



Результаты LHCb

Алексей Дзюба

Сессия Ученого совета ОФВЭ

25 декабря 2024 г

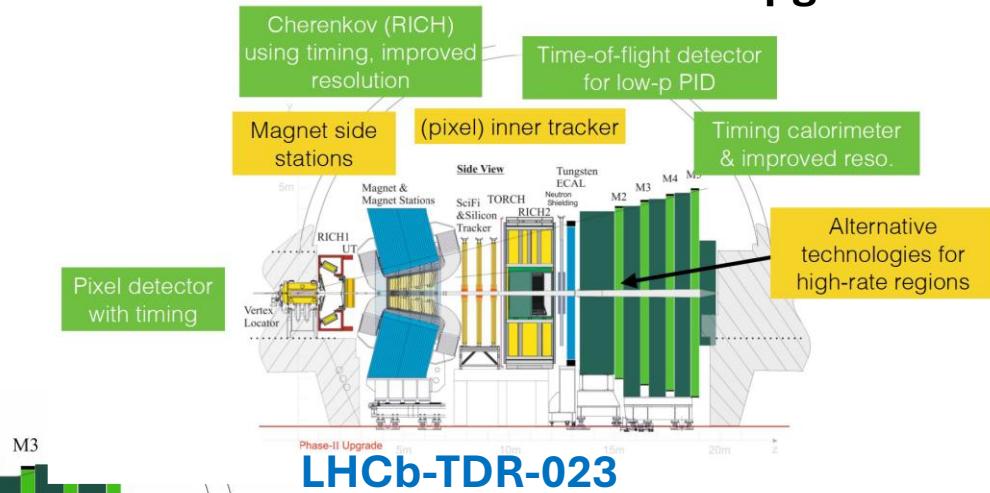
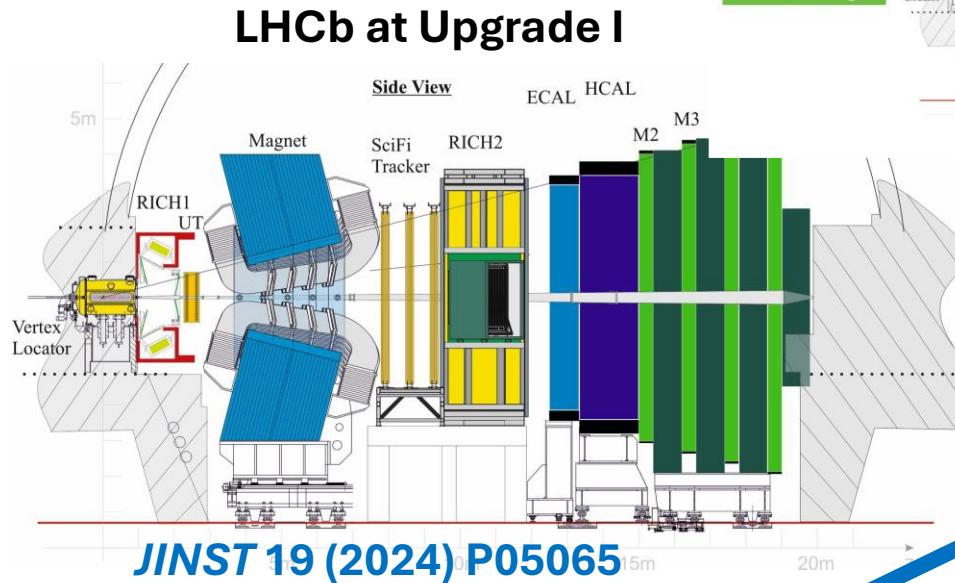
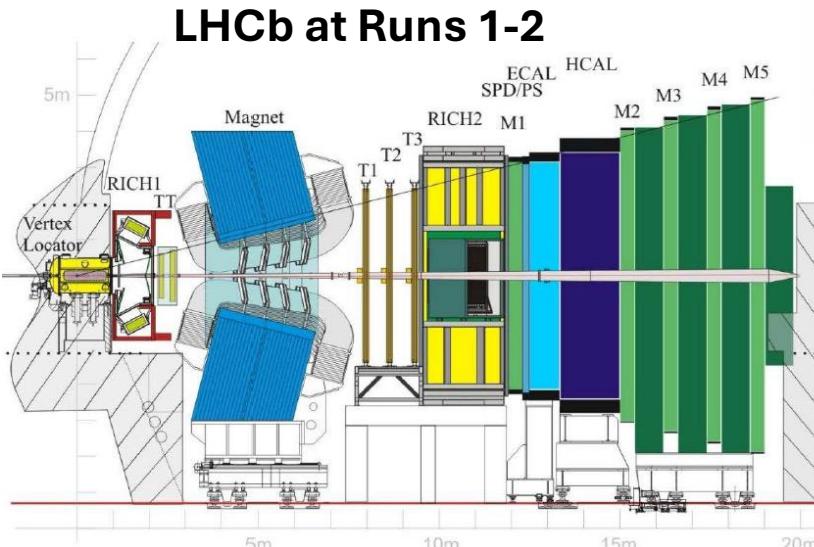
Физические задачи LHCb

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

Ввод в эксплуатацию после модернизации

Три «жизни» LHCb

Работа на малых углах в
режиме высокой
светимости – новый вызов
экспериментальной
физики высоких энергий



Светимость

$$\mathcal{L} = 1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\mathcal{L}_{int} = 300 \text{ fb}^{-1}$$

$$\mu \approx 40$$

$$\mathcal{L} = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\mathcal{L}_{int} = 50 \text{ fb}^{-1}$$

$$\mu \approx 5$$

$$\mathcal{L} = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\mathcal{L}_{int} = 9 \text{ fb}^{-1}$$

$$\mu \approx 1$$

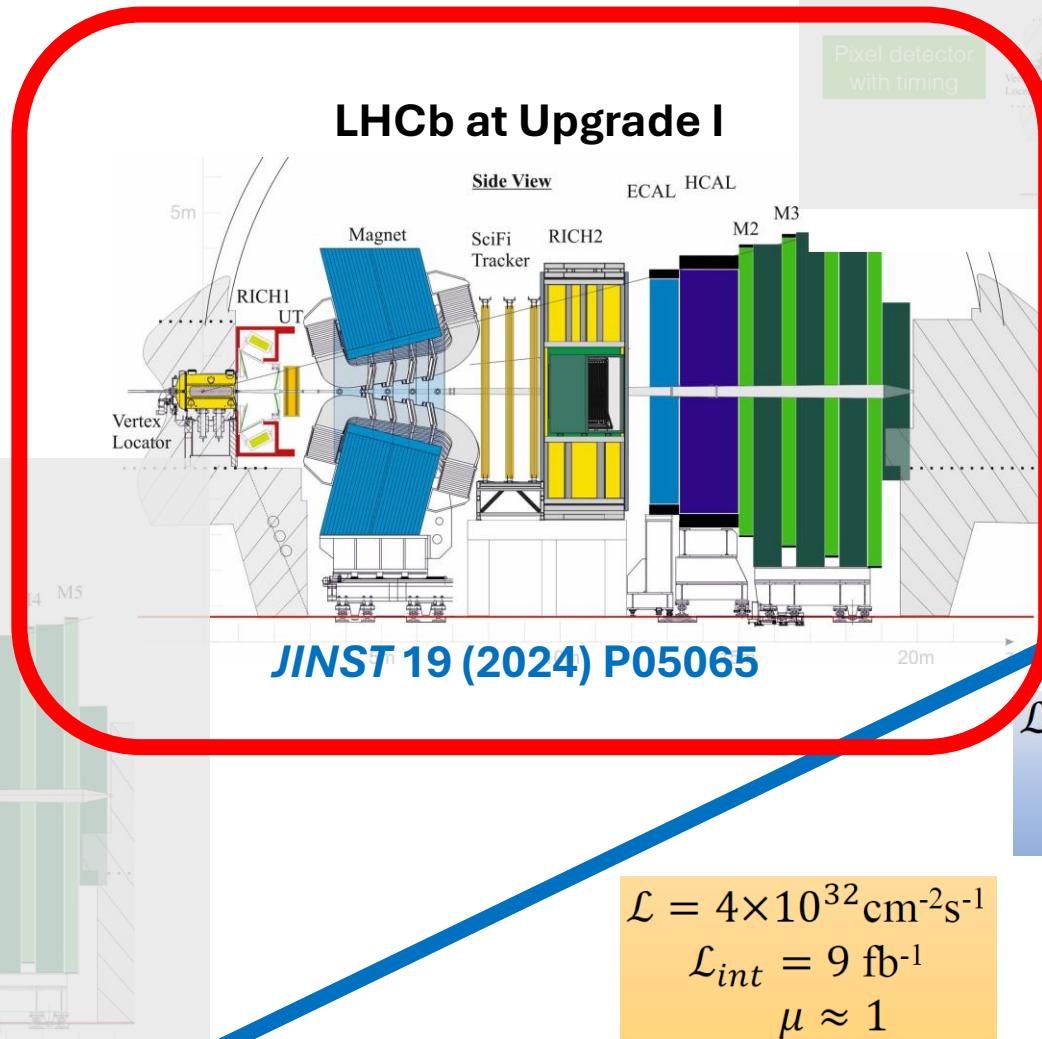
LHCb Upgrade I (Runs 3 & 4)

Мы сейчас в
этой точке

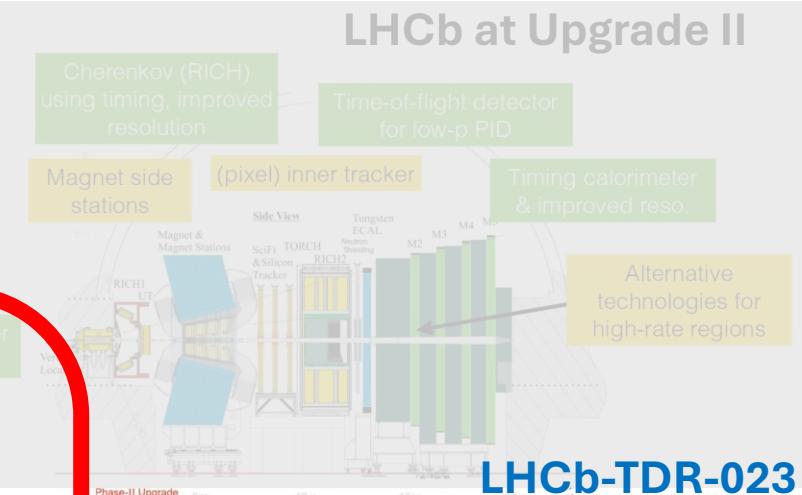


JINST 3 (2008) S08005

Int. J. Mod. Phys. A 30 (2015) 153022



$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \\ \mathcal{L}_{int} &= 9 \text{ fb}^{-1} \\ \mu &\approx 1\end{aligned}$$



Luminosity

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \\ \mathcal{L}_{int} &= 50 \text{ fb}^{-1} \\ \mu &\approx 5\end{aligned}$$

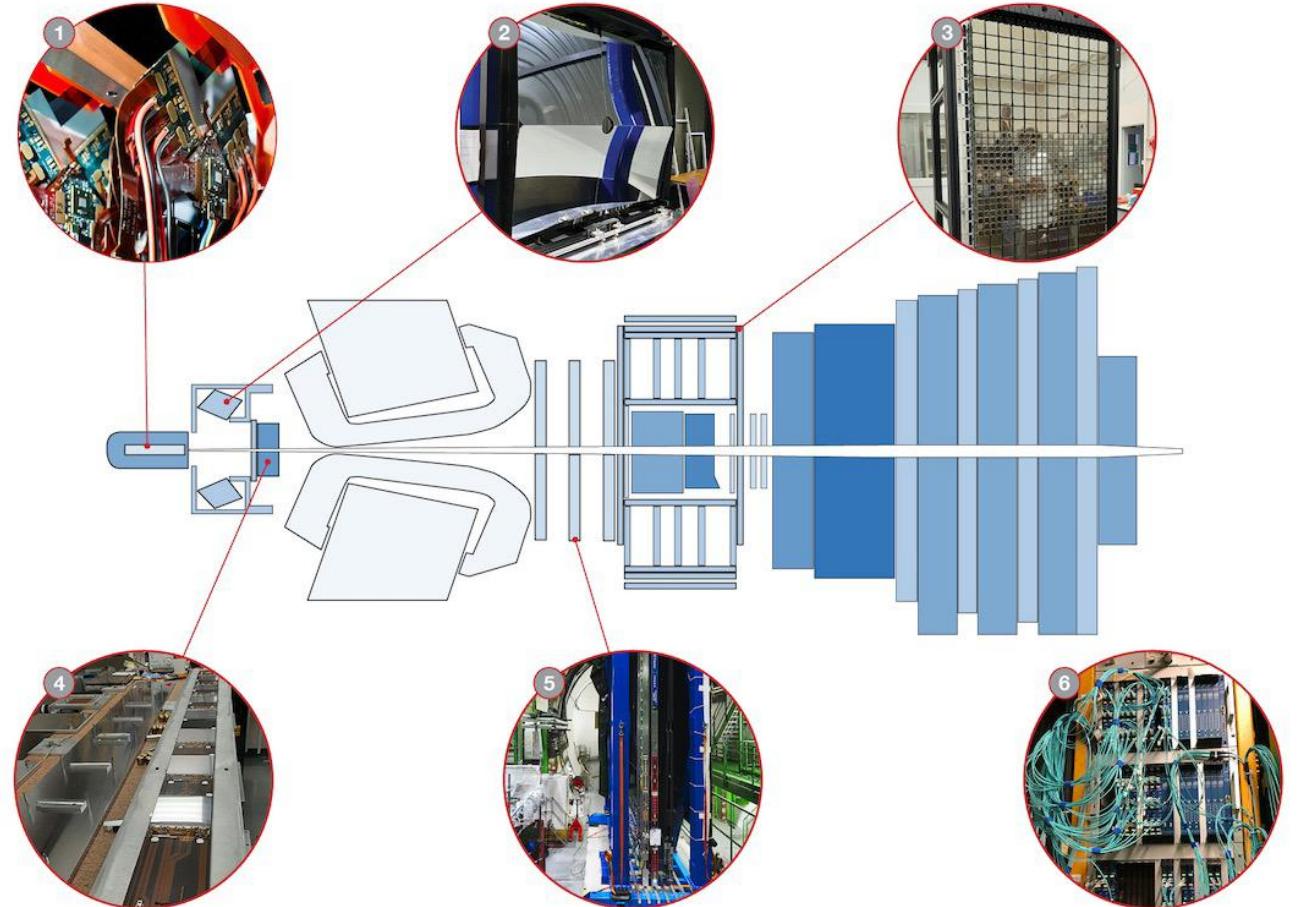
$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= 1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \\ \mathcal{L}_{int} &= 300 \text{ fb}^{-1} \\ \mu &\approx 40\end{aligned}$$

Новое

- Пиксельный вершинный детектор (VELO) ближе к трубе:
 - $8.2\text{mm} \rightarrow 5.1\text{mm}$
- Высокогранулярный трекер
- SciFi-трекер
- RICH новая оптическая система и система считывания ФЭУ
- PLUME – детектор светимости
- SMOG2 – система работы в режиме фиксированной мишени

VELO: NEW SILICON PIXEL DETECTOR

Vertex Locator (VELO) replaced by a new silicon pixel detector, installed as close as 5.1 mm to the proton beams.



