



Результаты эксперимента LHCb в 2025 году

Алексей Дзюба

Сессия Ученого совета ОФВЭ

24 декабря 2025 г

В 2025 году вышло 54 статьи LHCb

Bondar N., Chubykin A., Dzyuba A., Ilin D., Kravchenko P., Neustroev P., Sagidova N., Spiridenkov E., Voropaev V.

Физические задачи LHCb

- Проверка предсказания Стандартной Модели (СМ) и эффектов за её пределами путем выполнения **прецизионных измерений в секторе тяжелых ароматов**, используя редкие (подавленные в СМ) распады.
 - **Барионные распады прелестных мезонов**
- Измерение параметром матрицы кваркового смешивания (ККМ-матрица) различными методами. Проверка выполнения условий унитарности.
- **Спектроскопия адронов.** **Поиск** новых адронных состояний, в том числе экзотических (**тетракварков** и пентакварков).
- **Изучение эффектов CP-нарушения известных в СМ, а также поиск новых источников CP-нарушения.**
- Измерения в электротеслах в секторе СМ.
- Изучение столкновения протонов БАК с ядрами как в режиме покоящейся мишени, так и в коллайдерной моде.

Хранение MWPC высокой гранулярности

- Созданы для Мюонной системы LHCb (регион с повышенной загрузкой)
- Камеры изготовлены и находятся на хранении в Отделе Детекторов Излучений
- Для применения их в экспериментах в России необходимо оснастить их электроникой для съема данных



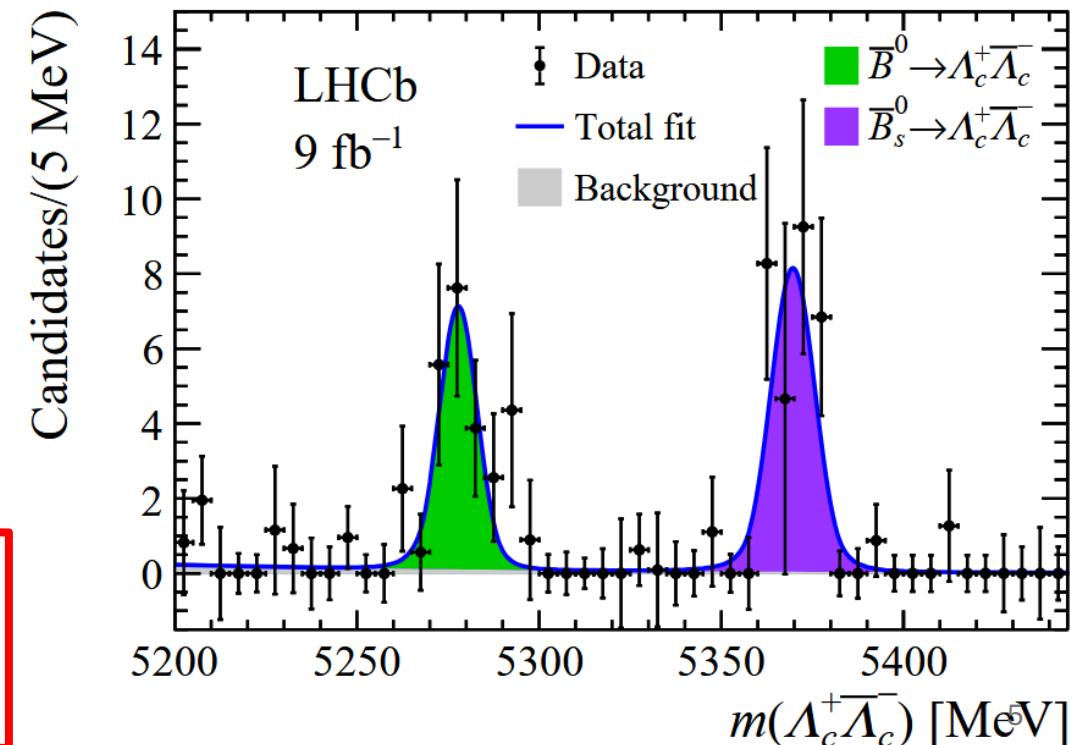
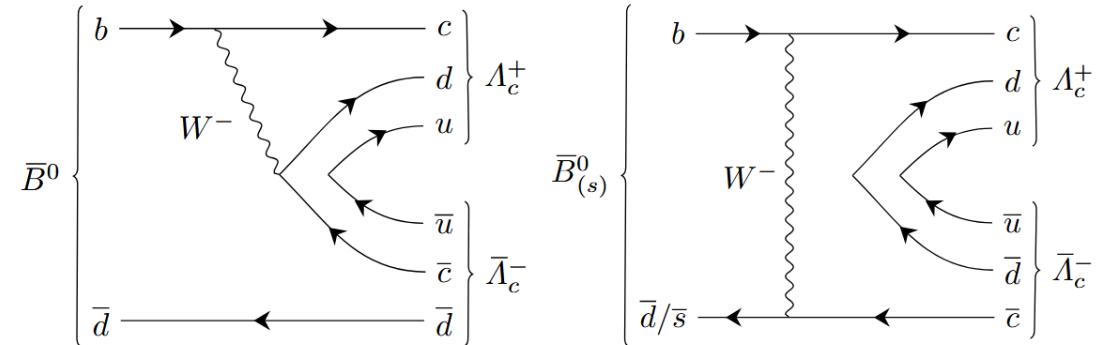
Барионные распады прелестных мезонов

Распады B^0 на 2 очарованных бариона

<https://arxiv.org/pdf/2511.20476>

- Распады В-мезонов в барионные конечные состояния возможны в силу большой массы В.
- Позволяет понять вклад различных диаграмм
- Преимущество эксперимента LHCb – отличная идентификация протонов
 - Детекторные системы RICH1 и RICH2

$$\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-) = (1.01^{+0.27} \pm 0.08 \pm 0.15) \times 10^{-5},$$
$$\mathcal{B}(\bar{B}_s^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-) = (5.0 \pm 1.3 \pm 0.5 \pm 0.8) \times 10^{-5},$$



Распад B^+ на пару протон-гиперон

- Цель определить вклад различных амплитуд в распады В-мезонов

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow p\bar{\Lambda}) = (1.24 \pm 0.17 \pm 0.05 \pm 0.03) \times 10^{-7},$$

$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow p\bar{p}) = (1.25 \pm 0.27 \pm 0.18) \times 10^{-8}$, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 232001

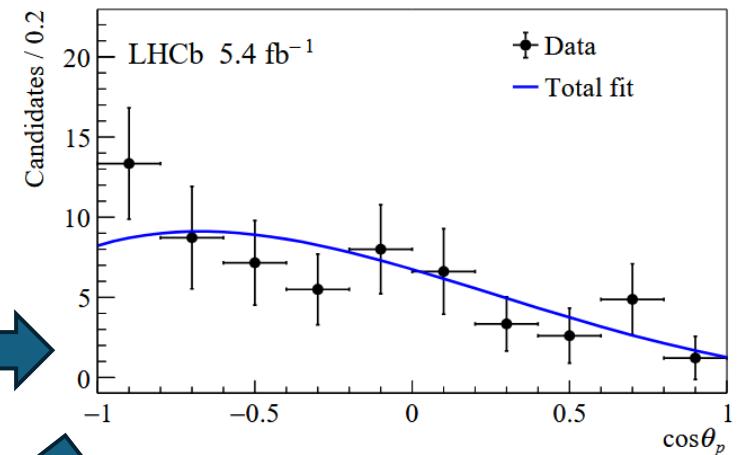
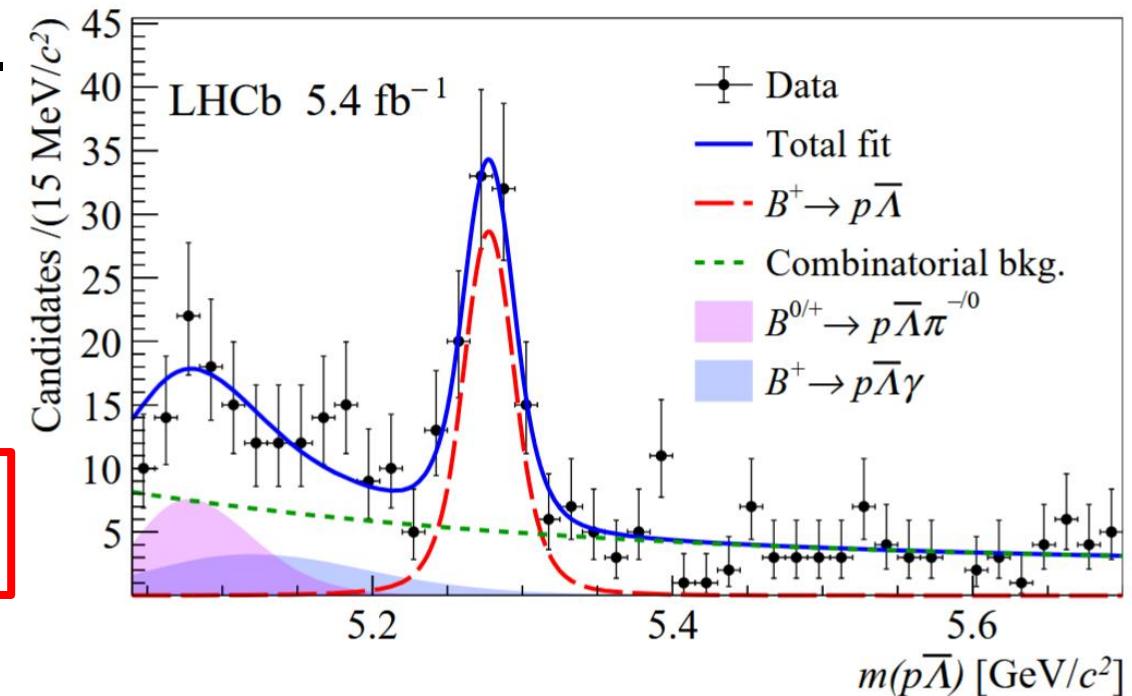
- Для мезонных и барионных распадов В-мезонов переход типа $\bar{b} \rightarrow u\bar{u}s$ доминирует над $\bar{b} \rightarrow u\bar{u}\bar{d}$
- Для b -барионов примерно одинаково
- Почему???**

