

Литературный обзор
к диссертации на тему
«Исследование распадов B_c^+ мезона*»»

Аспирант: Колов Александр Михайлович
Научный руководитель: Чистов Руслан Николаевич

*тема будет сформулирована иначе

Содержание

- ep упругое рассеяние и форм-факторы
- кварки и цвет
- открытие чармония
- СКМ и b -физика
- открытие B_c
- $R_{\psi(2S)/J/\psi}$.

Состояние физики к 1950

- атомное ядро уже описывается как система протонов и нейтронов;
- нейтрон открыт Чедвиком в 1932 году;
- кварковой модели ещё нет;
- КХД и Стандартной модели ещё нет;
- протон и нейтрон воспринимаются как базовые нуклоны.
- Но уже были признаки, что нуклоны не являются простыми точечными частицами.
- Для точечной дираковской частицы со спином $1/2$:
$$\mu_p^{\text{Dirac}} = \mu_N, \quad \mu_n^{\text{Dirac}} = 0.$$
- Экспериментально:
$$\mu_p \simeq 2.79 \mu_N, \quad \mu_n \simeq -1.91 \mu_N.$$
- **Вывод:** у нуклонов есть нетривиальное распределение заряда и магнитного момента.

Электрон-протонное рассеяние

Цель: измерить пространственную электромагнитную структуру протона.

- Упругое рассеяние:

$$e^- + p \rightarrow e^- + p.$$

- Протон остаётся протоном, но электрон передаёт ему импульс:

$$q = p_e - p_{e'}, \quad Q^2 = -q^2.$$

Электрон:

- на этих масштабах он практически точечный;
- взаимодействует электромагнитно, а не сильно;
- электромагнитная вершина хорошо известна;
- изменяя E и θ , можно менять пространственное разрешение.

Оценка разрешения:

$$\Delta r \sim \frac{\hbar}{|\vec{q}|}.$$

Большой Q^2 соответствует меньшим размерам структур.

В эксперименте измеряли кинематику рассеянного электрона:

$$E, \quad E', \quad \theta.$$

Для упругого ep -рассеяния:

$$Q^2 = 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

Если протон точечный, сечение должно следовать точечной электромагнитной формуле, но данные показали отклонение:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{exp}} \neq \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{point}}.$$

Это отклонение записывают через форм-факторы:

$$G_E(Q^2), \quad G_M(Q^2).$$

Estermann, R. Frisch, O. Stern, "Magnetic Moment of the Proton", Nature 132, 169-170 (1933).

Estermann, R. Frisch, O. Stern, "The Magnetic Moment of the Proton", Phys. Rev. 52, 535 (1937).

L. W. Alvarez, F. Bloch, "A Quantitative Determination of the Neutron Moment in Absolute Nuclear Magnetons", Phys. Rev. 57, 111 (1940).

R. W. McAllister, R. Hofstadter, "Elastic Scattering of 188-MeV Electrons from the Proton and the Alpha Particle", Phys. Rev. 102, 851 (1956)

R. Hofstadter, "Electron Scattering and Nuclear Structure", Rev. Mod. Phys. 28, 214 (1956)

Форм-факторы

- При малых Q^2 электрический форм-фактор связан с радиусом:

$$G_E(Q^2) = 1 - \frac{Q^2}{6} \langle r_E^2 \rangle + \mathcal{O}(Q^4),$$
$$\langle r_E^2 \rangle = -6 \left. \frac{dG_E}{dQ^2} \right|_{Q^2=0}.$$

- **Физический смысл:** форм-фактор описывает не точечную вершину, а распределённую структуру связанного состояния.

$$\langle \text{адрон}_f | J^\mu | \text{адрон}_i \rangle$$

Кварковая модель адронов

- **Кварковая модель:** Gell-Mann и Zweig, 1964.
мезоны: $q\bar{q}$, барионы: qqq .

- **Проблема:**

$$\Omega^- = sss, \quad J = \frac{3}{2}.$$

- **Решение:** дополнительное квантовое число

КХД

$SU(3)_{\text{color}}$

- Асимптотическая свобода:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{4\pi}{\beta_0 \ln(Q^2/\Lambda_{\text{QCD}}^2)}, \quad \beta_0 = 11 - \frac{2}{3}n_f.$$

Следствие: при больших Q^2 кварковое описание работает лучше, а при адронных масштабах важна непертурбативная динамика.

