarization vector of W -boson, and the amplitude of $\mathcal{B}_1 \rightarrow \mathcal{B}_2$ transition is denoted as H^μ .

Вычисление формфакторов

$$H^\mu = \bar{u}(P') \left[\gamma^\mu f_1(q^2) + i\sigma^{\mu\nu} \frac{q_\nu}{M_1} f_2(q^2) + \frac{q^\mu}{M_1} f_3(q^2) \right] u(P) -$$

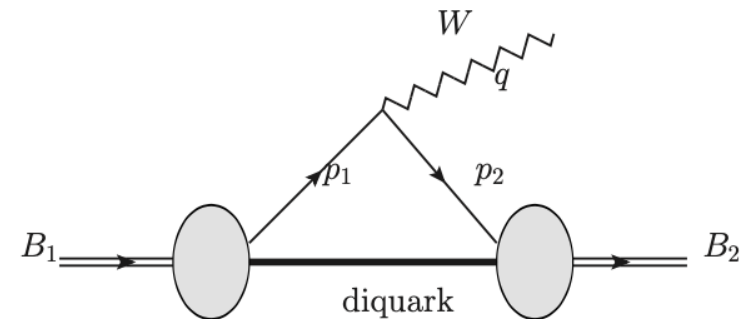
$$- \bar{u}(P') \left[\gamma^\mu g_1(q^2) + i\sigma^{\mu\nu} \frac{q_\nu}{M_1} g_2(q^2) + \frac{q^\mu}{M_1} g_3(q^2) \right] \gamma_5 u(P),$$

- сохранение токов \Rightarrow можно пренебречь f_3, g_3
- Интергал перекрытия

$$f_1 \sim \int \frac{d^3 p_1}{(2\pi)^3} \phi_{B_1}(p_1) \phi_{B_2}(p_2) \times$$

$$\text{Tr}[(\hat{P}_2 + M_2)(\hat{p}_2 + m_2)\gamma^+(\hat{p}_1 + m_1)(\hat{P}_1 + M_1)\gamma^+]$$

аналогично для остальных



Скалярный и аксиальный формфакторы

$$\begin{aligned}\Omega_{bc}^0 &\rightarrow \Omega_{cc}^+ W^- \\ b(cs)_{S,A} &\rightarrow c(cs)_{S,A} + W^-\end{aligned}$$

Ω_{cc}^+ : дикварк cc , его спин $S_d = 1$, $(cc)_A = c_1(\uparrow)c_2(\uparrow)$

$$\Omega_{cc}^+ = c_1(\uparrow)c_2(\uparrow)s(\downarrow)$$

В базисе $c(cs)$ $\Omega_{cc}^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} c_1(\uparrow)(c_2s)_S + \frac{1}{2} c_1(\downarrow)(c_2s)_A + c_1 \leftrightarrow c_2 \right)$

$$\Omega_{bc}^0 : \Omega_{bc}^0 = -\frac{\sqrt{3}}{2} b(\uparrow)(cs)_S + \frac{1}{2} b(\downarrow)(cs)_A$$

$$c_S = \frac{3\sqrt{2}}{4}, \quad c_A = \frac{\sqrt{2}}{4}$$

$$F(q^2) = c_S F_S(q^2) + c_A F_A(q^2)$$

Спектральные функции

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{ij} a_1 H^\mu \varepsilon_\mu$$

$$\Gamma = \frac{1}{2M_1} \frac{1}{2J+1} \int d\Phi_{n+1} |\mathcal{M}|^2$$

$$d\Phi_{n+1} = \frac{dq^2}{2\pi} d\Phi_2 d\Phi_n = dq^2 \frac{\lambda}{8\pi} \frac{d\Phi_n}{2\pi}$$

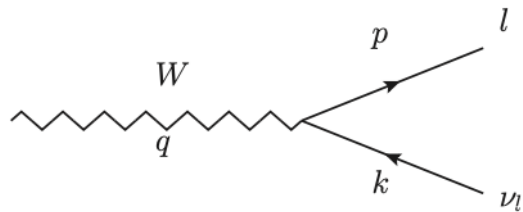
$$\int \frac{d\Phi_n}{2\pi} \varepsilon_\mu \varepsilon_\nu^* = (q_\mu q_\nu - q^2 g_{\mu\nu}) \rho_T(q^2) + q_\mu q_\nu \rho_L(q^2)$$

$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = \text{const} * (\mathcal{M}_T^2 \rho_T + \mathcal{M}_L^2 \rho_L)$$

$$\mathcal{M}_T^2 = H^\mu H_\nu^* (q_\mu q_\nu - q^2 g_{\mu\nu}), \quad \mathcal{M}_L^2 = H^\mu H_\nu^* q_\mu q_\nu$$

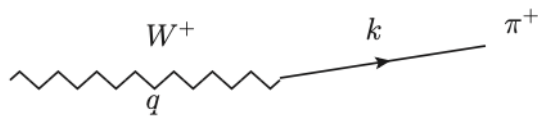
Спектральные функции

- $l\nu_e$



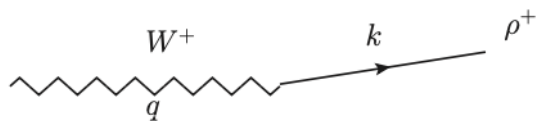
$$\epsilon_\mu = \bar{u}_l \gamma_\mu (1 + \gamma_5) v_{\nu_l}, \quad \rho_L = 0, \quad \rho_T = 1/(6\pi^2)$$

- π^+



$$\epsilon_\mu = f_\pi q_\mu, \quad \rho_L = f_\pi^2 \delta(q^2 - m_\pi^2), \quad \rho_T = 0$$