Измерения параметра слабого распада

$$\frac{dN}{d \cos \theta_p} \propto (1 - \alpha_\Lambda \alpha_B \cos \theta_p) \cdot \epsilon(\cos \theta_p),$$

Измерения свидетельствуют о сильной интерференции S- и P-волновых амплитуд распада

$$\alpha_B = 0.87^{+0.26}_{-0.29} \pm 0.09,$$



<https://arxiv.org/abs/2512.00328>

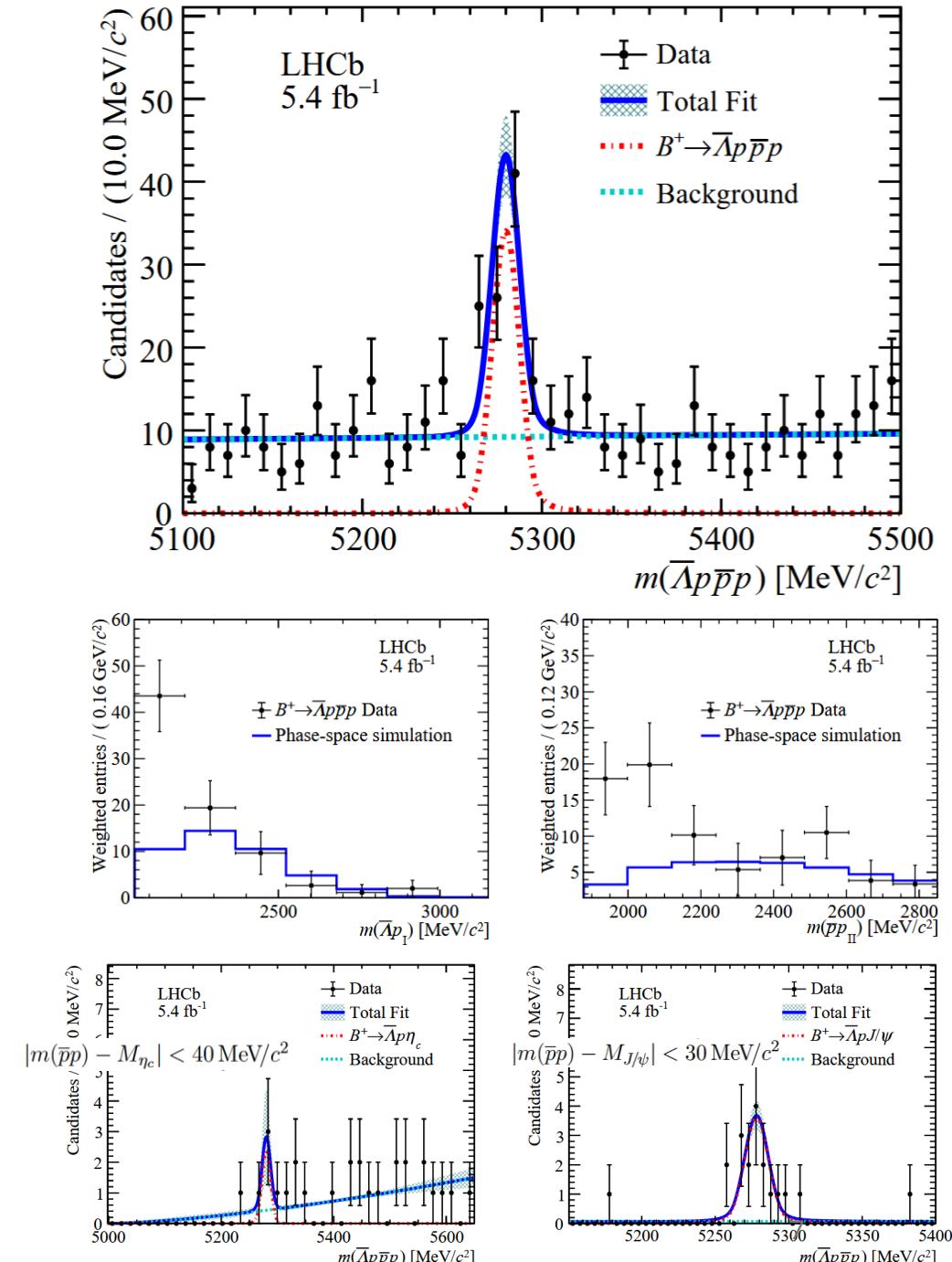
Распад B^+ на 4 бариона

- Исследования позволяют исследовать вклад в амплитуду распада резонансов со скрытым очарованием
- Распределения по массе пар барионов позволяют выделить эти вклады
- Первые измерения СР-асимметрии в этом канале распада

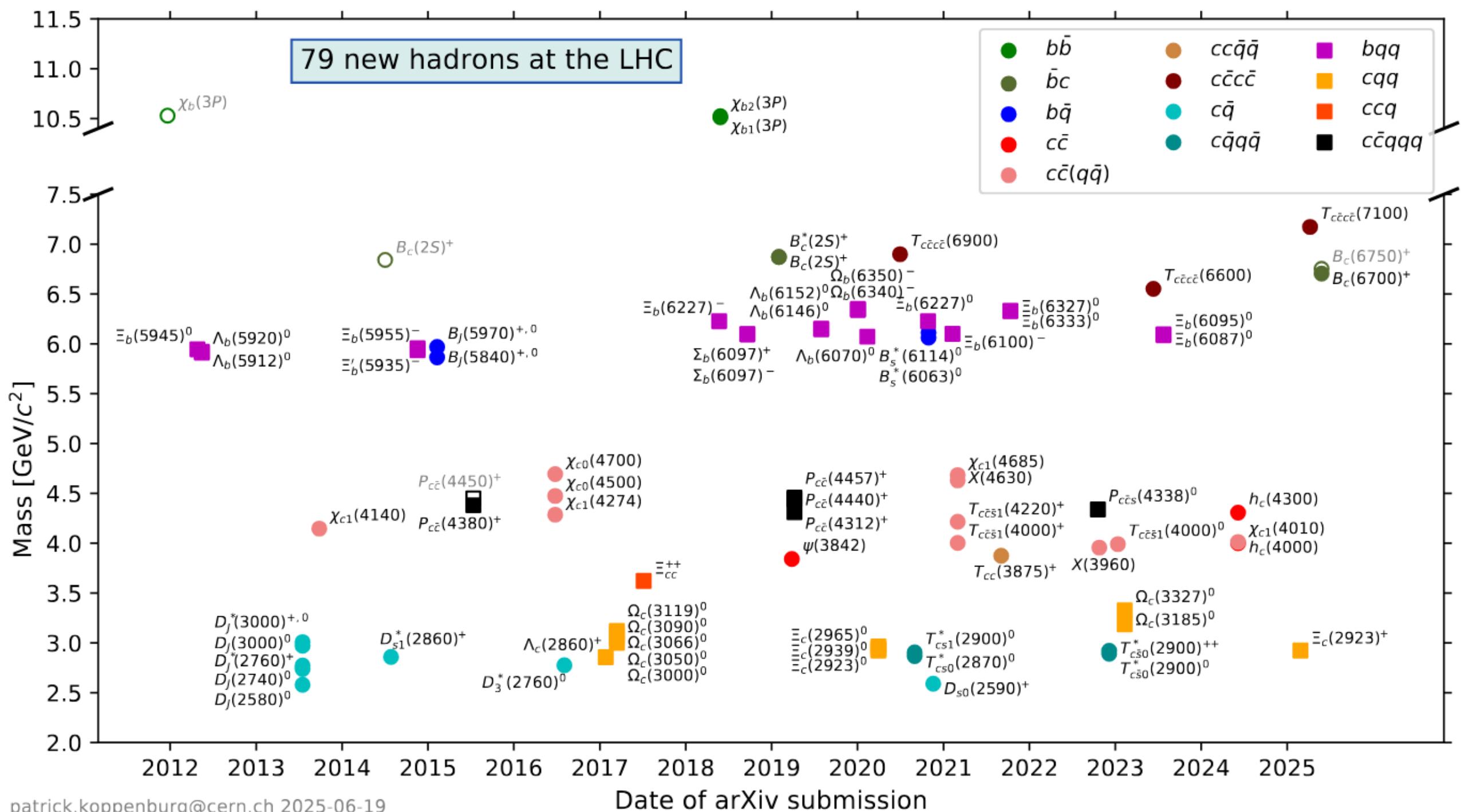
$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \bar{L} p\bar{p}p) = (2.15 \pm 0.35 \pm 0.12 \pm 0.28) \times 10^{-7},$$