Cabibbo, GIM и charm

- **Cabibbo, 1963:**

$$d_C = d \cos \theta_C + s \sin \theta_C.$$

N. Cabibbo, "Unitary Symmetry and Leptonic Decays", Phys. Rev. Lett. 10, 531 (1963), DOI: 10.1103/PhysRevLett.10.531.

- **GIM, 1970:** подавление FCNC требует charm-кварк.

$$\begin{pmatrix} u \\ d_C \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s_C \end{pmatrix}.$$

S. L. Glashow, J. Iliopoulos, L. Maiani, "Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry", Phys. Rev. D 2, 1285 (1970), DOI: 10.1103/PhysRevD.2.1285.

- **Что нашли в 1974:** узкий резонанс J/ψ .
 $J/\psi = c\bar{c}$.

J. J. Aubert et al., "Experimental Observation of a Heavy Particle J ", Phys. Rev. Lett. 33, 1404-1406 (1974), DOI: 10.1103/PhysRevLett.33.1404J.-E. Augustin et al., "Discovery of a Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation", Phys. Rev. Lett. 33, 1406-1408 (1974), DOI: 10.1103/PhysRevLett.33.1406

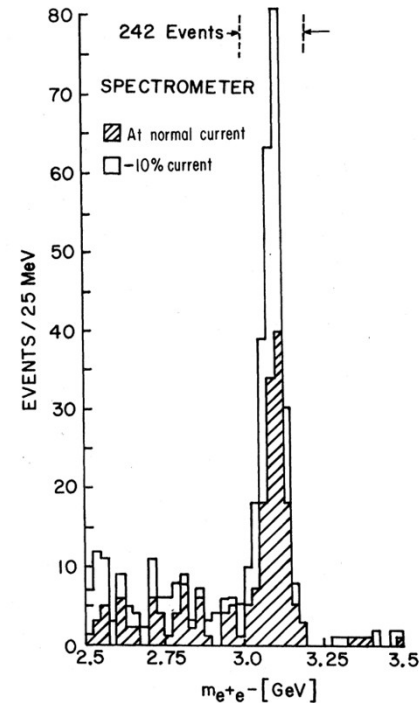
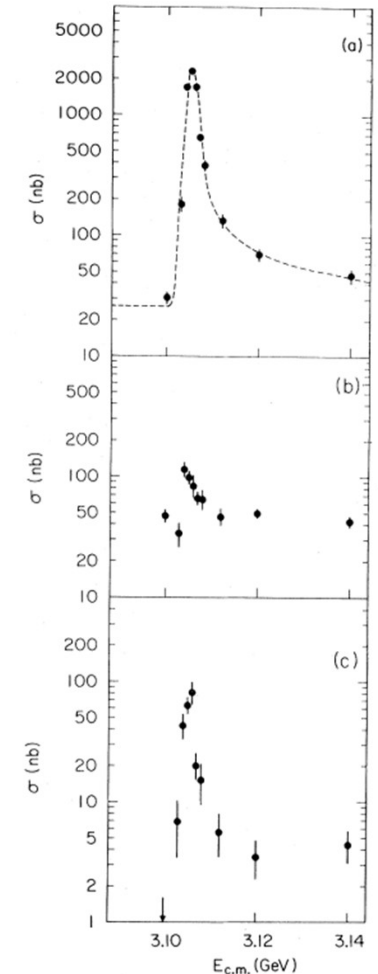


FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.



$\psi(2S)$

- После J/ψ в e^+e^- -аннигиляции был найден второй узкий резонанс:

