



# Результаты ЛНСб

Алексей Дзюба

Сессия Ученого совета ОФВЭ

25 декабря 2024 г

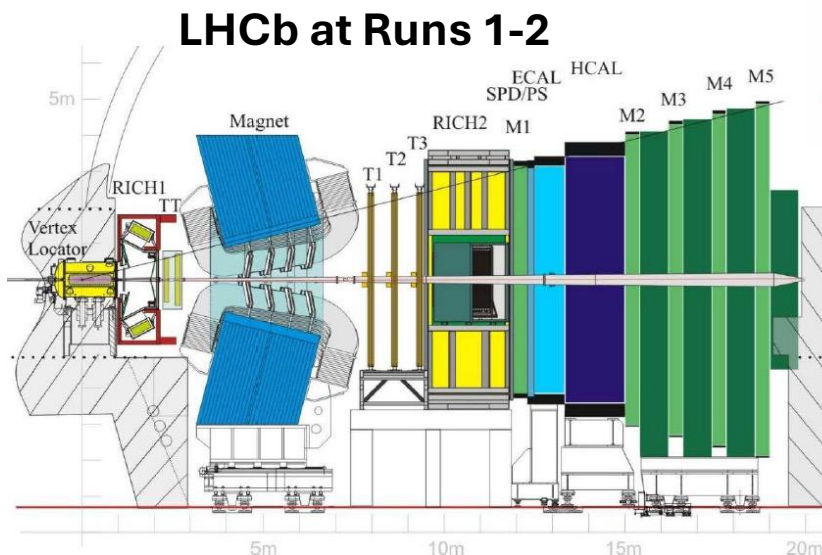
# Физические задачи LHCb

- 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 электослабом секторе СМ.
- Изучение столкновения протонов БАК с ядрами как в режиме покоящейся мишени, так и в коллайдерной моде.

# Ввод в эксплуатацию после модернизации

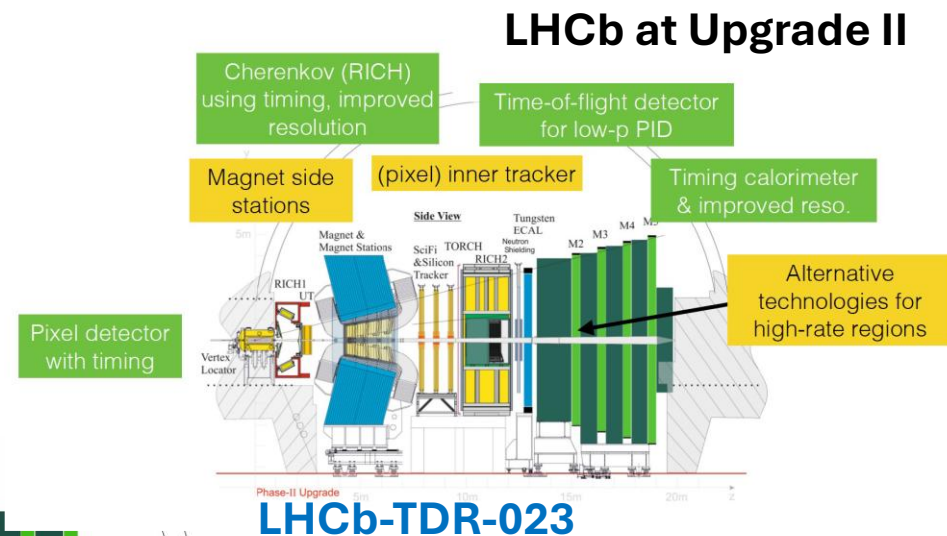
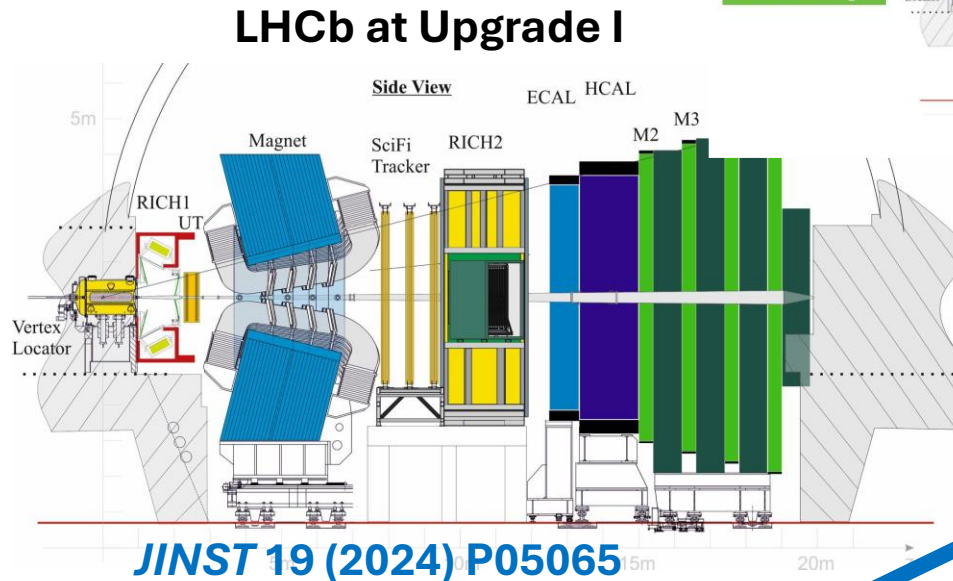
# Три «жизни» LHCb

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



JINST 3 (2008) S08005

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



Светимость

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

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

$$\mu \approx 40$$

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

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

$$\mu \approx 5$$

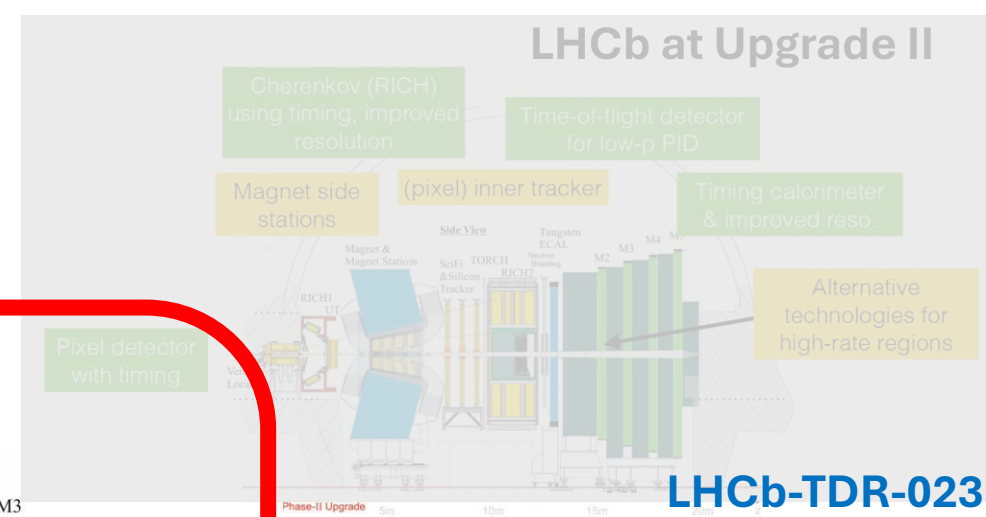
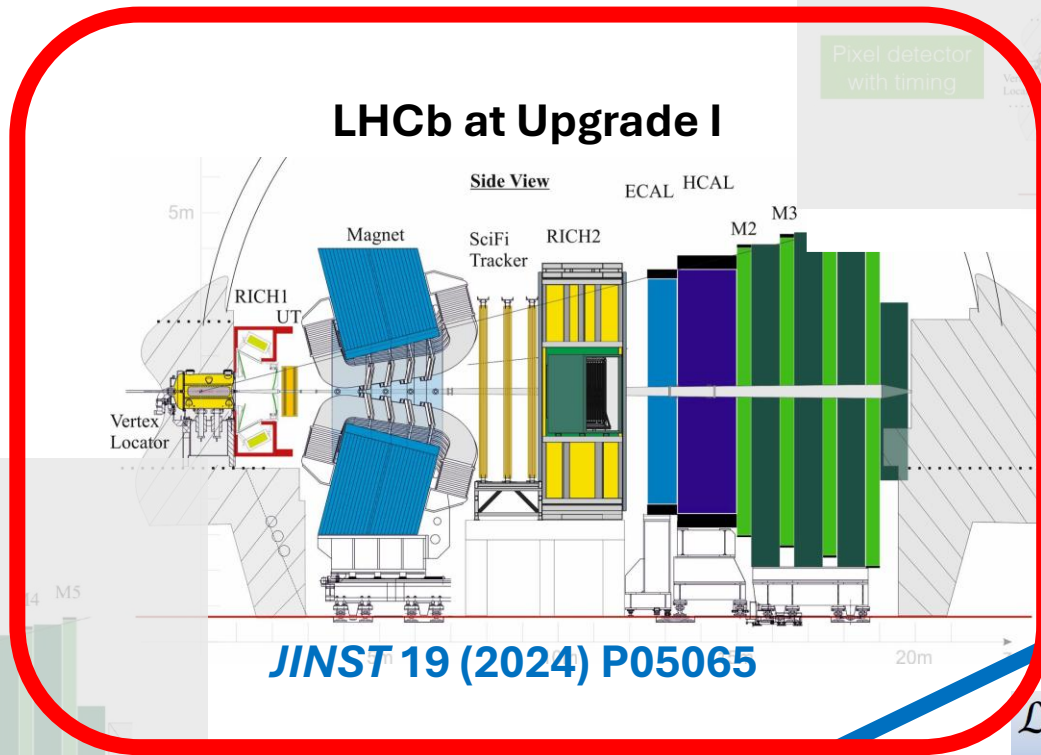
$$\mathcal{L} = 4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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

$$\mu \approx 1$$

# LHCb Upgrade I (Runs 3 & 4)

Мы сейчас в  
этой точке



Luminosity

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

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

$$\mu \approx 40$$

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

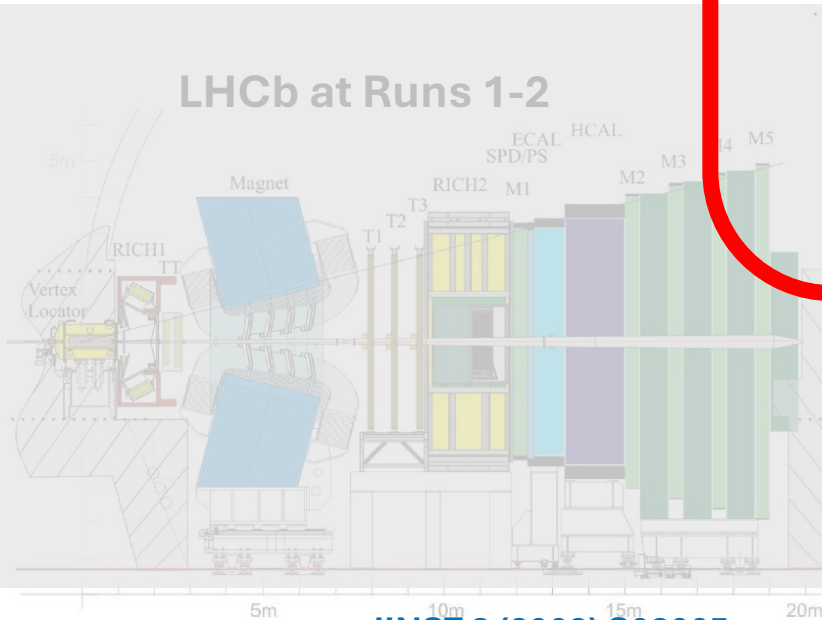
$$\mathcal{L}_{int} = 50 \text{ fb}^{-1}$$

$$\mu \approx 5$$

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

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

$$\mu \approx 1$$



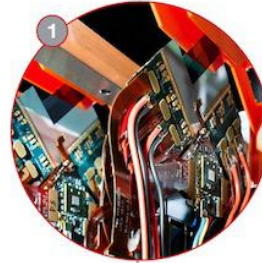


# Новое

- Пиксельный вершинный детектор (VELO) ближе к трубе:
  - 8.2mm → 5.1mm
- 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.