$$\mathcal{A}_{CP} = (5.4 \pm 15.6 \pm 2.4)\%.$$

<https://arxiv.org/pdf/2508.16259>

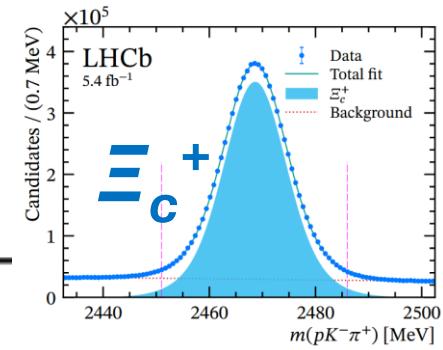
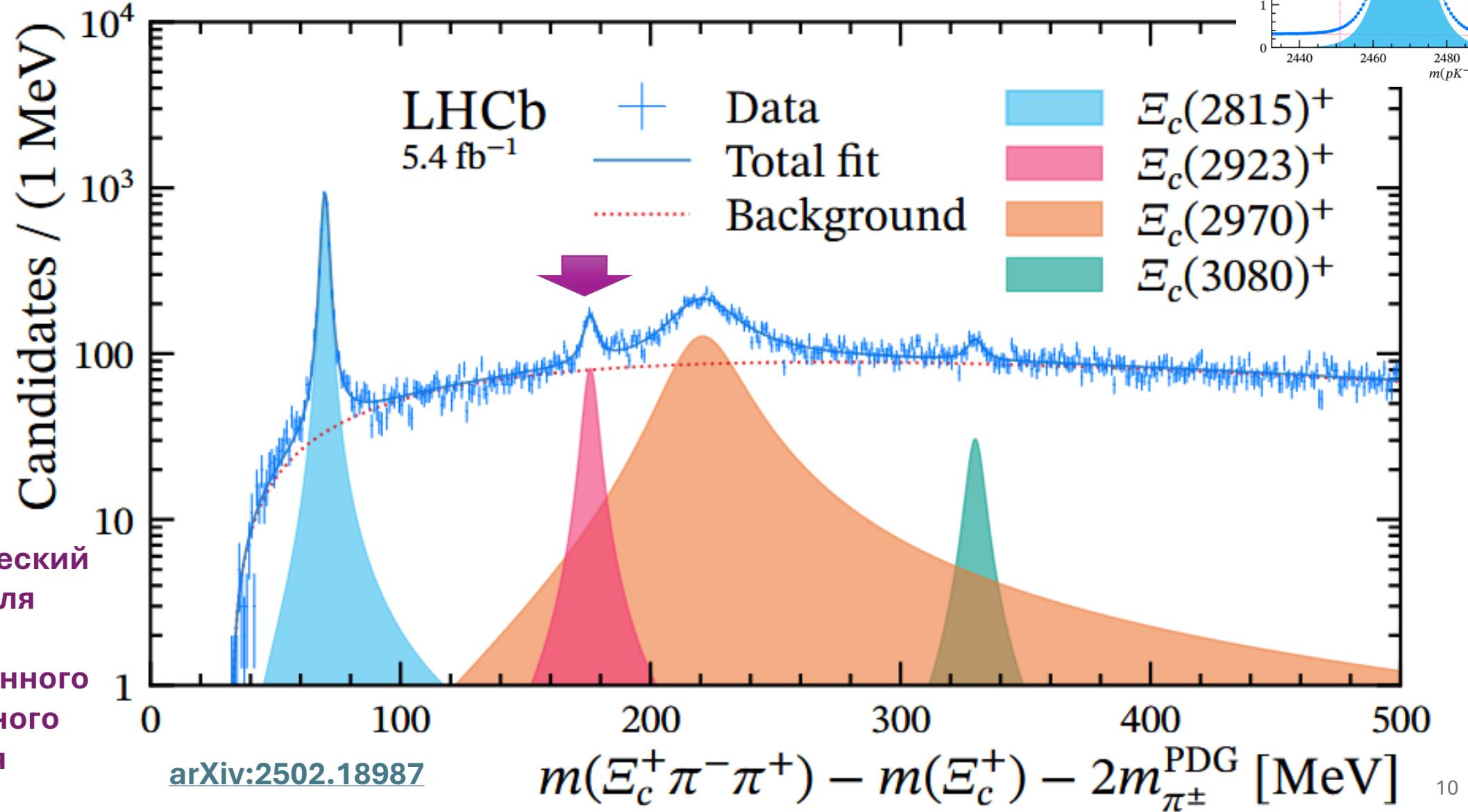


Физика очарованного кварка

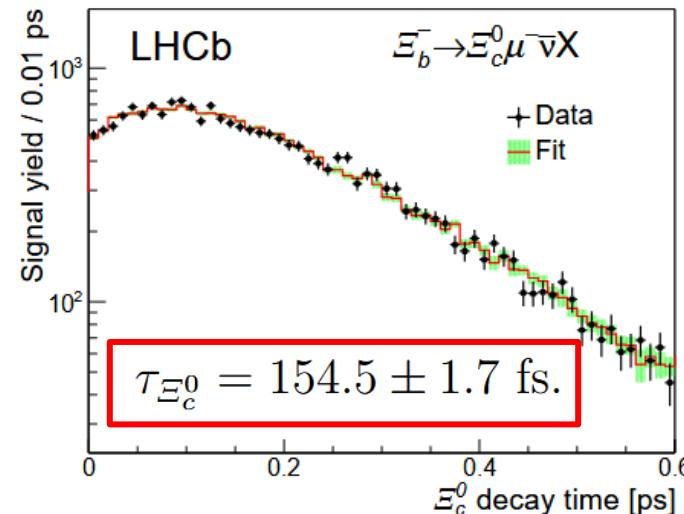
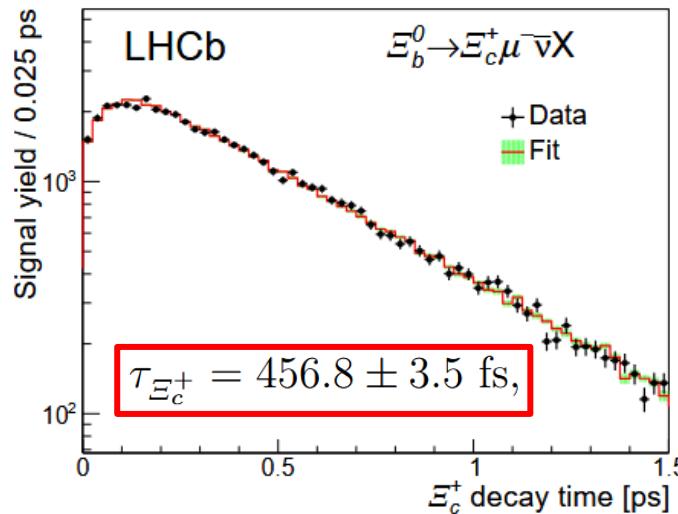
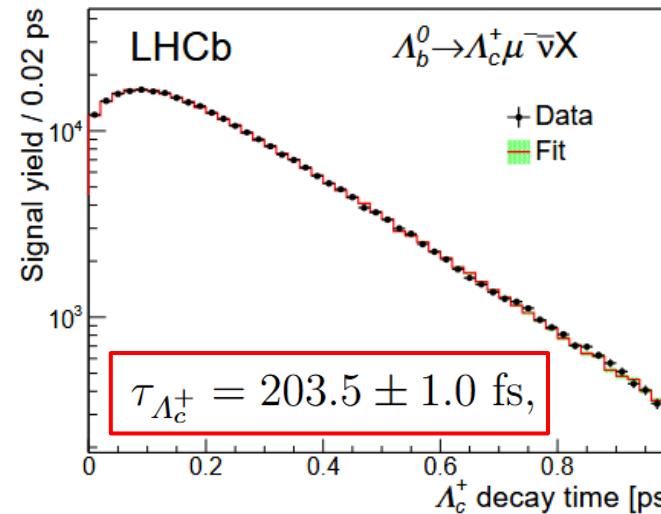
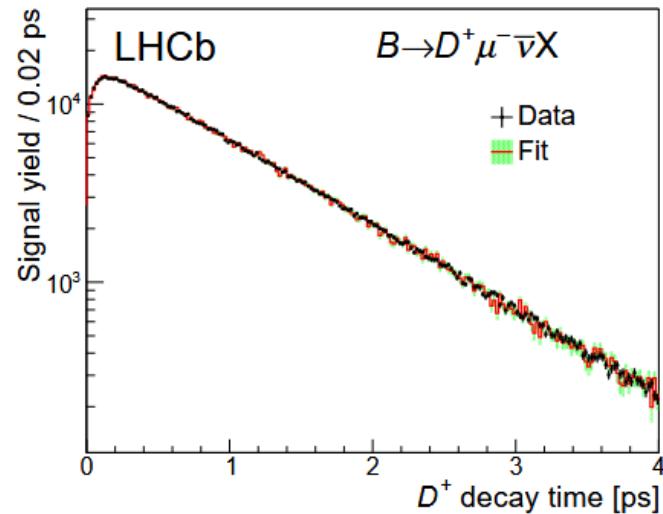


