

Эксперимент LHCb – обзор физических результатов

Дзюба Алексей, ЛБФ ОФВЭ

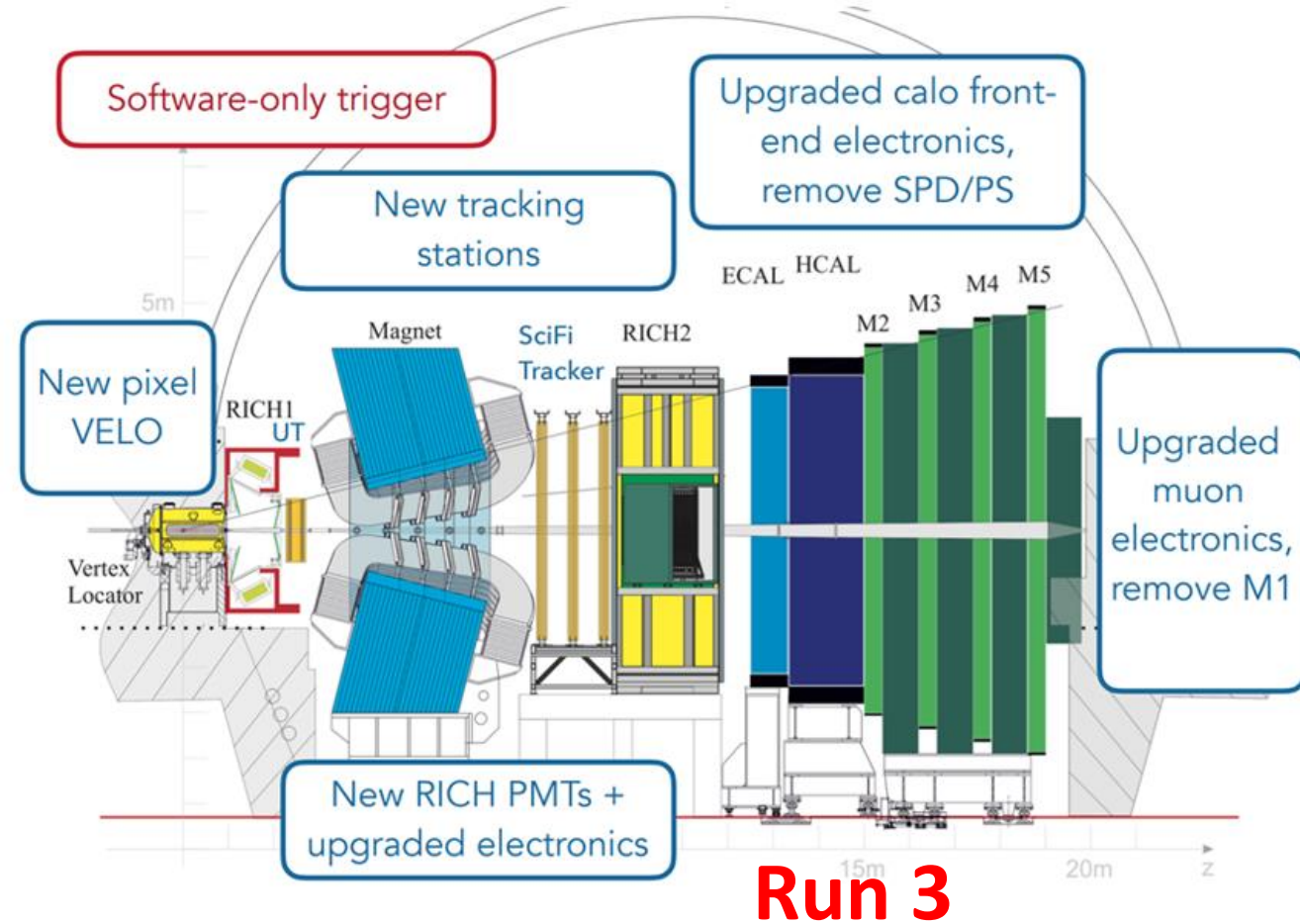
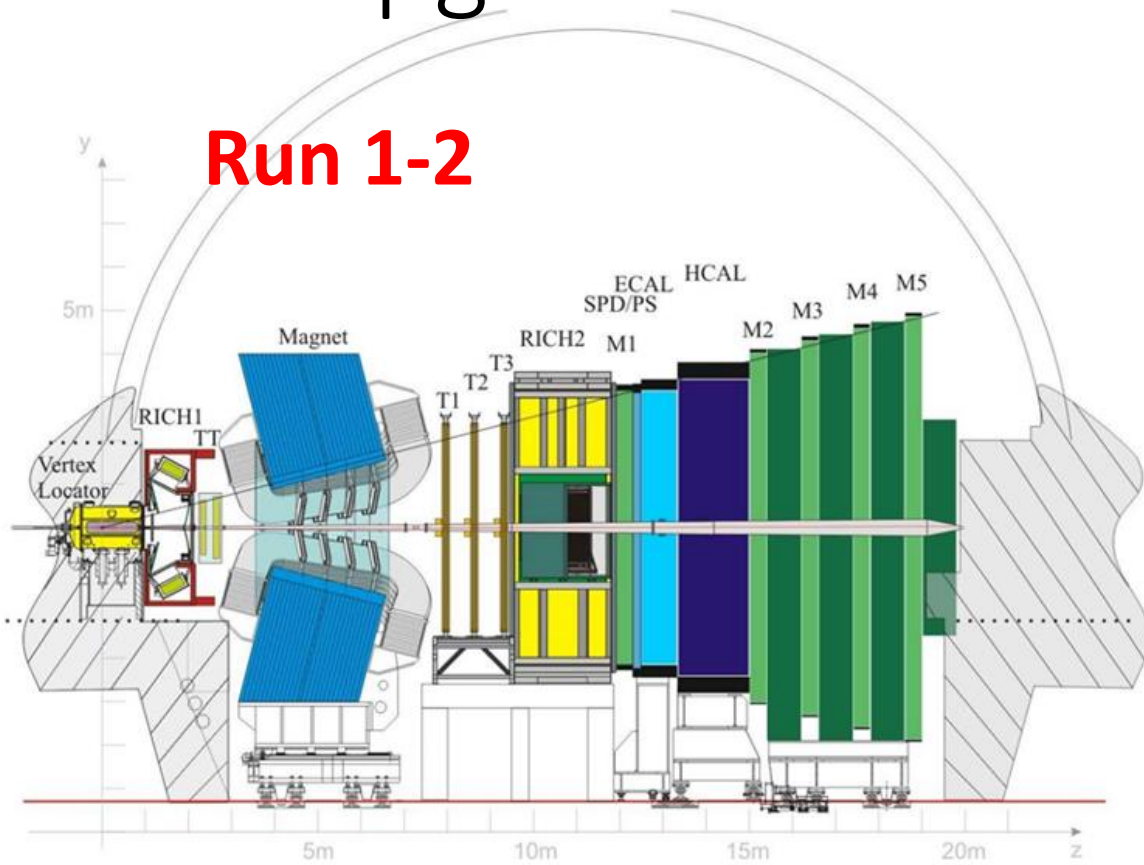
27 декабря 2023 года