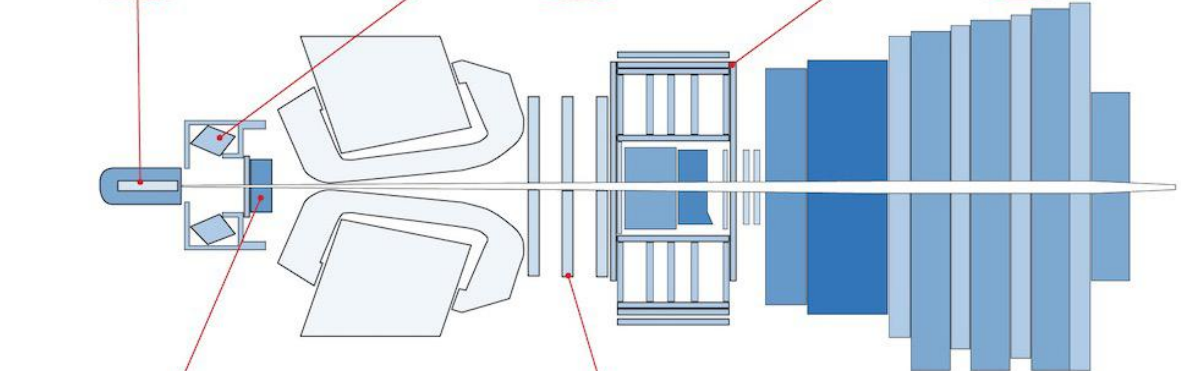
## RICH1

New optics of RICH1 mirrors, with larger curvature radius.



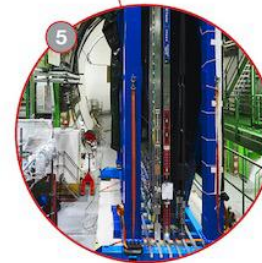
## RICH2

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



## TRACKER: New UT

New high granularity silicon microstrip upstream tracker (UT).