Observation of $\Xi_c(2923)^+$

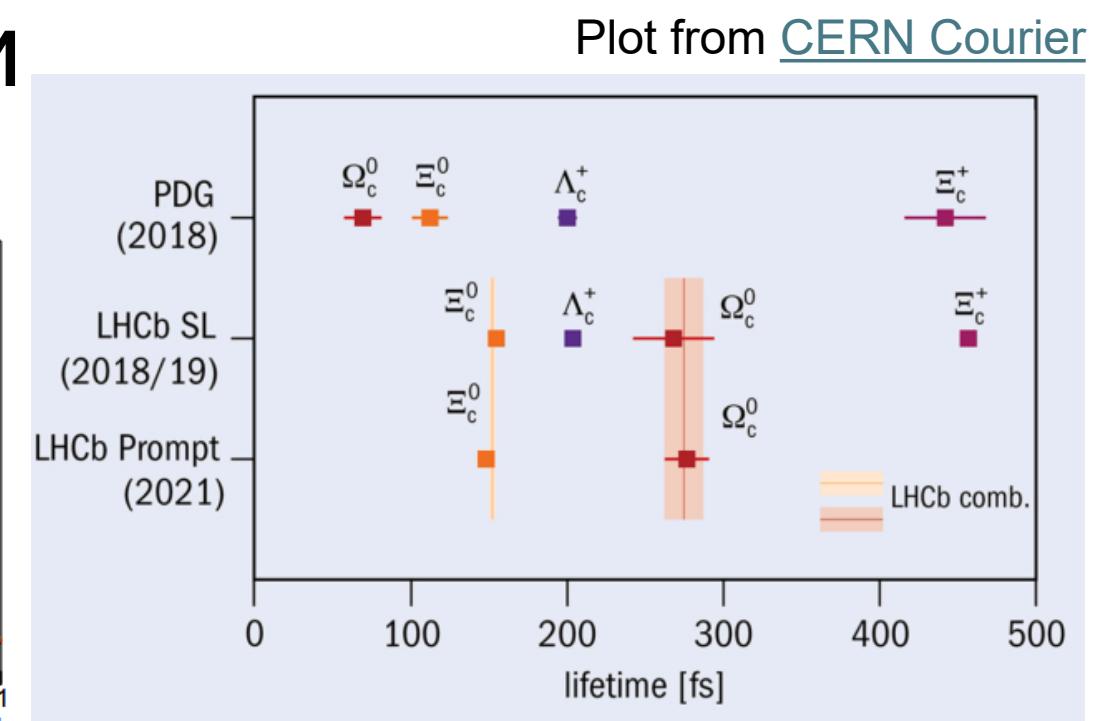
Изотопический
партнер для
ранее
обнаруженного
нейтрального
состояния



Измерение времен жизни очарованных барионов



Phys. Rev. D 100, 032001 (2019)



- Измерения LHCb опровергли результаты предыдущих экспериментов по иерархии времен жизни
 - Полулептонные распады b - и c -барионов
- Подтверждено в прямых распадах
Science Bulletin 2022, v.67, p.479
Полуюонный распад b -бариона и адронный распад c -бариона?

Подтверждено в адронных модах распада

- JHEP 09 (2025) 157

$$\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^0 (\rightarrow p K^- K^- \pi^+) \pi^-$$

$$\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 (\rightarrow p K^- K^- \pi^+) \pi^-$$

- Комбинация всех измерений LHCb

$$\tau_{\Omega_c^0} = 274.8 \pm 10.5 \text{ fs},$$

$$\tau_{\Xi_c^0} = 150.7 \pm 1.6 \text{ fs},$$

$$\tau_{\Omega_c^0} = 276.3 \pm 19.4 \text{ (stat)} \pm 1.8 \text{ (syst)} \pm 0.7 (\tau_{D^0}) \text{ fs},$$
$$\tau_{\Xi_c^0} = 149.2 \pm 2.5 \text{ (stat)} \pm 0.9 \text{ (syst)} \pm 0.4 (\tau_{D^0}) \text{ fs},$$

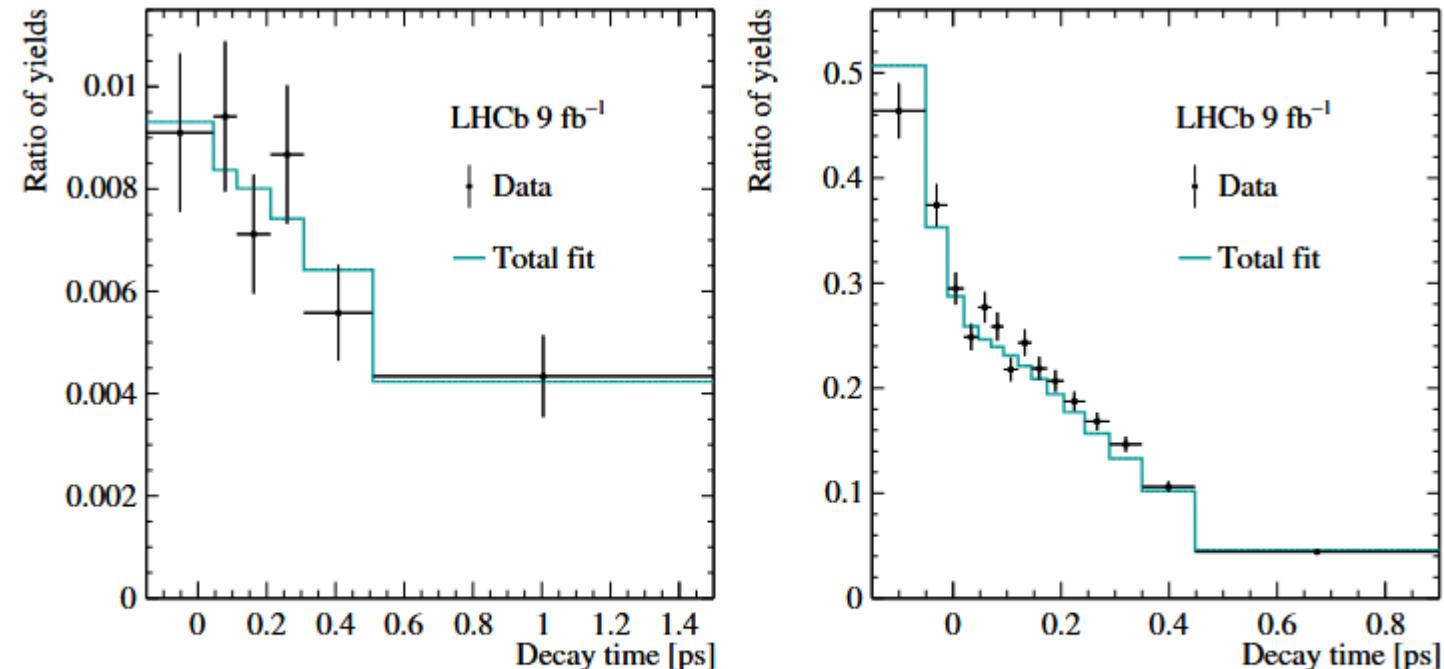
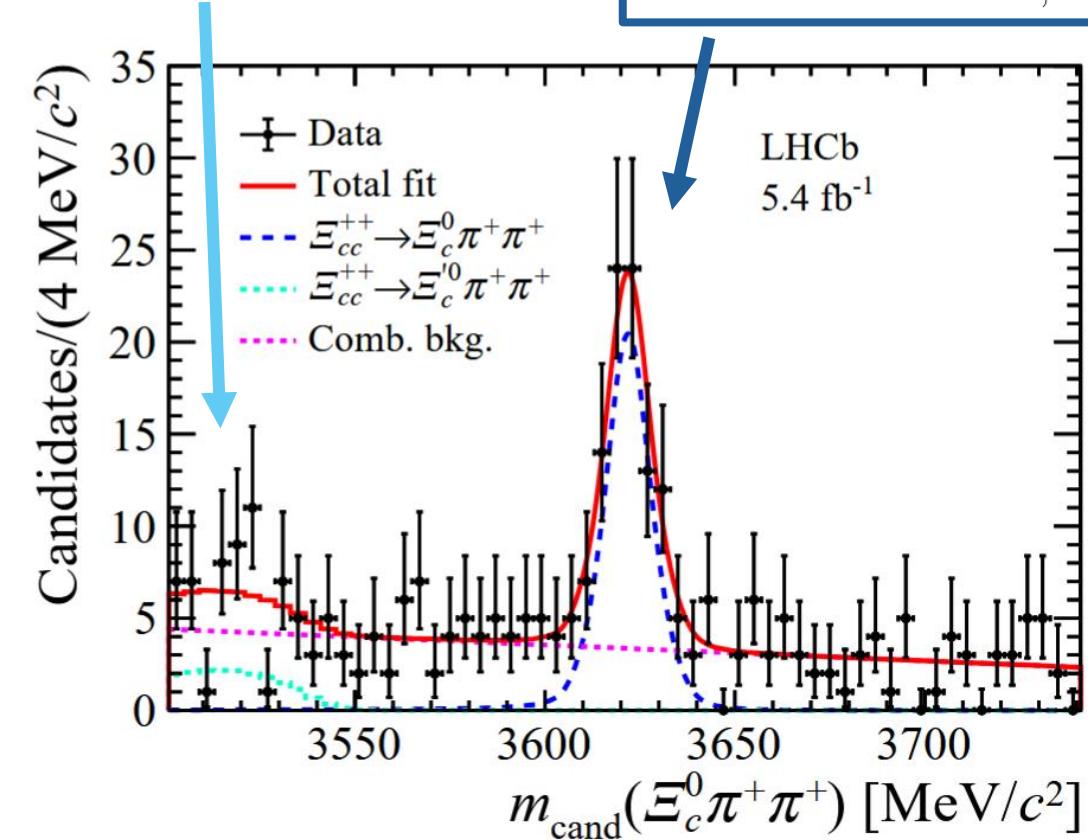
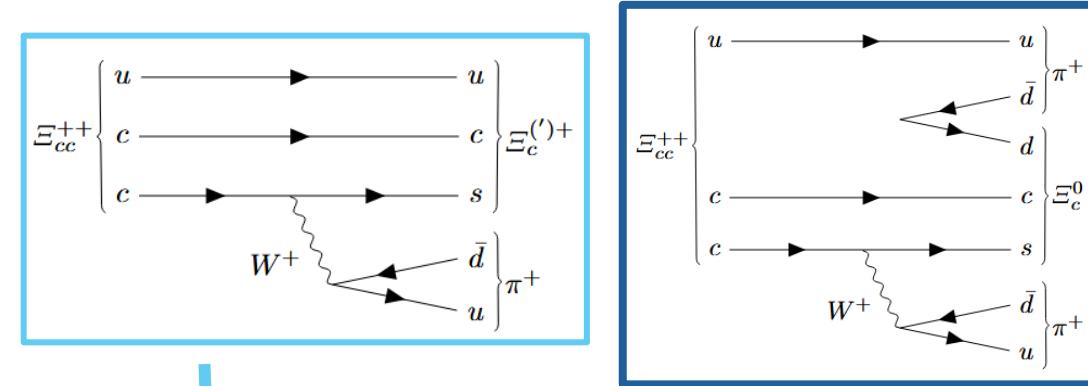


Figure 3. Ratio of yields (r_i) between the (left) $\Omega_b^- \rightarrow \Omega_c^0 \pi^-$ and (right) $\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^-$ decays, and the $B^- \rightarrow D^0 \pi^-$ decays, in bins of decay time. The results from the fit with the model given in eq. 5.1 are shown.