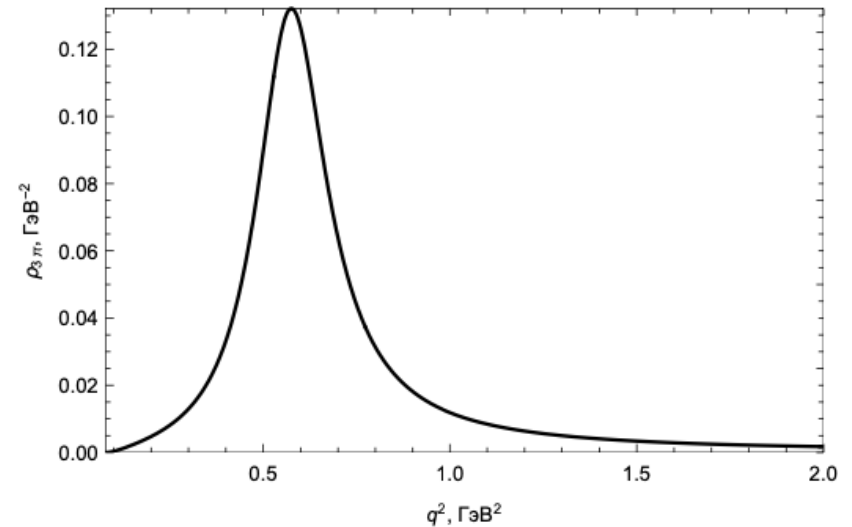
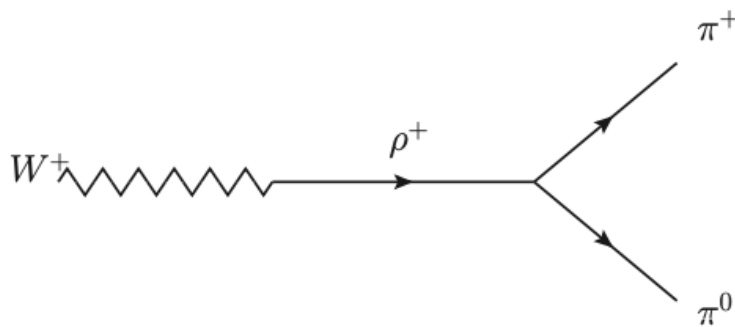
- ρ^+



$$\epsilon_\mu = f_\rho m_\rho \epsilon_\mu^\rho, \quad \rho_L = 0, \quad \rho_T = f_\rho^2 \delta(q^2 - m_\rho^2)$$

Спектральные функции

$$2\pi = \pi^+\pi^0$$



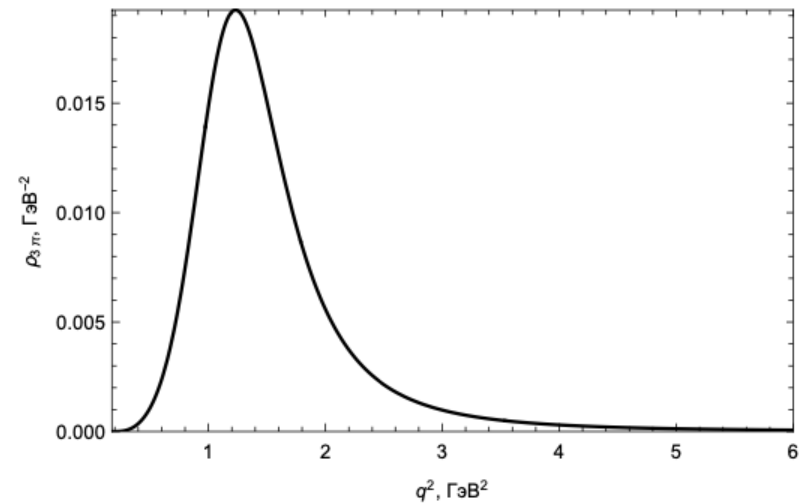
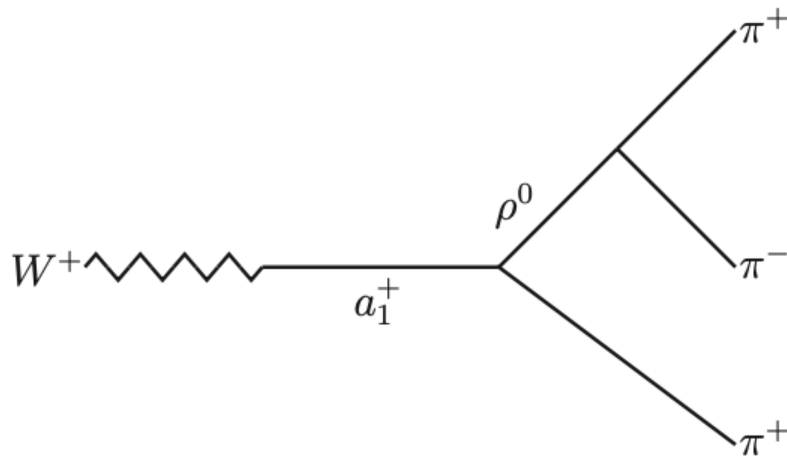
$$\epsilon_\mu \sim BW_\rho(k_1 - k_2)_\mu$$
$$\rho_T^{(2\pi)}(q^2) \sim \left(\frac{q^2 - 4m_\pi^2}{q^2}\right)^2 \frac{1 + 0.64q^2}{[(q^2 - 0.57)^2 + 0.01]^2}$$

A. V. Luchinsky, Phys.Rev. D86 (2012) 074024

Нормировка \Leftarrow экспериментальные данные по распадам τ

Спектральные функции

$$(3\pi)_{ch} = \pi^+\pi^-\pi^+$$



$$\epsilon_\mu \sim BW_{a_1} BW_\rho (k_1 - k_2)_\mu + \text{permutations}$$

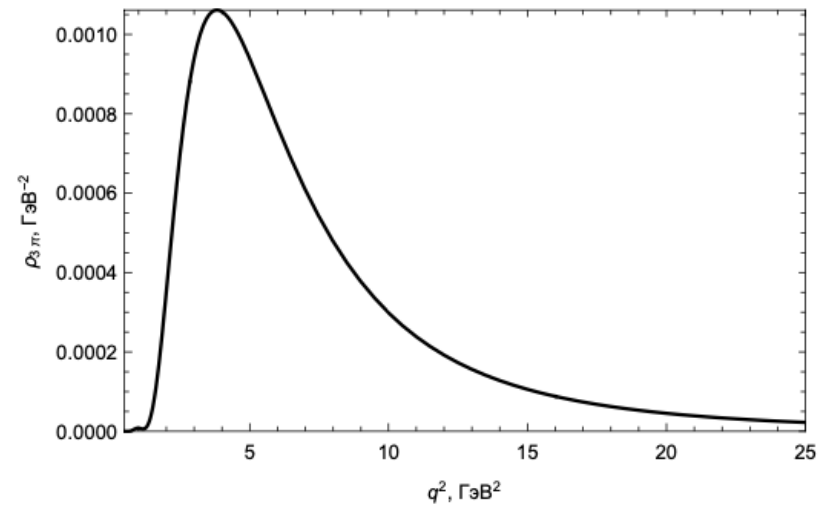
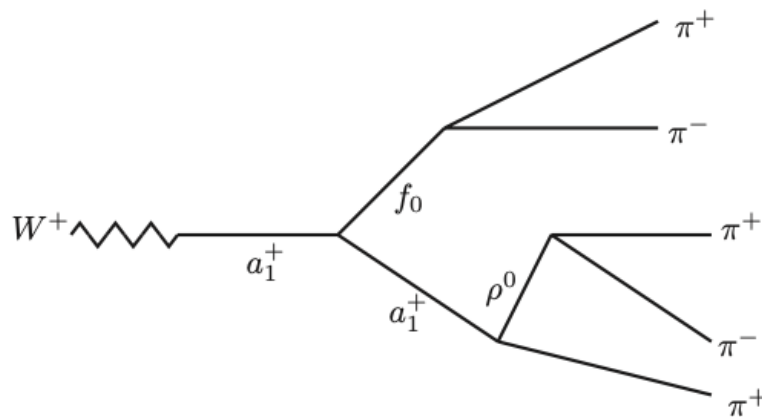
$$\rho_T^{(3\pi)}(q^2) \sim \left(\frac{q^2 - 9m_\pi^2}{q^2} \right)^4 \frac{1 + 190q^2}{(q^2 - 1.06)^2 + 0.48}$$