## TRACKER: SCI-FI

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

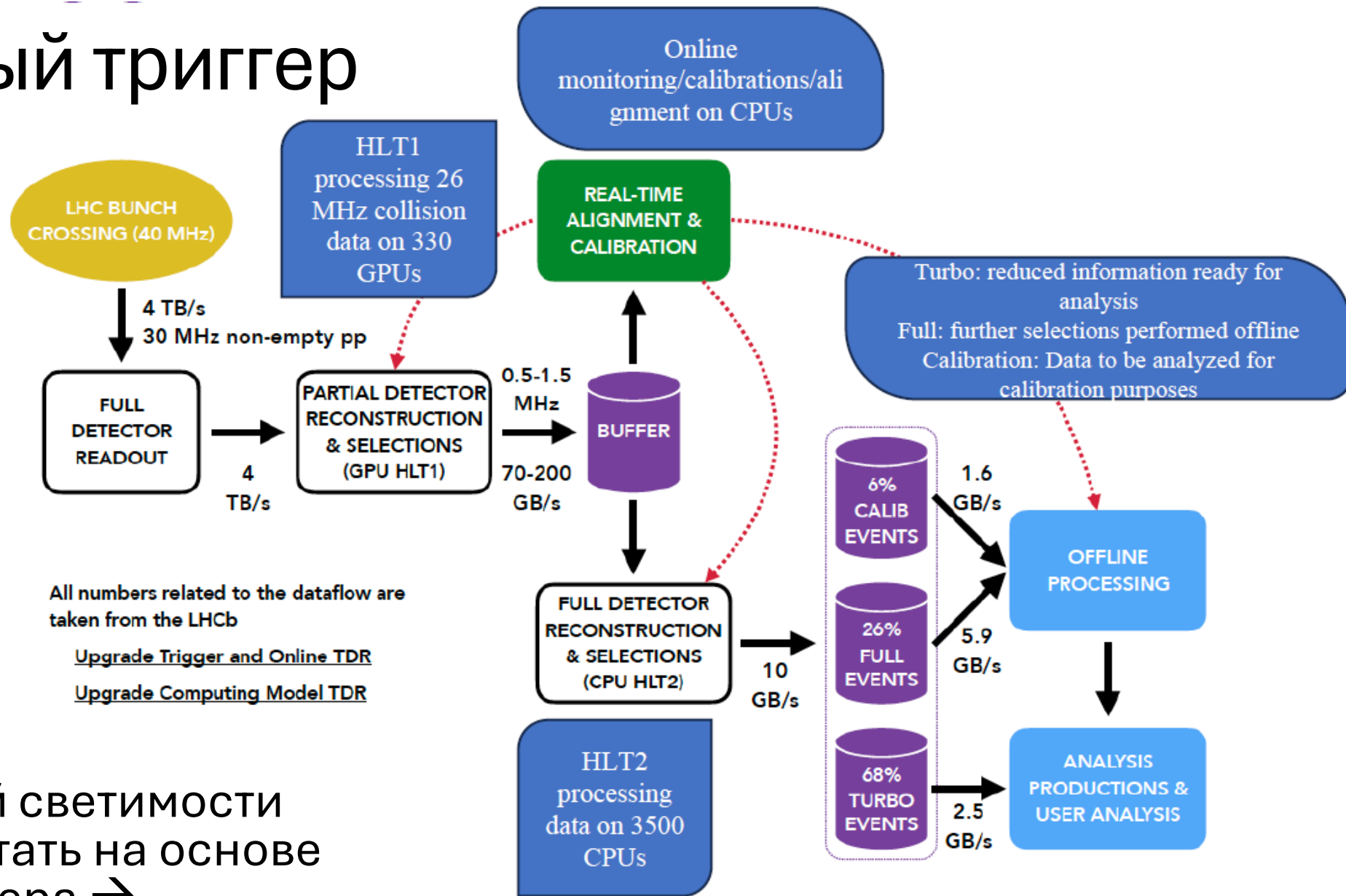


## FRONT-END ELECTRONICS

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

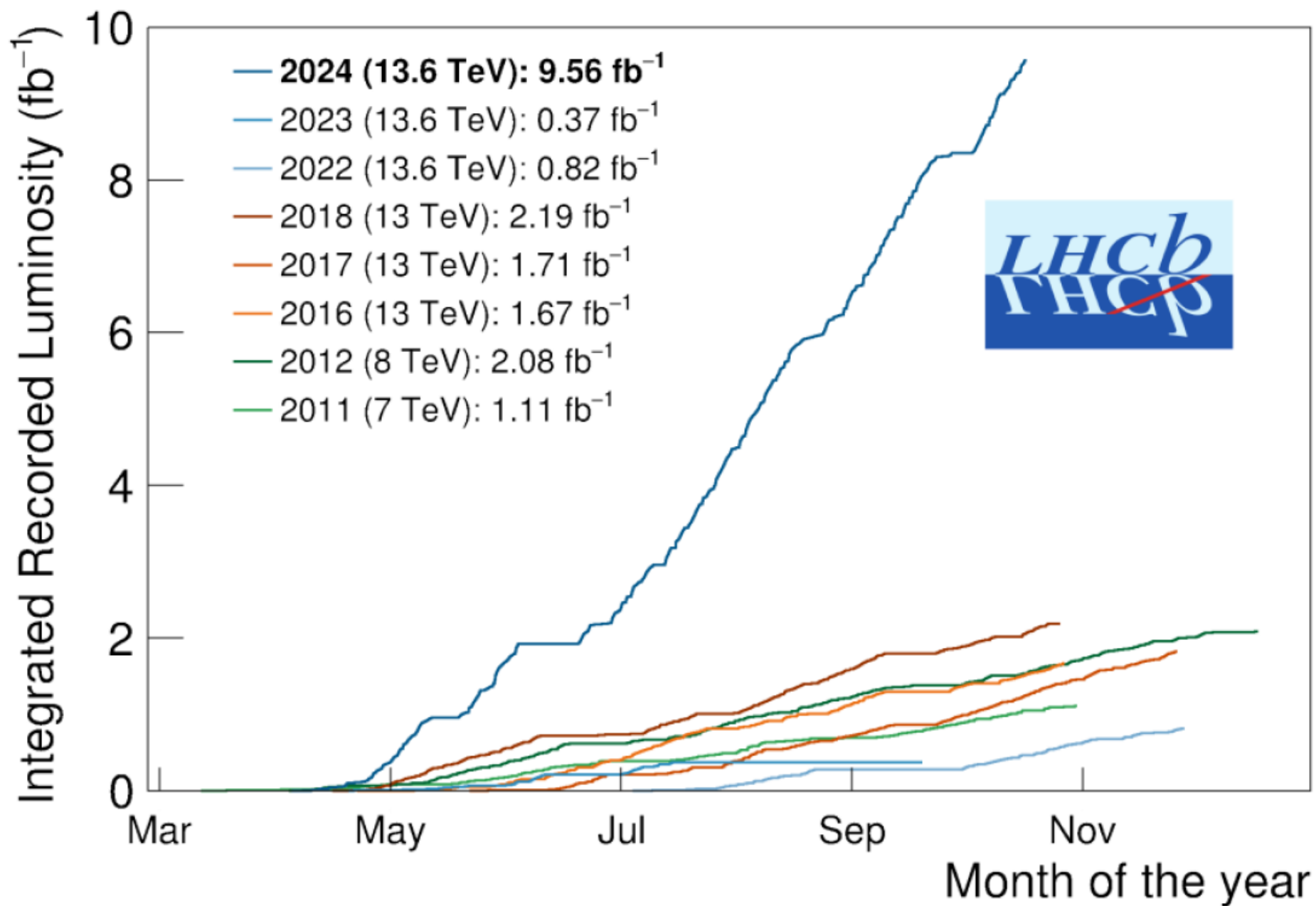
# Программный триггер

JINST 14 (2019) P04006



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

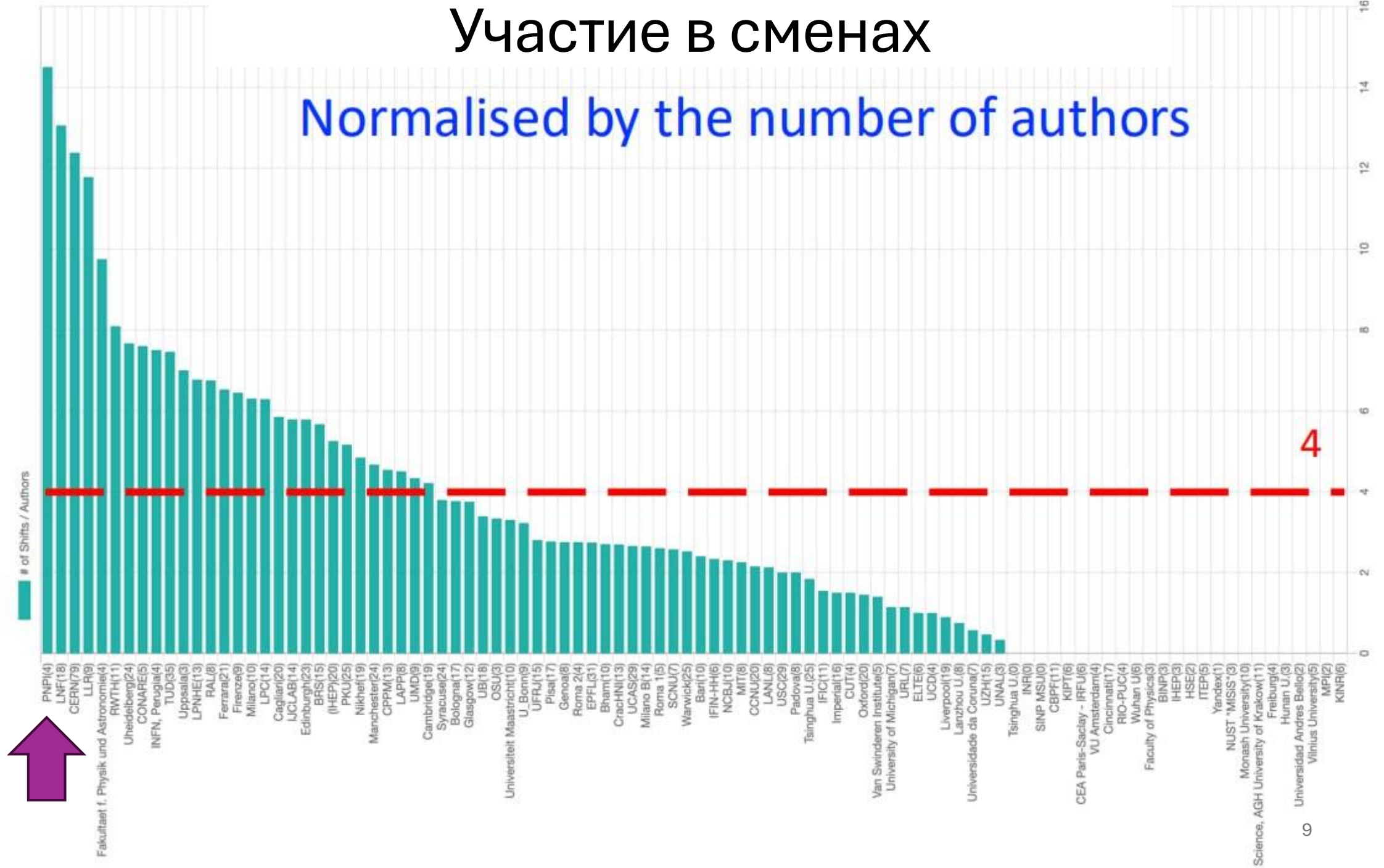
Write ~10GB/s at 1 MHz





# Участие в сменах

Normalised by the number of authors



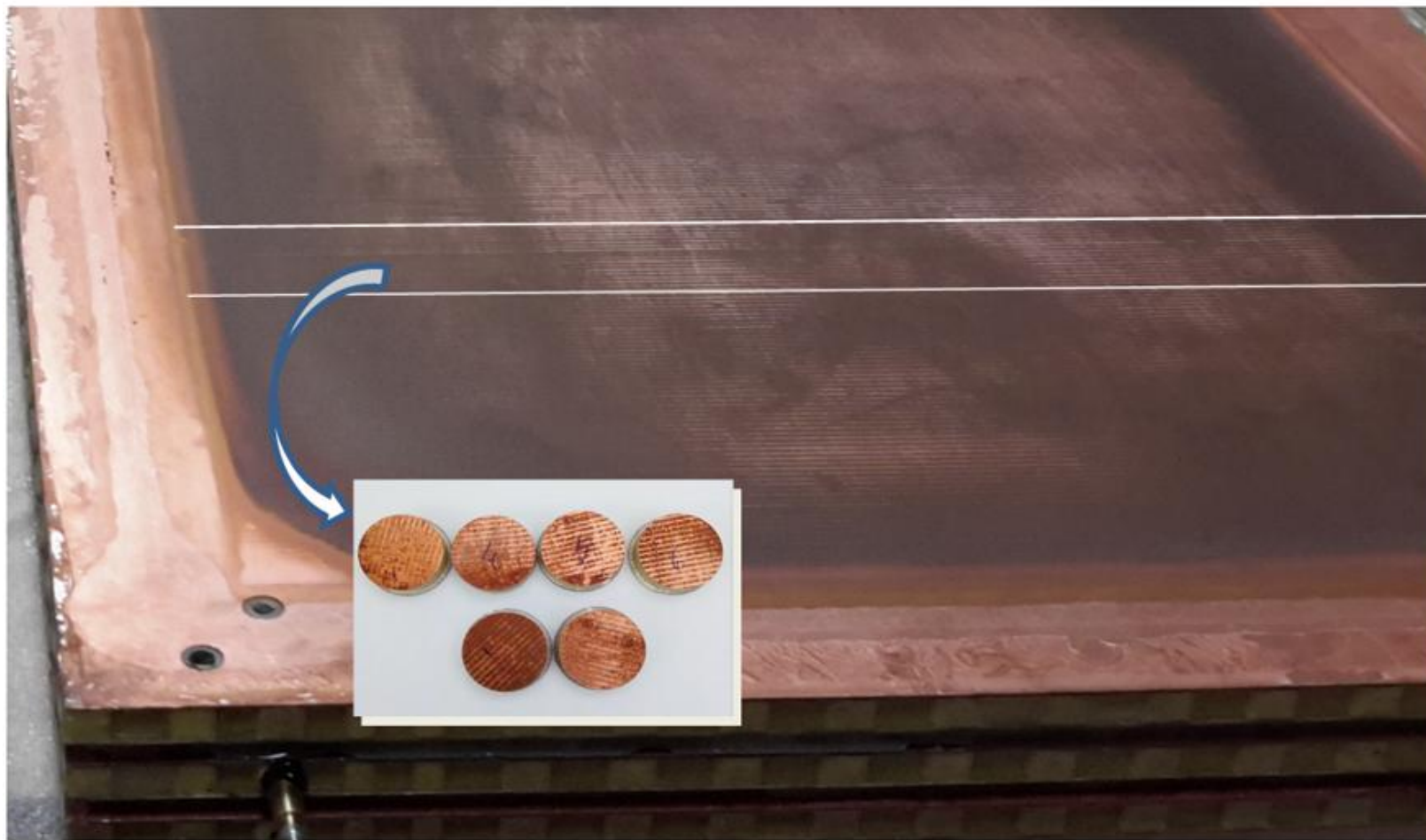
# Работы в ОФВЭ

# Производство камер высокой гранулярности

- Для региона с повышенной нагрузкой
- Камеры изготовлены и находятся на хранении в Отделе Детекторов Излучений
- Для применения их в экспериментах в России необходимо оснастить их электроникой для съема данных







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.



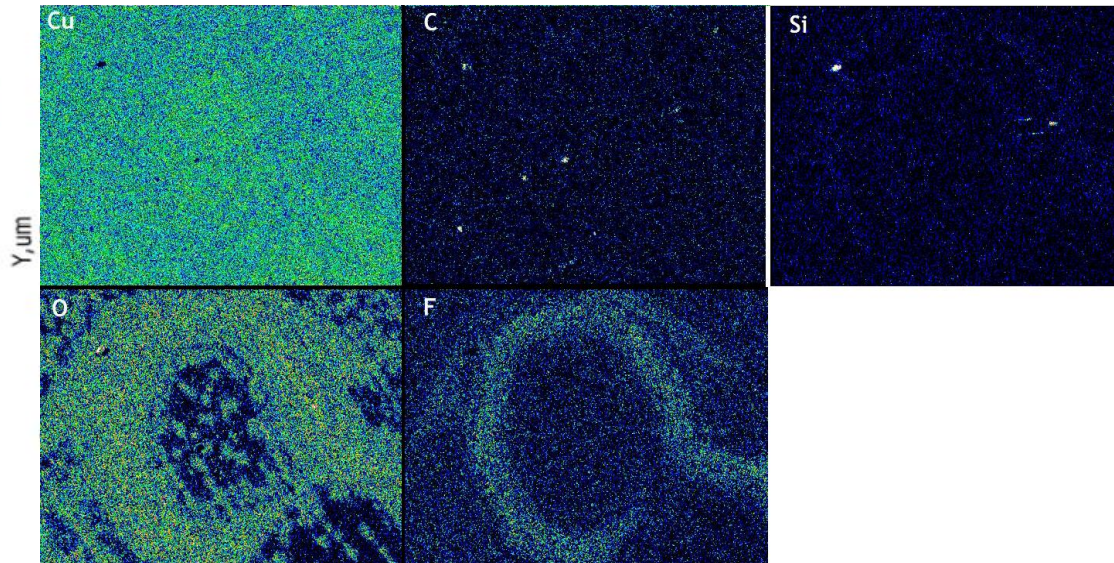
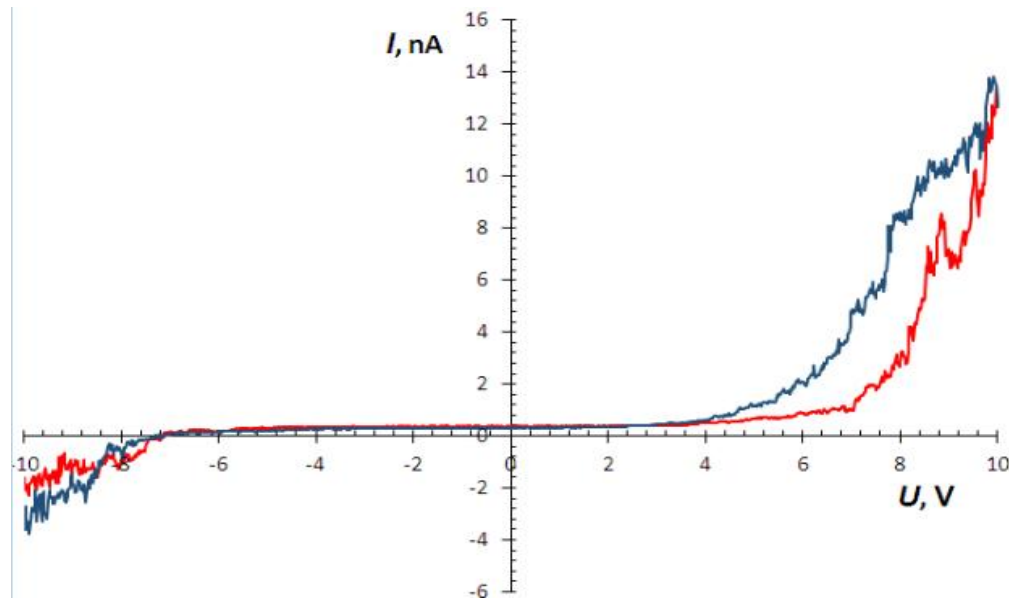
В электрическом поле у катода  $E_{\text{катод}} \sim 5 \text{ кВ см}^{-1}$  на катоде происходит хемоабсорбция диссоциировавших молекул газовой смеси  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CF}_4$

→ **вдоль анодных проволочек на катоде образуются полосы осадков**

→ → **источник образований – плазмохимия газового разряда на аноде !**

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





□ Результаты исследований катода МПК методами:

□ Обратного Резерфордского Рассеяния (ОБР, RBS)

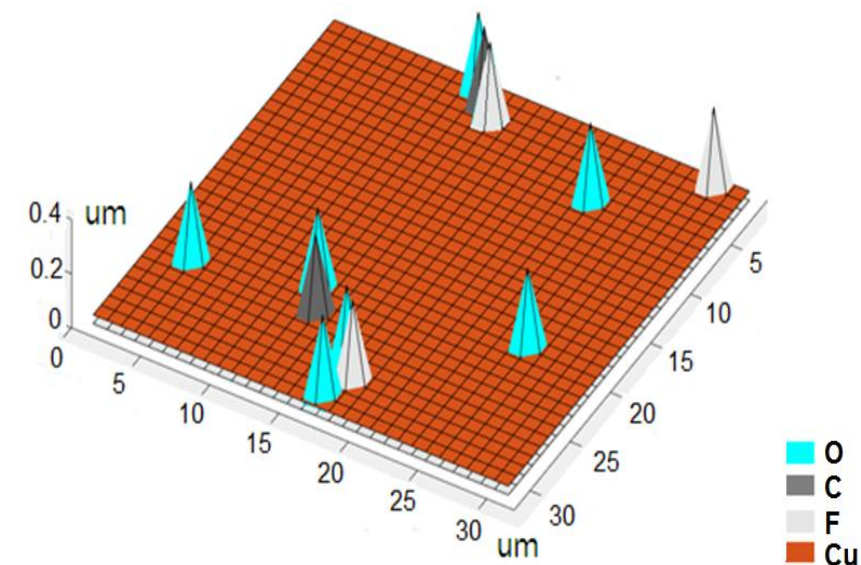
□ Рамановской спектроскопии

□ Атомной Силовой Микроскопии (АСМ)

□ Топография поверхности

□ Исследование растекания заряда

□ Вольт-Амперная характеристика (ВАХ)



# Выводы исследования

Комплексное исследование образцов катода МПК ЛНСб 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 длятся 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

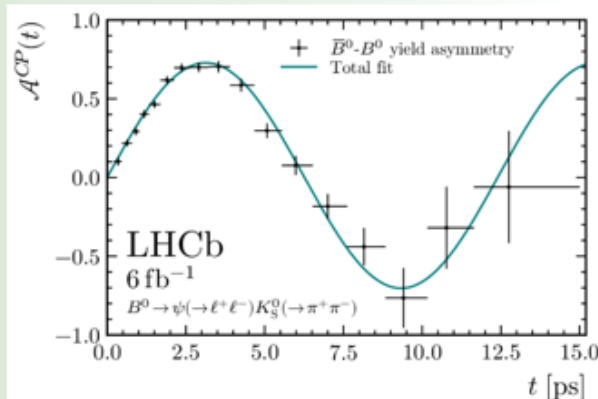


**Нарушении CP четности, одно из условий, необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной (А.Д. Сахаров)**

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

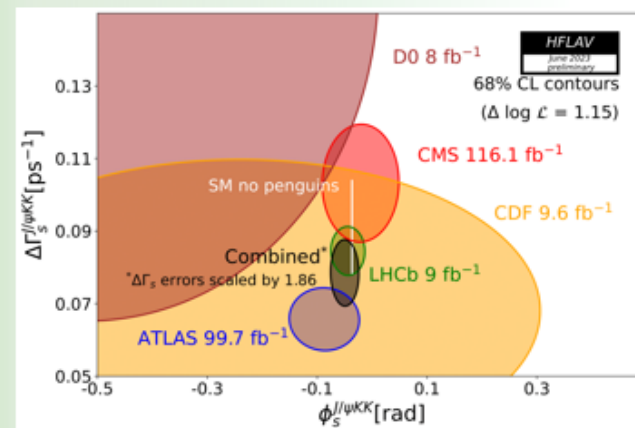
- $\varphi_s: B_s^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \phi(\rightarrow K^+ K^-)$
- $\sin(2\beta): B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K_S^0(\rightarrow \pi^+ \pi^-)$
- Регистрация мюонов необходима для надежного выделения сигнальных событий
- Мюонная система LHCb разработана, создана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

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



## Результаты

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



**Полученные значения  $\varphi_s$  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 CP-нарушения



1964

1999

2001

2004

2012

2013

2018

2019

????