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

План доклада

- Статус LHCb
 - Обслуживание Мюонной системы LHCb (смены / новые камеры / измерение светимости)
 - Проблемы с детектором VELO
- Основные результаты 2023 года
 - Проверка принципа лептонной универсальности
 - Измерения параметров треугольников унитарности
 - Адронная спектроскопия

LHCb Upgrade



- Группа НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ осуществляла техническую поддержку Мюонной системы эксперимента, которая была полностью готова к набору статистики
- Полностью выполнены обязательства института по участию в дежурных сменах эксперимента LHCb

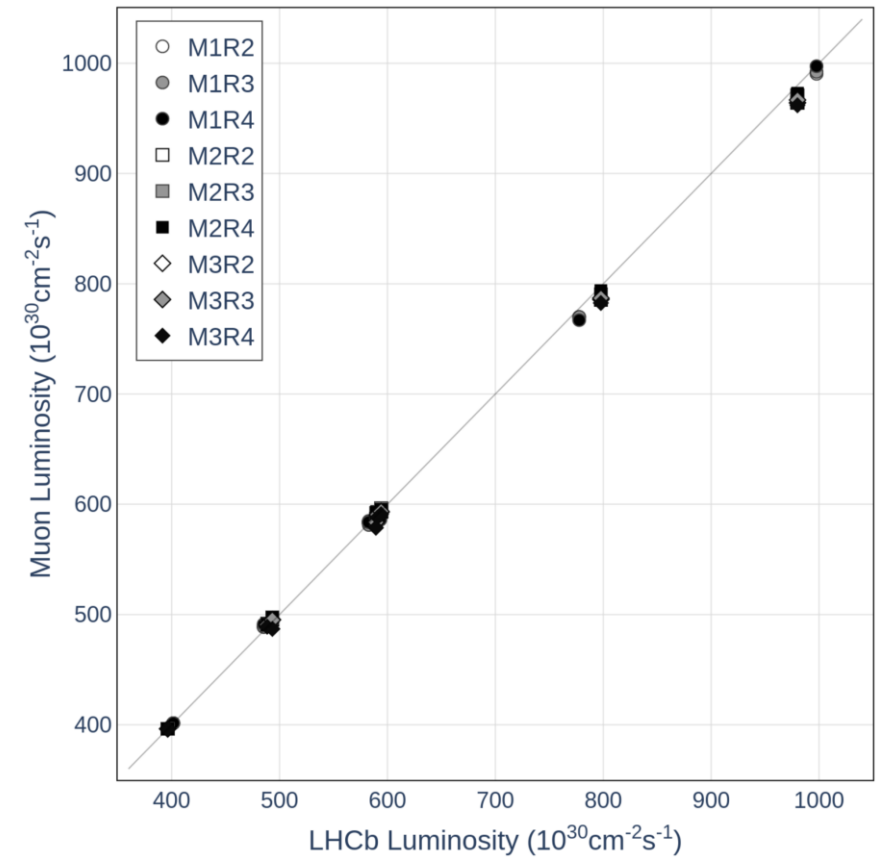
Производство камер высокой гранулярности

- Камеры механически изготовлены
- После успешного прохождения тестов всеми 15 камерами, они будут готовы к транспортировке в ЦЕРН для введения в эксплуатацию в Мюонного детектора установки LHCb.



Мюонная система LHCb – как измеритель светимости

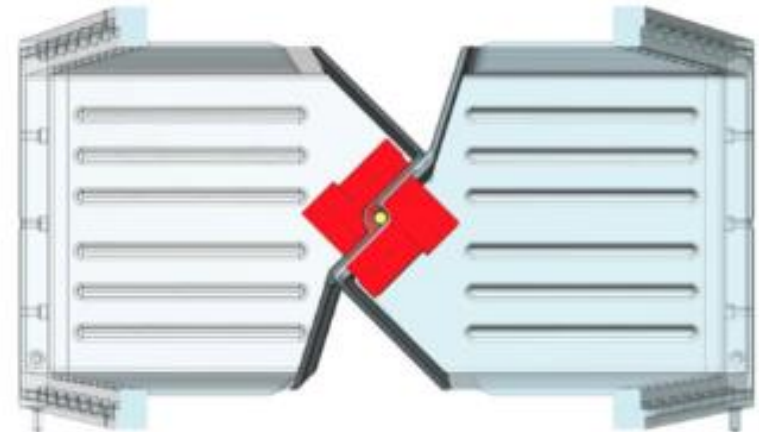
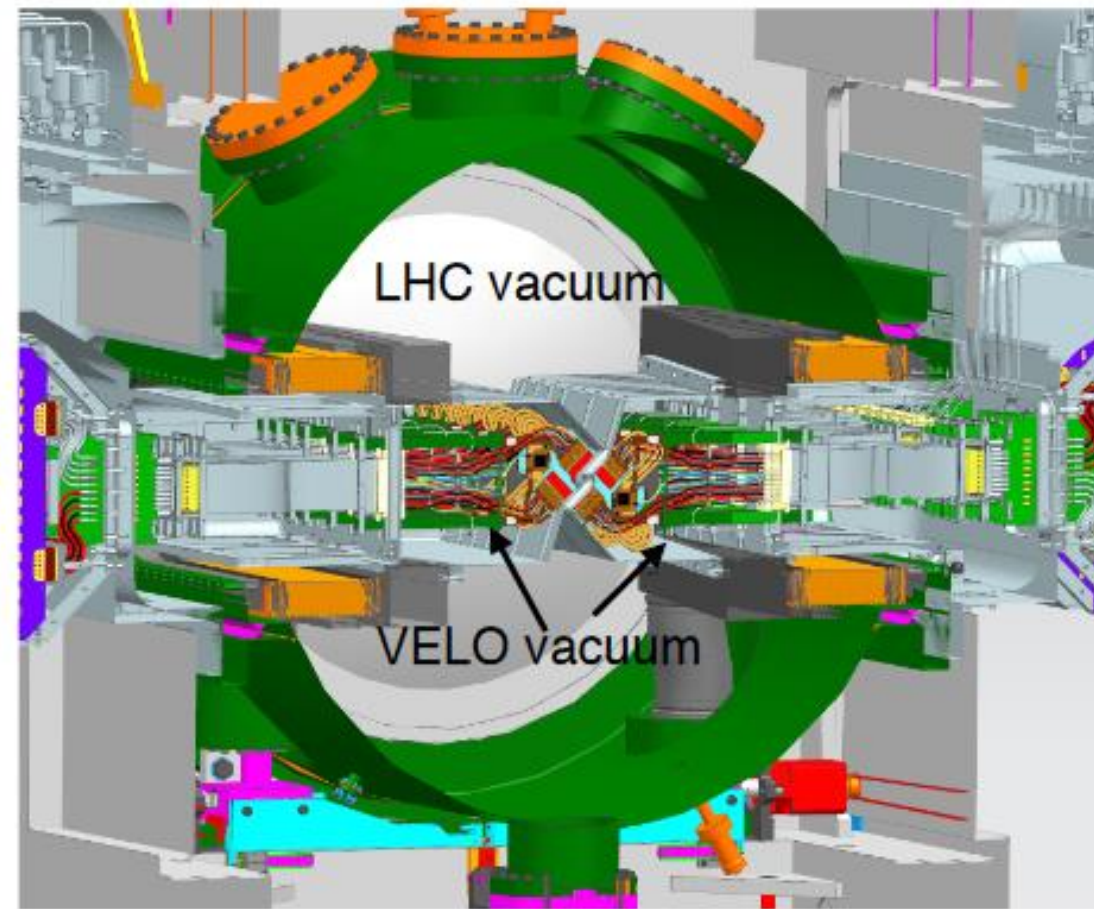
- Проведено исследование, целью которого была проверка возможности мониторинга светимости в детекторе LHCb с использованием мюонной системы эксперимента
- Два метода:
 - С использованием среднего тока по регионам и станциям детектора,
 - Мониторинг токов на 276 кластерах системы.
- Методы продемонстрировали хорошее согласие с результатами детектора PLUME, а также калориметра.
- Разработана программа контроля светимости при помощи мюонного детектора в режиме набора данных детектора LHCb.