Нормировка \leftarrow экспериментальные данные по распадам τ

A. V. Luchinsky, Phys.Rev. D86 (2012) 074024

Спектральные функции

$$(5\pi)_{ch} = \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+$$



$$\epsilon_\mu \sim BW_{a_1} BW(f) BW_{a_1} BW_\rho (k_1 - k_2)_\mu + \text{perm}$$

$$\rho_T^{(5\pi)}(q^2) \sim \left(\frac{q^2 - 25m_\pi^2}{q^2} \right)^{10} \frac{1 - 1.65q^2 + 0.69q^4}{[(q^2 + 2.21)^2 - 4.69]^3}$$

A. V. Luchinsky, Phys.Rev. D86 (2012) 074024

Бренчинги

Главной целью изучения является нахождение Br по исследуемым каналам и их сравнение между собой и с результатами других авторов

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma}{dq^2} = & \frac{G_F^2}{2} V_{ij}^2 a_1^2 \frac{1}{2M_1} \frac{1}{2J+1} \frac{\lambda}{8\pi} \left(\frac{1}{2M_1^2} \left(f_1^2 M_1^2 (-2q^4 + 2q^2 M_-^2 - q^2 M_+^2 + M_-^2 M_+^2) + \right. \right. \\ & 12f_1 f_2 q^2 M_+ (q^2 - M_-^2) M_1 - 4f_2^2 q^2 (q^4 - q^2 M_-^2 + 2q^2 M_+^2 - 2M_-^2 M_+^2) + \\ & g_1^2 (M_- + M_+)^2 (-2q^4 - q^2 M_-^2 + 2q^2 M_+^2 + M_-^2 M_+^2) + 12g_1 g_2 q^2 M_- (M_+^2 - q^2) (M_- + M_+) - \\ & \left. \left. 4g_2^2 q^2 (q^4 + 2q^2 M_-^2 - q^2 M_+^2 - 2M_-^2 M_+^2) \right) \rho_T + 2 \left(f_1^2 M_-^2 (M_+^2 - q^2) + g_1^2 M_+^2 (M_- - q^2) \right) \rho_L \right). \end{aligned}$$

Результаты: cc

$B_1 \rightarrow B_2$	Modes					
	$ \nu_l $	π	ρ	2π	3π	5π
$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+$	0.494	0.22	0.993	0.865	0.204	2.7×10^{-4}
$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Sigma_c^+$	0.45	0.175	1.05	0.905	0.186	$9. \times 10^{-5}$
$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+$	4.99	4.84	12.3	10.2	0.989	3.9×10^{-4}
$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^{\prime+}$	5.98	4.02	17.6	14.3	1.31	5.6×10^{-4}
$\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Sigma_c^0$	0.299	0.117	0.698	0.601	0.123	$6. \times 10^{-5}$
$\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^0$	1.65	1.6	4.08	3.37	0.328	1.3×10^{-4}
$\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^{\prime0}$	1.98	1.34	5.86	4.74	0.434	1.9×10^{-4}
$\Omega_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^0$	0.208	0.171	0.512	0.425	0.0492	$2. \times 10^{-5}$
$\Omega_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^{\prime0}$	0.249	0.142	0.711	0.584	0.0649	$3. \times 10^{-5}$
$\Omega_{cc}^+ \rightarrow \Omega_c^0$	6.66	6.5	22.6	17.1	0.735	2.1×10^{-4}

Таблица: Относительные вероятности распадов дважды очарованных барионов в процентах

Результаты: bc

$\mathcal{B}_1 \rightarrow \mathcal{B}_2$	Modes					
	$l\nu_l$	π	ρ	2π	3π	5π
$\Xi_{bc}^+ \rightarrow \Lambda_b^0$	0.223	0.0255	0.486	0.417	0.0836	$7. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^+ \rightarrow \Sigma_b^0$	0.148	0.0174	0.403	0.335	0.0444	$2. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^+ \rightarrow \Xi_b^0$	2.3	0.54	5.84	4.78	0.414	1.7×10^{-4}
$\Xi_{bc}^0 \rightarrow \Sigma_b^-$	0.112	0.0132	0.306	0.254	0.0332	$2. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^0 \rightarrow \Xi_b^-$	0.868	0.206	2.21	1.8	0.155	$7. \times 10^{-5}$
$\Omega_{bc}^0 \rightarrow \Xi_b^-$	0.254	0.0223	0.511	0.444	0.104	1.3×10^{-4}
$\Omega_{bc}^0 \rightarrow \Omega_b^-$	6.03	0.711	16.6	13.7	1.68	7.1×10^{-4}
$\Xi_{bc}^+ \rightarrow \Sigma_c^{++}$	0.0035	1.5×10^{-6}	2.37×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.4×10^{-4}	$9. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^+ \rightarrow \Xi_{cc}^{++}$	1.58	0.00465	0.438	0.437	0.2	0.0544
$\Xi_{bc}^0 \rightarrow \Lambda_c^+$	$3. \times 10^{-4}$	$3. \times 10^{-7}$	4.3×10^{-5}	$5. \times 10^{-5}$	$3. \times 10^{-5}$	$1. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^0 \rightarrow \Sigma_c^+$	$7. \times 10^{-4}$	2.9×10^{-7}	4.6×10^{-5}	$6. \times 10^{-5}$	$3. \times 10^{-5}$	$2. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bc}^0 \rightarrow \Xi_{cc}^+$	0.603	0.00177	0.167	0.166	0.0761	0.0207
$\Omega_{bc}^0 \rightarrow \Xi_c^+$	$5. \times 10^{-4}$	5.5×10^{-7}	8.8×10^{-5}	$1. \times 10^{-4}$	$5. \times 10^{-5}$	$2. \times 10^{-5}$
$\Omega_{bc}^0 \rightarrow \Omega_{cc}^+$	1.87	0.00384	0.429	0.433	0.199	0.061