CP violation  
(in mixing)  
in neutral  
**Kaon** decays

Direct CP  
violation in  
neutral **Kaon**  
decays

CP violation  
in mixing  
and decay in  
**B<sup>0</sup>** decays

Direct CP  
violation in  
**B<sup>0</sup>** decays

Direct CP  
violation in  
**B<sup>+</sup>** decays



Direct CP  
violation in  
**B<sub>s</sub><sup>0</sup>** decays



CP violation  
in mixing  
and decay in  
**B<sub>s</sub><sup>0</sup>** decays



Direct CP  
violation in  
**D<sup>0</sup>** decays



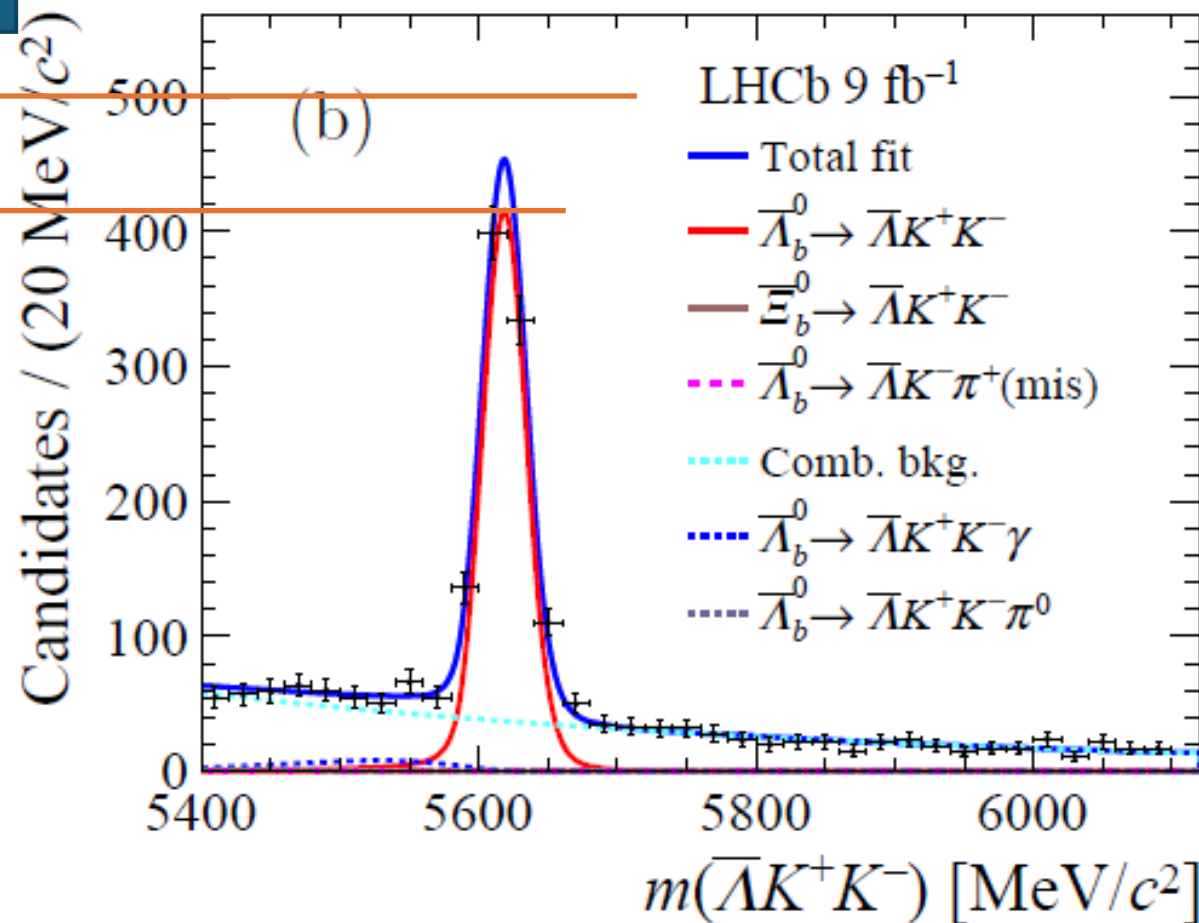
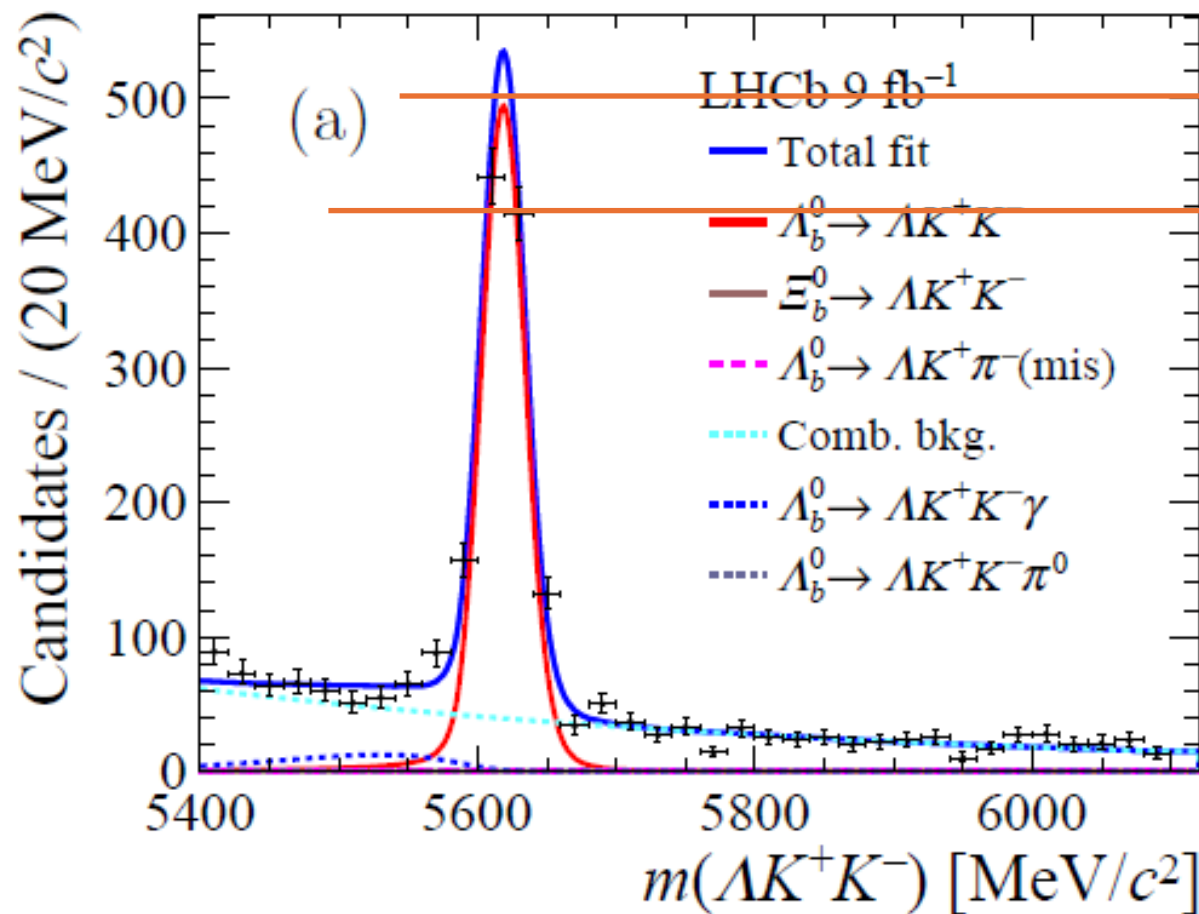
Direct CP  
violation  
in **baryon**  
decays

Direct CPV  
in CKM  
suppressed  
in beauty to  
charm  
**B<sup>+</sup>** decays

# CP-нарушение в распадах барионов

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

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

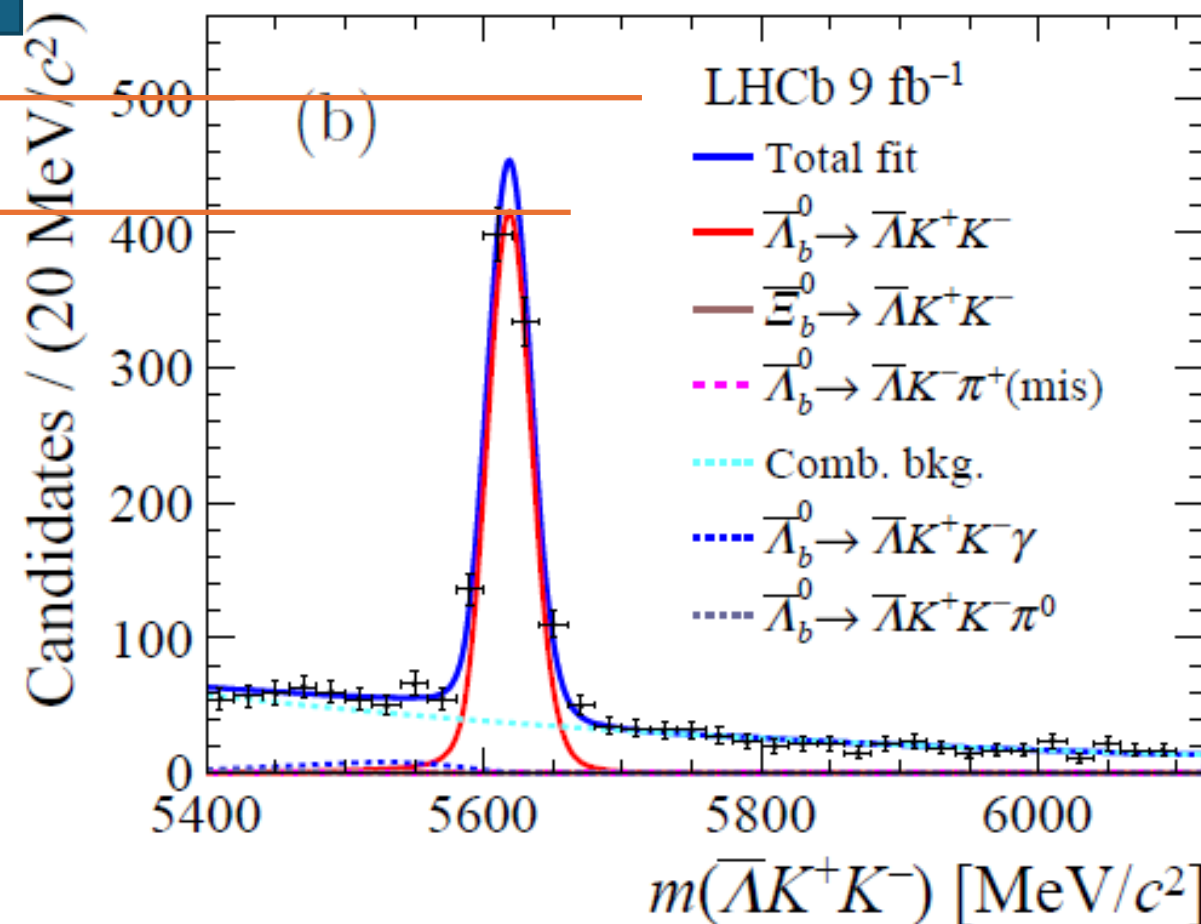
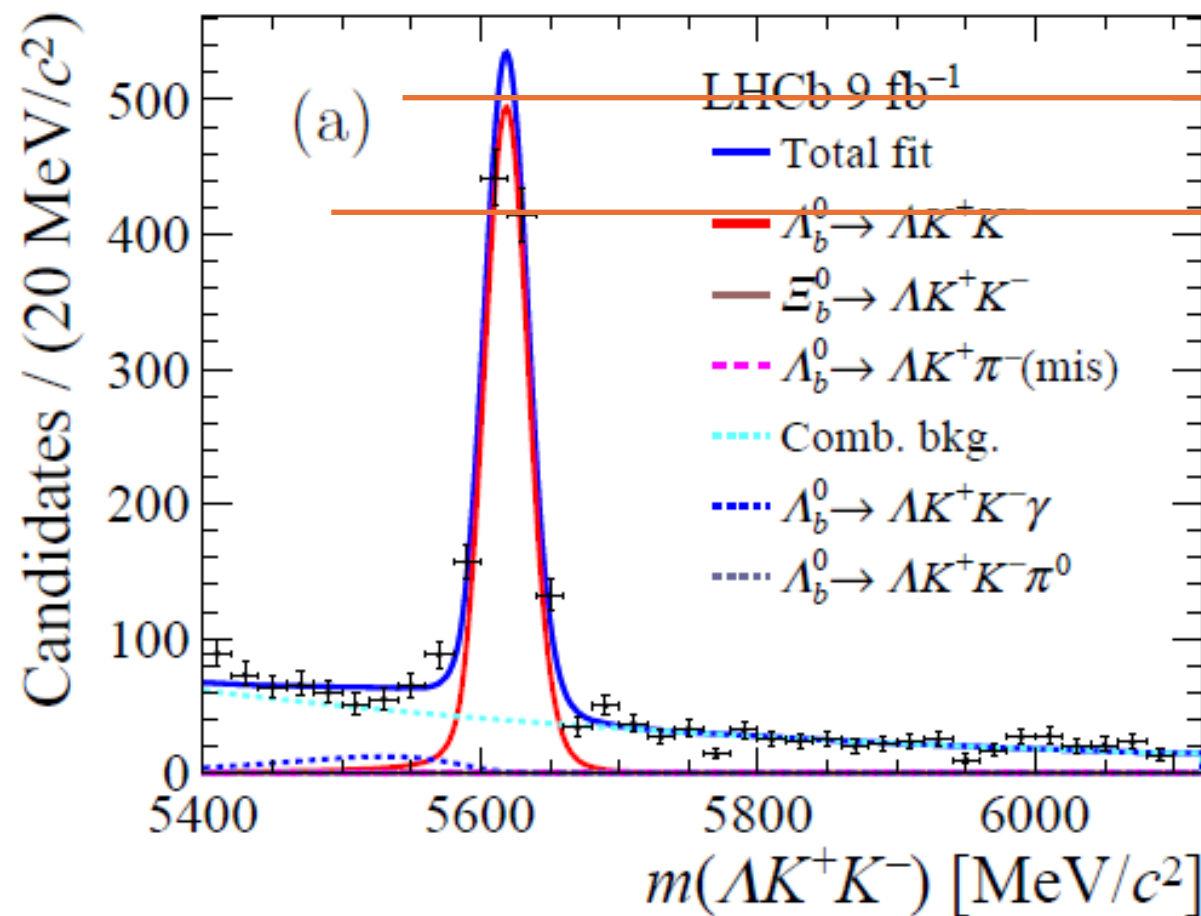