$$\psi(2S) \equiv \psi'.$$

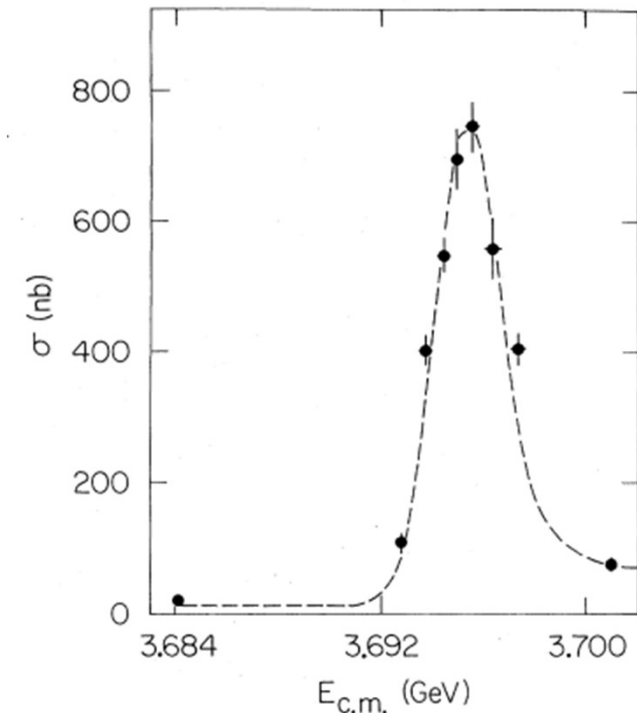
- **SLAC/SPEAR, 1974:**

$$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$$

показал второй пик около 3.7 GeV.

- **Интерпретация:** первое радиальное возбуждение charmonium.

$$J/\psi: 1^3S_1, \quad \psi(2S): 2^3S_1.$$

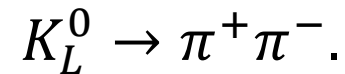


G. S. Abrams et al., "Discovery of a Second Narrow Resonance in e^+e^- Annihilation", *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1453–1455 (1974), DOI: 10.1103/PhysRevLett.33.1453.

3 поколение

- **CP-нарушение в каонах:**

J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, "Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson", Phys. Rev. Lett. 13, 138 (1964), DOI: 10.1103/PhysRevLett.13.138.



Если бы CP была точной симметрией распад бы не наблюдался

Число физических CP-фаз:

$$N_{\text{phases}} = \frac{(N - 1)(N - 2)}{2}.$$

Kobayashi–Maskawa, 1973: физическая CP-фаза в матрице смешивания появляется при

$$N \geq 3.$$

Нужно 3 поколение

M. Kobayashi, T. Maskawa, "CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction", Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1973), DOI: 10.1143/PTP.49.652.

От СКМ к b -кварку и B -физике

- СКМ-смешивание:

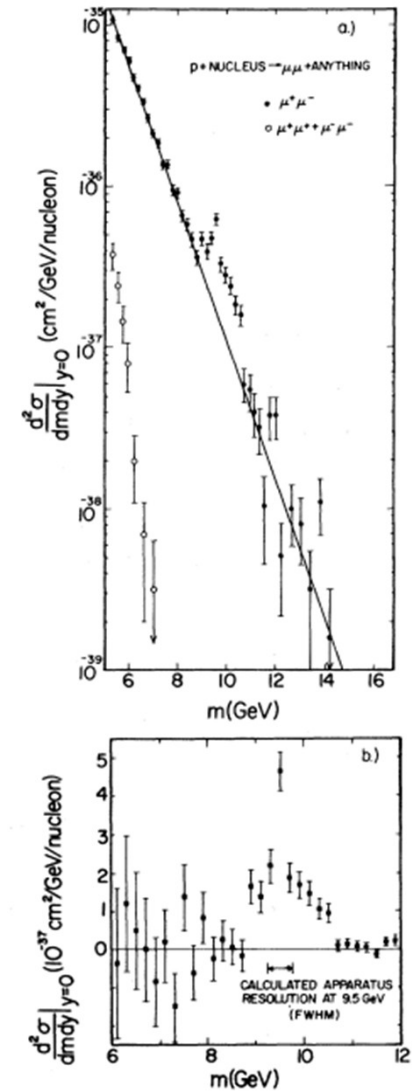
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V_{\text{СКМ}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

- **Что нашли в 1977:** резонанс Υ в Fermilab.
 $\Upsilon = b\bar{b}$.

S. W. Herb et al., "Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions", Phys. Rev. Lett. 39, 252 (1977), DOI: 10.1103/PhysRevLett.39.252.

- **Обычные heavy-light B -мезоны:**

$$B^+ = \bar{b}u, \quad B^0 = \bar{b}d, \quad B_s^0 = \bar{b}s.$$



Открытие B_c^+

После открытия c - и b -кварков ожидалось состояние $\bar{b}c$

Основное состояние лежит ниже порога открытых B - и D -мезонов:

$$m(B_c) < m_B + m_D.$$

Поэтому сильный распад основного состояния запрещён.