Сравнение светимостей, измеренных при помощи метода анализа счетов фронт-энд электроники мюонной системы и измеренной при помощи калориметра светимости в ходе первого и второго этапа набора данных БАК

Инцидент с детектором VELO

- Инцидент произошел 10 января 2023 года во время нагрева VELO в неоне.
- Очень тонкие фольги, разделяющие вакуум LHC и VELO, подверглись пластической деформации до ~ 15 мм в сторону пучка \rightarrow их необходимо заменить.
- Детектор не поврежден.
- Замена фольги при остановке в конце 2023 года
- VELO не мог быть полностью закрыт в 2023 году \rightarrow **данные 2023 не годятся для физики тяжелых ароматов**



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

Заряженные токи (распады $B \rightarrow D\tau\nu$)

- К сожалению, эффект нарушения принципа лептонной универсальности в «петлевых» (диплептонных) распадах прелестных мезонов не подтвердился (см. результаты 2022).

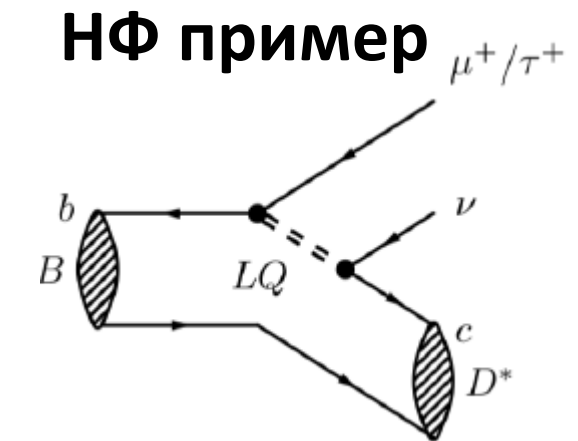
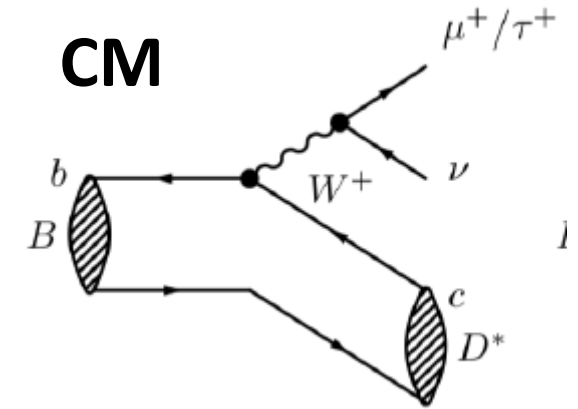
- Древесные диаграммы
- Плохие фоновые условия

$$R(D^*) = \frac{B(B^0 \rightarrow D^{*-} \tau^+ \nu_\tau)}{B(B^0 \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_\mu)}$$