$$A_{\text{Raw}}^f = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

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

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

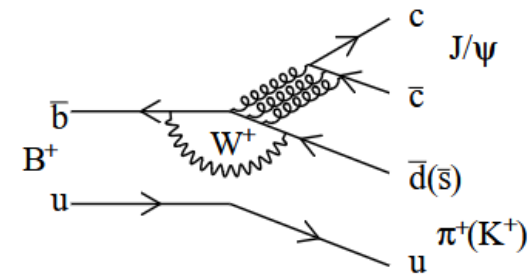
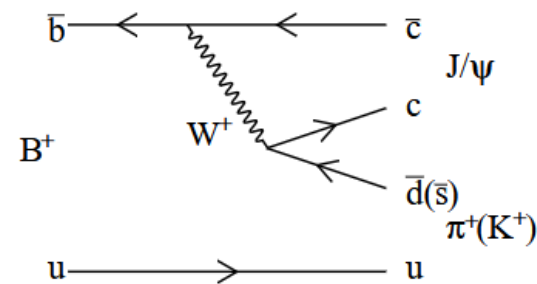
First evidence of CP violation,  $3.1\sigma$



# CP-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  $\sin(2\beta)$

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

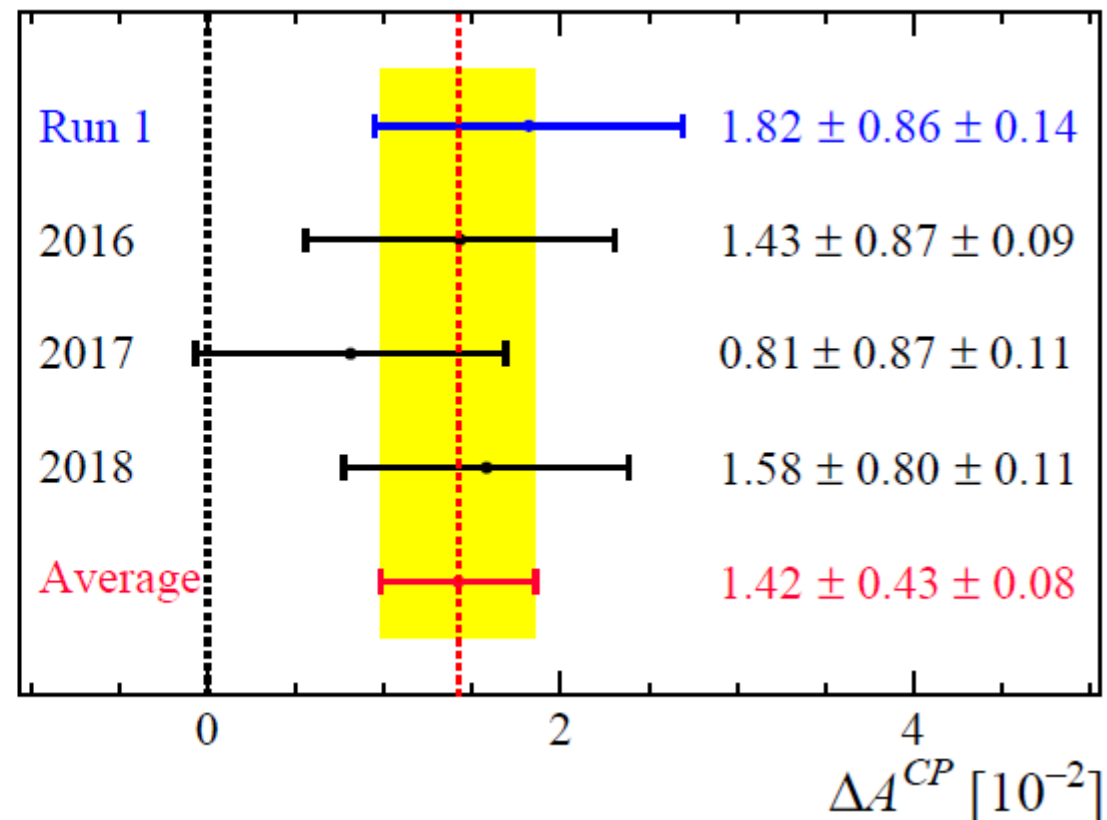
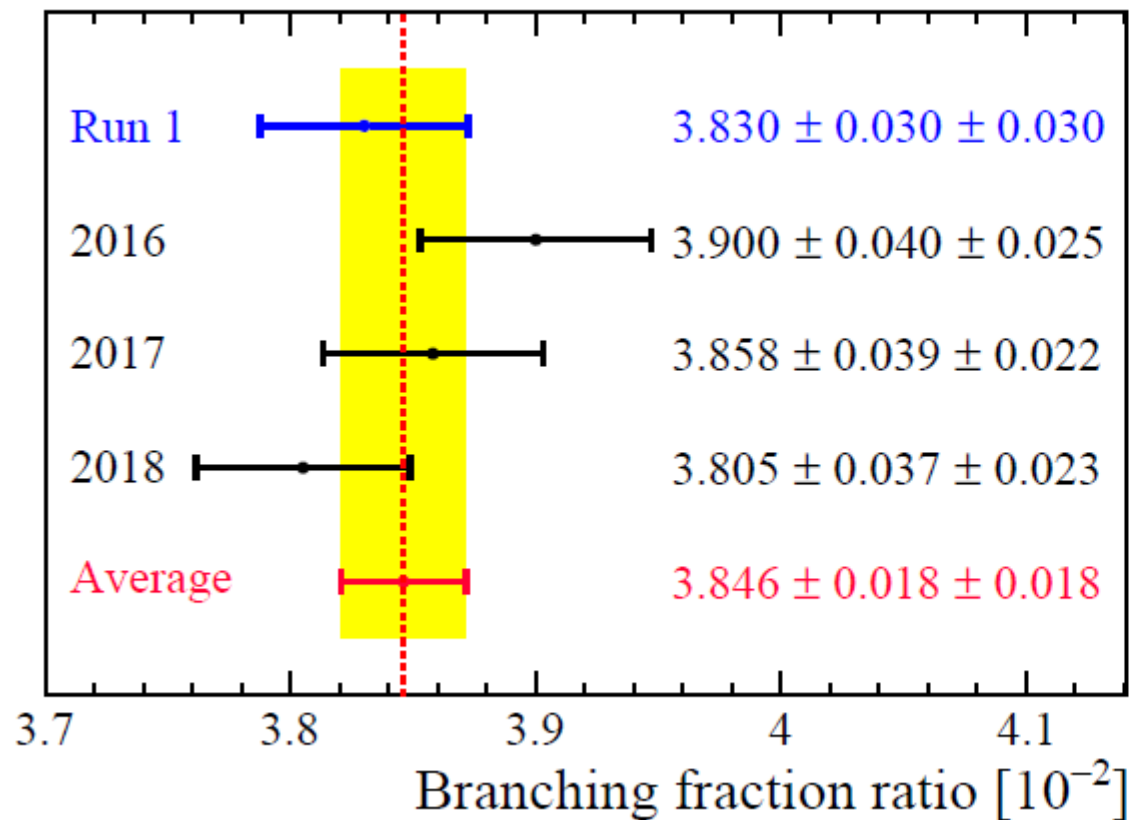


- LHCb Run-1:
- $\Delta A_{CP} = (1.82 \pm 0.86_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$
- $R_{\pi/K} = (3.83 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.03_{\text{syst}}) \times 10^{-2}$



# Объединение с данными Run-1

arXiv:2411.12178



**Run-2**

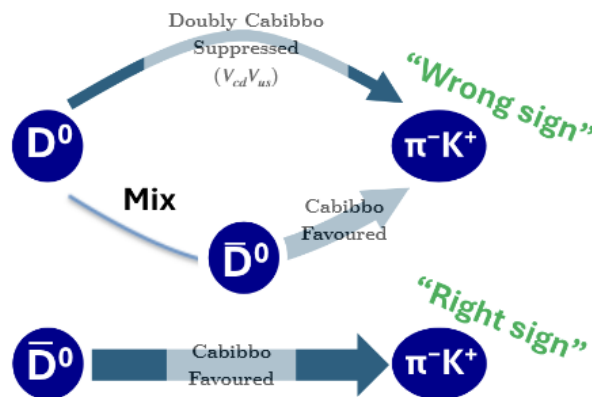
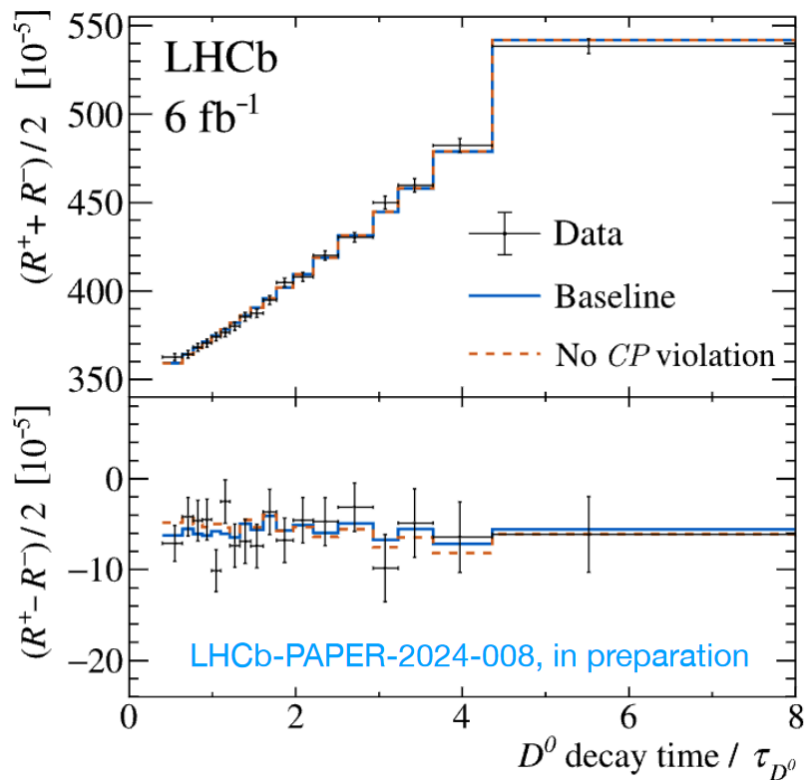
$$\mathcal{R}_{\pi/K} = (3.852 \pm 0.022 \pm 0.018) \times 10^{-2},$$
$$\Delta \mathcal{A}^{CP} = (1.29 \pm 0.49 \pm 0.08) \times 10^{-2}.$$