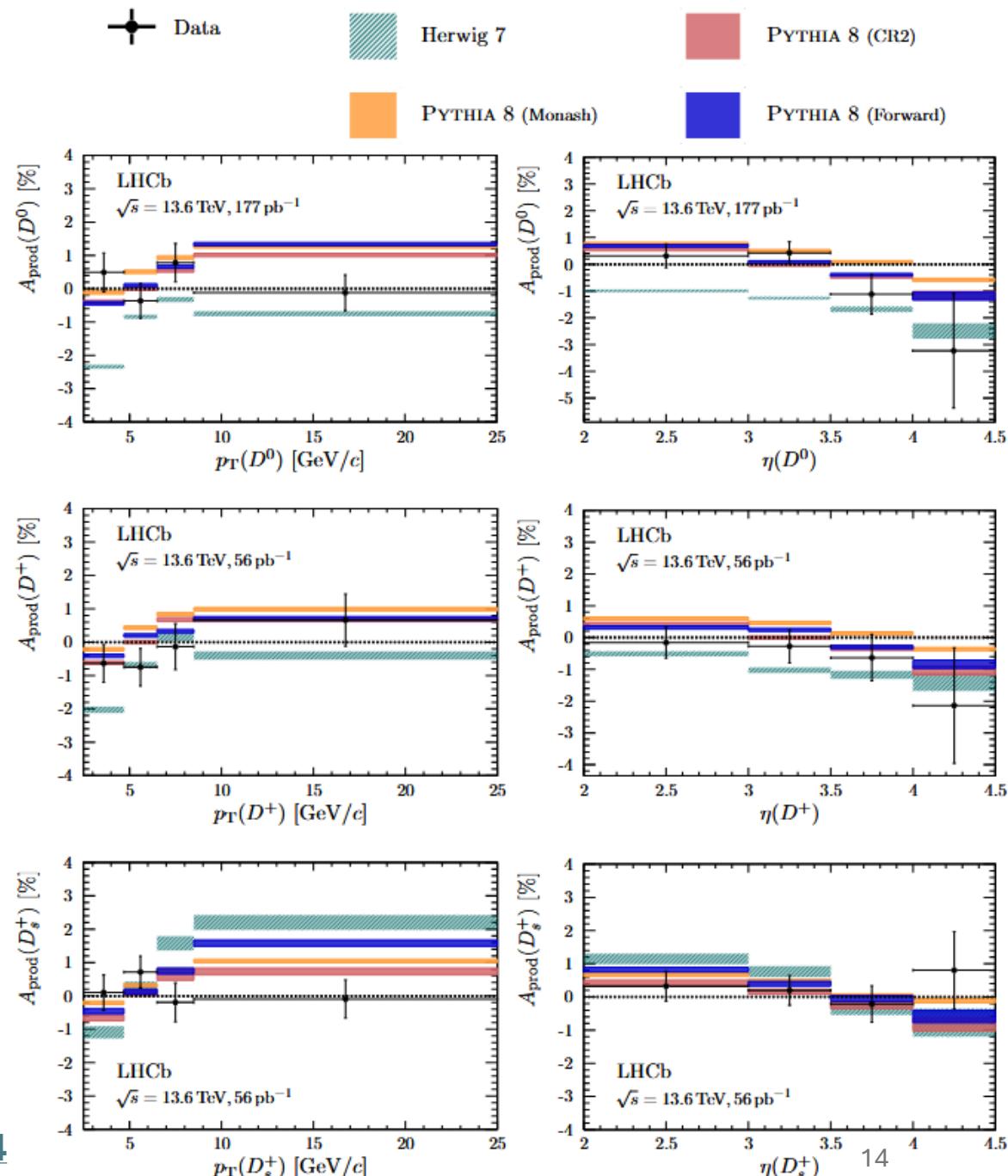
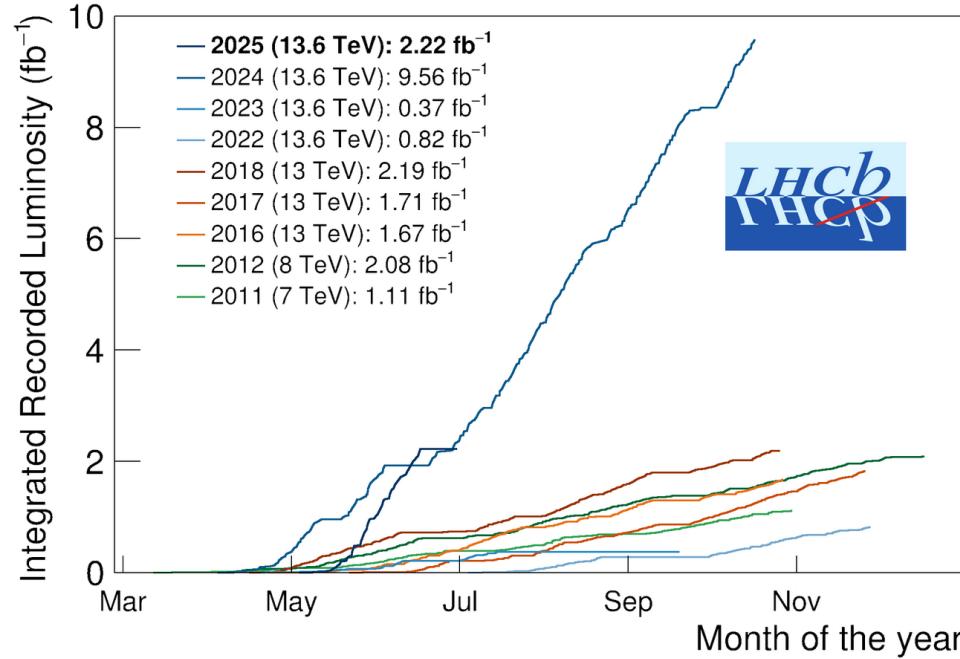
Обнаружен еще один канал распада Ξ_{cc}^{++}



- $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 (\rightarrow p K^- K^- \pi^+) \pi^+ \pi^+$
- Поиск канала распада бариона с двойным очарованием осуществлялся с использованием данных о $p\bar{p}$ взаимодействиях при энергии 13 TeV
- Интегральная светимость 5.4 фб^{-1} .

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \pi^+) \times \mathcal{B}(\Xi_c^0 \rightarrow p K^- K^- \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+) \times \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)} = \\ = 0.105 \pm 0.014 \text{ (stat)} \pm 0.007 \text{ (syst)}$$

First paper after Upgrade I



- Асимметрии рождения D^+ , D^0 и D_s^+ мезонов измерялись в нескольких интервалах по поперечному импульсу и по псевдобыстроте частиц
- Не обнаружено существенной асимметрии рождения

ФИЗИКА ОЧАРОВАННОГО КВАРКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ LHCb

A. A. Дзюба

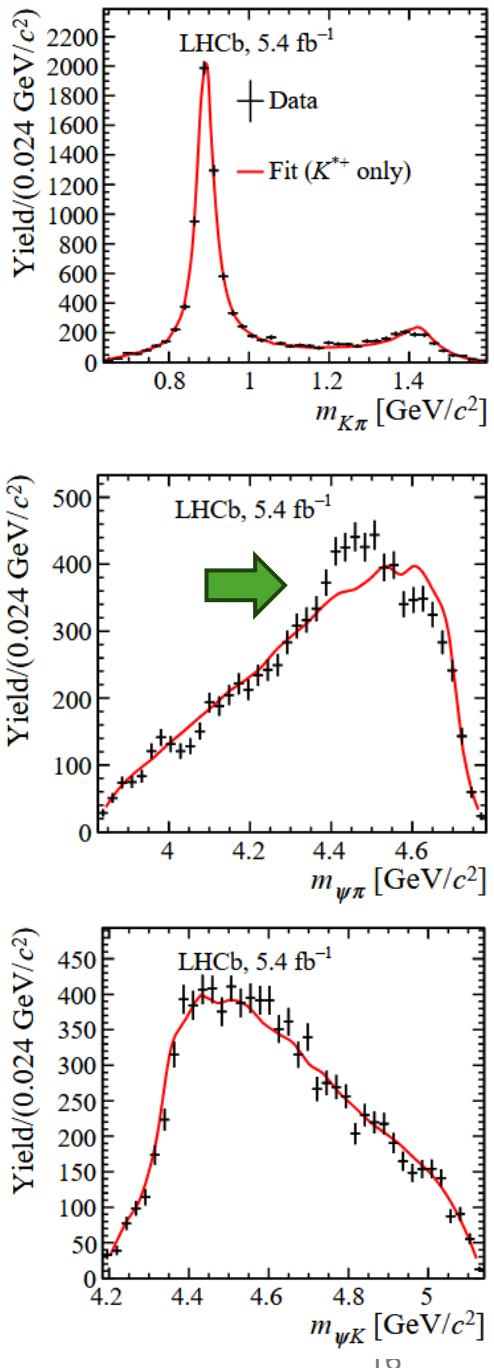
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина,
188300, Россия

Эксперимент LHCb, проводящийся на Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН), направлен на изучение процессов рождения и свойств адронов, содержащих в своем составе тяжелые кварки (c и b). Уникальные возможности LHCb (высокое сечение рождения очарованных и прелестных адронов, точное выделение вершин их рождения и распада, надежная идентификация типа зарегистрированной частицы и др.) позволяют: исследовать адронный спектр, наблюдать новые (в том числе подавленные) моды распадов адронов, проводить поиск и исследование СР-нарушающих процессов, осуществлять поиск новой физики путем исследования редких распадов c - и b -адронов. В статье представлен обзор результатов LHCb в области физики очарованного кварка.