Таблица: Относительные вероятности распадов bc барионов в процентах

Результаты: bb

$\mathcal{B}_1 \rightarrow \mathcal{B}_2$	Modes					
	$ \nu_l $	π	ρ	2π	3π	5π
$\Xi_{bb}^0 \rightarrow \Sigma_b^+$	0.0043	7.7×10^{-7}	4.34×10^{-4}	4.8×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}
$\Xi_{bb}^0 \rightarrow \Xi_{bc}^+$	2.59	0.00198	0.568	0.577	0.272	0.088
$\Xi_{bb}^0 \rightarrow \Xi_{bc}^{'+}$	1.15	3.28×10^{-4}	0.128	0.141	0.0734	0.0388
$\Xi_{bb}^- \rightarrow \Lambda_b^0$	0.0011	4.8×10^{-7}	2.23×10^{-4}	2.3×10^{-4}	1.2×10^{-4}	$4. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bb}^- \rightarrow \Sigma_b^0$	0.0022	3.9×10^{-7}	2.18×10^{-4}	2.4×10^{-4}	1.3×10^{-4}	$7. \times 10^{-5}$
$\Xi_{bb}^- \rightarrow \Xi_{bc}^0$	2.62	0.00199	0.572	0.582	0.274	0.0889
$\Xi_{bb}^- \rightarrow \Xi_{bc}^{'0}$	1.16	3.27×10^{-4}	0.128	0.141	0.0733	0.0389
$\Omega_{bb}^- \rightarrow \Xi_b^0$	0.002	9.5×10^{-7}	4.51×10^{-4}	4.6×10^{-4}	2.3×10^{-4}	$7. \times 10^{-5}$
$\Omega_{bb}^- \rightarrow \Xi_b^{'0}$	0.0044	7.7×10^{-7}	4.53×10^{-4}	$5. \times 10^{-4}$	2.6×10^{-4}	1.3×10^{-4}
$\Omega_{bb}^- \rightarrow \Omega_{bc}^0$	4.81	0.004	1.13	1.15	0.542	0.167
$\Omega_{bb}^- \rightarrow \Omega_{bc}^{'0}$	2.13	6.58×10^{-4}	0.256	0.281	0.148	0.0747

Таблица: Относительные вероятности распадов bb барионов в процентах

Внутренний чарм протона

Наблюдение резонансов в моде J/Ψ p

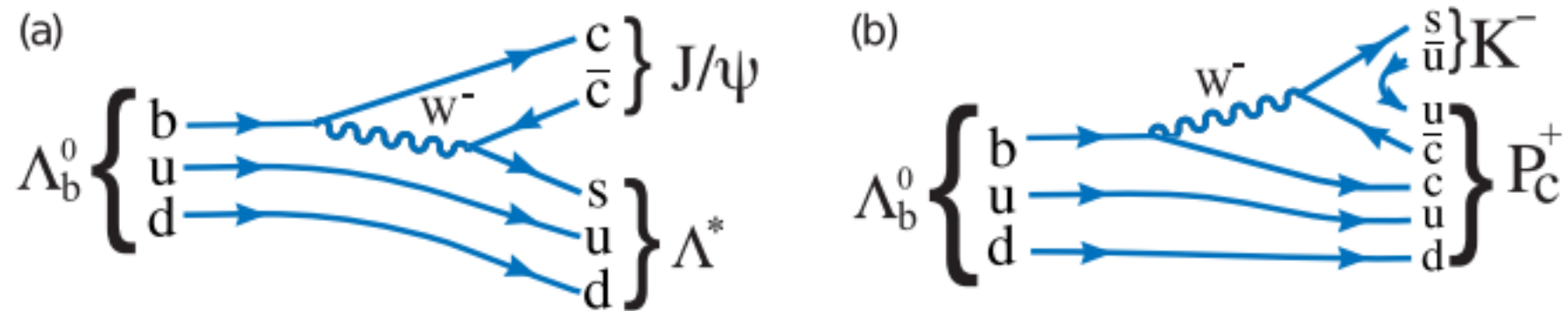


Figure 1: Feynman diagrams for (a) $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*$ and (b) $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-$ decay.