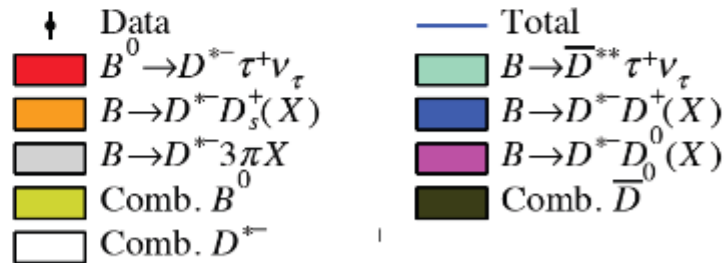
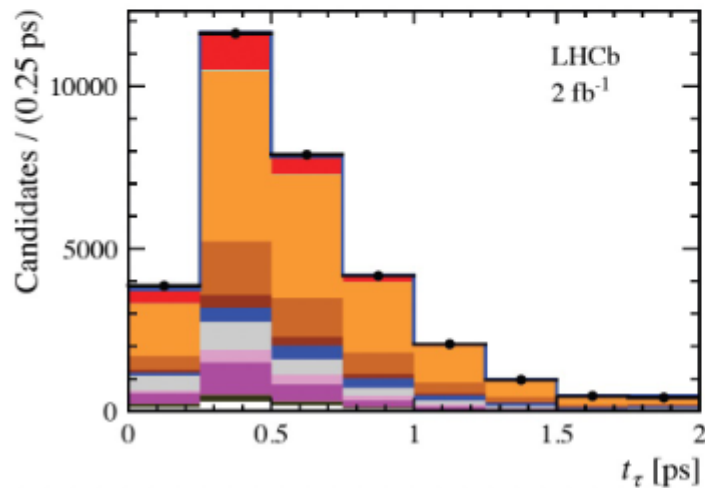
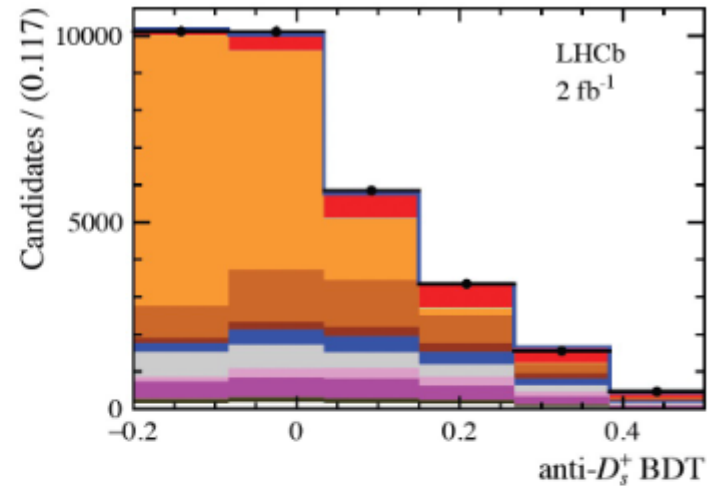
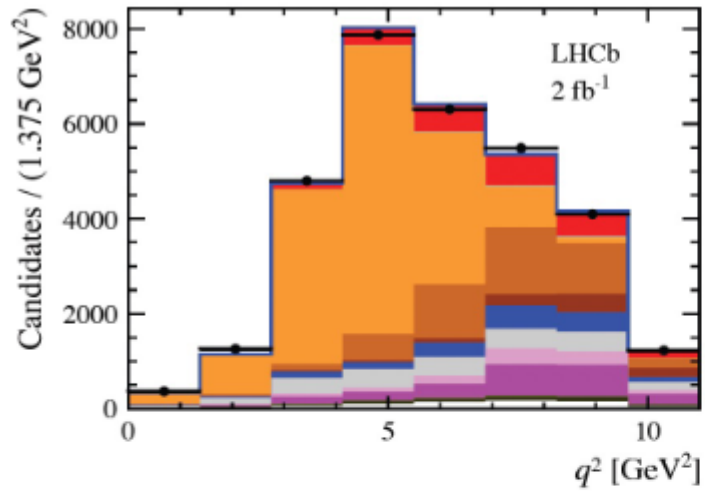
$$R(D)_{SM} = 0.299 \pm 0.003$$

$$R(D^*)_{SM} = 0.258 \pm 0.005$$

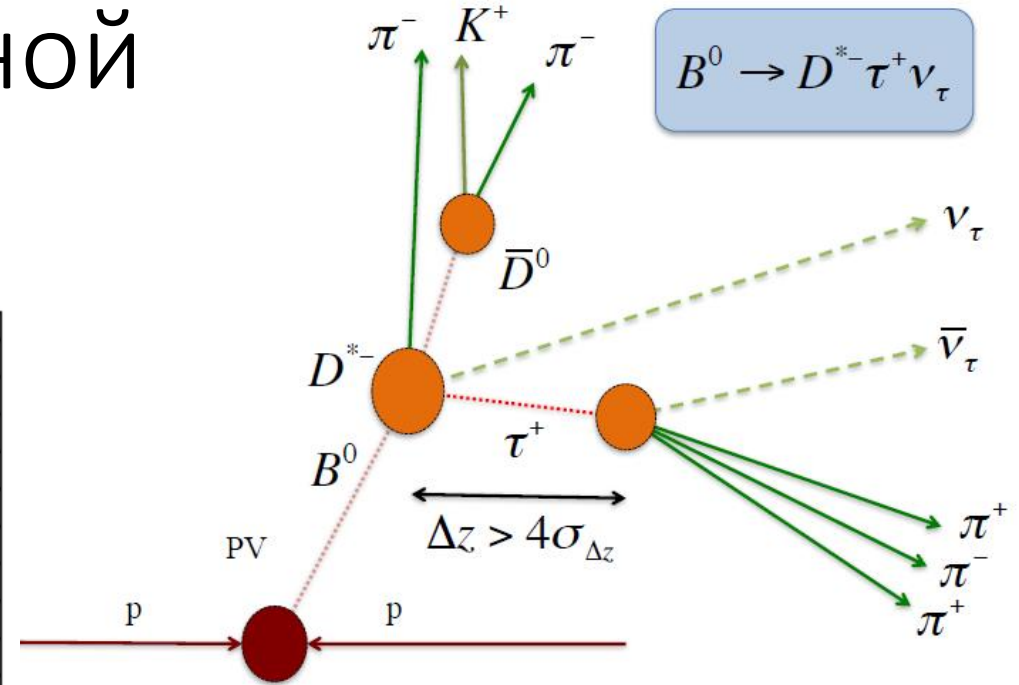
- Чувствительно к любым проявлениям НФ, которые связаны с третьим поколением лептонов
- Поиск на Belle, BaBar и LHCb