Поиск экзотических адронов

- Поиск новых экзотических резонансов (тетра- и пентакварков)
- Полный амплитудный анализ распада $B^+ \rightarrow \Psi(2S) K_S^0 \pi^+$.
- Использовались данные протон-протонных столкновений при энергии 13 ТэВ, соответствующие интегральной светимости $5,4 \text{ фб}^{-1}$.
- Распределение в пятимерном фазовом объеме не может быть описано только вкладами с промежуточными K^{*+} резонансами, в то время как включение в модель вклада тетракваркового состояния значительно улучшает описание.
- Модельно-независимое исследование структуры экзотического вклада с использованием техники диаграммы Арганда подтвердила, что дополнительный вклад носит резонансный характер.
- Наилучшее описание спектров соответствует квантовым числам резонансного состояния $J^P = 1^+$.
- $M = 4,452 \pm 0,016^{+0,055}_{-0,033} \text{ ГэВ}/c^2$ и $\Gamma = 0,174 \pm 0,019^{+0,083}_{-0,020} \text{ ГэВ}$, что соответствует резонансу $T_{c-c_1}(4430)^+$, ранее обнаруженного экспериментами Belle и LHCb.

<https://arxiv.org/abs/2511.20428>



Резонанс $T_{c^-c1}(4430)^+$,

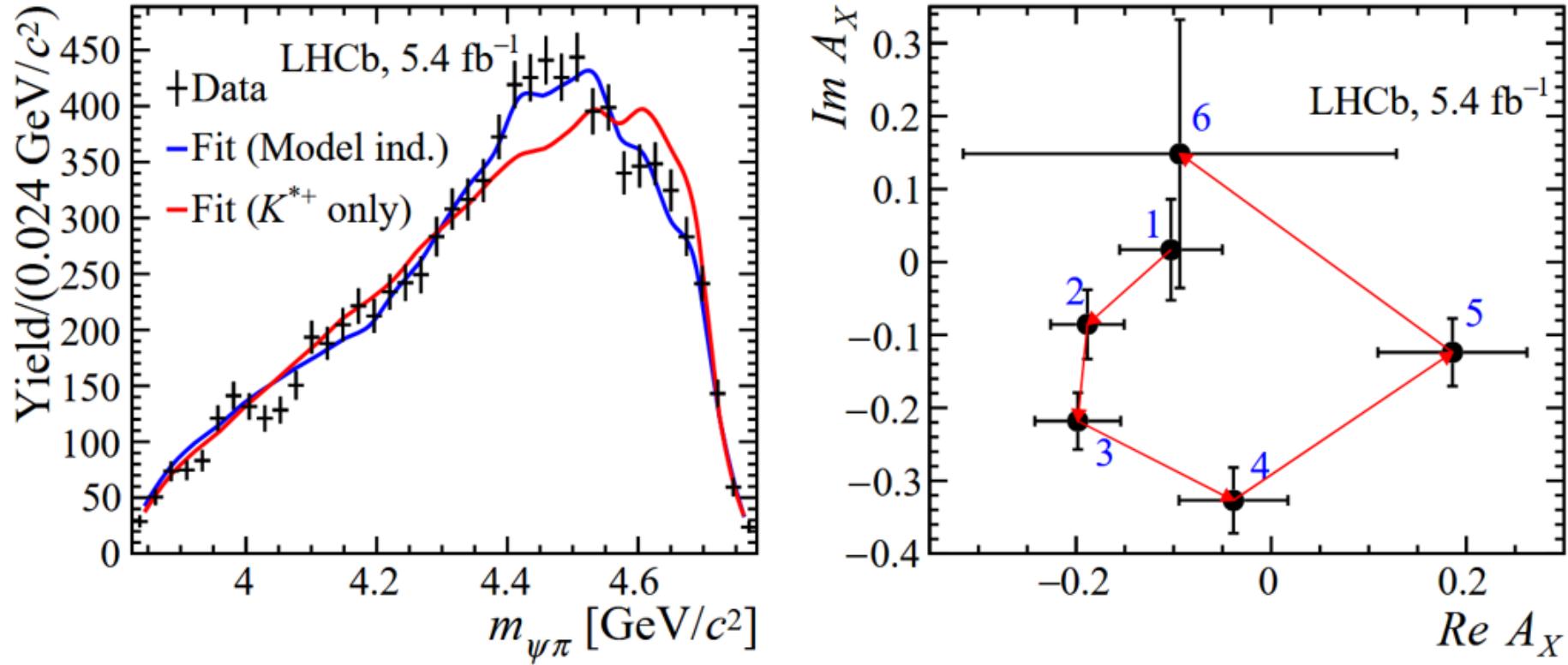
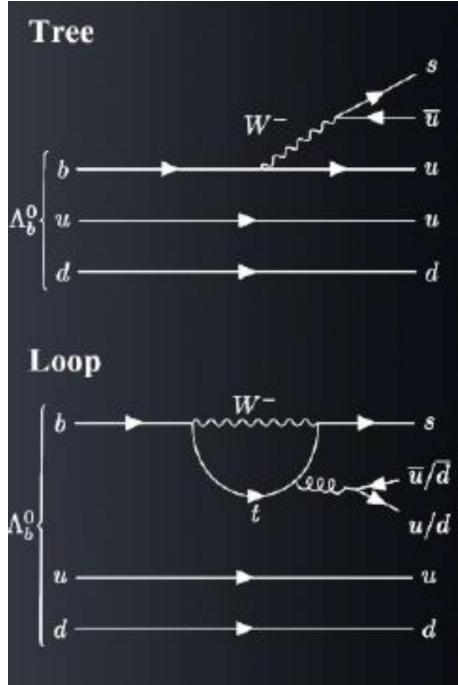


Рис.1 (Слева) распределение по массе системы $\psi(2S)\pi^+$ для событий распадов $B^+\rightarrow\psi(2S)K_S^0\pi^+$. Красная линия – расчеты модели, включающей только вклад известных K^{*+} резонансов, синяя линия – расчет с учетом вклада тетраквакового состояния. (Справа) диаграмма Арганда для комплексной резонансной амплитуды экзотического адрона. Каждая точка соответствует одному из шести интервалов по массе системы $\psi(2S)\pi$ (возрастает с номером точки).

Изучение эффектов СР-нарушения

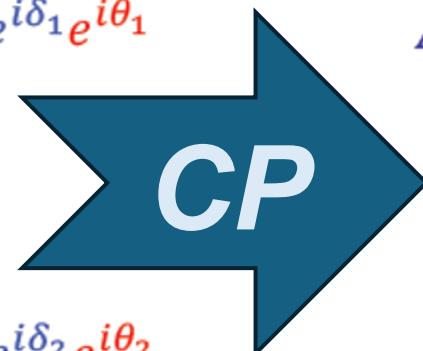
Обнаружение СР-нарушения в распадах барионов

$$\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$$



Для наблюдения СР-нарушения необходима как минимум интерференция двух амплитуд (малость $|V_{ub}|$ дает большие асимметрии)

$$A_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{i\theta_1}$$



$$\bar{A}_1 = \rho_1 e^{i\delta_1} e^{-i\theta_1}$$

Слабая фаза меняет свой знак при операции СР, а **сильная** не меняет

$$A_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{i\theta_2}$$

$$\bar{A}_2 = \rho_2 e^{i\delta_2} e^{-i\theta_2}$$

$$|\bar{A}_1 + \bar{A}_2|^2 - |A_1 + A_2|^2 = 4\rho_1\rho_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

- Прямое СР-нарушение проявляется в появлении асимметрии распада
- Относительно легко измерить
- Сложности теоретических расчетов из-за наличия сильной фазы

$$\Delta = \frac{|A_f|^2 - |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}{|A_f|^2 + |\bar{A}_{\bar{f}}|^2}$$

Новые работы LHCb по теме:

- Measurement of CP asymmetries in $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$ decays

LHCb-PAPER-2024-048
[arXiv:2412.13958](https://arxiv.org/abs/2412.13958)

- Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays

LHCb-PAPER-2024-054
[arXiv:2503.16954](https://arxiv.org/abs/2503.16954)

Nature 643 (2025) 1223-1228

- Study of Λ_b^0 and Ξ_b^0 decays to $\Lambda h^+ h^-$ and evidence for CP violation in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$