Наблюдение резонансов в моде $J/\psi p$

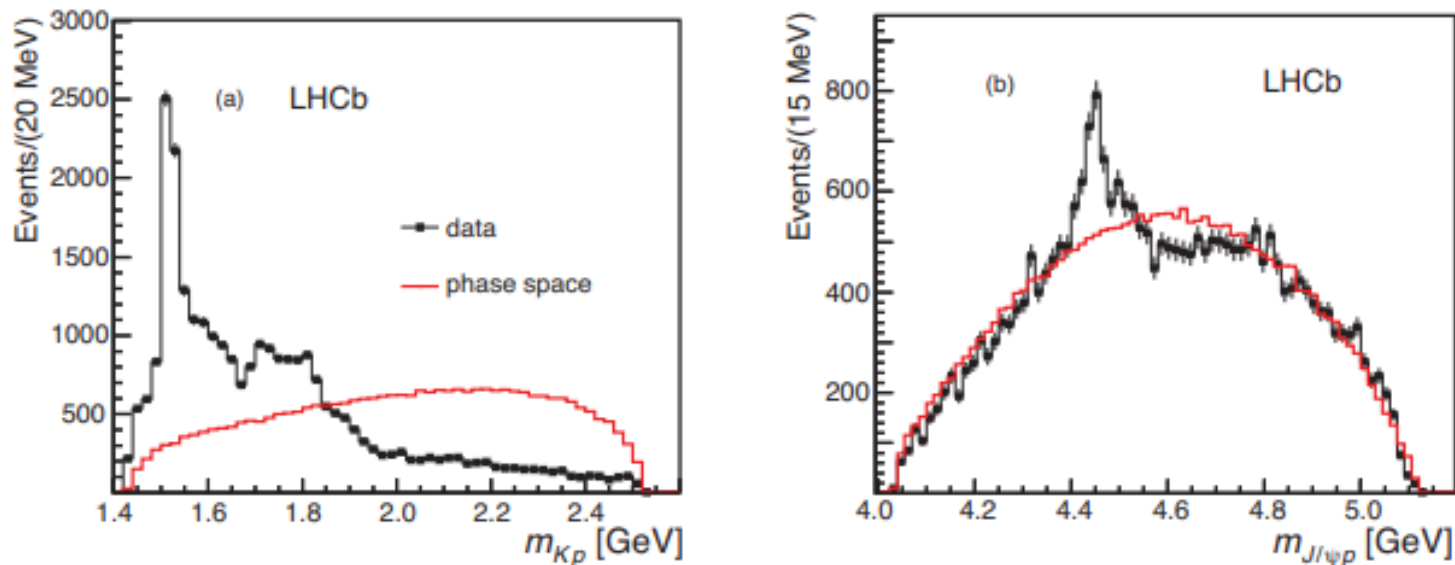
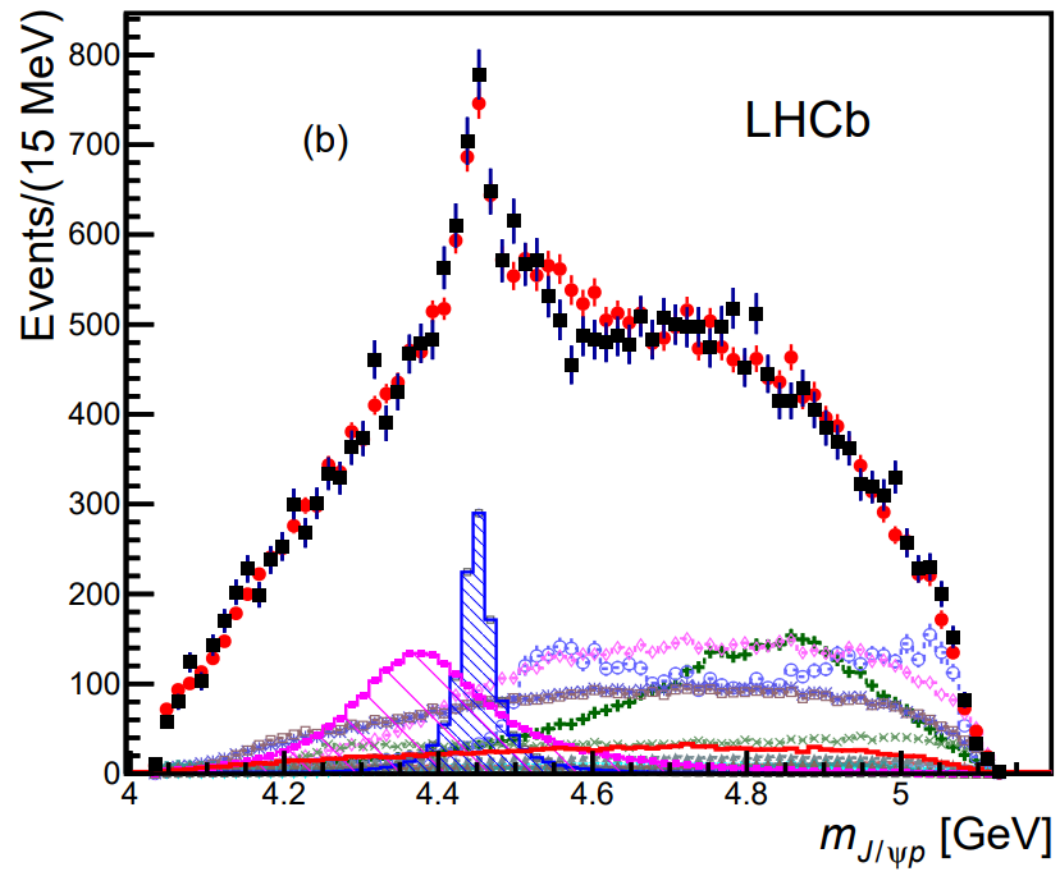


Figure 2: Invariant mass of (a) $K^- p$ and (b) $J/\psi p$ combinations from $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays. The solid (red) curve is the expectation from phase space. The background has been subtracted.

Наблюдение резонансов в моде $J/\psi p$



Наблюдение резонансов в моде J/Ψ p

$$P_c(4312)^+ (M = 4311.9 \pm 0.7_{-0.6}^{+6.8} \text{ MeV}, \Gamma = 9.8 \pm 2.7_{-4.5}^{+3.7} \text{ MeV}),$$

$$P_c(4440)^+ (M = 4440.3 \pm 1.3_{-4.7}^{+4.1} \text{ MeV}, \Gamma = 20.6 \pm 4.9_{-10.1}^{+8.7} \text{ MeV}),$$

$$P_c(4457)^+ (M = 4457.3 \pm 0.6_{-1.7}^{+4.1} \text{ MeV}, \Gamma = 6.4 \pm 2.0_{-1.9}^{+5.7} \text{ MeV}),$$

Резонансы: интерпретация

- Пентакварковое состояние
- Молекула
- Различные особенности
 - Cusp effect
 - Треугольные диаграммы

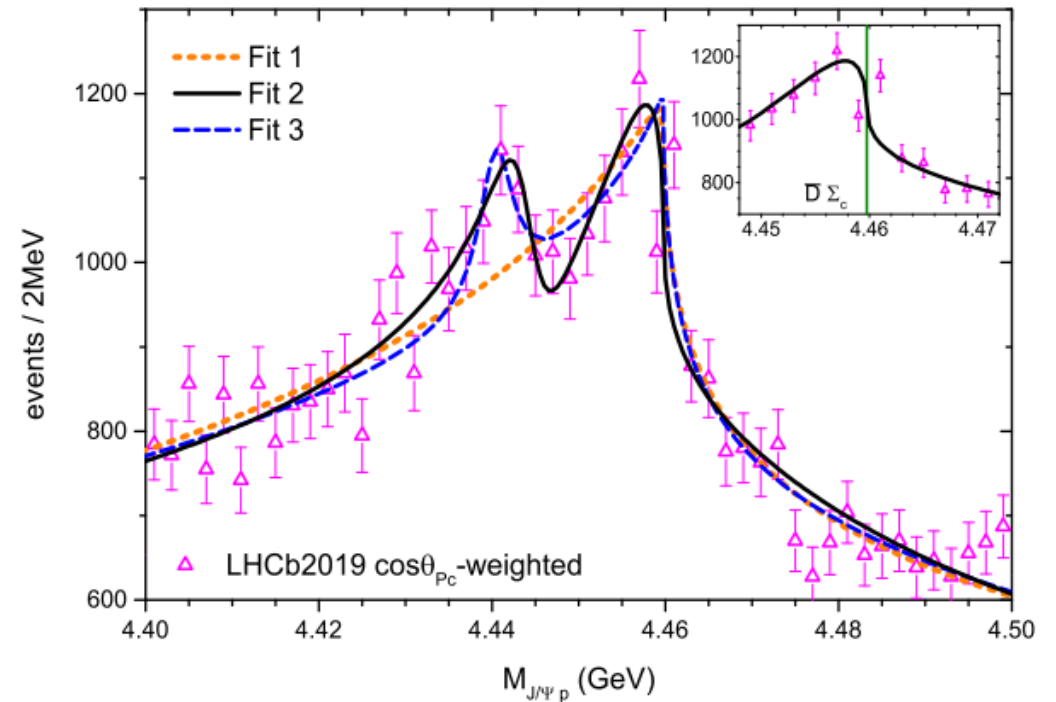


FIG. 2: Fit of the $J/\Psi p$ spectroscopy of $\Lambda_b \rightarrow J/\Psi p K^-$ for enlarged size around $P_c(4440)$ and $P_c(4457)$.