TRACKER: New UT

New high granularity silicon microstrip upstream tracker (UT).

RICH1

New optics of RICH1 mirrors, with larger curvature radius.

RICH2

New multi-anode photomultipliers replaced the hybrid photon detectors (HPD) in RICH1 and RICH2.

TRACKER: SCI-FI

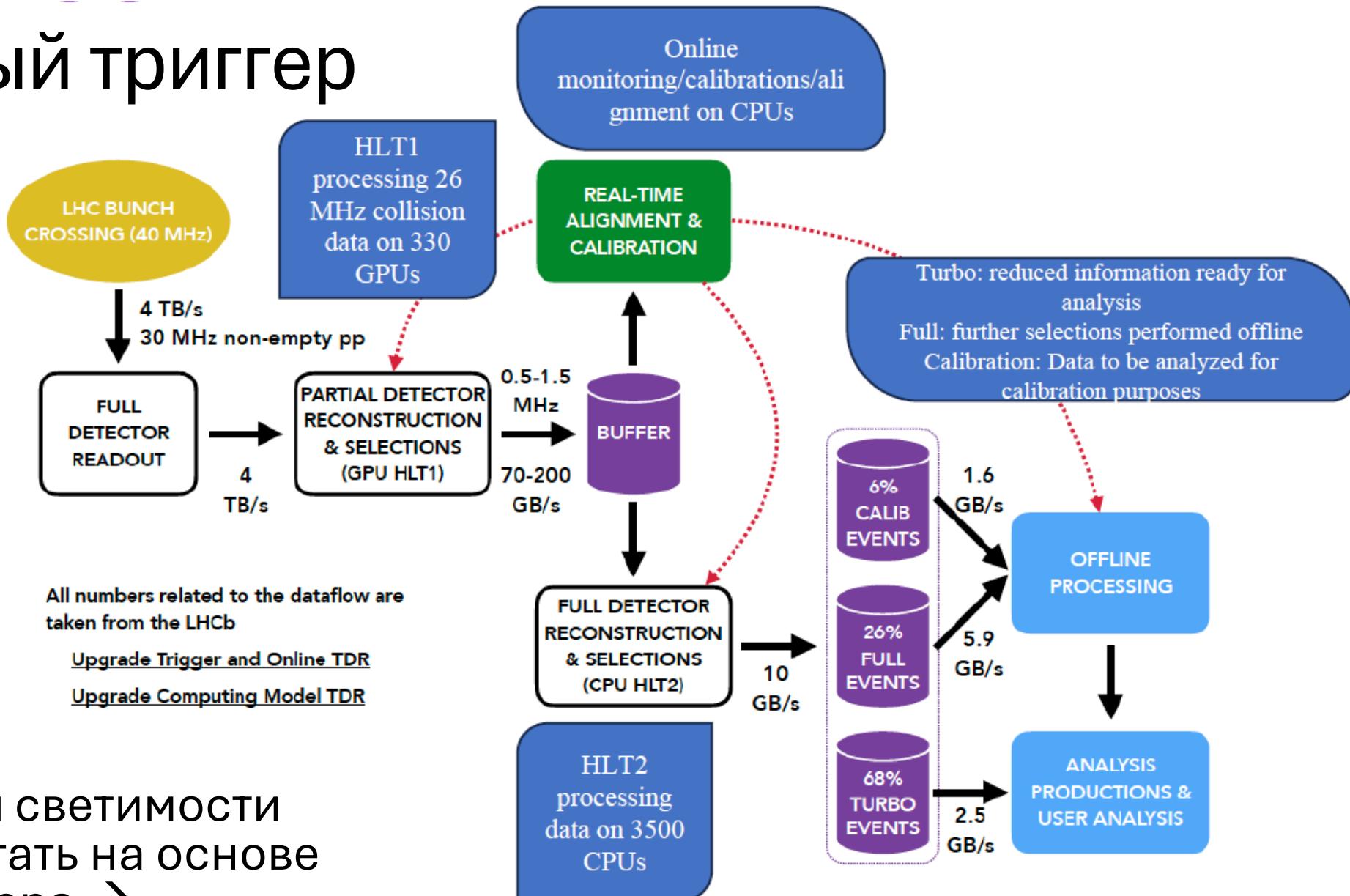
Three new scintillating fibre tracker (Sci-Fi) stations.

FRONT-END ELECTRONICS

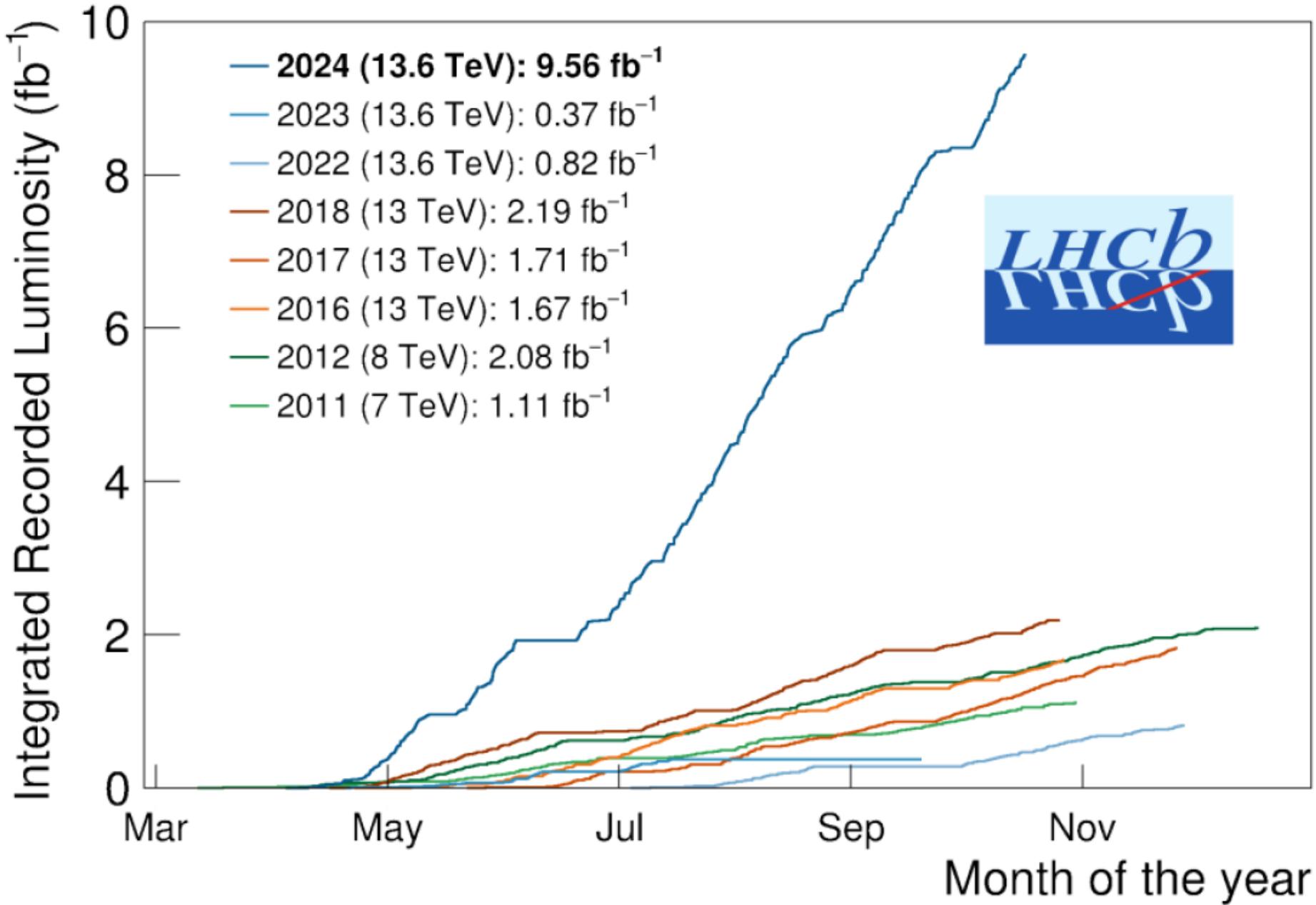
All front-end electronics (i.e. those connected directly to the detectors) have been modified.

Программный триггер

JINST 14 (2019) P04006

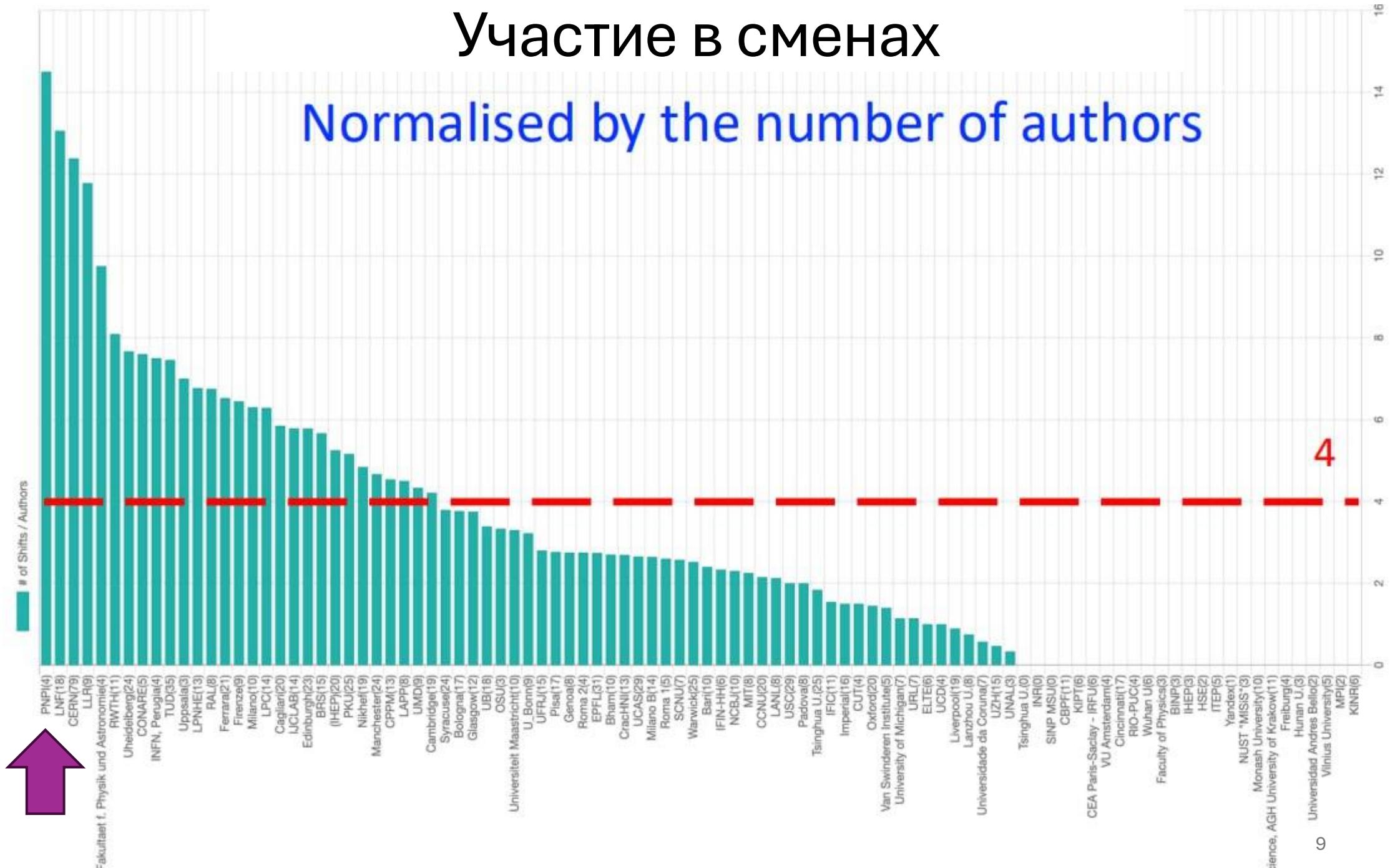


- В режиме высокой светимости невозможно работать на основе аппаратного триггера → **Программный триггер!**