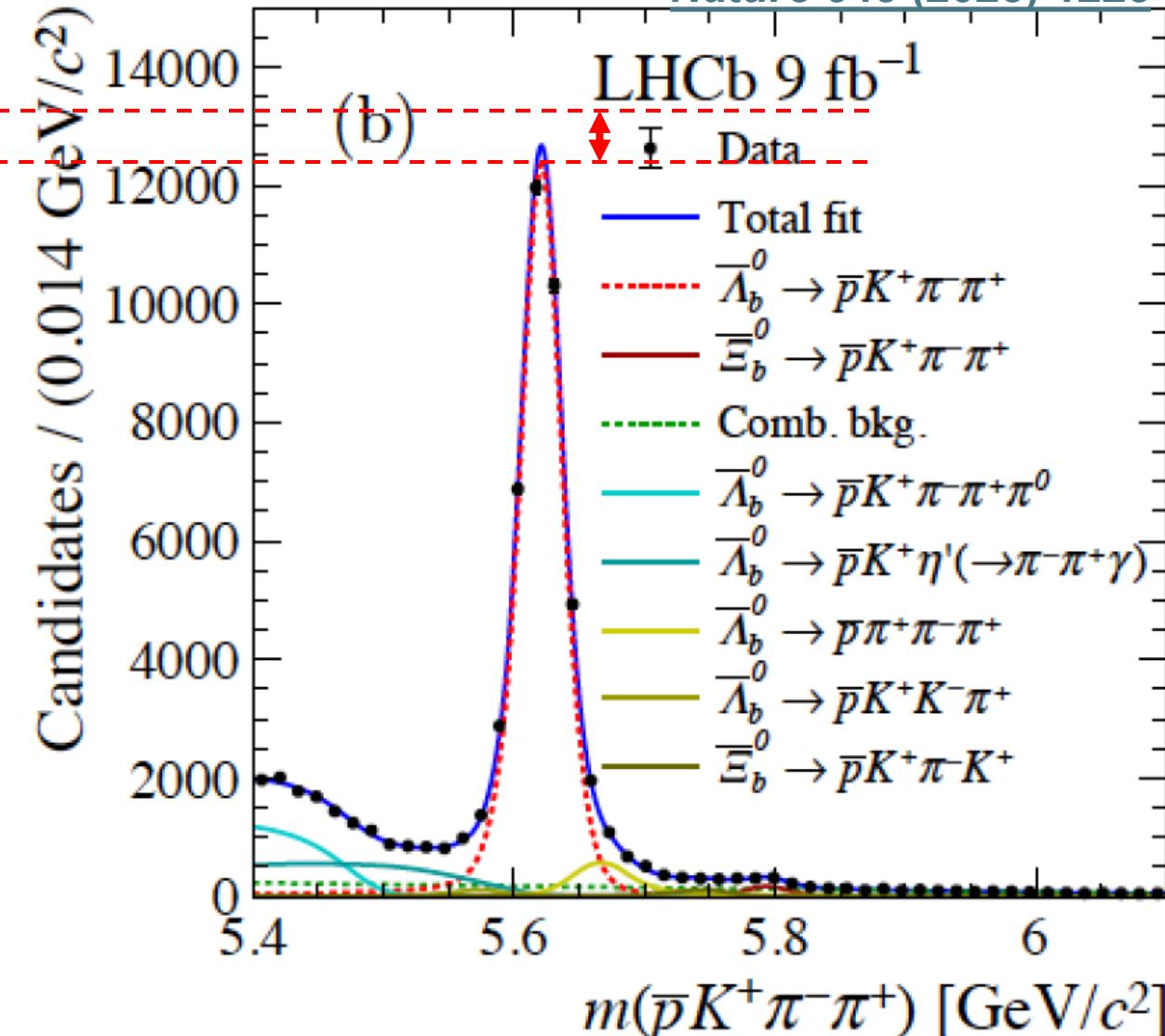
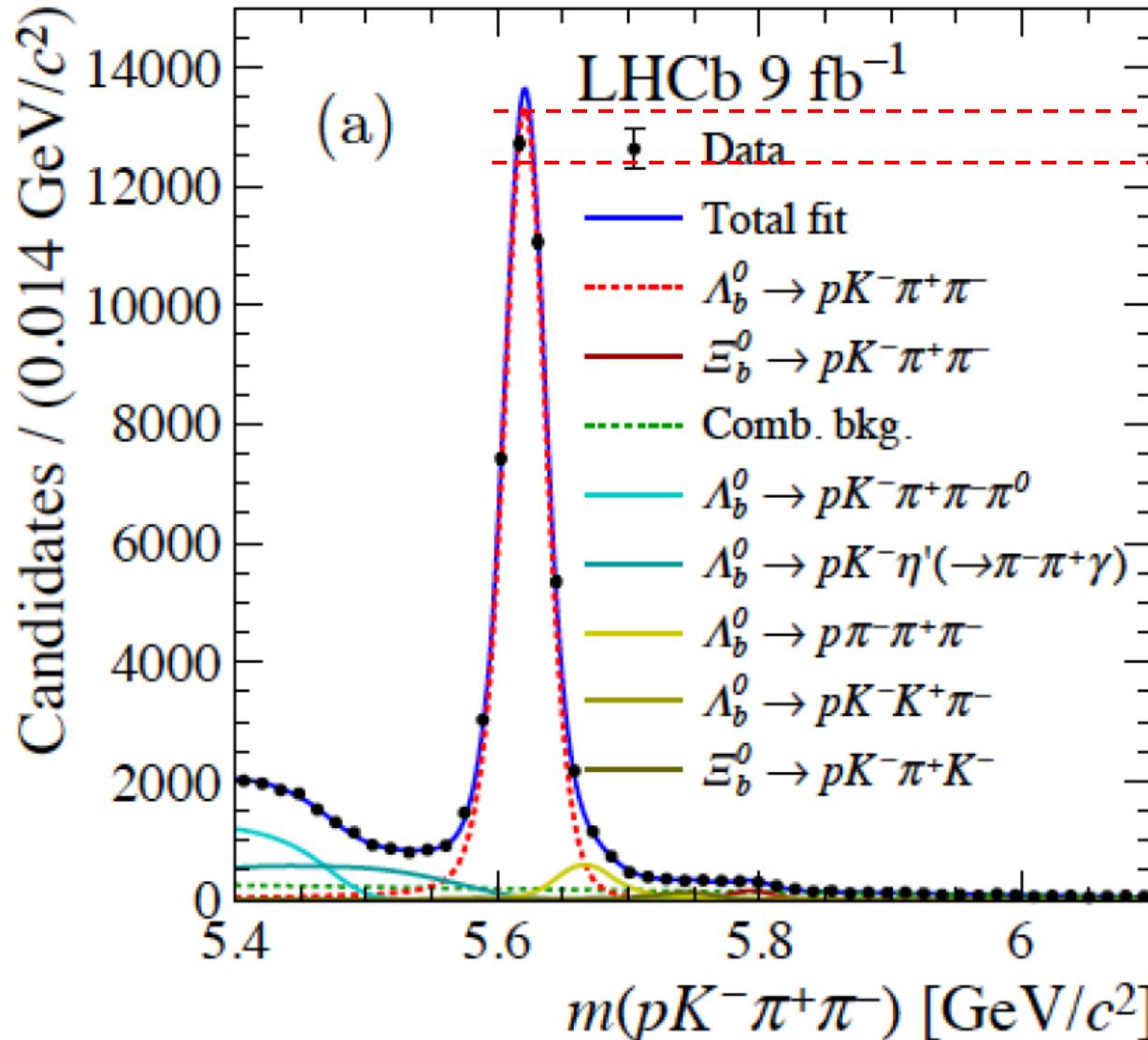
LHCb-PAPER-2024-043
Phys. Rev. Lett. 134 (2025) 101802

Decay topology	Mass region (GeV/c^2)	\mathcal{A}_{CP}
$\Lambda_b^0 \rightarrow (pK^-)(\pi^+\pi^-)$	$m_{pK^-} < 2.2$ $m_{\pi^+\pi^-} < 1.1$	$(5.24 \pm 1.29 \pm 0.21)\%$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (p\pi^-)(K^-\pi^+)$	$m_{p\pi^-} < 1.7$ $m_{\pi^+K^-} \in [0.8, 1.0] \cup [1.1, 1.6]$	$(2.73 \pm 0.82 \pm 0.14)\%$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (p\pi^-\pi^+)K^-$	$m_{p\pi^-\pi^+} < 2.7$	$(5.39 \pm 0.86 \pm 0.10)\%$
$\Lambda_b^0 \rightarrow (K^-\pi^+\pi^-)p$	$m_{K^-\pi^+\pi^-} < 2.0$	$(2.01 \pm 1.16 \pm 0.30)\%$

Nature 643 (2025) 1223

СР-асимметрия для $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$ измерена: $A_{CP} = 2.45 \pm 0.46 \pm 0.10 \%$