Intrinsic charm: модель Бродского

$|p\rangle = A_0|uud\rangle + A_1|uudc\bar{c}\rangle + \dots$, где $|A_1|^2$ — ненулевая вероятность существования внутренних $c\bar{c}$ -пар

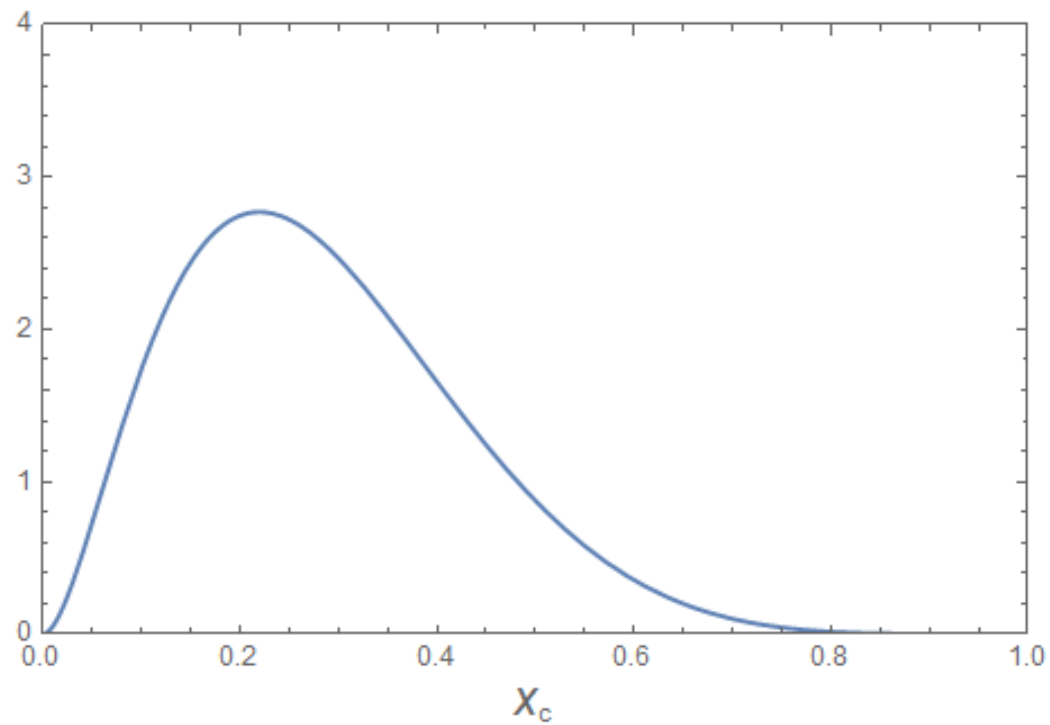
$$G(A \rightarrow B_1 \dots B_n) = \left| \frac{\langle B_1 \dots B_n | M | A \rangle}{E_A - E_{B_1} - \dots - E_{B_n}} \right|^2$$

$$E_i = p_i + \frac{m_i^2}{2p_i}$$

$$G(x_{u_1}, x_{u_2}, x_d, x_c, x_{\bar{c}}) \sim \left(M_p^2 - \sum_{i=u_1, u_2, d, c, \bar{c}} \frac{m_{\perp i}^2}{x_i} \right)^{-2}$$

Распределение с-кварков в протоне

$$G_c(x_c) \sim x_c^2 \left[(1 - x_c)(1 + 10x_c + x_c^2) - 6x_c(1 + x_c) \ln \frac{1}{x_c} \right]$$



Проблемы внутреннего чарма протона

- Теория носит чисто пертурбативный характер, кварки рождаются из глюонов
- Распределения для D^+ и D^- в эксперименте несимметричны
- Неизвестна абсолютная нормировка распределения кварков

Смешивание пентакварка с протоном

$$|p\rangle' = |p\rangle + \varepsilon|P_c\rangle;$$

$$\begin{pmatrix} M_p & V \\ V & M_{P_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |X_1\rangle \\ |X_2\rangle \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} |X_1\rangle \\ |X_2\rangle \end{pmatrix};$$

Модель Кути-Вайскопфа

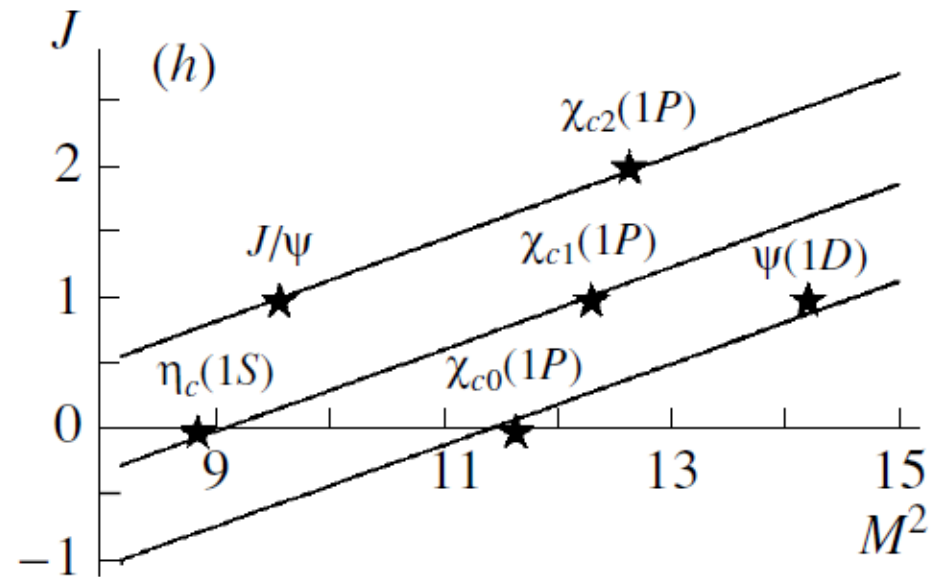
$$G(x_1, \dots, x_n) \sim \prod_{i=1}^m x_i^{1-\alpha_i} \prod_{i=1}^n \frac{dx_i}{x_i} \delta \left(1 - \sum_{i=1}^n x_i \right)$$

$$G_q^{P_c}(x_q) \sim x_q^{-\alpha_q} (1 - x_q)^{-1+\gamma+2(1-\alpha_q)+2(1-\alpha_c)}$$

$$G_c^{P_c}(x_c) \sim x_c^{-\alpha_c} (1 - x_c)^{-1+\gamma+3(1-\alpha_q)+(1-\alpha_c)}$$