Проверка принципа лептонной универсальности

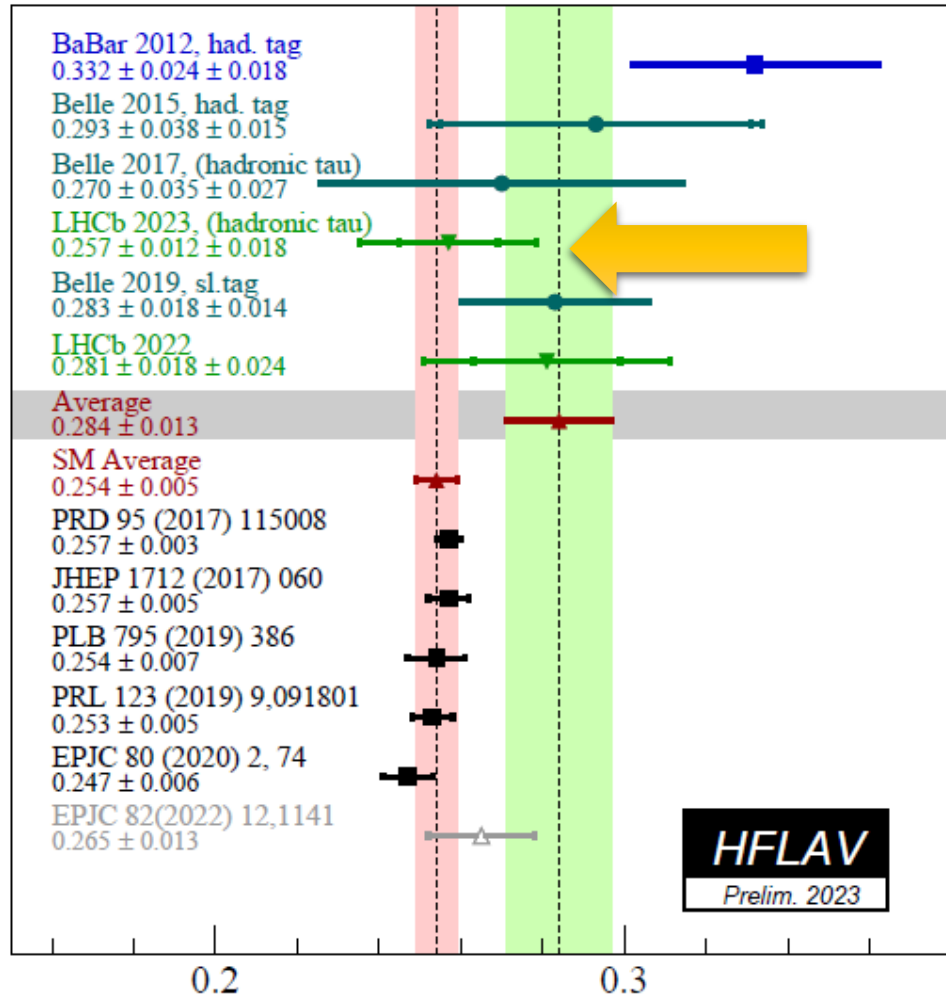


[Phys. Rev. D108 \(2023\) 012018](https://arxiv.org/abs/2208.07158)

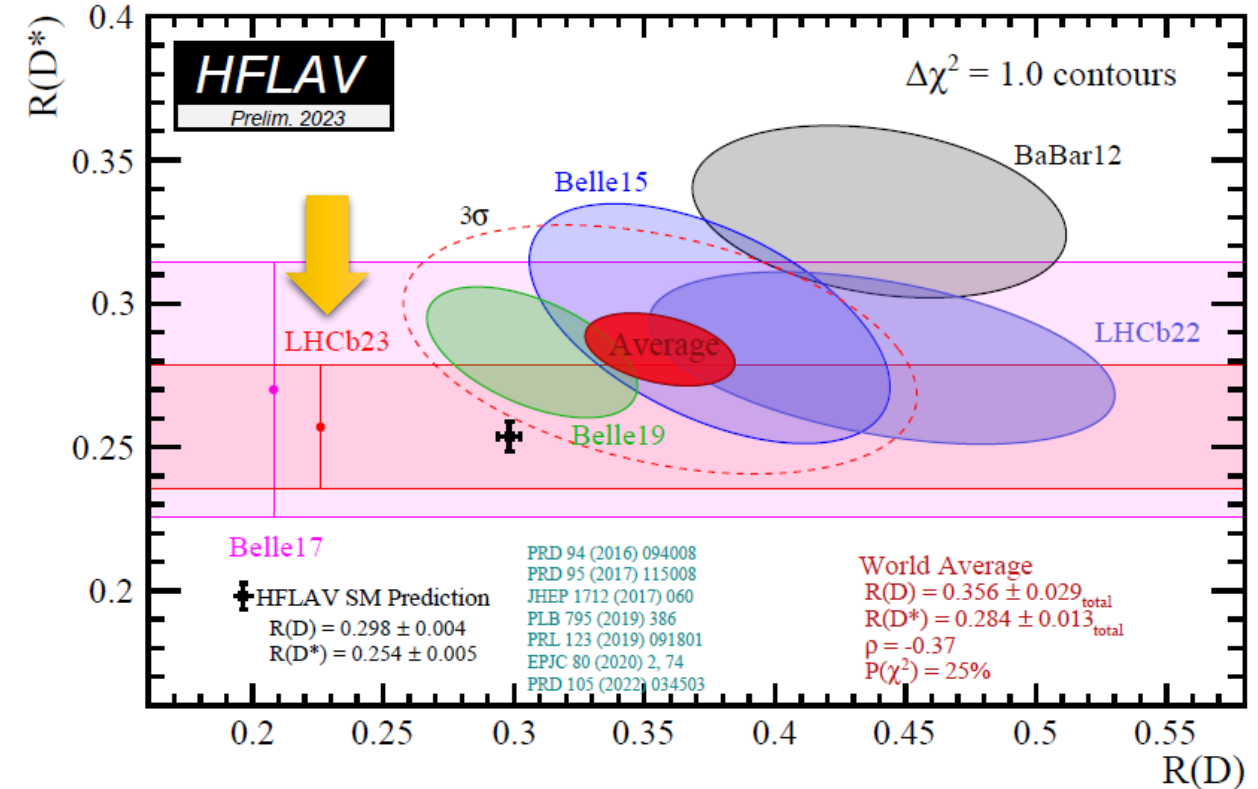


- В 2023 году LHCb исследовал $R(D^*)$, используя адронные распады тау
- Сложные фоновые условия (Монте-Карло + контроль на данных)

Лептонная универсальность (распады $B \rightarrow D\tau\nu$)



Расхождение мировых данных с предсказаниями СМ 3σ



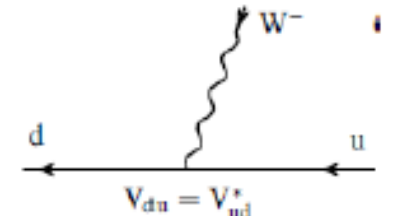
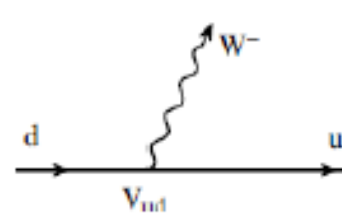
1σ -контуры и 1σ -полосы вероятности для различных измерений $R(D^0)$ и $R(D^*)$. Объединение результатов различных экспериментов показано красным. Пунктирной линией показан 3σ -контур для объединения результатов различных измерений. Предсказания СМ показаны черной точкой

Матрица кваркового смешивания

- Собственные состояния кварков по слабому взаимодействию и по аромату различны
- Матрица смешивания (Кабиббо-Кобаяши-Маскава)
- Два поколения – нет CPV, три поколения – одна CPV-фаза
- Эл-ты КKM-матрицы входят в амплитуды переходов
- **Параметризация Вольфенштейна**