Участие в сменах

Normalised by the number of authors

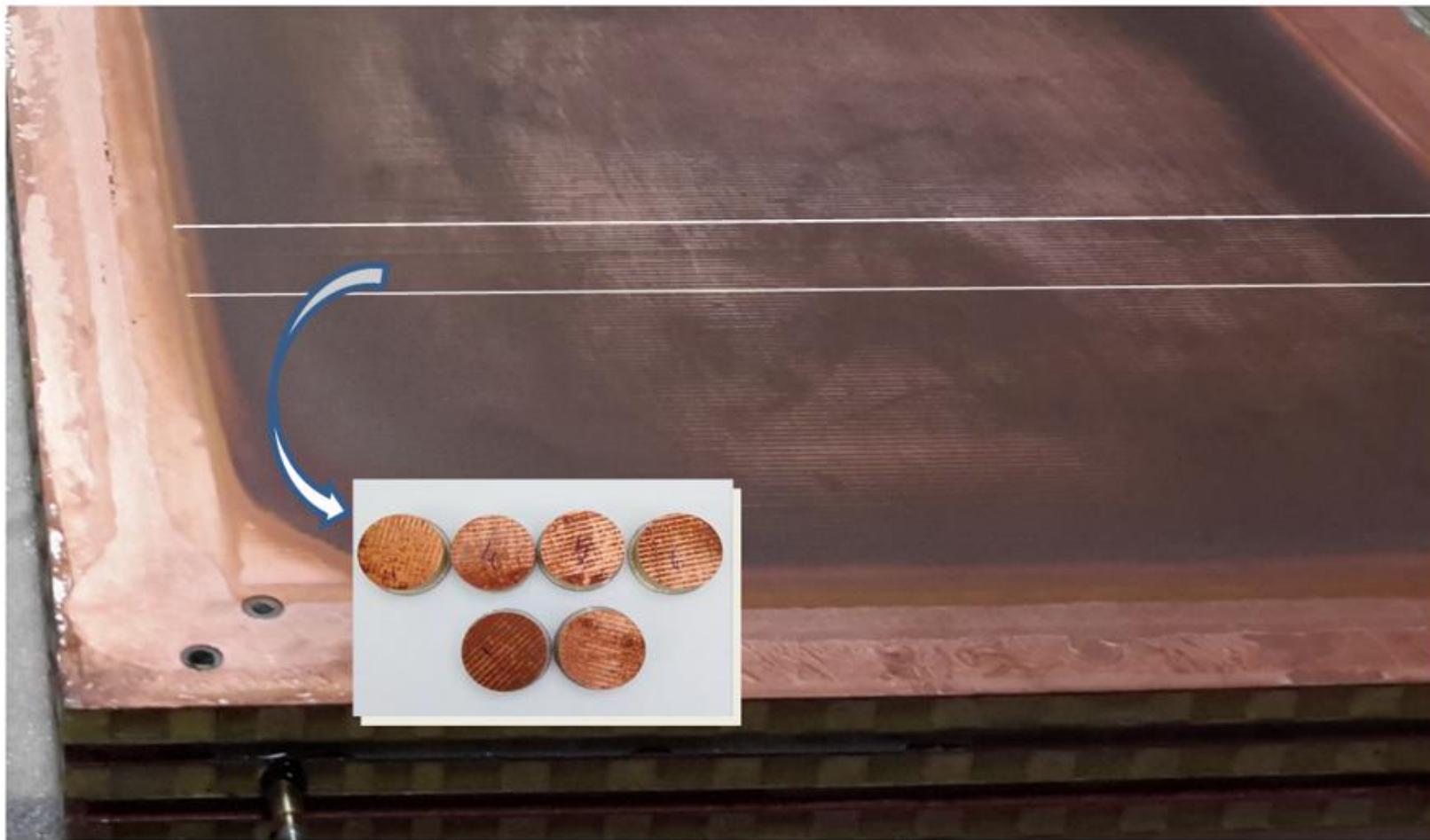


Работы в ОФВЭ

Производство камер высокой гранулярности

- Для региона 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





МПК демонтированная из мюонного детектора для исследования причины появления спонтанных токов ! **2018 г**

Г. Е. Гаврилов, М. Э. Бузоверя, И. А. Карпов, М. В. Таценко, М. В. Ткаченко, Известия Российской академии наук. Серия физическая» № 8, том 86, стр. 1152-1158, 2022.

Катодная панель МПК после разборки.

Белые линии – зона, где находится центр эмиссии электронов.

Вставка внизу – снимок образцов катода со следами осадков.

Медная фольга под микроскопом выглядит рыхлой.

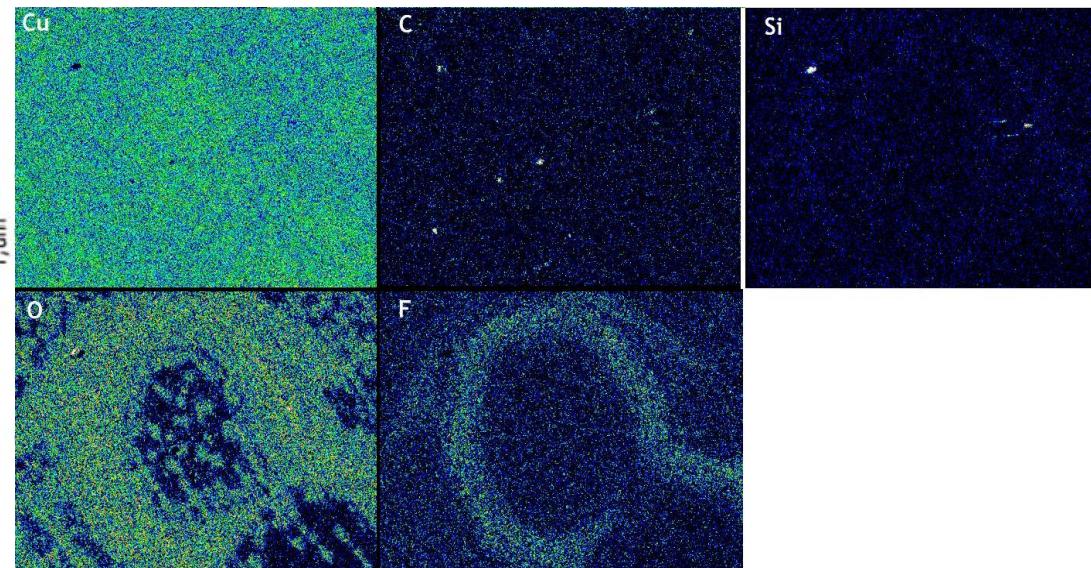
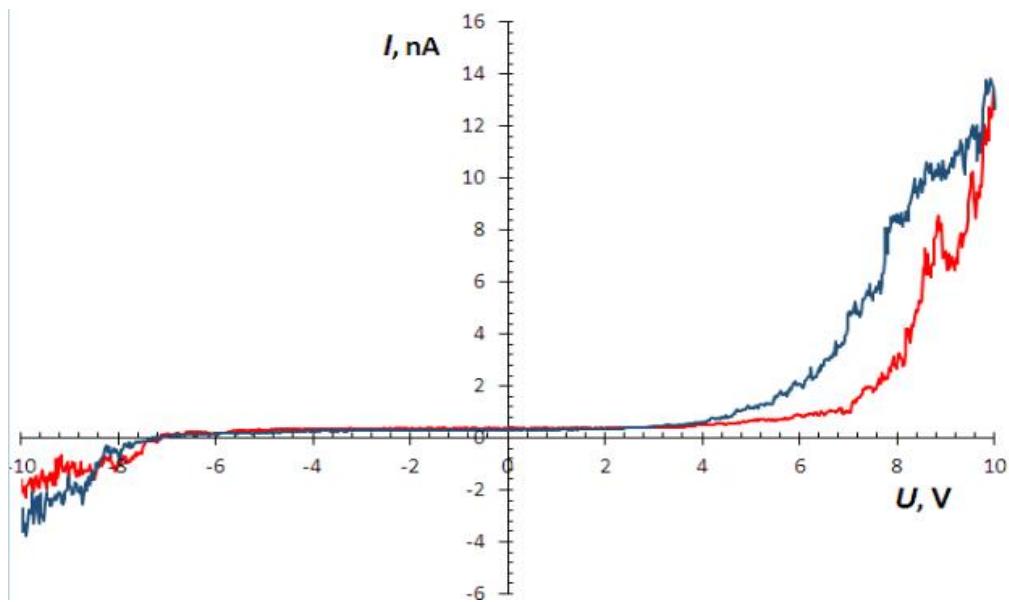


В электрическом поле у катода $E_{\text{катод}} \sim 5 \text{ кВ см}^{-1}$ на катоде происходит хемоабсорбция диссоциировавших молекул газовой смеси CO_2, CF_4

→ вдоль анодных проволочек на катоде образуются полосы осадков

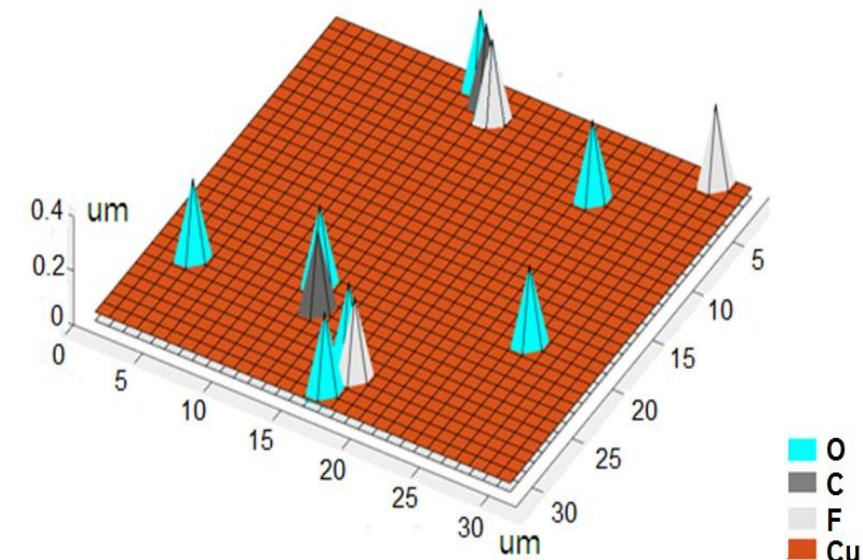
→ → источник образований – плазмохимия газового разряда на аноде !

Г.Е. Гаврилов, О.Е. Маев, А.А. Дзюба и др.



□ Результаты исследований катода МПК методами:

- Обратного Резерфордовского Рассеяния (ОБР, RBS)
- Рамановской спектроскопии
- Атомной Силовой Микроскопии (АСМ)
 - Топография поверхности
 - Исследование растекания заряда
 - Вольт-Амперная характеристика (ВАХ)



Выводы исследования

Комплексное исследование образцов катода МПК LHCb показало, что в условиях работы на БАК, **новым источником МЭ являются наноуглеродные структуры sp^2 -гибридизации с примесями sp^3 -гибридизации, сформировавшие на поверхности центры низкопороговой эмиссии электронов. Обнаруженные центры обладают уникальными характеристиками:**

- формируются при комнатной температуре и атмосферном давлении в условиях постоянного радиационного облучения заряженными частицами; величина токов эмиссии в точке на катоде варьируется от 1-5 нА и зависит от рабочего напряжения МПК;
- появление центров стабильной эмиссии обусловлено длительной работой системы МПК в условиях облучения, поэтому их изучение в лабораторных условиях затруднено;
- центры эмиссии электронов стабильны в режиме максимальных токов при тренировках МПК, которые делятся от недели до двух месяцев.

Полученные результаты имеют хорошую повторяемость спустя длительные (до 1 года !) промежутки времени между измерениями, что означает хорошую устойчивость спонтанно-образованных эмиссионных наноуглеродных структур в МПК.

Некоторые физические результаты

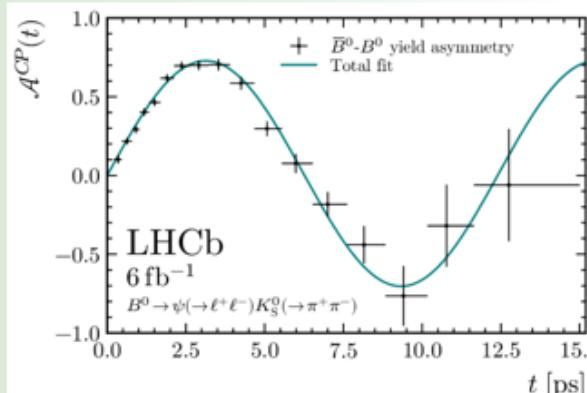


Нарушение СР четности, одно из условий, необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной (А.Д. Сахаров)

- СР инвариантность нарушена в кварковом секторе Стандартной Модели (СМ);
- Ожидается, что проявления новой физики, выходящей за пределы СМ, связаны с заметным нарушением СР-четности;
- Наблюдаемые Φ_s и $\sin(2\beta)$ могут быть точно рассчитаны в рамках СМ так как зависят от параметров матрицы кваркового смешивания;
- LHCb измеряет Φ_s и $\sin(2\beta)$, изучая характеристики распадов прелестных мезонов (B_s^0 и B^0).