- **CDF, 1998:**

$$p\bar{p}, \quad \sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}.$$

$$B_c^\pm \rightarrow J/\psi \ell^\pm \nu.$$

$$N = 20.4_{-5.5}^{+6.2}, \quad 4.8\sigma.$$

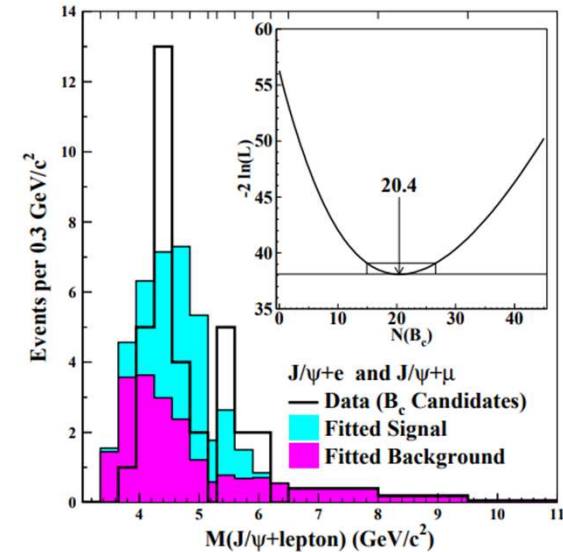


FIG. 1. Histogram of the $J/\psi \ell$ mass that compares the signal and background contributions determined in the likelihood fit to the combined data for $J/\psi e$ and $J/\psi \mu$. Note that the mass bins vary in width. The total B_c contribution is $20.4_{-5.5}^{+6.2}$ events. The inset shows the behavior of the log-likelihood function $-2 \ln(L)$ vs. the number of B_c mesons.

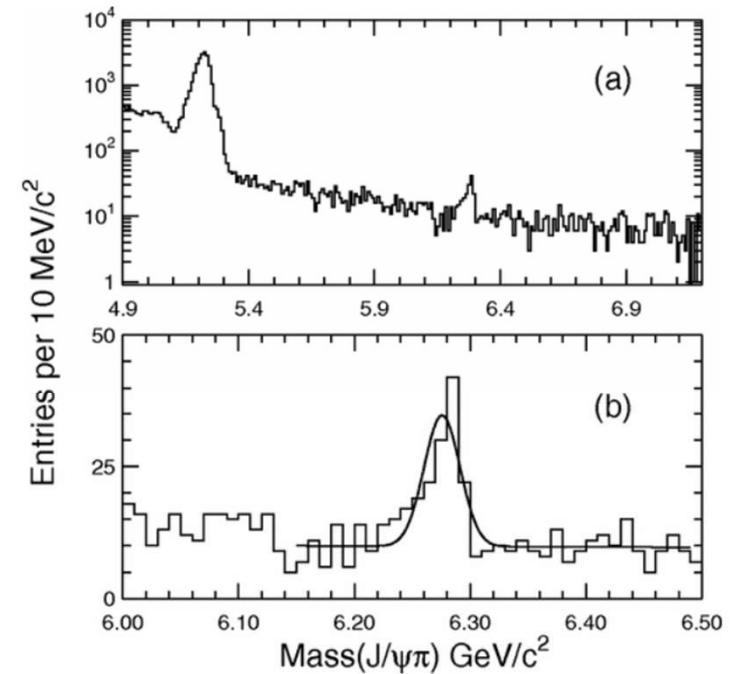
F. Abe et al. [CDF Collaboration], "Observation of the B_c Meson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$ ", *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2432–2437 (1998), DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.2432.

Полное восстановление B_c^\pm

$$B_c^\pm \rightarrow J/\psi\pi^\pm$$

- **CDF, 2008:**

$$N = 108 \pm 15, \quad > 8\sigma$$
$$m(B_c) = 6275.6 \pm 2.9_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}} \text{ MeV.}$$



(a) The invariant mass distribution of $J/\psi\pi^\pm$ combinations. The large enhancement near 5.2 GeV/c^2 is due to $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ candidates, which have been reconstructed with an incorrect mass assignment for the K^\pm . (b) Identical to (a), but in a narrower mass range around the theoretically favored B_c^\pm mass. The projection of the fit to the data is indicated by the curve overlaid on (b).