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$I(d \rightarrow u) \propto i \frac{g_2}{2\sqrt{2}} \bar{u} V_{ud} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) d \quad A(u \rightarrow d) \propto i \frac{g_2}{2\sqrt{2}} \bar{d} V_{ud}^* \gamma_\mu (1 + \gamma_5) u$$



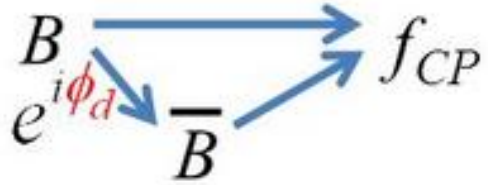
$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4).$$

$$s_{ij} = \sin \vartheta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \vartheta_{ij} \quad c_{13} = c_{23} = 1$$

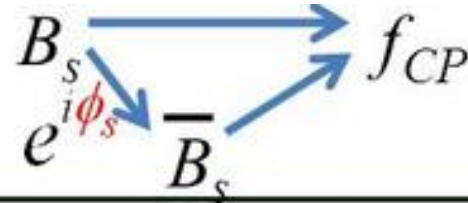
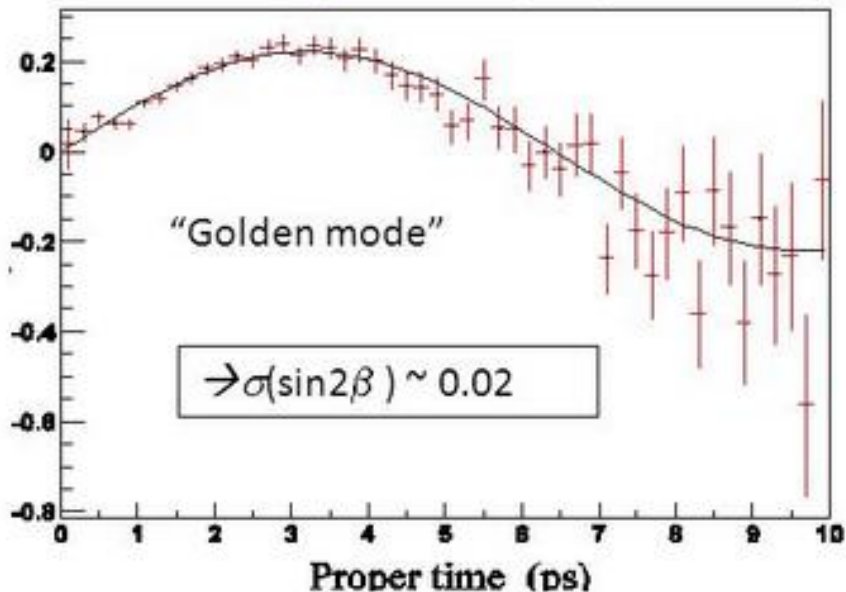
$$s_{12} = \lambda, \quad s_{23} = A\lambda^2, \quad s_{13} \exp(-i\delta) = A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

$$s_{12} = \lambda = 0,222 \pm 0,002, \quad s_{23} = O(10^{-2}), \quad s_{13} = O(10^{-3})$$

Проявления CP -нарушения (при интерференции прямых распадов и смешивания)



$$B^0: -A_{CP}(t) = \eta_f \sin \phi_d \sin(\Delta m_d t)$$



$$B_s: A_{CP}(t) = \frac{\eta_f \sin \phi_s \sin(\Delta m_s t)}{\cosh \frac{\Delta \Gamma_s t}{2} - \eta_f \cos \phi_s \sinh \frac{\Delta \Gamma_s t}{s}}$$

Позволяет извлекать CP -нарушающую фазу матрицы кваркового смешивания

Channel	Yield (2 fb^{-1})	B/S
$B_d \rightarrow J/\psi K_s$	216 k	0.8

Измерение параметров треугольника унитарности

Нейтральные токи с изменением кварковых ароматов и редкие распады K -мезонов \ Л.Г. Ландсберг

<https://ufn.ru/ru/articles/2003/10/a/>

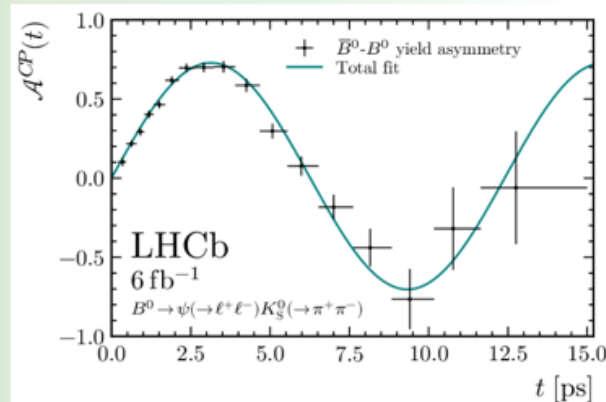


Нарушения CP четности, одно из условий, необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной (А.Д. Сахаров)

- 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 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).

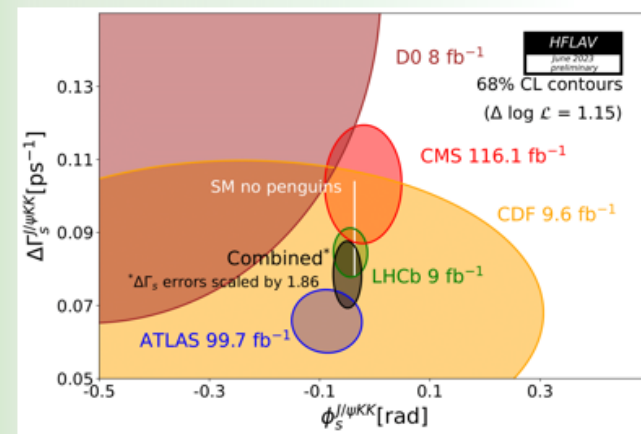
- $\varphi_s: B_s^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+\mu^-) \phi(\rightarrow K^+K^-)$
- $\sin(2\beta): B^0 \rightarrow \psi(\rightarrow \mu^+\mu^-) K_S^0(\rightarrow \pi^+\pi^-)$
- Регистрация мюонов необходима для надежного выделения сигнальных событий
- Мюонная система LHCb разработана, создана и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