Пересечение Редже траекторий в нуле

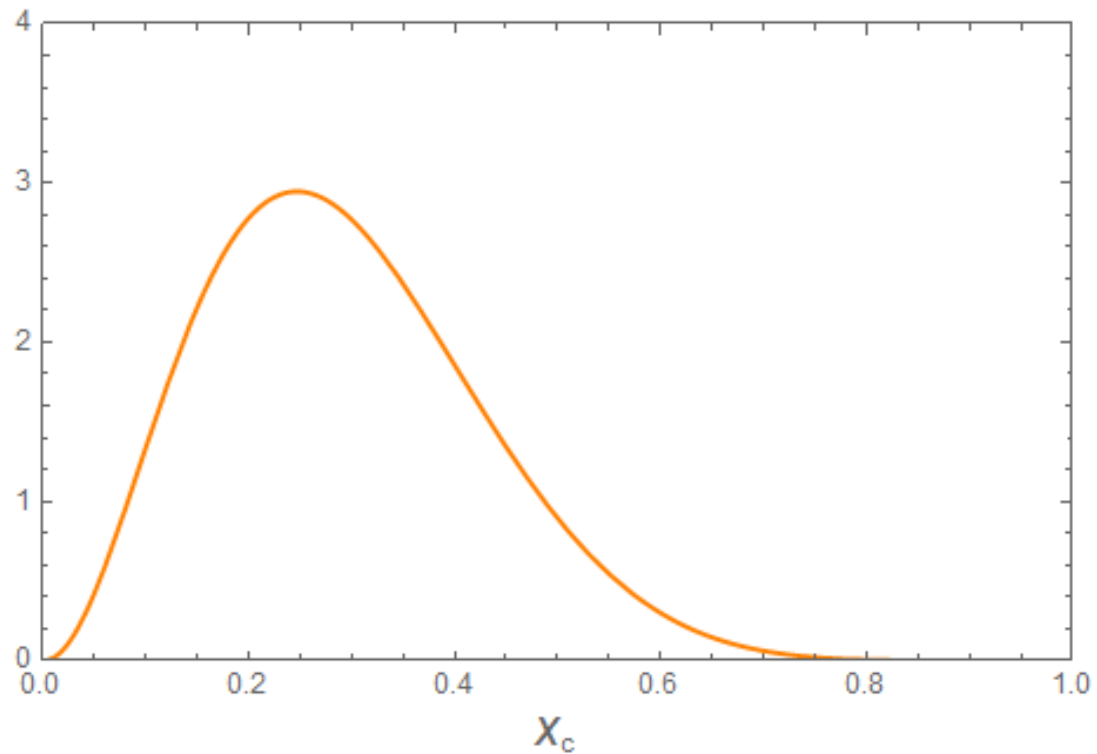
- $\alpha_c = -2.2$
- $\alpha_q = 0.5$
- $\alpha_s = 0$
- $\alpha_b = -8$



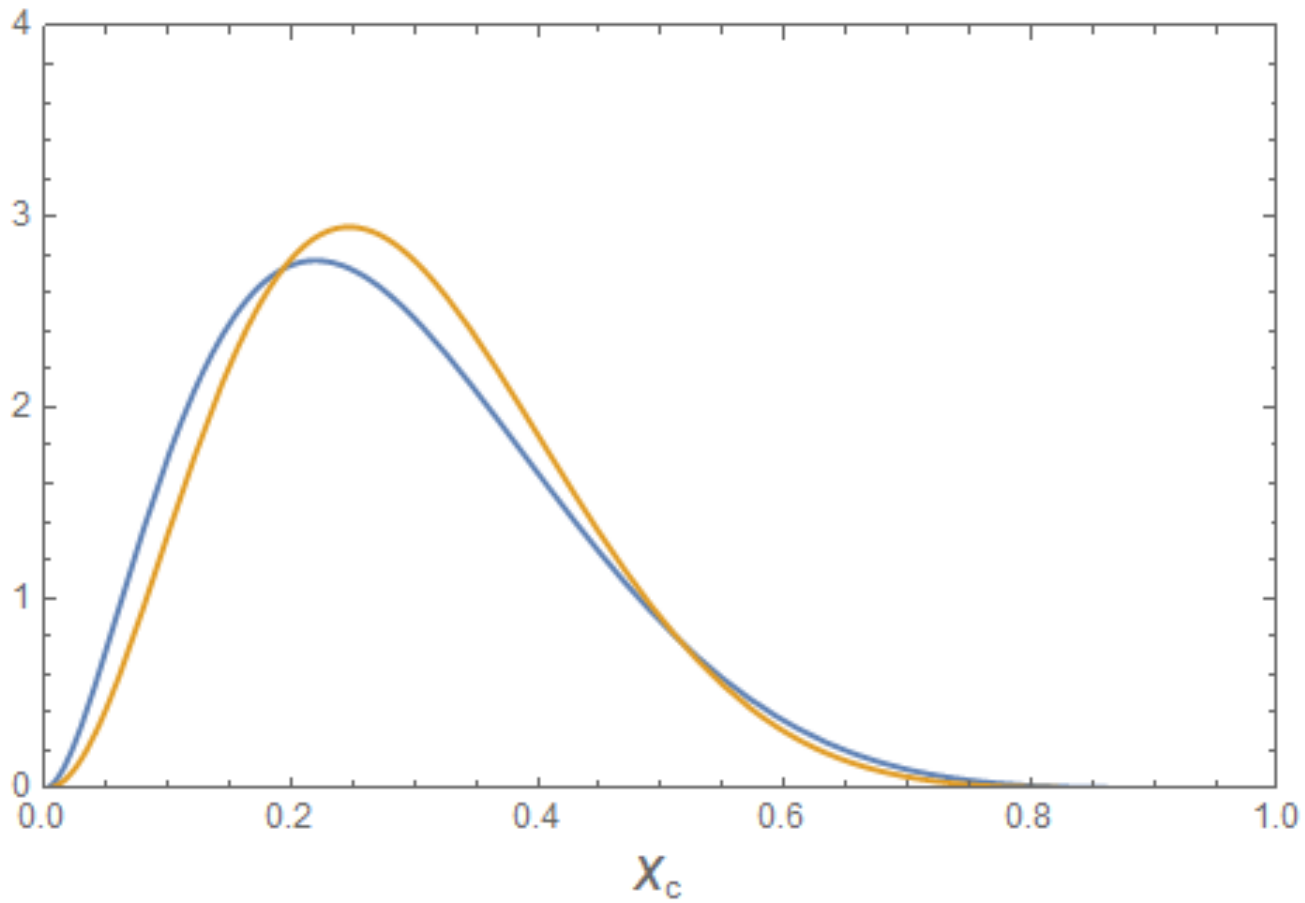
$$J = \alpha(M^2) = \alpha' M^2 + \alpha(0).$$