Статистическая значимость  
отклонения от нуля 3.2 стандартных  
отклонения

Указание на CP-нарушение

# Поиск CP-нарушения при смешивании очарованных мезонов

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



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

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

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

Ratios depends on  $D^0$  mixing parameters and  $CP$  violating parameters

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

DCS
Interference
Mixing

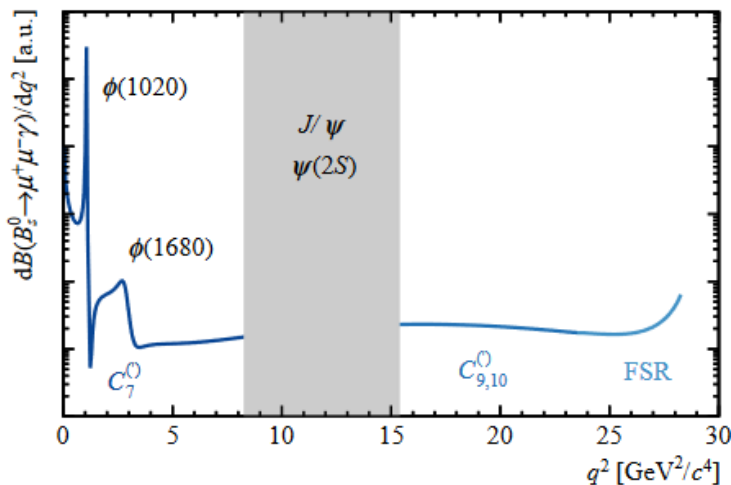
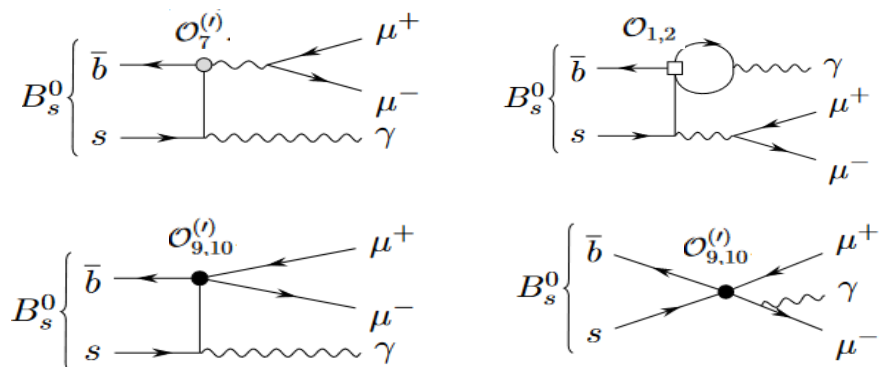
$R_{K\pi}$	$(343.1 \pm 2.0) \times 10^{-5}$
$c_{K\pi}$	$(51.4 \pm 3.5) \times 10^{-4}$
$c'_{K\pi}$	$(13.1 \pm 3.7) \times 10^{-6}$
$A_{K\pi}$	$(-7.1 \pm 6.0) \times 10^{-3}$
$\Delta c_{K\pi}$	$(3.0 \pm 3.6) \times 10^{-4}$
$\Delta c'_{K\pi}$	$(-1.9 \pm 3.8) \times 10^{-6}$

Первое наблюдение  
квадратичного члена

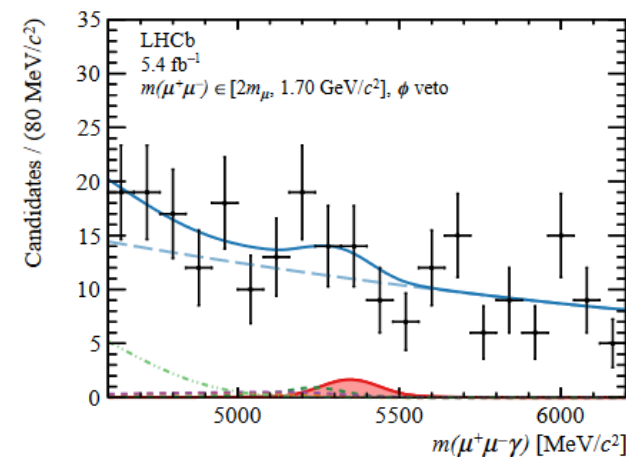
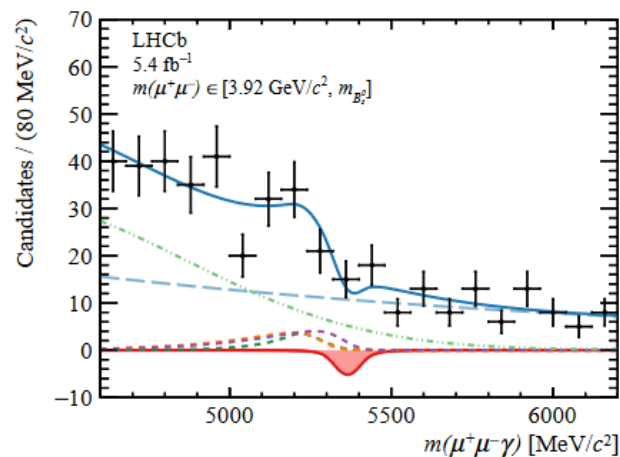
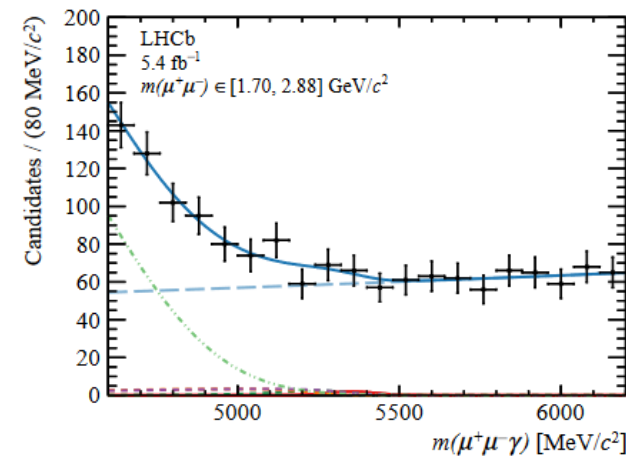
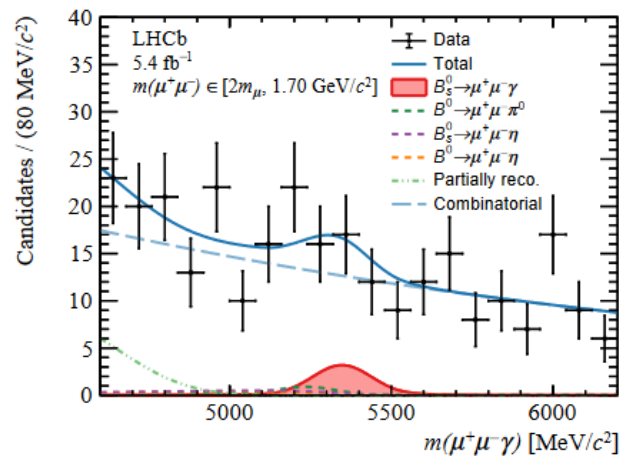
Нет указаний на CP-  
нарушение

# 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

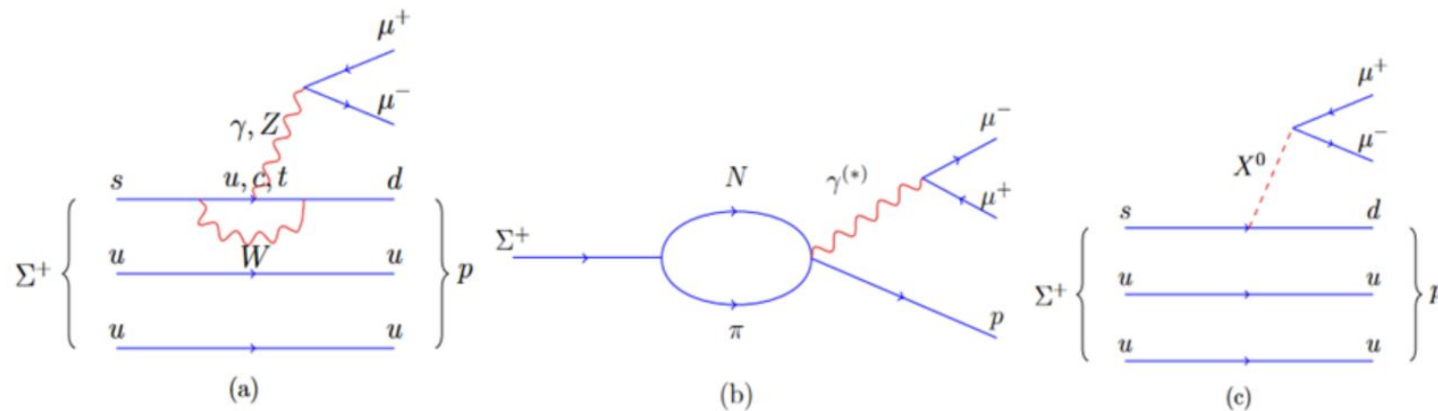


$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma) < 4.2 \times 10^{-8}, \quad m(\mu^+ \mu^-) \in [2m_\mu, 1.70] \text{ GeV}/c^2,$$

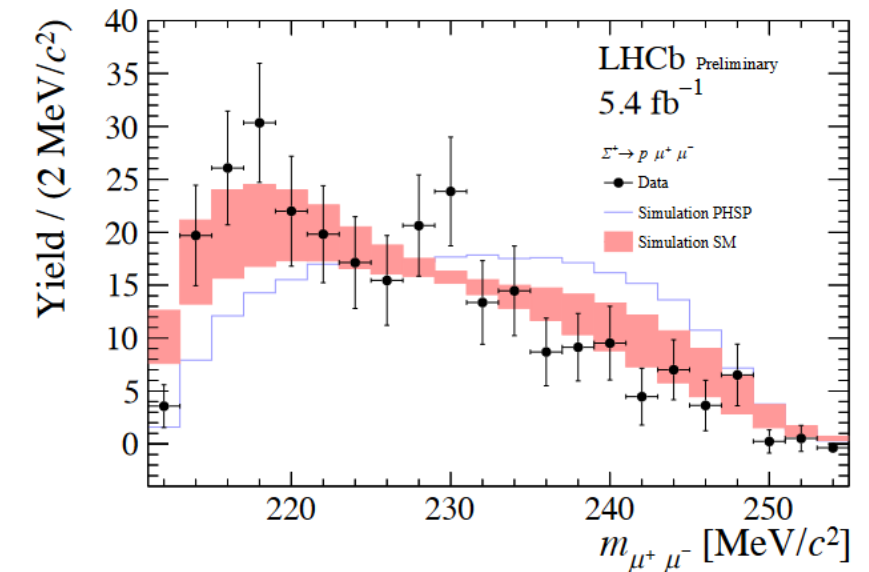
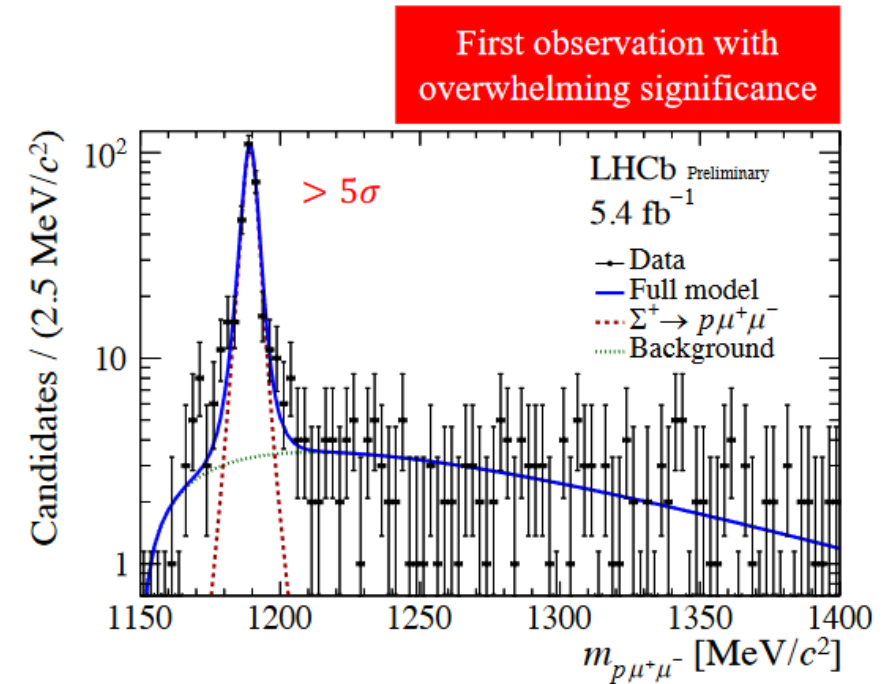
$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma) < 7.7 \times 10^{-8}, \quad m(\mu^+ \mu^-) \in [1.70, 2.88] \text{ GeV}/c^2,$$