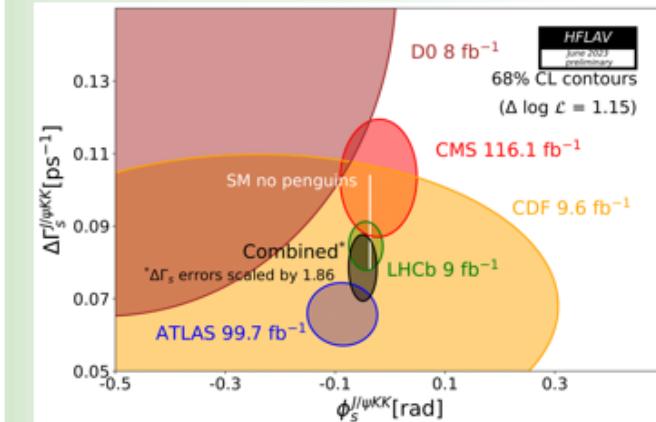
- $\Phi_s: B_s^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \phi(\rightarrow K^+ K^-)$
- $\sin(2\beta): B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_s^0(\rightarrow \pi^+ \pi^-)$
- Регистрация мюонов необходима для надежного выделения сигнальных событий
- Мюонная система LHCb разработана, создана и эксплуатируется сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Например, распределение для зависящей от времени СР-асимметрии, для распадов $B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_s^0(\rightarrow \pi^+ \pi^-)$ свидетельствует о нарушении СР инвариантности и позволяет извлечь величину $\sin(2\beta)$



Результаты

- $\Phi_s = -0,039 \pm 0,022_{\text{стат}} \pm 0,006_{\text{систем}}$
- $\sin(2\beta) = 0,717 \pm 0,013_{\text{стат}} \pm 0,008_{\text{систем}}$

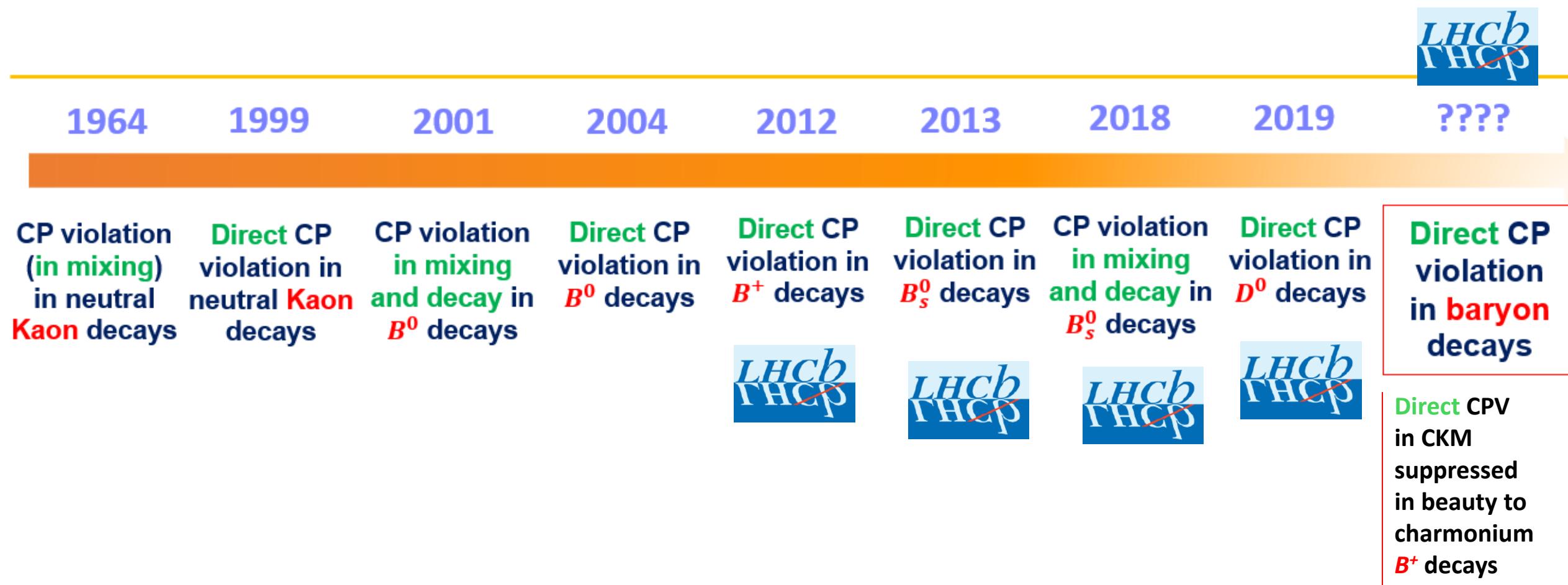


Полученные значения Φ_s и $\sin(2\beta)$ являются самыми точными на сегодняшний день и находятся в хорошем согласии в пределах имеющихся неопределенностей как с результатами предыдущих измерений, так и с предсказаниями СМ

arXiv:2309.09728
arXiv:2308.01468

Результаты направлены в PRL

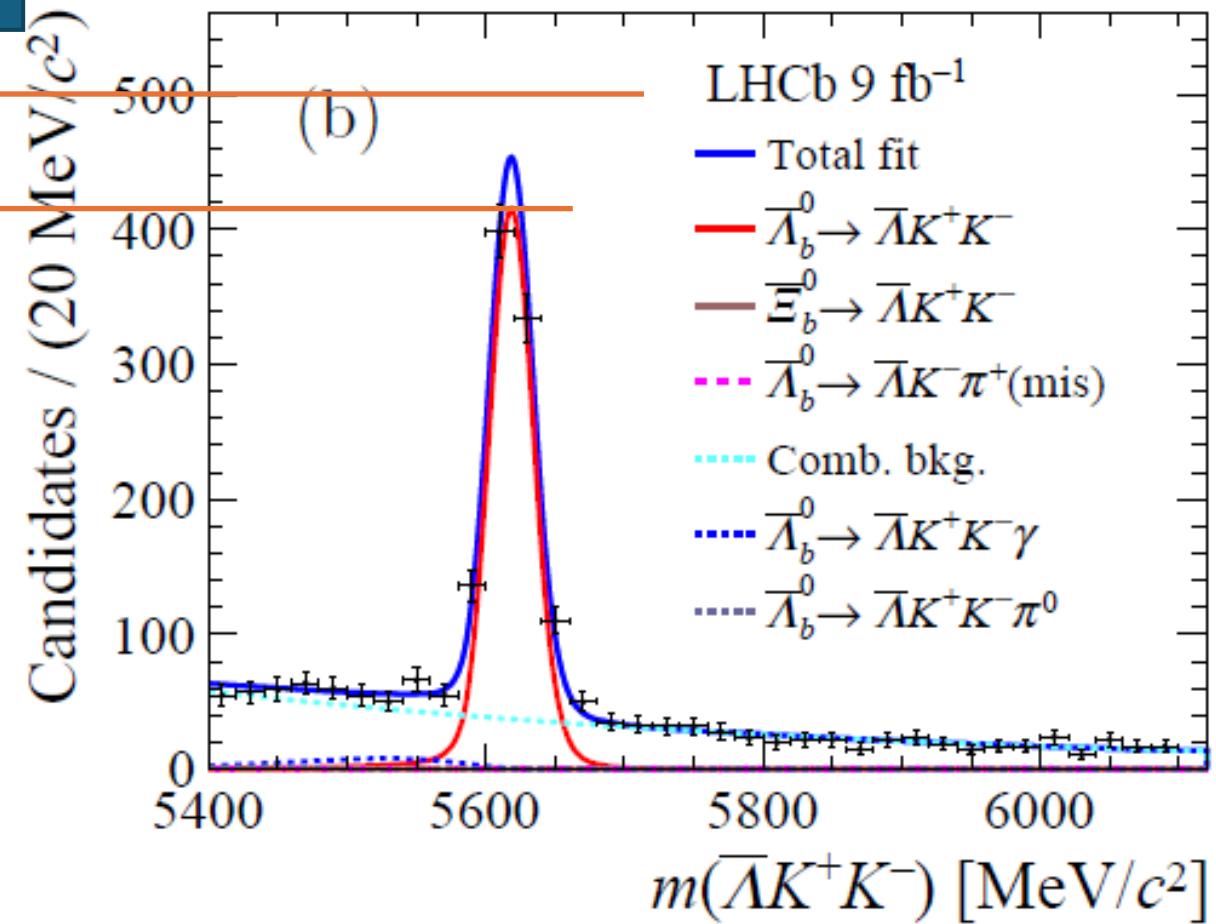
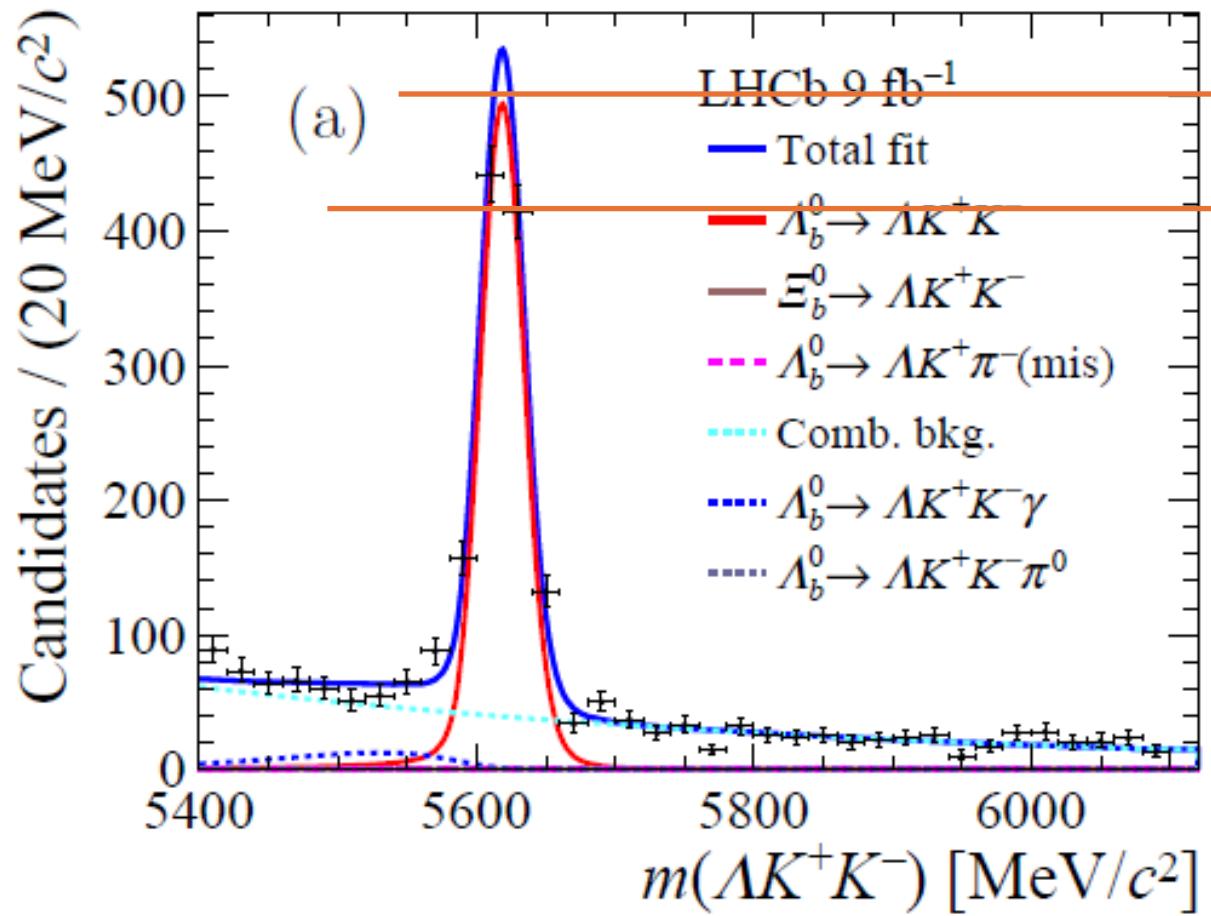
История исследования СР-нарушения



СР-нарушение в распадах барионов

$$A_{\text{Raw}}^f = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

$$A_{CP}^f = \frac{\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

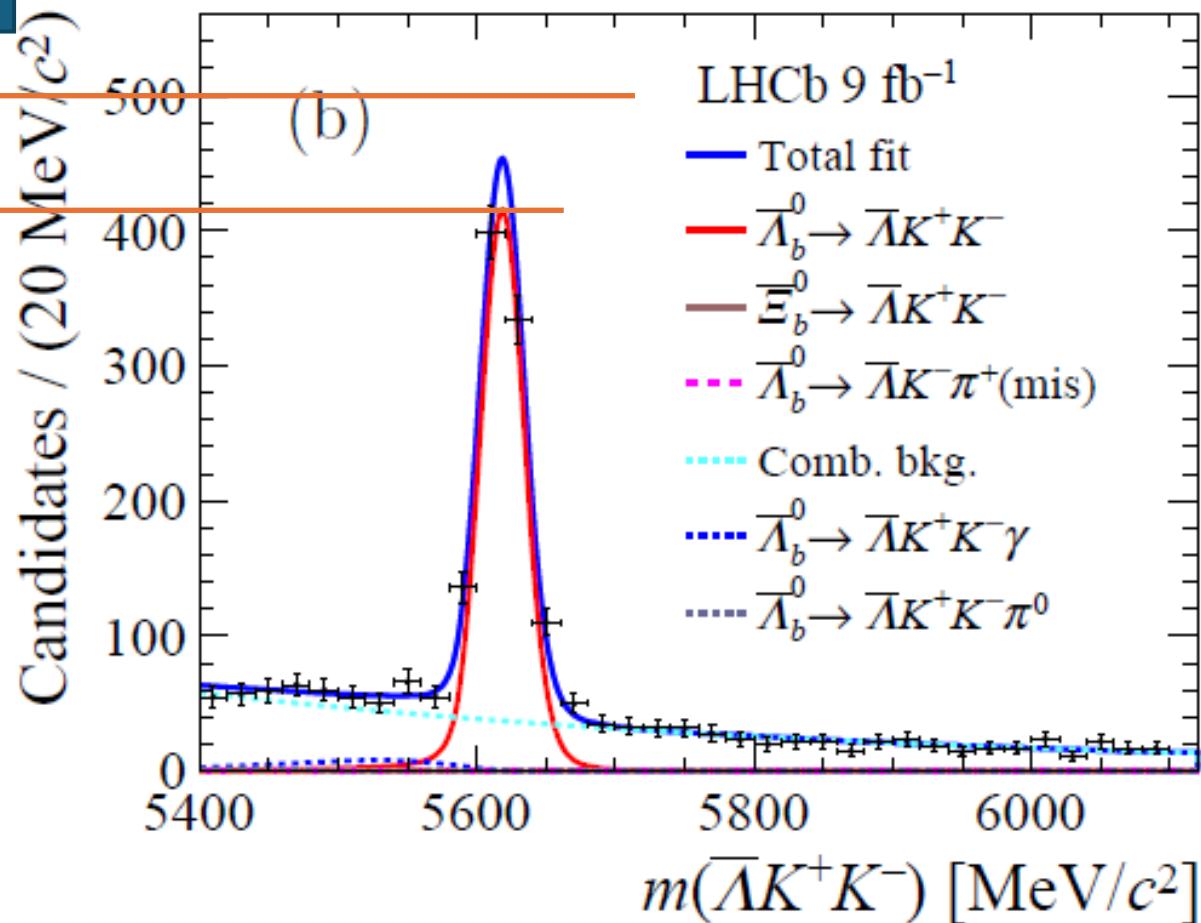
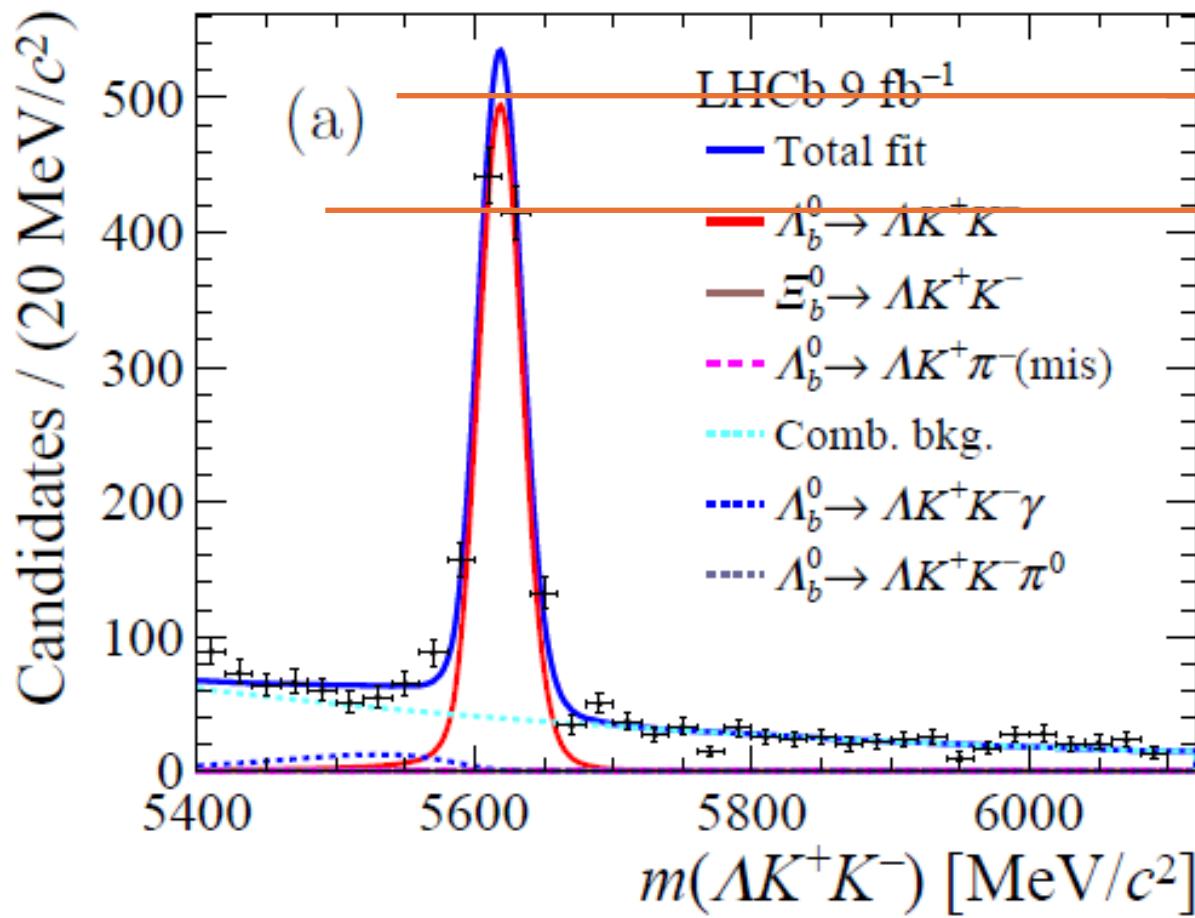