$$\alpha' = 1/\mu_{c\bar{c}}^2.$$

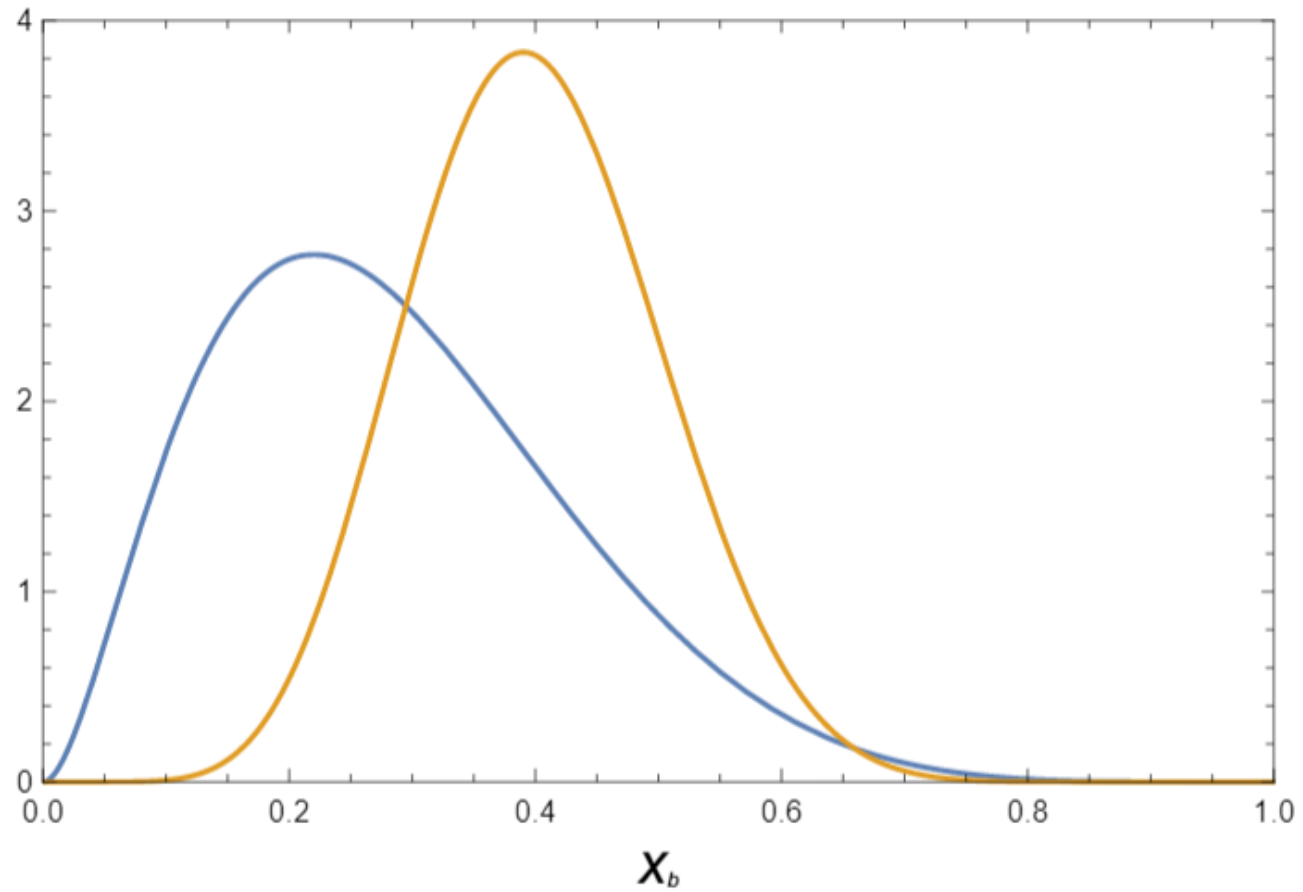
Распределение валентных с-кварков в пентакварке



Сравнение распределений с-кварков



Сравнение распределений b-кварков



Смешивание пентакварка с протоном

$$\begin{pmatrix} M_p & V \\ V & M_{P_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |X_1\rangle \\ |X_2\rangle \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} |X_1\rangle \\ |X_2\rangle \end{pmatrix}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{M_p + M_{P_c} \pm \sqrt{(M_p - M_{P_c})^2 + 4V^2}}{2}$$

$$\lambda_1 = M_p + \frac{V^2}{M_{P_c} - M_p},$$

$$\lambda_2 = M_{P_c} - \frac{V^2}{M_{P_c} - M_p}.$$

Смешивание: ограничение на присутствие с-кварка в протоне

$$|p\rangle' = |p\rangle + \varepsilon|P_c\rangle,$$

$$\varepsilon = \frac{V}{M_{P_c} - M_p},$$

$$V \lesssim \Gamma_{P_c}$$

$$P_c(4312)^+ (M = 4311.9 \pm 0.7_{-0.6}^{+6.8} \text{ MeV}, \Gamma = 9.8 \pm 2.7_{-4.5}^{+3.7} \text{ MeV}),$$

$$P_c(4440)^+ (M = 4440.3 \pm 1.3_{-4.7}^{+4.1} \text{ MeV}, \Gamma = 20.6 \pm 4.9_{-10.1}^{+8.7} \text{ MeV}),$$

$$P_c(4457)^+ (M = 4457.3 \pm 0.6_{-1.7}^{+4.1} \text{ MeV}, \Gamma = 6.4 \pm 2.0_{-1.9}^{+5.7} \text{ MeV}),$$

Смешивание: ограничение на присутствие с-кварка в протоне

$$\varepsilon \lesssim \frac{\Gamma_{P_c}}{M_{P_c} - M_p}$$

$$\varepsilon \lesssim \frac{9.8 \text{ МэВ}}{4312 \text{ МэВ} - 938 \text{ МэВ}} \approx 3 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon^2 \lesssim 10^{-5}$$

Смешивание протона с пентакварком

- Полученная модель непертурбативна
- Распределения валентных кварков строго нормированы
- Получено новое ограничение на присутствие с-кварка в протоне

Спасибо за внимание!

Буду рад ответить на ваши вопросы