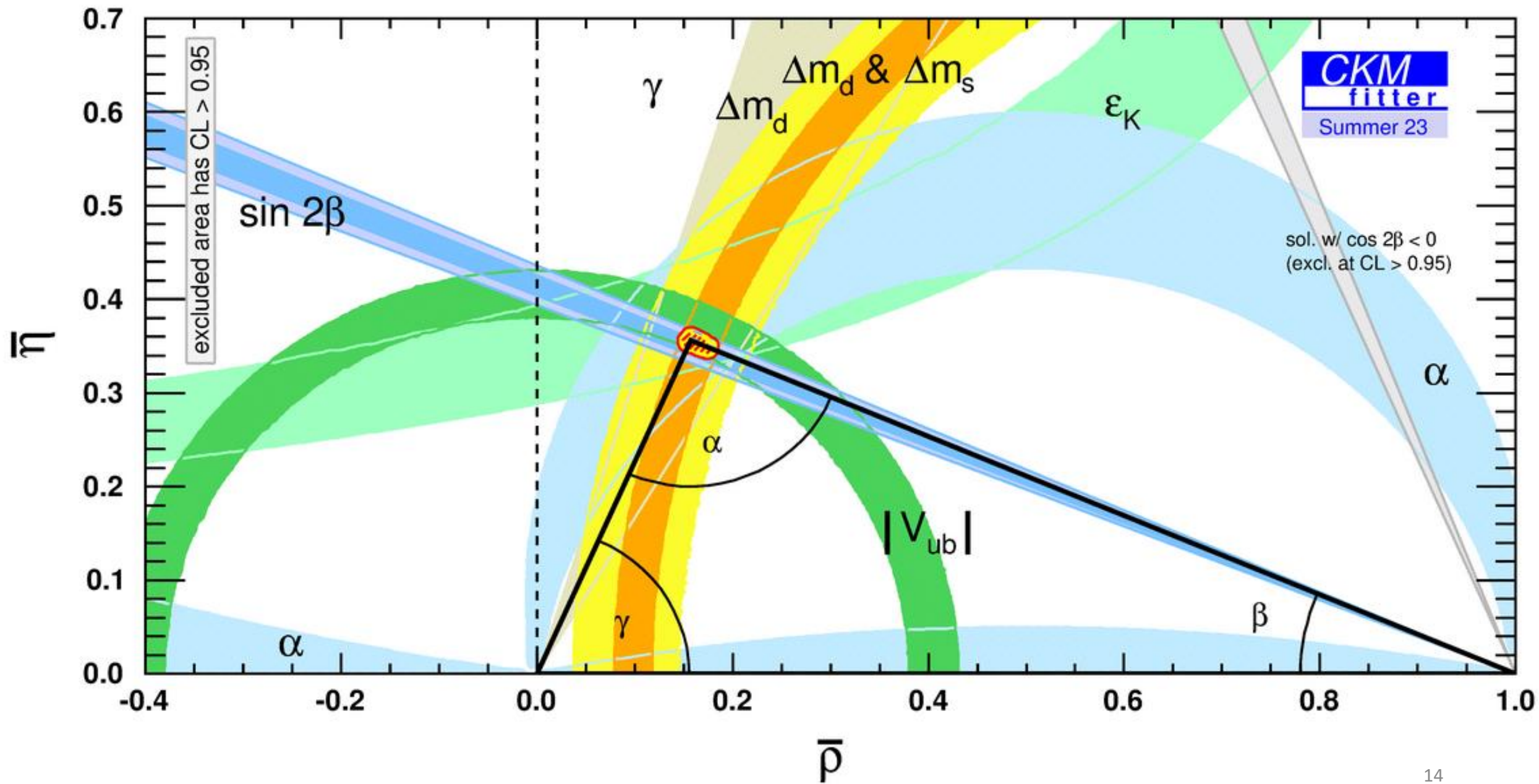
- $\varphi_s = -0,039 \pm 0,022_{\text{стат}} \pm 0,006_{\text{сист}}$
- $\sin(2\beta) = 0,717 \pm 0,013_{\text{стат}} \pm 0,008_{\text{сист}}$