$$A_{\text{Raw}}^f = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

$$\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$$

$$\Delta A_{CP} = 0.083 \pm 0.023 \pm 0.016$$

First evidence of CP violation, 3.1σ



СР-нарушение в распадах $B^+ \rightarrow J/\psi h^+$ ($h=\pi, K$)

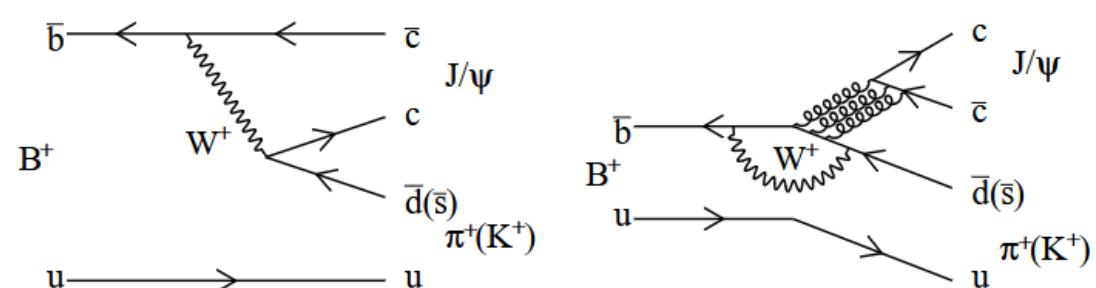
- $b \rightarrow c\bar{c}q$ кварковый переход ($q = s, d$)
- $\Delta A_{CP} \equiv A_{CP}(B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) - A_{CP}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)$
- Отношение вероятностей распада позволяет «контролировать» вклад различных диаграмм
- Критично для измерения $\sin(2\beta)$

$$\mathcal{R}_{\pi/K} \equiv \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)}$$

- LHCb Run-1:

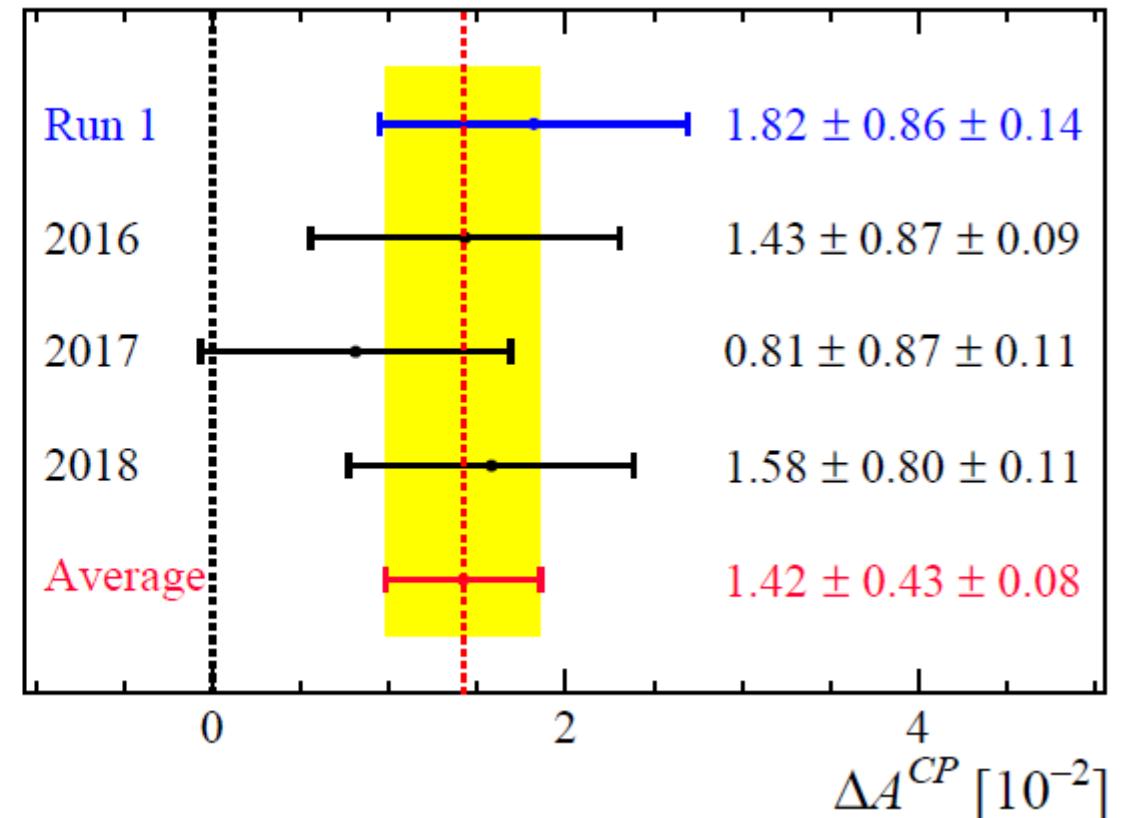
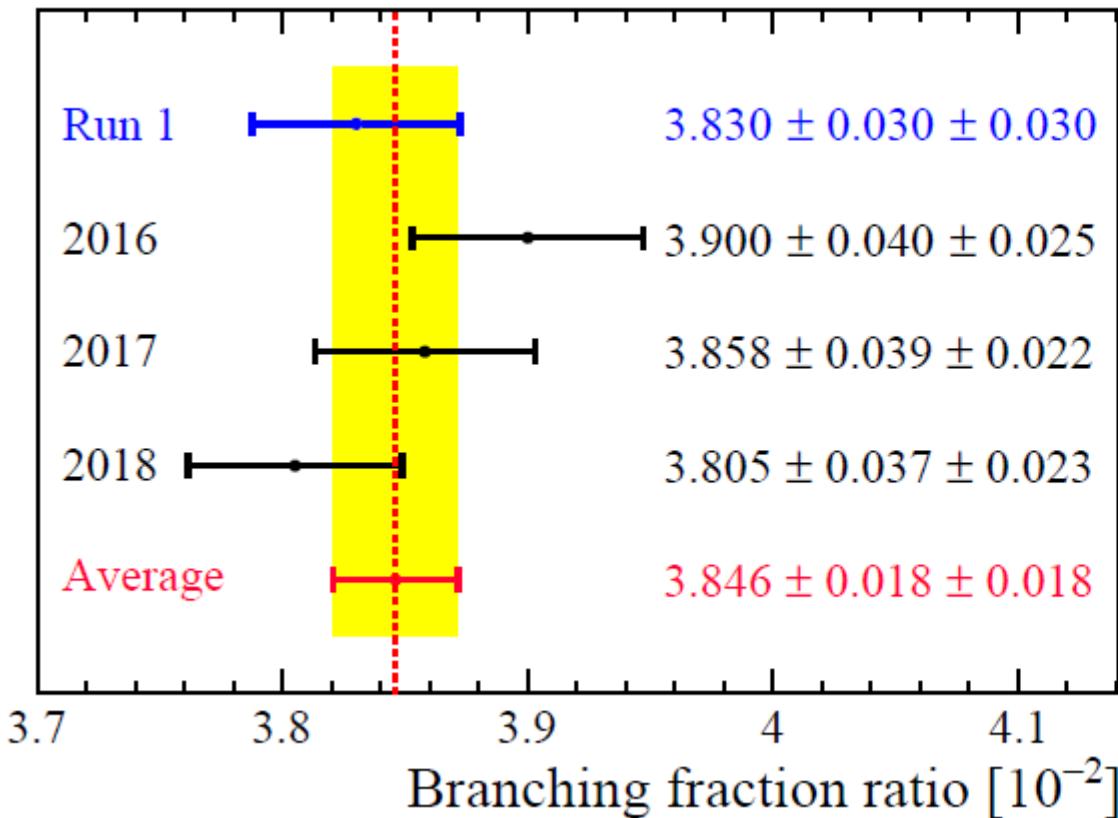
$$\Delta A_{CP} = (1.82 \pm 0.86_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$$

$$R_{\pi/K} = (3.83 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.03_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$$



Объединение с данными Run-1

arXiv:2411.12178



Run-2

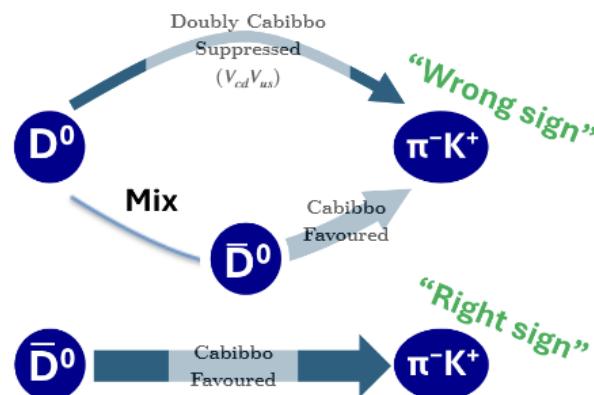
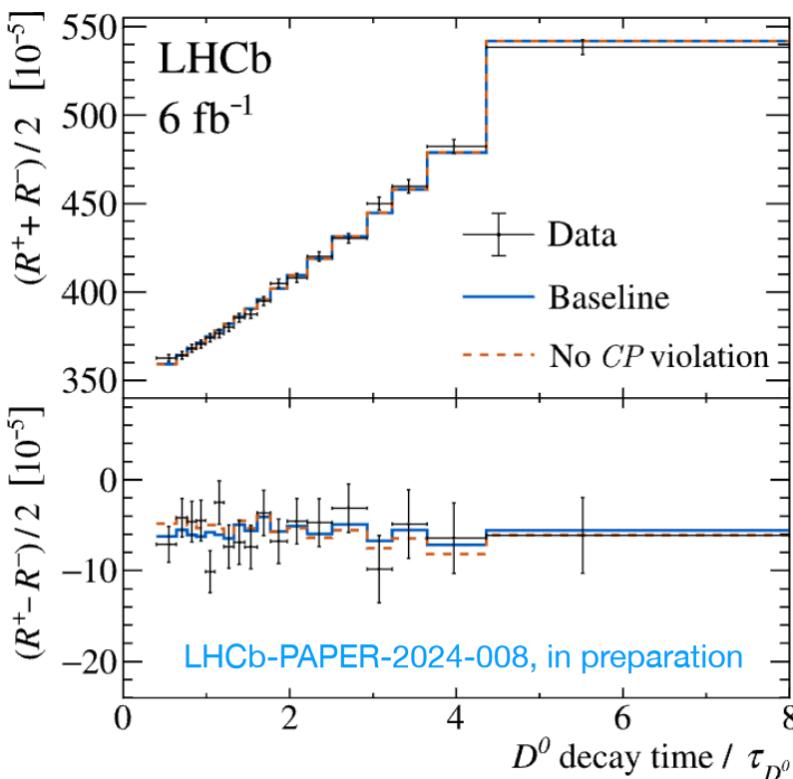
$$\mathcal{R}_{\pi/K} = (3.852 \pm 0.022 \pm 0.018) \times 10^{-2},$$
$$\Delta A^{CP} = (1.29 \pm 0.49 \pm 0.08) \times 10^{-2}.$$

Статистическая значимость
отклонения от нуля 3.2 стандартных
отклонения

Указание на CP-нарушение

Поиск СР-нарушения при смешивании очарованных мезонов

- Прямое СР-нарушение в чарм-секторе наблюдалось на LHCb
 - $\Delta A_{CP} \neq 0$, [PRL 122 \(2019\) 211803](#)
 - Скорее всего $D \rightarrow \pi\pi$, [PRL 131 \(2023\) 091802](#)
 - Косвенное СР-нарушение?
 - Run-2 / Prompt-таггинг ($D^{*\pm} \rightarrow D^0 \pi^\pm$)