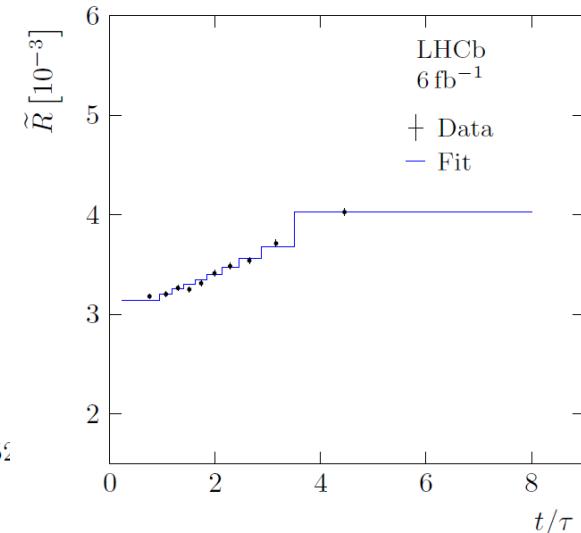
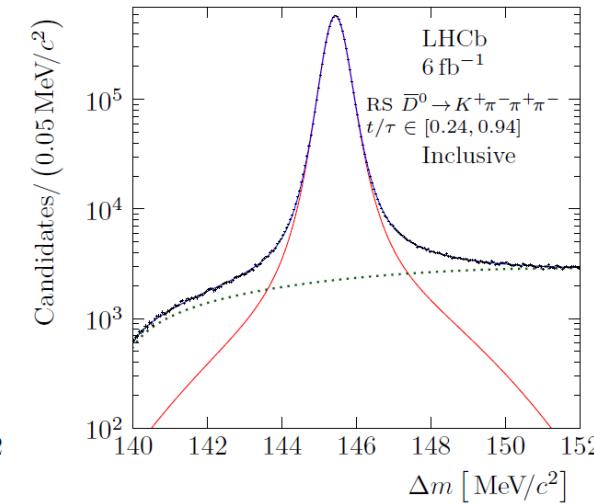
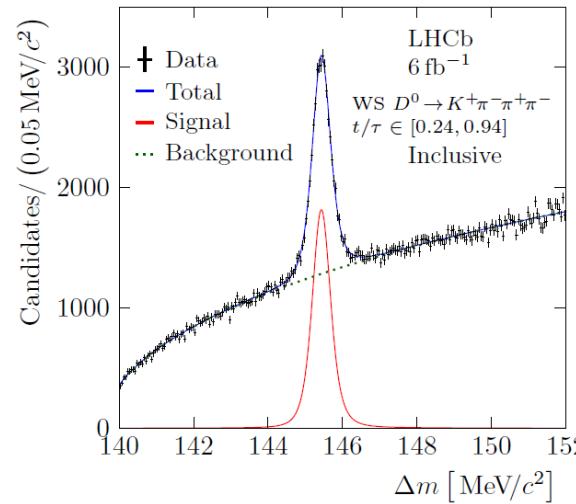
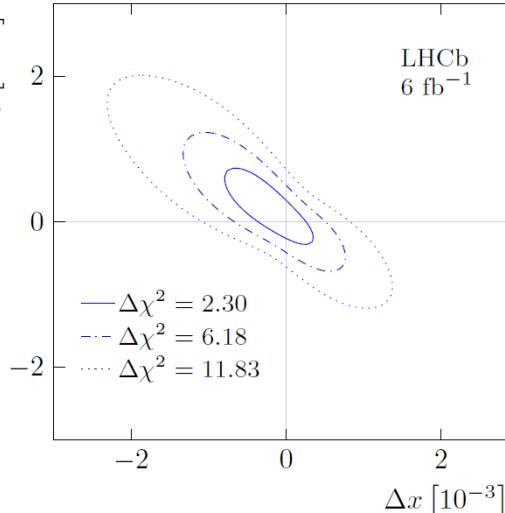
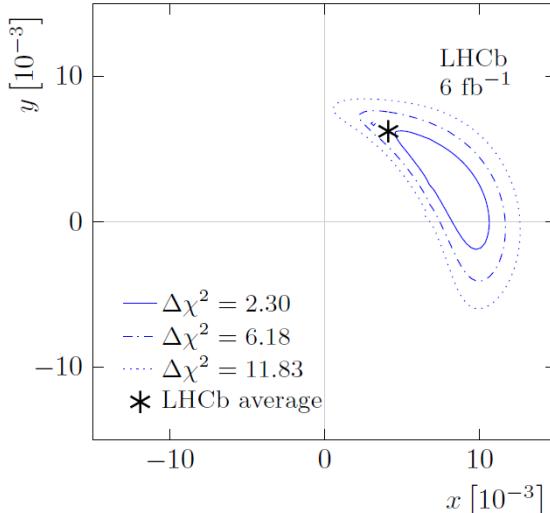
[Nature 643 \(2025\) 1223](#)



Изучение СР-асимметрии в зависимости от на диаграмме Далица позволяет понять
«резонансную»-зависимость эффекта $\Delta A_{CP}(N^{*+}K^-) = 0.165 \pm 0.048 \pm 0.017$

Поиск СР-нарушения и измерение параметров смешивания для $D^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\pm \pi^\mp$

- Исследование эволюции во времени отношения Кабибо-разрешенного и дважды-Кабибо-подавленного каналов распада позволяет измерить параметры смешивания, определить адронные фазы необходимы для измерения СКМ- γ , а также для поиска эффектов СР-нарушения



$$r = (5.49 \pm 0.02) \times 10^{-2},$$

$$\kappa = 0.430 \pm 0.043,$$

$$\delta = (163.3 \pm 13.8)^\circ,$$

$$x = (0.85 \pm 0.15)\%,$$

$$y = (0.21 \pm 0.29)\%,$$

$$\Delta x = (-0.02 \pm 0.04)\%,$$

$$\Delta y = (0.02 \pm 0.04)\%.$$

- Улучшена точность измерения адронных параметров и параметров смешивания
- СР-нарушение не обнаружено

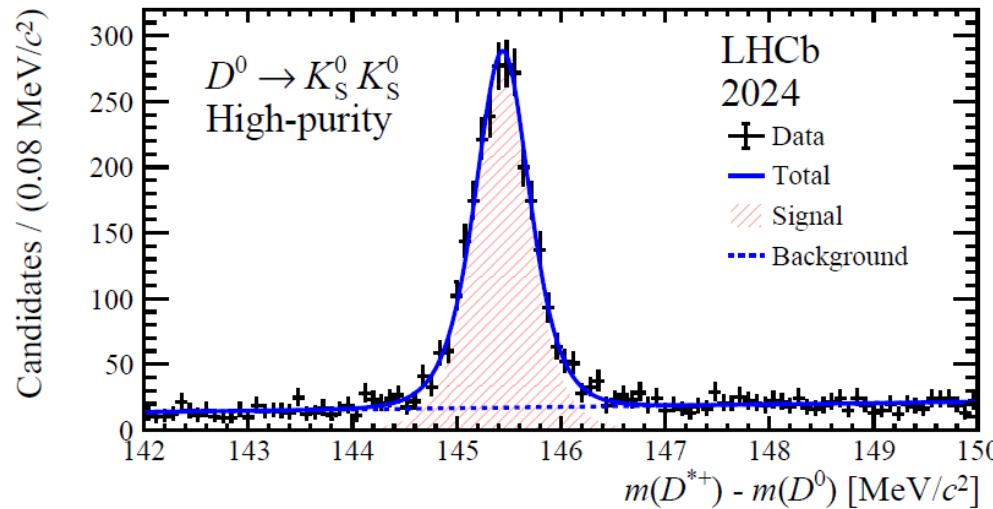
[arXiv:2510.04963](https://arxiv.org/abs/2510.04963)

$$R(t) \equiv \frac{\Gamma[D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-](t)}{\Gamma[D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \pi^+](t)} \approx r^2 - r\kappa y' \frac{t}{\tau} + \frac{x^2 + y^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2,$$

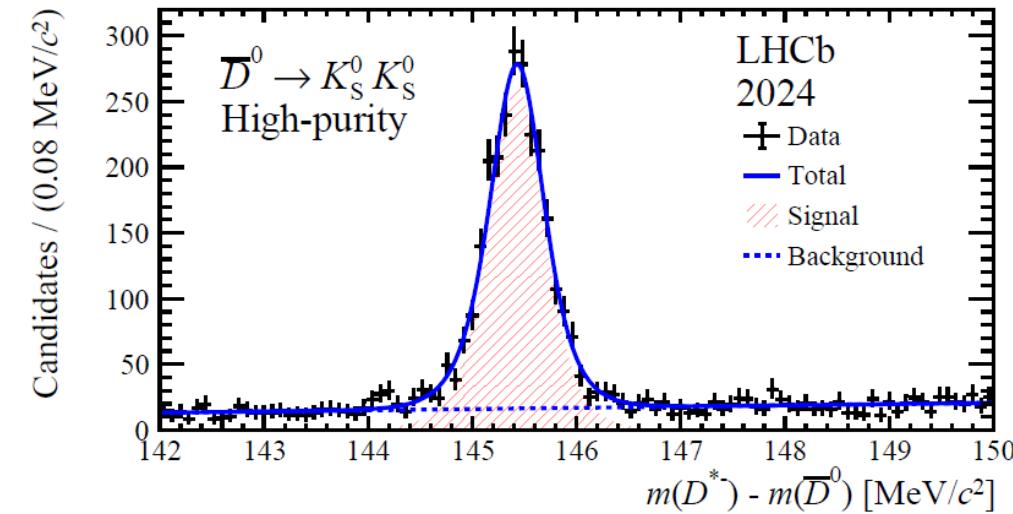
$$y' \equiv y \cos \delta - x \sin \delta.$$

Поиск СР-нарушения в данных Run-3

- Данные 2024 года, при энергии 13.6 TeV, соответствующие интегральной светимости 6.2 фб^{-1}
- За год набрана статистика как за весь Run-2
- Адронный таггинг (prompt) аромата



arXiv:2510.14732



СР-нарушение не обнаружено

$$\mathcal{A}^{CP}(K_S^0 K_S^0) \equiv \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0)}, \quad \Rightarrow$$

$$\mathcal{A}^{CP}(K_S^0 K_S^0) = (-0.37 \pm 0.78 \pm 0.29)\%.$$

Заключение

- Эксперимент LHCb на БАК нацелен на:
 - Поиск указаний на существование Новой физики в редких распадах прелестных адронов,
 - Уточнение параметров СМ, ответственных за нарушение CP -четности, а также поиск новых источников CP -нарушение за пределами СМ.
 - Спектроскопию тяжелых адронов (в том числе экзотических)
- **Ответственное хранение многопроволочных пропорциональных камер высокой гранулярности** для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.
 - Можно найти им применение, но нужно обеспечить электроникой.
- Основные результаты LHCb, представленные в 2025 году:
 - **Обнаружение нескольких барионных распадов прелестных мезонов**
 - **Обнаружение CP -нарушения в барионном секторе**
 - **Спектроскопия очарованных барионов**
 - **Поиск тетракварков**
 - **И многое другое**
 - <https://lbfence.cern.ch/alcm/public/analysis>



С наступающим Новым Годом!