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

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



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

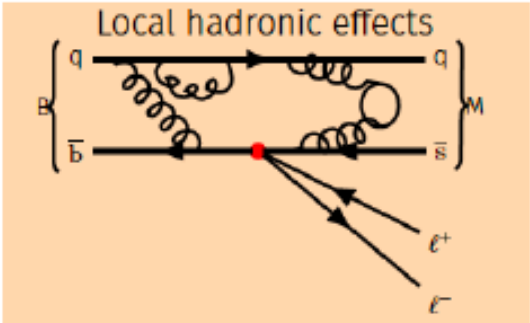
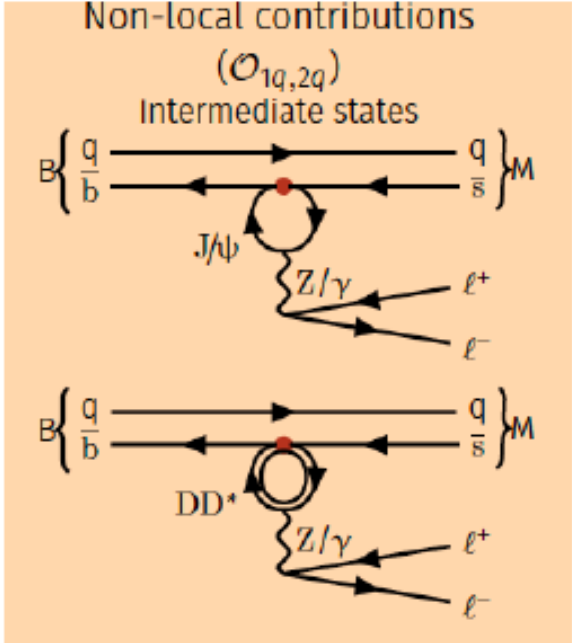
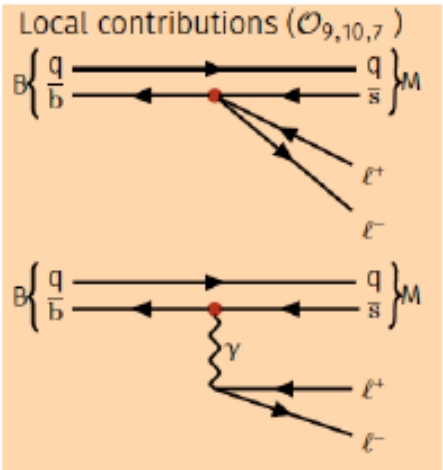
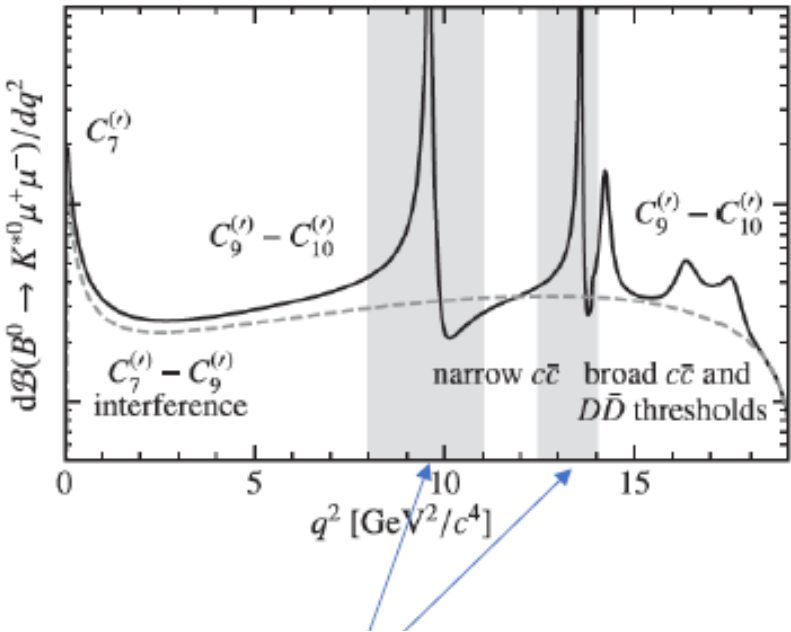


# Новый подход к учету нелокальных форм-факторов

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

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!

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

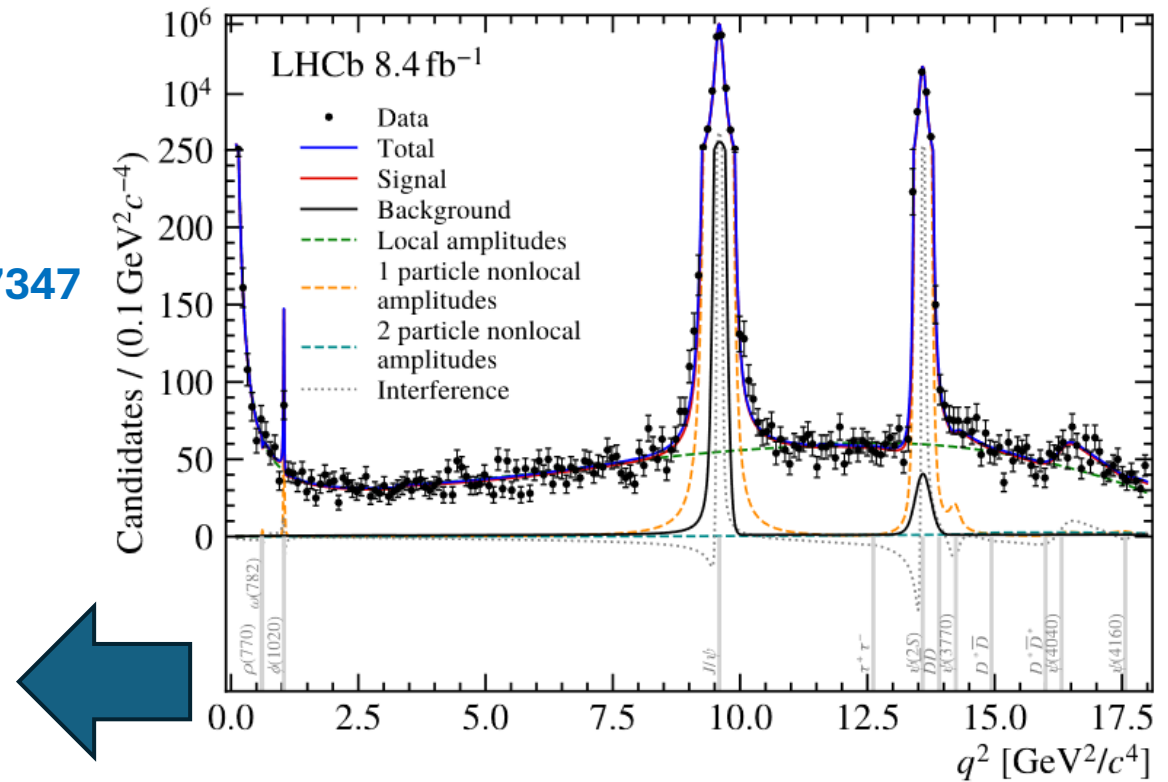
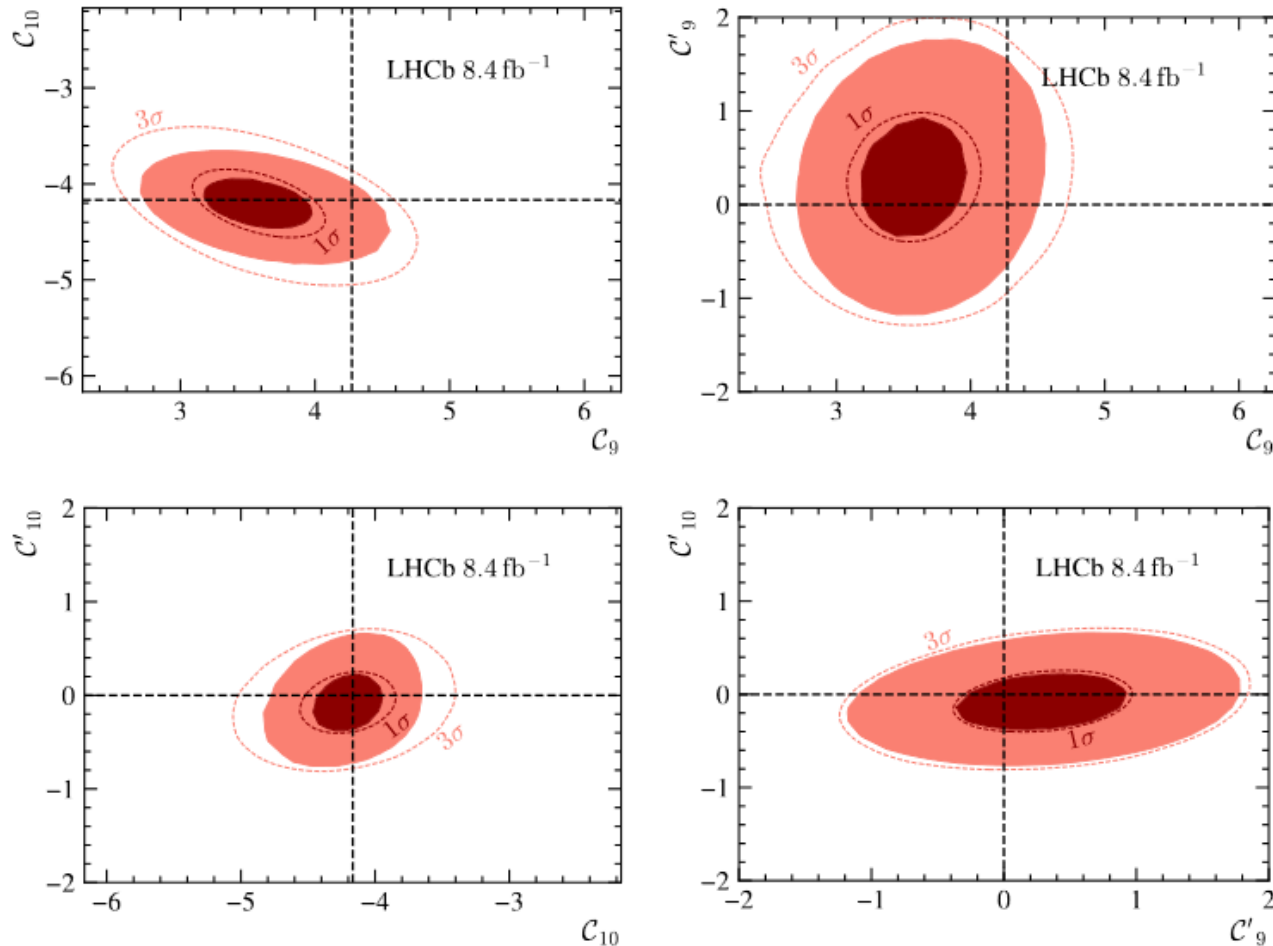
Local form factors