T. Aaltonen et al. [CDF Collaboration], "Observation of the Decay $B_c^\pm \rightarrow J/\psi\pi^\pm$ and Measurement of the B_c^\pm Mass", **Phys. Rev. Lett.** **100**, 182002 (2008), DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.182002.

Связь с теорией

- Экспериментальная величина:

$$R_{\psi(2S)/J/\psi} = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+)}{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)}.$$

- Связь с теорией:

$$R_{\psi(2S)/J/\psi} \approx \frac{p_{\psi(2S)}^3}{p_{J/\psi}^3} \left| \frac{A_0^{B_c \rightarrow \psi(2S)}(m_\pi^2)}{A_0^{B_c \rightarrow J/\psi}(m_\pi^2)} \right|^2$$

Чармоний: $J/\psi: 1^3S_1$, $\psi(2S): 2^3S_1$.

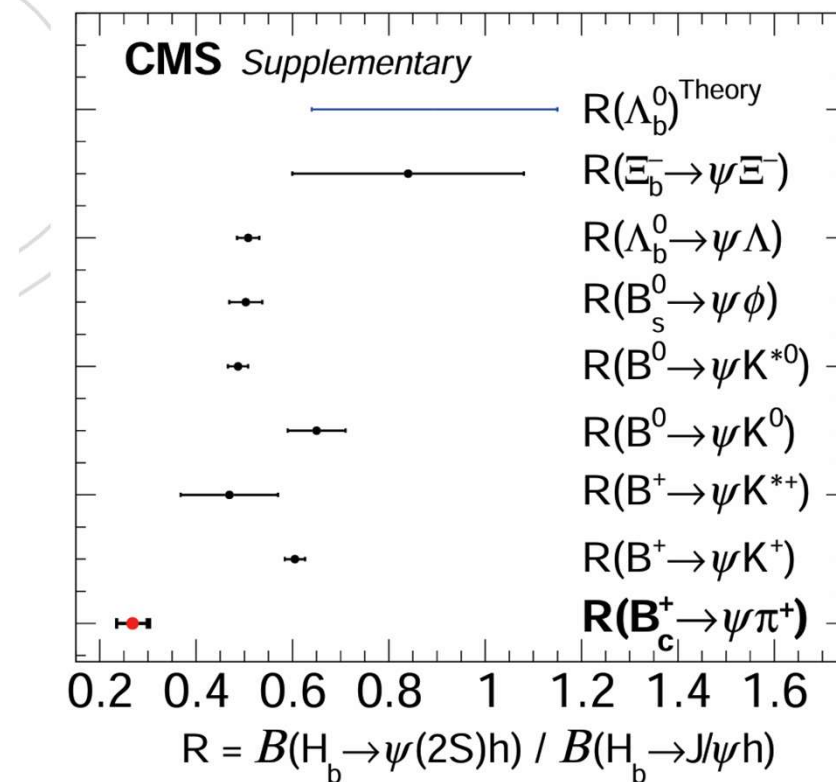
Оба состояния имеют

$$J^{PC} = 1^{--}.$$

$\psi(2S)$ — радиальное возбуждение. В потенциальной картине радиальная волновая функция имеет узел:

$R_{2S}(r)$ меняет знак.

Следствие: переход $B_c \rightarrow \psi(2S)$ чувствительнее к деталям волновых функций и модели форм-фактора.



Результаты LHCb

- **LHCb, CERN LHC, 2013:**
первое наблюдение

$$pp, \quad \sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, \quad \mathcal{L} = 1.0 \text{ fb}^{-1}.$$

$$N_{\psi(2S)\pi} = 20 \pm 5, \quad 5.2\sigma.$$

$$R = 0.250 \pm 0.068_{\text{stat}} \pm 0.014_{\text{syst}} \pm 0.006_{\mathcal{B}}.$$