Fit the time-dependent ratio $R(t)$

$$R_{K\pi}^+(t) \equiv \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow K^+\pi^-)}{\Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow K^+\pi^-)}$$

$$R_{K\pi}^-(t) \equiv \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow K^-\pi^+)}{\Gamma(D^0(t) \rightarrow K^-\pi^+)}$$

Ratios depends on D^0 mixing parameters and \mathcal{CP} violating parameters

$$R_{K\pi}^\pm(t) \approx R_{K\pi}(1 \pm \underline{A_{K\pi}}) + \sqrt{R_{K\pi}(1 \pm \underline{A_{K\pi}})}(c_{K\pi} \pm \underline{\Delta c_{K\pi}}) \frac{t}{\tau_{D^0}} + (c'_{K\pi} \pm \underline{\Delta c'_{K\pi}}) \left(\frac{t}{\tau_{D^0}} \right)^2$$

CPV in decay CPV in mixing
↓ ↓ ↓
DCS Interference Mixing

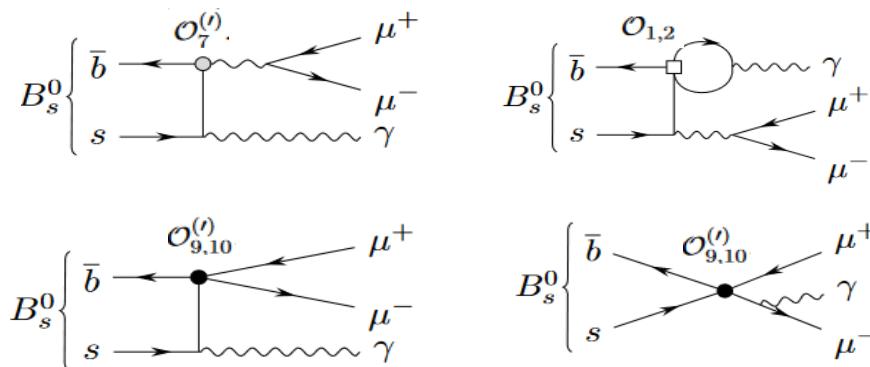
$R_{K\pi}$	$(343.1 \pm 2.0) \times 10^{-5}$
$c_{K\pi}$	$(51.4 \pm 3.5) \times 10^{-4}$
$c'_{K\pi}$	$(13.1 \pm 3.7) \times 10^{-6}$
$A_{K\pi}$	$(-7.1 \pm 6.0) \times 10^{-3}$
$\Delta c_{K\pi}$	$(3.0 \pm 3.6) \times 10^{-4}$
$\Delta c'_{K\pi}$	$(-1.9 \pm 3.8) \times 10^{-6}$

Первое наблюдение квадратичного члена

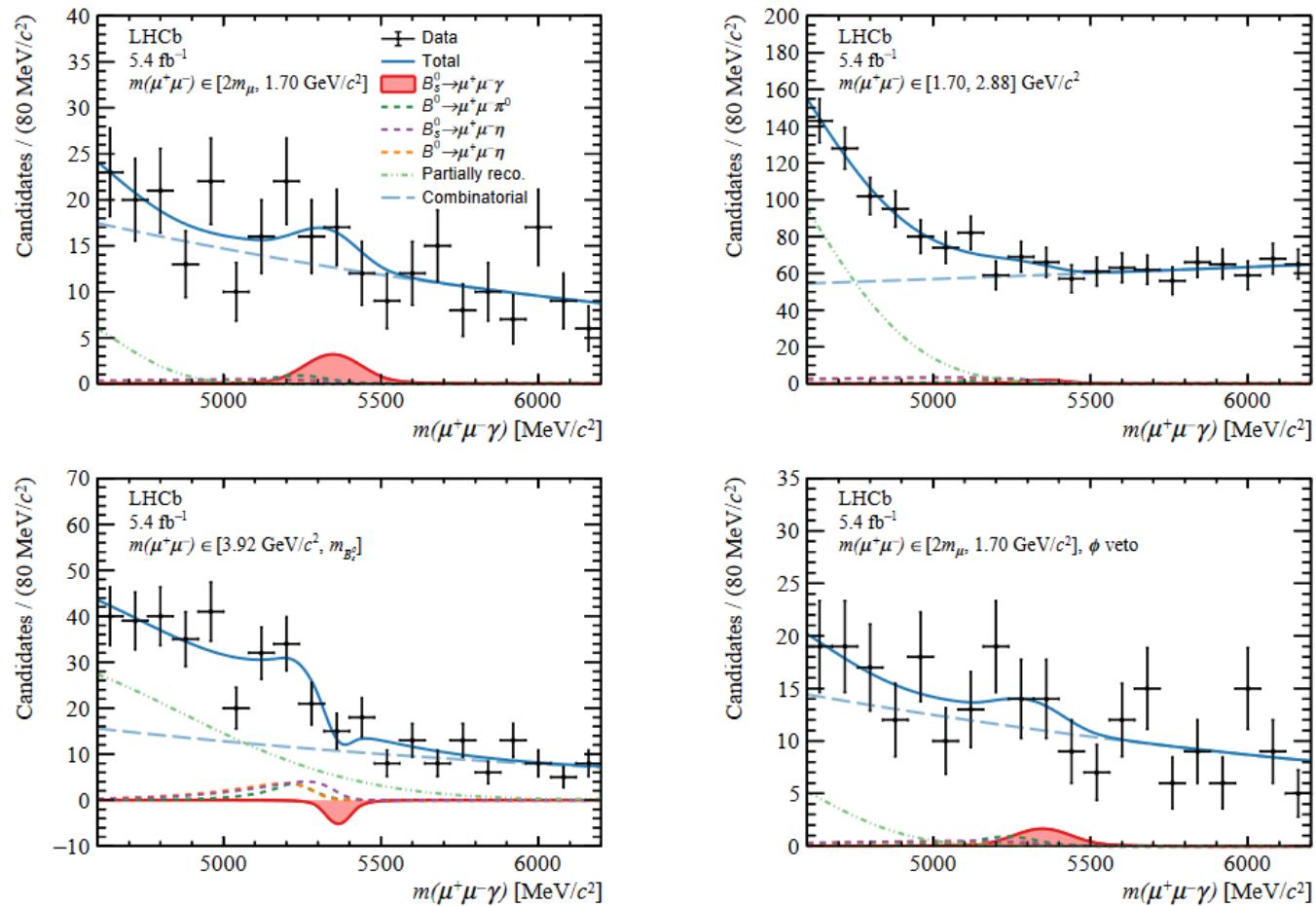
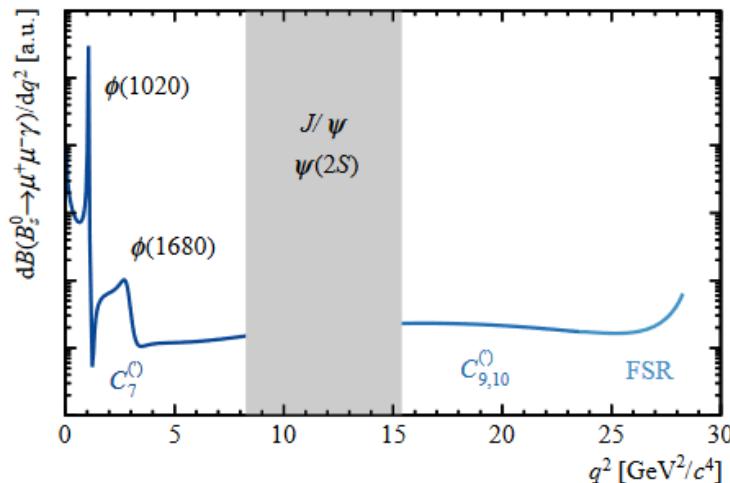
Нет указаний на СР-нарушение

Поиск $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$

- В СМ вероятность распадов сильно подавлена (петлевые диаграммы + $\alpha_{\text{эм.}}$)
- Обнаружение \rightarrow указание на Новую физику
- Тип НФ \rightarrow оператор в вилсоновском разложении



Чувствительность
к разным сценариям
в разных диапазонах
масс мюонной пары

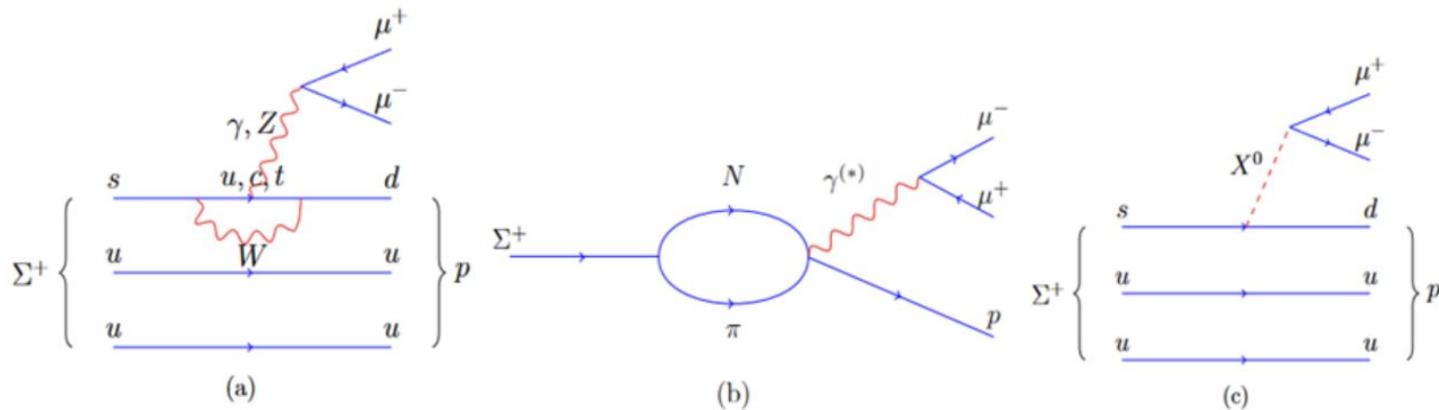


$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma) < 4.2 \times 10^{-8}, \quad m(\mu^+ \mu^-) \in [2m_\mu, 1.70] \text{ GeV}/c^2,$$

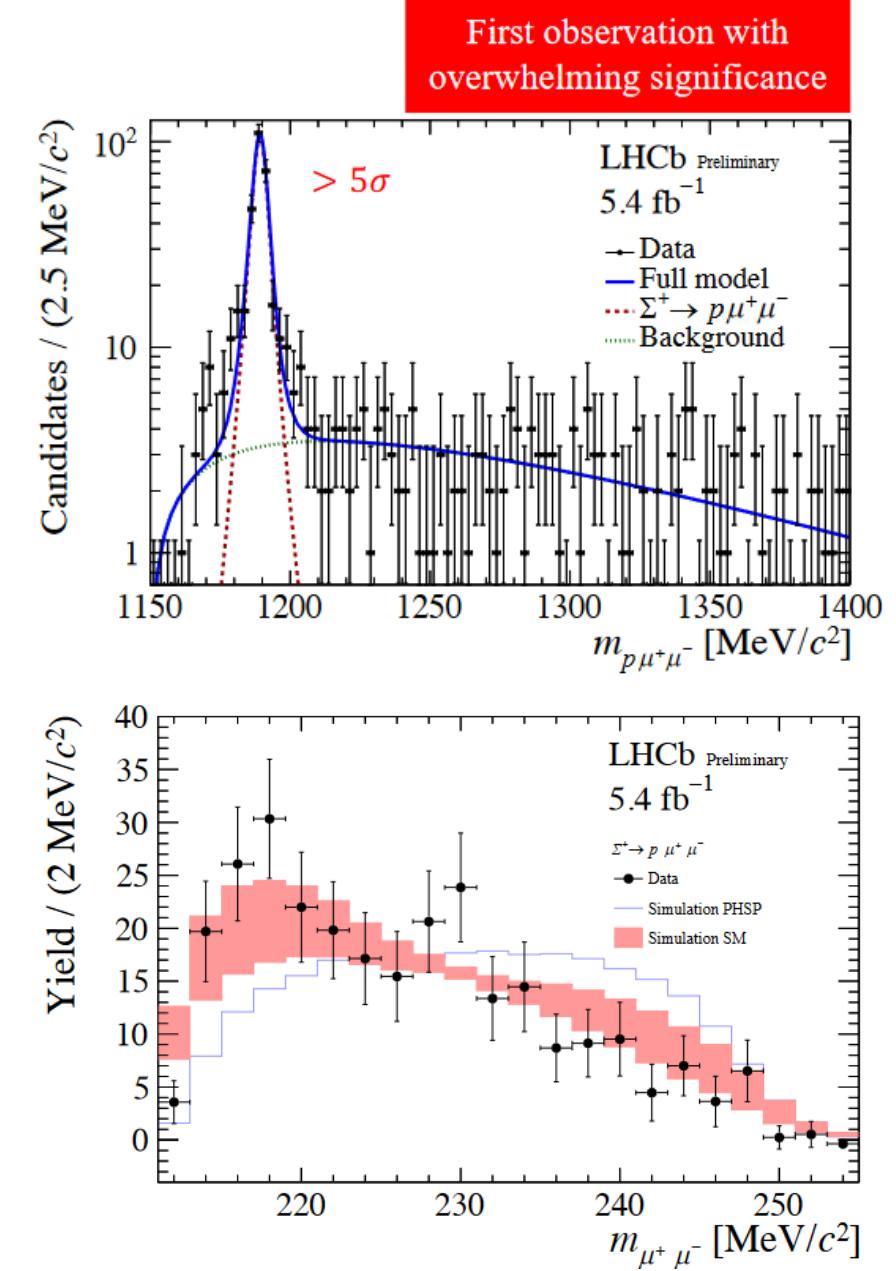
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma) < 7.7 \times 10^{-8}, \quad m(\mu^+ \mu^-) \in [1.70, 2.88] \text{ GeV}/c^2,$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma) < 4.2 \times 10^{-8}, \quad m(\mu^+ \mu^-) \in [3.92, m_{B_s^0}] \text{ GeV}/c^2,$$