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



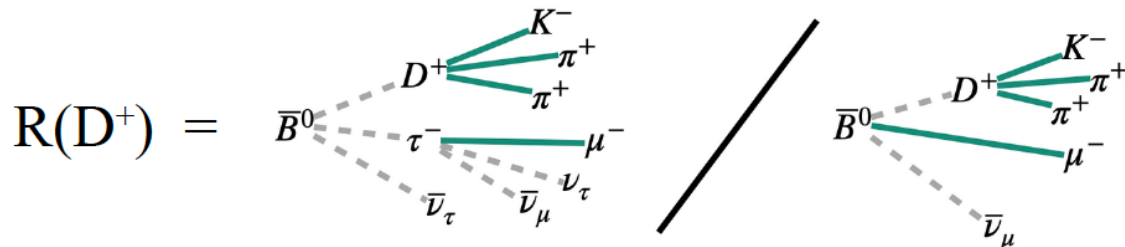
- Используемая модель также учитывает перерассеяние  $B^0 \rightarrow K^{*0}[\tau^+\tau^- \rightarrow \mu^+\mu^-]$
- Многомерный амплитудный анализ
- *Вилсоновский коэффициент*  $C_9$  отвечающий векторному оператору отклоняется от предсказаний СМ на уровне  $2.1\sigma$
- Другие коэффициенты находятся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



# R(D) и R(D\*)

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

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



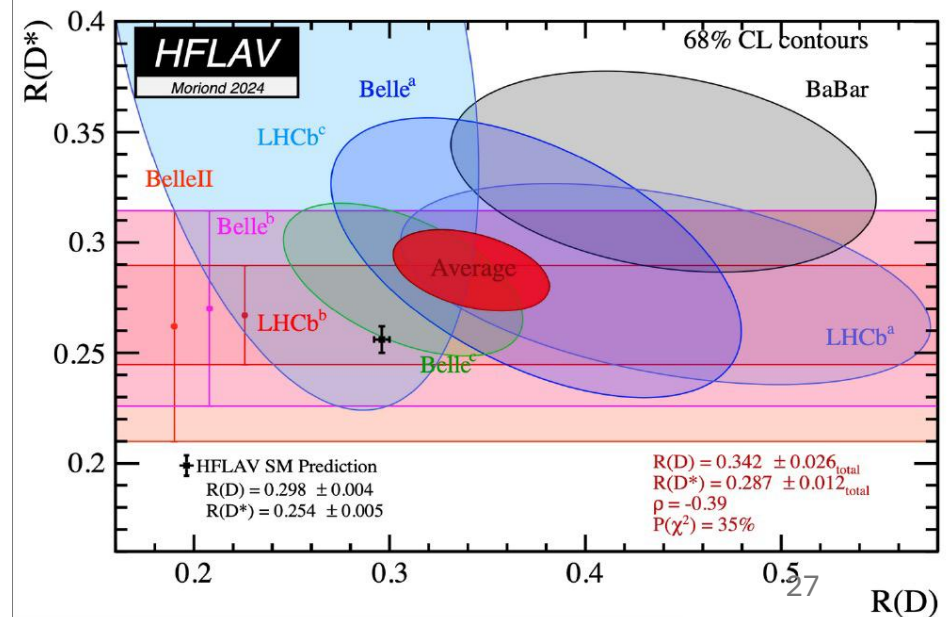
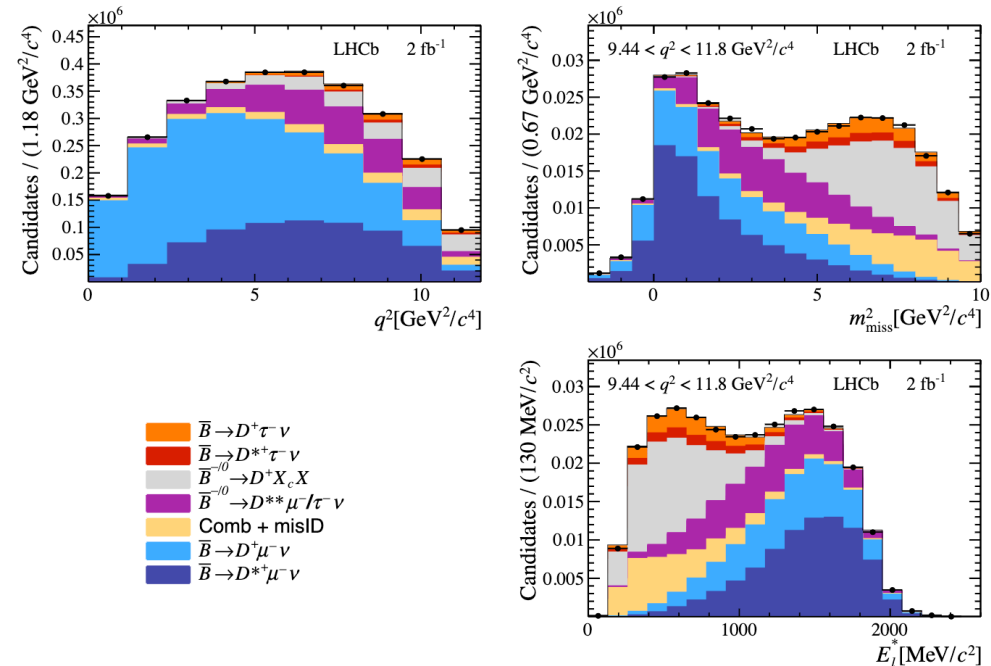
- 3D-аппроксимация с использованием шаблонов  $q^2$ ,  $m_{\text{miss}}^2$  и  $E_l^*$  распределений

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

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

Corr. Coef. -0.39

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



# Прецизионное измерение времени жизни $\Xi_b^-$

- 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

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

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

HQE : неопределённость 1.9%

Данные до 2024 г.: 2.5%

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

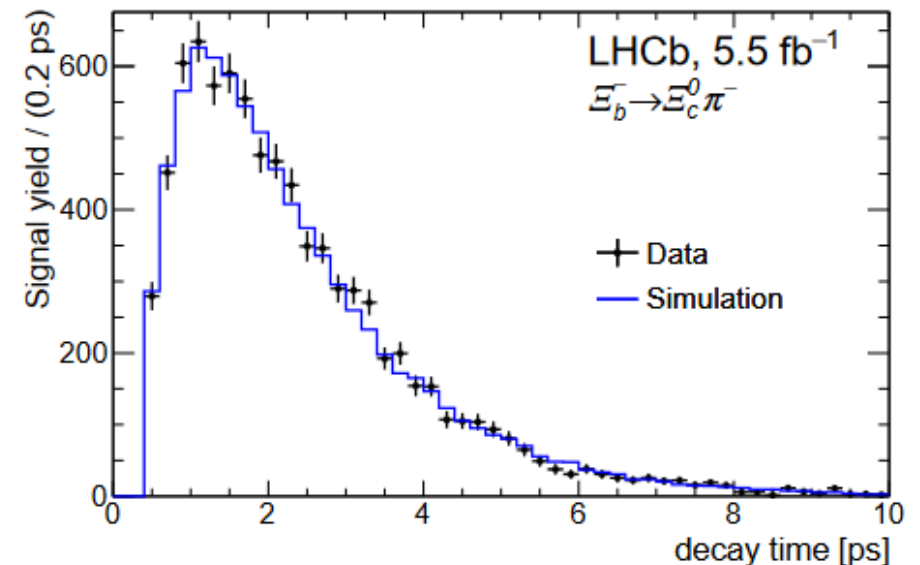
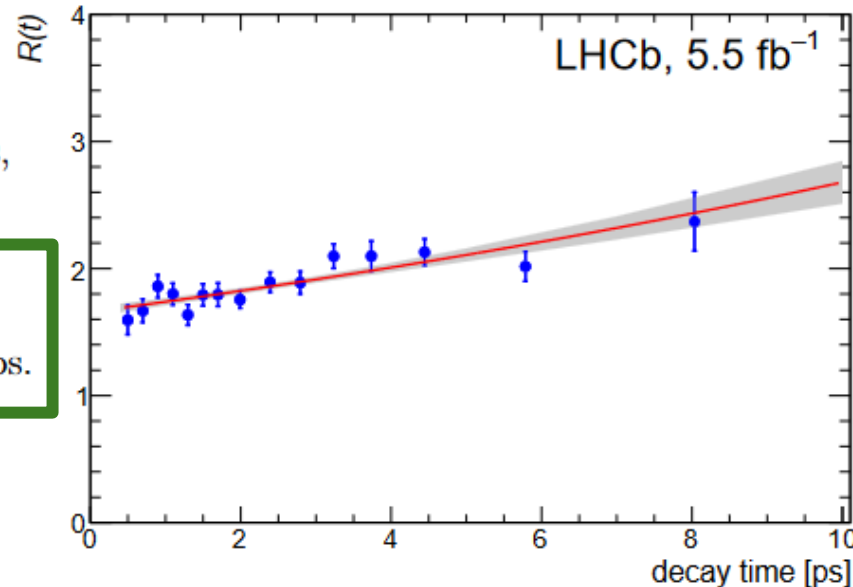
$$r_\tau^{\text{Run 2}} = 1.076 \pm 0.013 \pm 0.006,$$

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

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

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

**Уточненные данные и предсказания на основе HQE совпадают!**



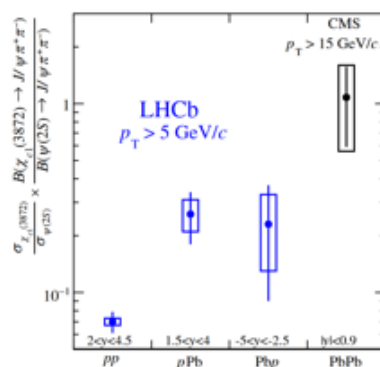
arXiv:2406.12111



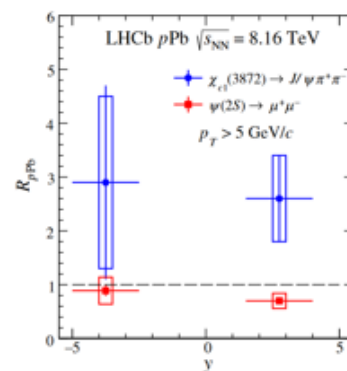
## Изменяются ли свойства экзотических адронов в ядерной среде?

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 чармония  $\psi(2S)$ . 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.



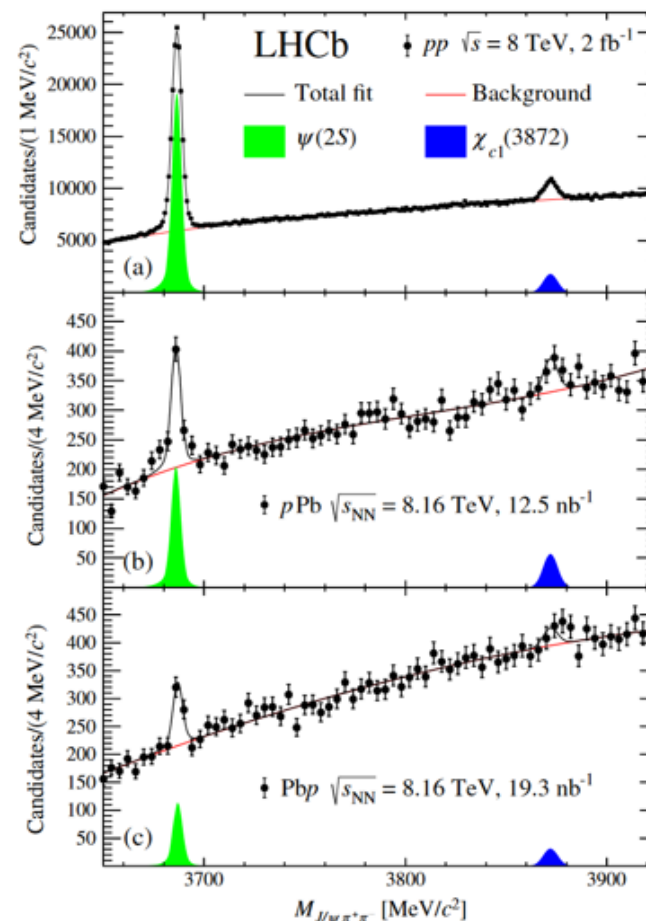
Отношение выходов адронов  $\chi_{c1}(3872)$  и  $\psi(2S)$  для различных взаимодействий



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 многопроводочных пропорциональных камер высокой гранулярности** для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.
- **Исследованы причины «старения» многопроводочных 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**



**С наступающим Новым Годом!**