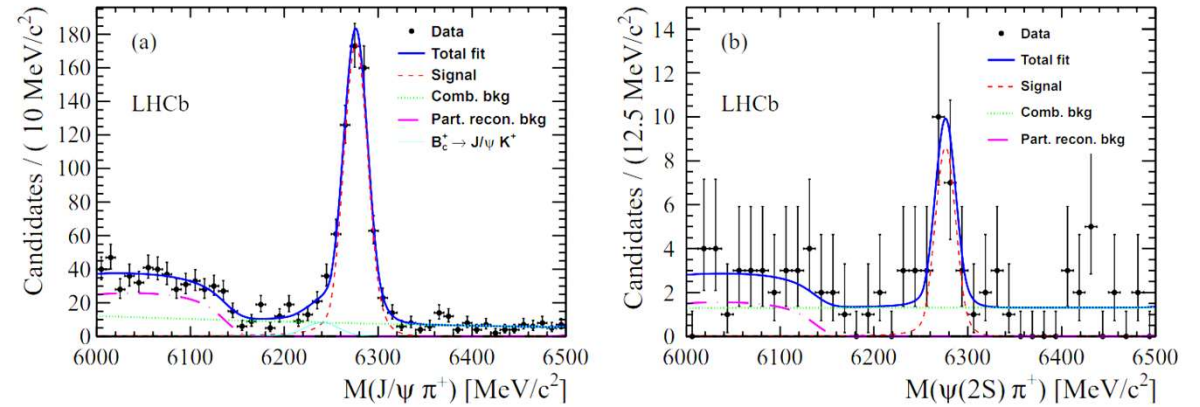


Figure 1: Invariant mass distributions of B_c^+ candidates reconstructed as (a) $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ and (b) $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \pi^+$. Points with error bars (black) show the data, the thick solid line (blue) represents the fit of the data, the dashed line (red) the signal distribution, the dotted line (green) the combinatorial background, the dot-dashed line (purple) the partially reconstructed background, and the thin solid line (light blue) the background from the $B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+$ channel.

Результаты LHCb

- LHCb, CERN LHC, 2015, Run1

$$pp, \quad \sqrt{s} = 7 - 8 \text{ TeV}, \quad \mathcal{L} = 3.0 \text{ fb}^{-1}.$$

$$R = 0.268 \pm 0.032_{\text{stat}} \pm 0.007_{\text{syst}} \pm 0.006_{\text{BF}}.$$

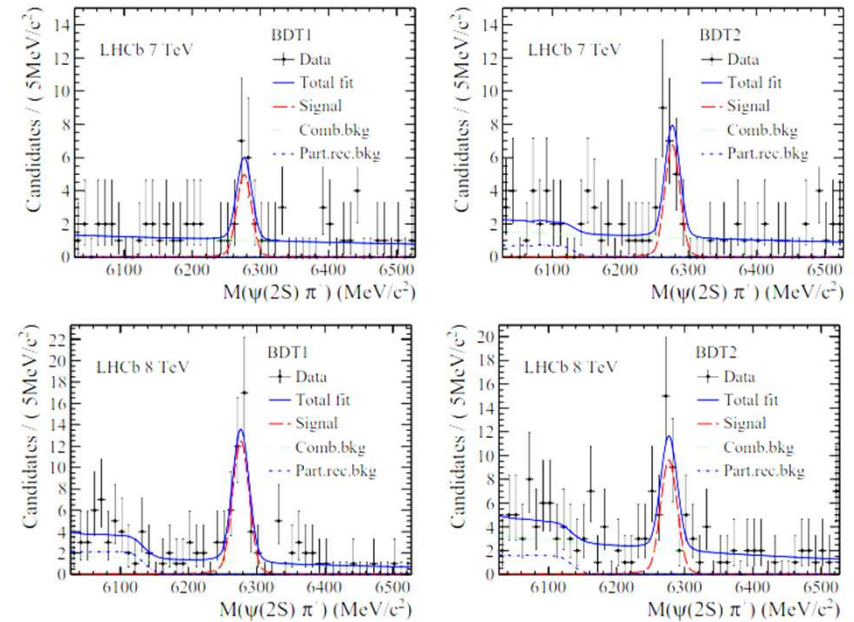


Figure 2: Fit to the reconstructed B_c^+ mass distribution for $B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+$ using (top) 2011 and (bottom) 2012 data samples. The plots on the left (right) correspond to the data selected with BDT1 (BDT2). Black points with error bars represent the data, and the various components are indicated in the keys.