Первое наблюдение $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$



- [Phys. Rev. Lett. 120 \(2018\) 221803](#) (указание)
- Данные Run-2 позволили достоверно обнаружить этот распад
- Апроксимация при помощи метода максимального правдоподобия
- Параметризация сигнала Hypatia function:
 - 279 ± 19 событий-кандидатов
- Описание фона – Argus function
- Хорошее согласие с предсказаниями СМ по распределению масс мюонной пары

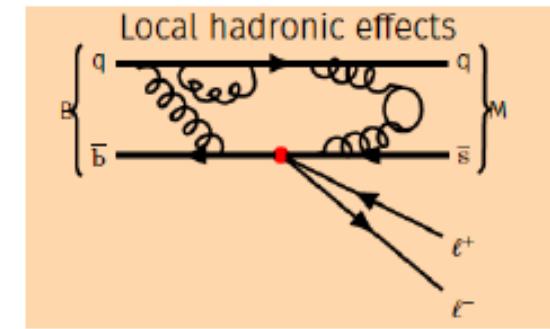
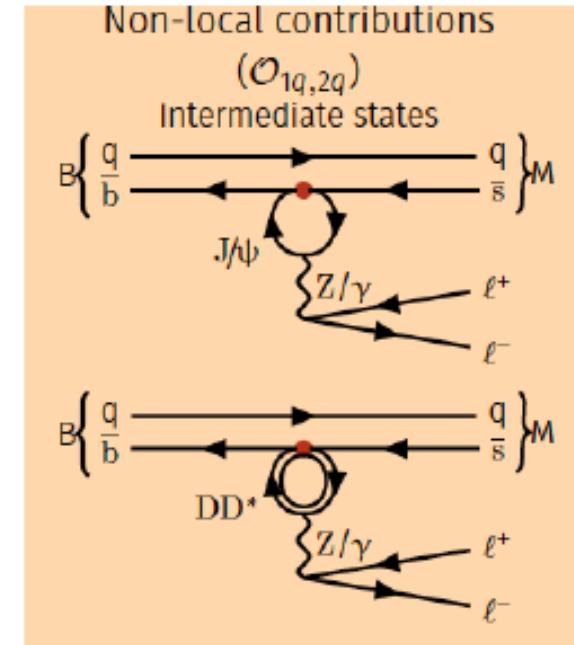
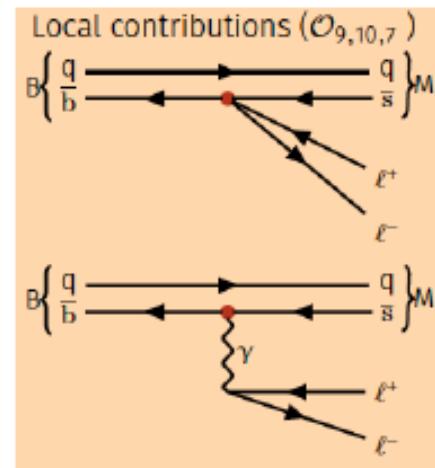
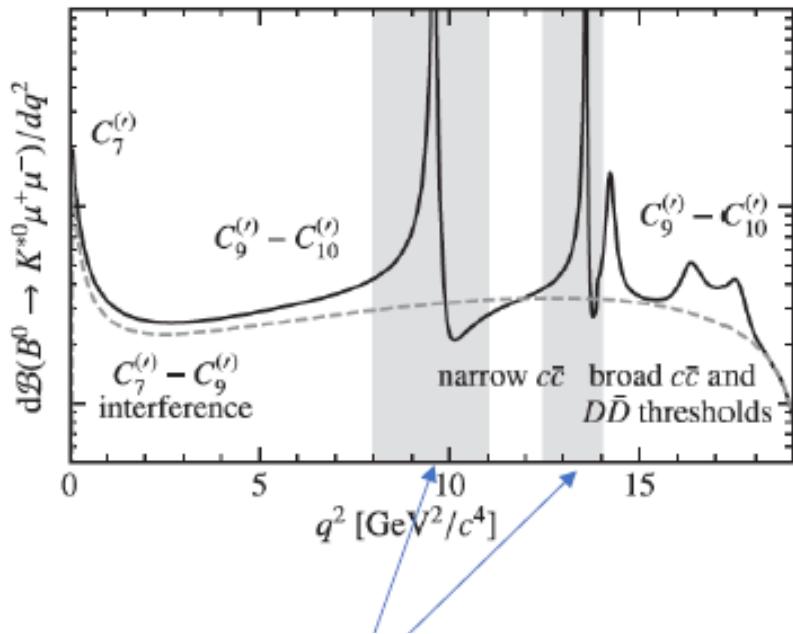


Новый подход к учету нелокальных форм-факторов

$$B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$$

Необходимо учесть вклад адронных резонансов!

[Phys. Rev. D 109 \(2024\) 052009](#)



И локальных
КХД поправок

В предыдущем подходе области чармониевых резонансов не рассматривались, но в новом они входят в амплитуду!

$$\mathcal{A}_\lambda^{L,R}(B \rightarrow M_\lambda \ell \ell) = N_\lambda \left\{ (C_9 \mp C_{10}) \mathcal{F}_\lambda(q^2) - 16\pi^2 \frac{M_B}{m_b} \mathcal{H}_\lambda(q^2) \right\}$$

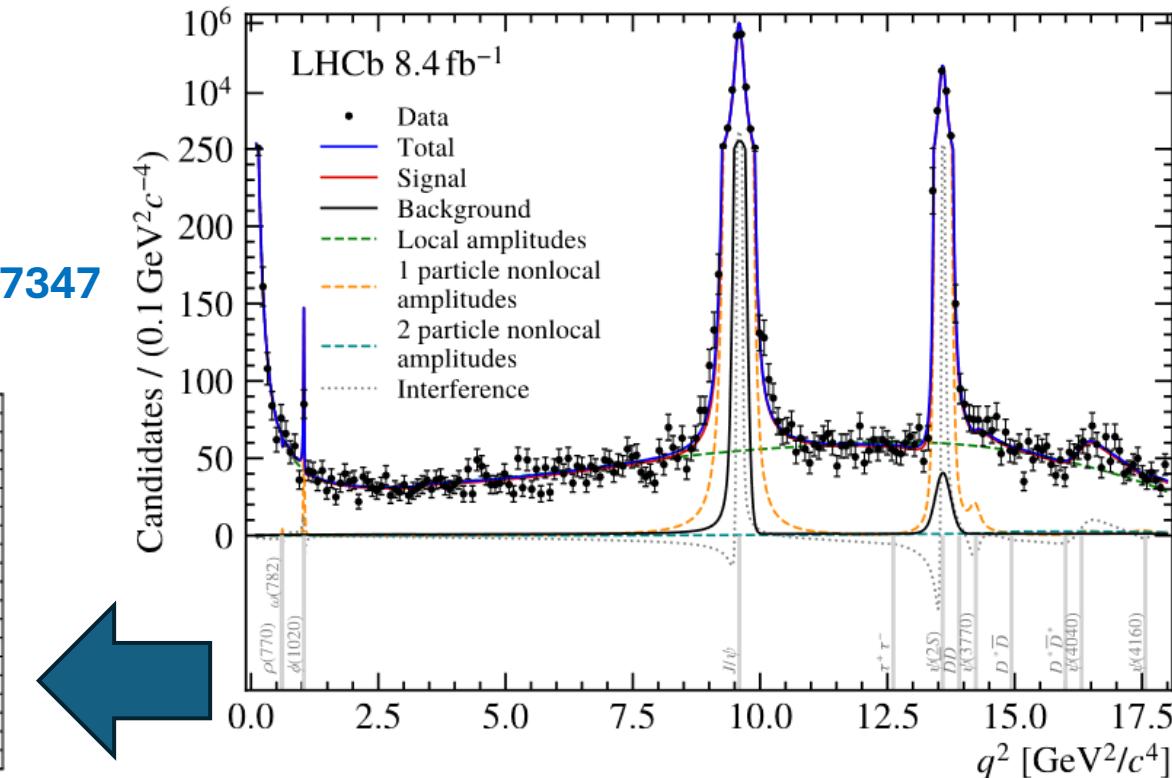
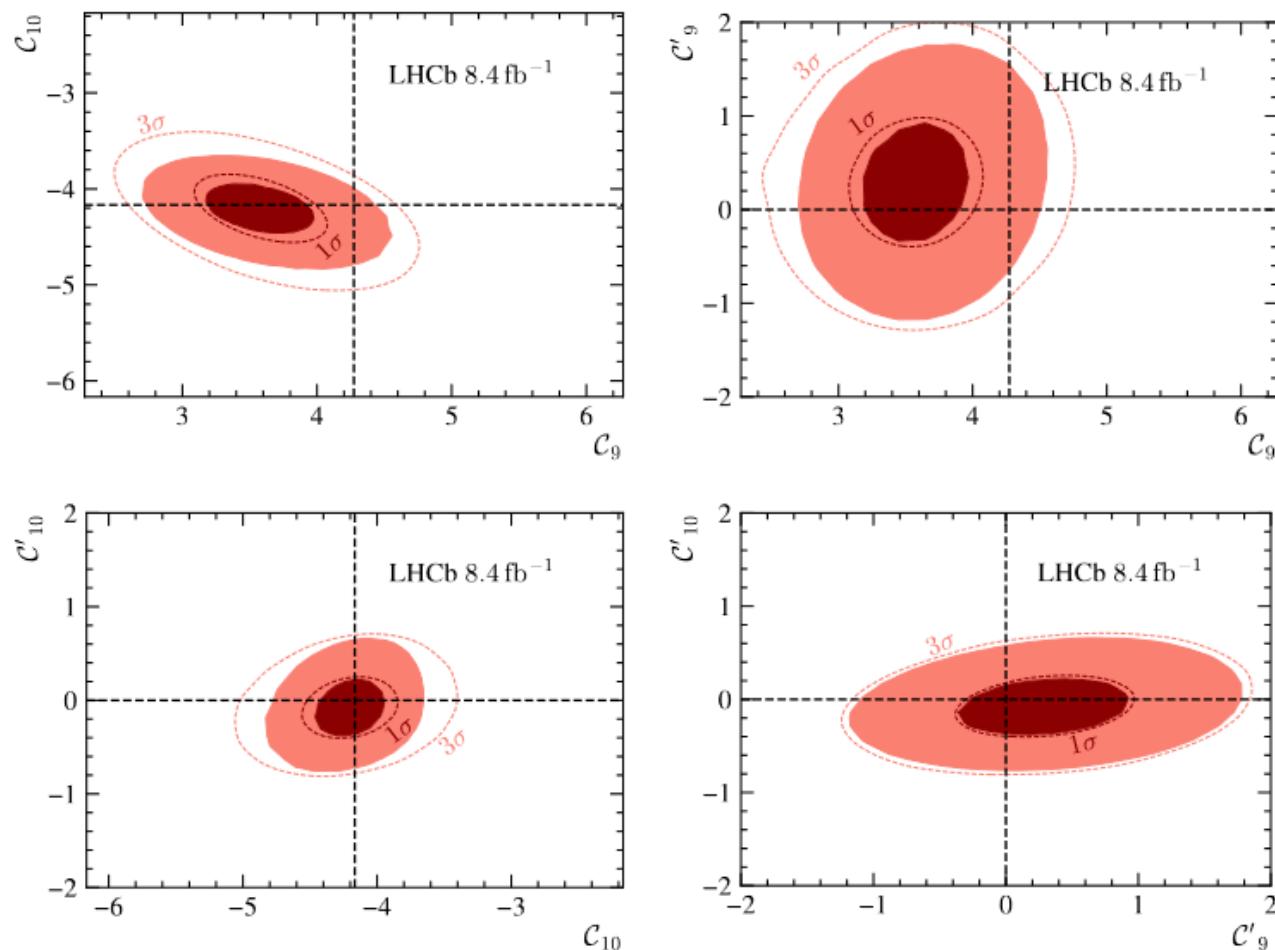
Local form factors

Non-local form factors

q^2 – квадрат массы ди-лептона

Comprehensive analysis of local and nonlocal amplitudes in the $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ decay

arXiv:2405.17347

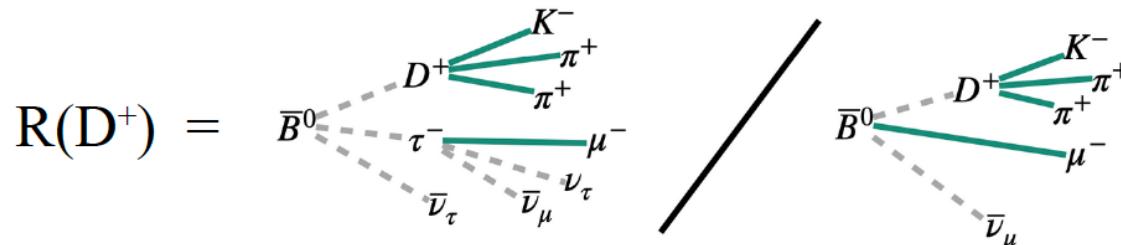


- Используемая модель также учитывает перерассеяние $B^0 \rightarrow K^{*0} [\tau^+ \tau^- \rightarrow \mu^+ \mu^-]$
- Многомерный амплитудный анализ
- Вилсоновский коэффициент C_9 , отвечающий векторному оператору, отклоняется от предсказаний СМ на уровне 2.1σ
- Другие коэффициенты находятся в лучшем согласии с предсказаниями СМ

$R(D)$ и $R(D^*)$

$$\mathcal{R}(D^*) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \bar{\nu})}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \bar{\nu})}$$

- Совместное измерение $R(D)$ и $R(D^*)$ в мюонном канале распада тау-лептона для поиска нарушения лептонной универсальности \rightarrow Новая Физика на «древесном» уровне СМ



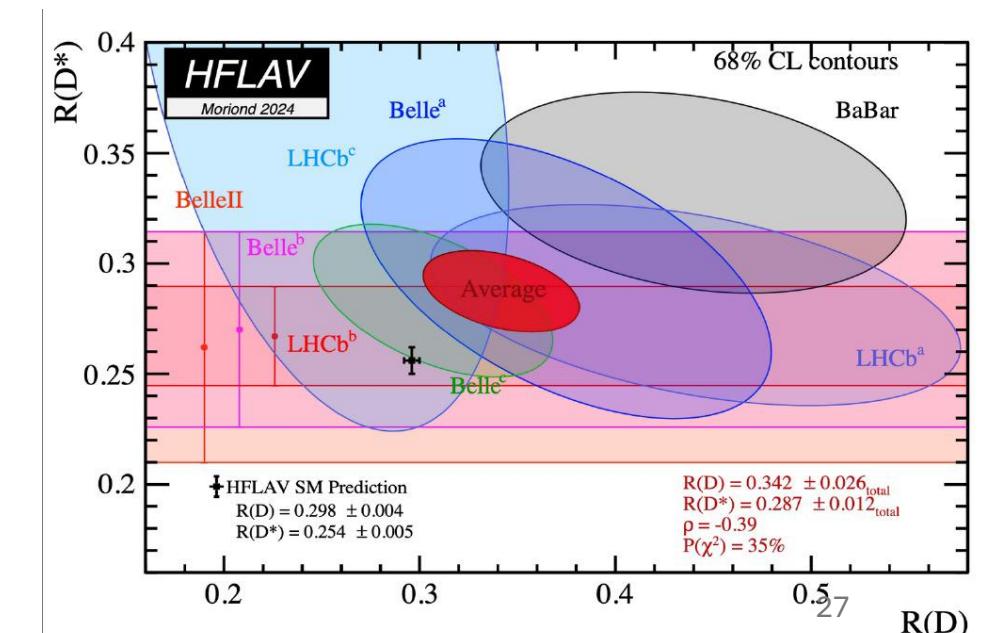
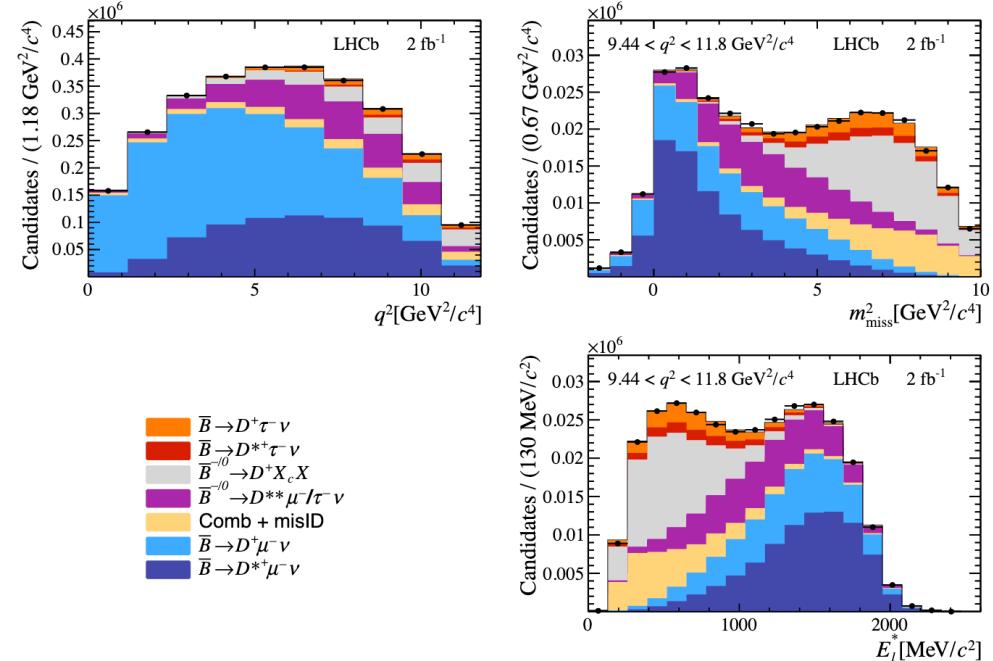
- 3D-аппроксимация с использованием шаблонов q^2 , m_{miss}^2 и E_l^* распределений

$$R(D^+) = 0.249 \pm 0.043 \pm 0.047$$

$$R(D^{*+}) = 0.402 \pm 0.081 \pm 0.085$$

Corr. Coef. -0.39

- Полученный результат 0.8σ от предсказаний СМ и 1.1σ от мирового среднего
- Объединенные результаты на 3.17σ расходятся с предсказаниями СМ



Прецизионное измерение времени жизни Ξ_b^-

- Heavy quark expansion (HQE) – одна из важнейших схем расчета в физике-ароматов
- На предсказания HQE опираются методы извлечение параметров кваркового смешивания, инклюзивные измерения, определение осцилляционных параметров
- Время жизни предсказывается в рамках расчетов на основе HQE, поэтому его уточнение – важная экспериментальная задача

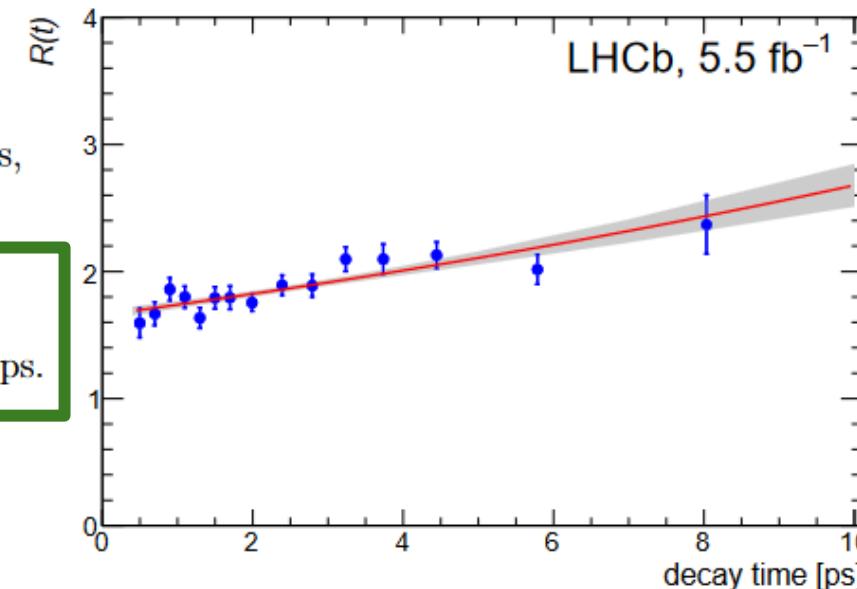
$$r_\tau^{\text{Run 2}} = 1.076 \pm 0.013 \pm 0.006,$$

$$\tau_{\Xi_b^-}^{\text{Run 2}} = 1.575 \pm 0.019 \pm 0.009 \pm 0.011 \text{ ps},$$

$$r_\tau^{\text{Run 1,2}} = 1.078 \pm 0.012 \pm 0.007,$$

$$\tau_{\Xi_b^-}^{\text{Run 1,2}} = 1.578 \pm 0.018 \pm 0.010 \pm 0.011 \text{ ps}.$$

Уточненные данные и предсказания на основе HQE совпадают!



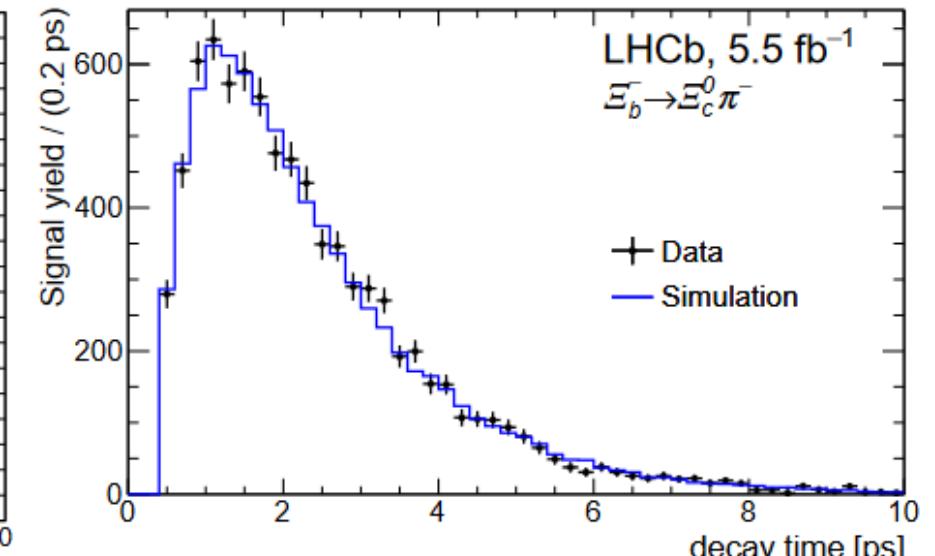
$$R(t) \equiv \frac{N[\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^-](t)}{N[\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-](t)} \cdot \frac{\varepsilon[\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-](t)}{\varepsilon[\Xi_b^- \rightarrow \Xi_c^0 \pi^-](t)} = R_0 \exp(\lambda t),$$

$$\lambda \equiv \frac{1}{\tau_{\Lambda_b^0}} - \frac{1}{\tau_{\Xi_b^-}}. \quad r_\tau \equiv \frac{\tau_{\Xi_b^-}}{\tau_{\Lambda_b^0}} = \frac{1}{1 - \lambda \tau_{\Lambda_b^0}}.$$

HQE : неопределенность 1.9%

Данные до 2024 г.: 2.5%

$$r_\tau^{\text{HQE}} = 1.078 \pm 0.021$$



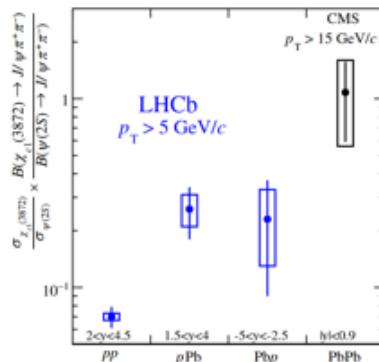
arXiv:2406.12111



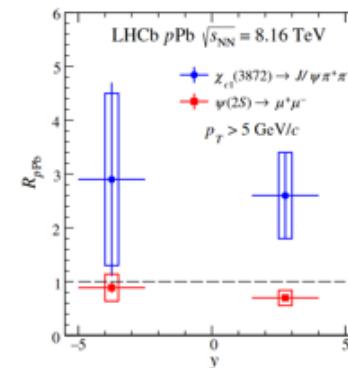
Изменяются ли свойства экзотических
адронов в ядерной среде?

Эксперимент LHCb впервые провел измерения образования экзотических адронов $\chi_{c1}(3872)$ в pPb -взаимодействиях. Увеличение отношения сечений рождения $\chi_{c1}(3872)$ и $\psi(2S)$ от столкновений pp к pPb и к $PbPb$ может указывать на то, что экзотический адрон $\chi_{c1}(3872)$ испытывает в ядерной среде иную динамику, чем обычное состояние чармоная $\psi(2S)$. Измеренный фактор ядерной модификации R_{pA} указывает на то, что образование адронов $\chi_{c1}(3872)$ в pPb -столкновениях может быть увеличено по сравнению с pp -взаимодействиями.

Вклад группы LHCb-ПИЯФ: обеспечение эффективной регистрации мюонов, подготовка публикации.



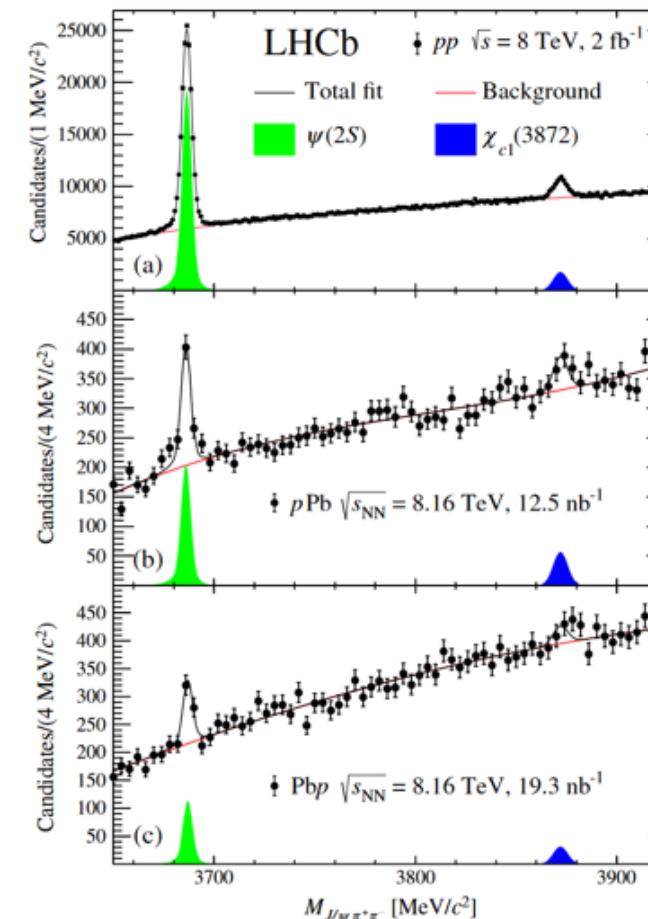
Отношение выходов
адронов $\chi_{c1}(3872)$ и
 $\psi(2S)$ для различных
взаимодействий



Факторы ядерной
модификации для адронов
 $\chi_{c1}(3872)$ и
 $\psi(2S)$ в pPb -взаимодействиях

Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 242301

Спектр масс системы $J/\psi\pi^+\pi^-$ для $p-p$ -, $p-Pb$ - и $Pb-p$ -взаимодействий, в которых выделен сигнал от распада адронов $\chi_{c1}(3872)$ и $\psi(2S)$.



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)
- **Завершено производство новых многопроволочных пропорциональных камер высокой гранулярности** для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.
- **Исследованы причины «старения» многопроволочных камер Мюонной системы**
- Группа ОФВЭ осуществляла **техническое сопровождение Мюонной системы** детектора LHCb :
 - Мюонная система детектора успешно эксплуатировалась
 - **Обязательства выполнены**
- Основные результаты LHCb, представленные в 2024 году:
 - **Проверка предсказаний КМ-механизма (параметры CP нарушения)**
 - **Указание на CP -нарушение в барионном секторе**
 - **Поиск Новой физики**
 - **Новые распады и спектроскопия**
 - **Факторы ядерной модификации для экзотических адронов**