R. Aaij et al. [LHCb Collaboration], “Measurement of the branching fraction ratio $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+)/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)$ ”, **Phys. Rev. D** **92**, 072007 (2015), DOI: 10.1103/PhysRevD.92.072007

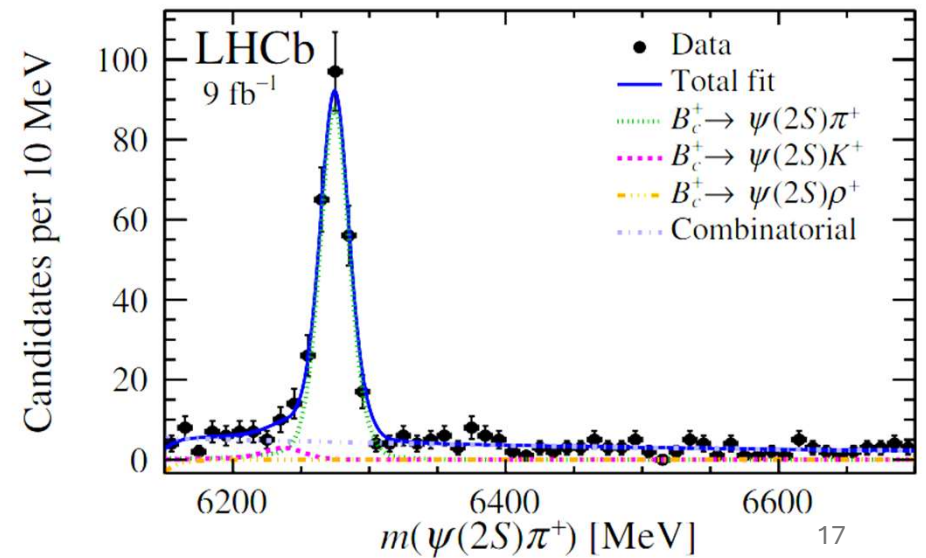
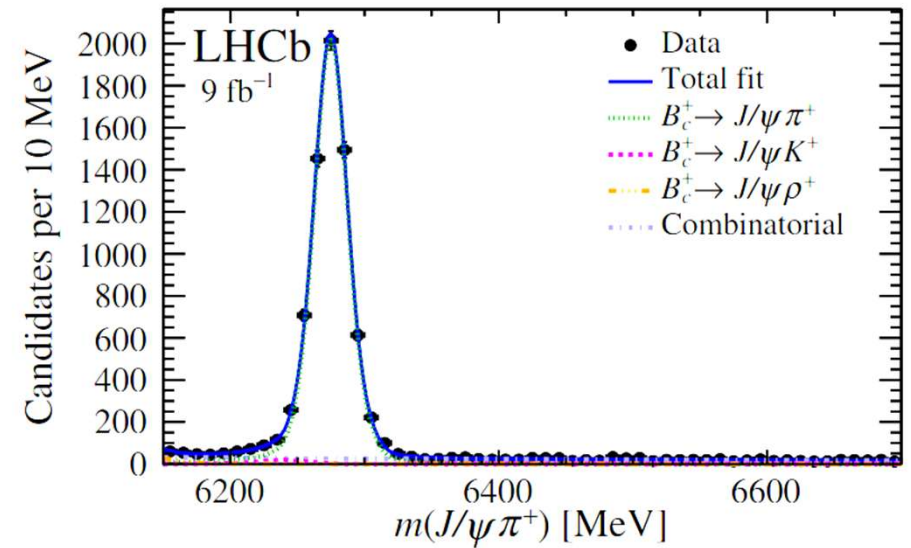
Результаты LHCb

• LHCb, Run 1 + Run 2, 2023/2024:

$$R = 0.254 \pm 0.018_{\text{stat}} \pm 0.003_{\text{syst}} \pm 0.005_{\text{BF}}$$

Это наиболее точное опубликованное измерение данного отношения. Результат согласуется с измерениями LHCb 2013 и 2015 годов.

R. Aaij et al. [LHCb Collaboration], "Search for $B_c^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ decays and measurement of the branching fraction ratio $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+)/\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi\pi^+)$ ", *Eur. Phys. J. C* **84**, 468 (2024)



Зачем измерять еще раз

CMS даёт независимую экспериментальную среду:

- центральная область детектора
- другая геометрия и acceptance
- независимая реконструкция
- другая структура триггеров и фонов
- много событий, можно улучшить точность
- два канала реконструкции $\psi(2S)$.

$$\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-.$$
$$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-, \quad J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-.$$

Спасибо за внимание