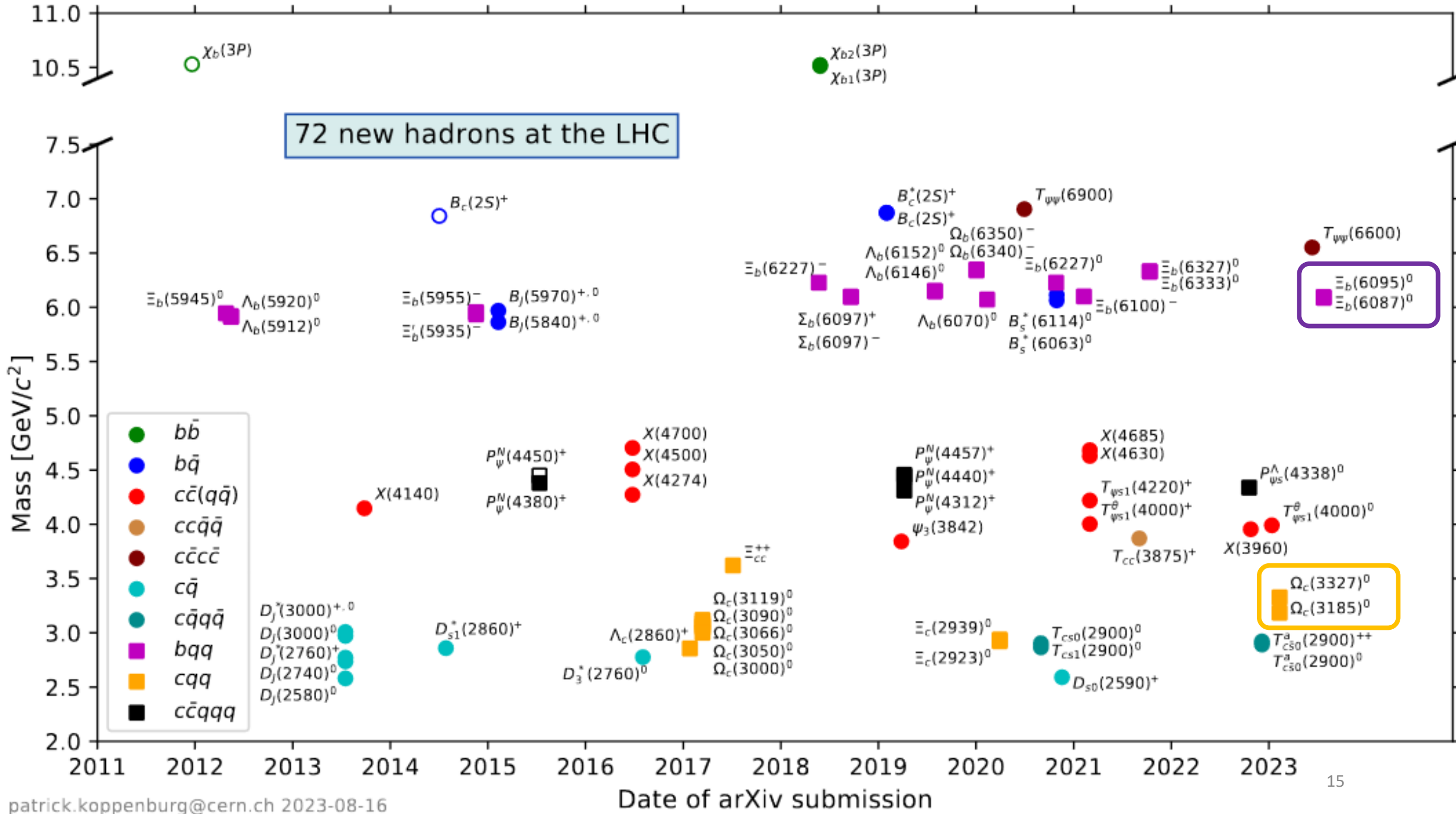


Полученные значения φ_s и $\sin(2\beta)$ являются самыми точными на сегодняшний день и находятся в хорошем согласии в пределах имеющихся неопределенностей как с результатами предыдущих измерений, так и с предсказаниями СМ

arXiv:2309.09728
arXiv:2308.01468

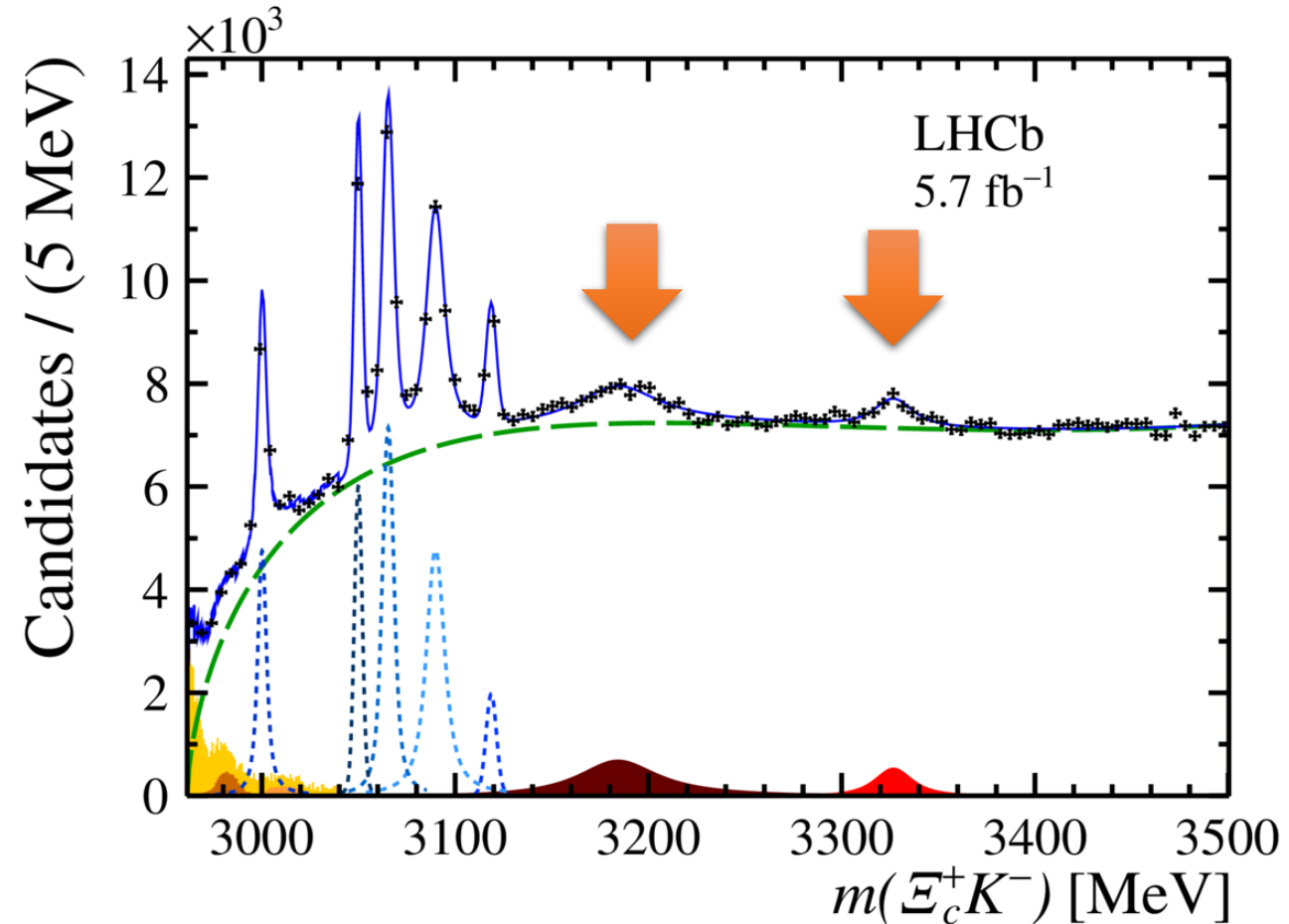
Результаты направлены в PRL





$\Omega_c(3185)^0$ и $\Omega_c(3327)^0$

- В 2015 году эксперимент LHCb объявил об одновременном открытии пяти возбужденных состояний Ω_c^{*0} , которые наблюдались в $\Xi_c^+ K^-$ канале его распада.
- Эти исследования были продолжены в том числе с использованием статистики, накопленной в ходе второго этапа работы БАК.
- Новый анализ данных показал, что помимо пяти узких пиков, в спектре инвариантной массы системы $\Xi_c^+ K^-$ наблюдаются еще две широкие (резонансные) структуры.



$$\Omega_c(3185)^0: \quad m = 3185.1 \pm 1.7^{+7.4}_{-0.9} \pm 0.2 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Gamma = 50 \pm 7^{+10}_{-20} \text{ МэВ}$$

$$\Omega_c(3327)^0: \quad m = 3327.1 \pm 1.2^{+0.1}_{-1.3} \pm 0.2 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Gamma = 20 \pm 5^{+13}_{-1} \text{ МэВ}$$

$\Xi_b(6087)^0$ и $\Xi_b(6095)^0$

- Новые состояния наблюдались в спектре масс $\Xi_b^0 \pi^+ \pi^-$
- Сам барион восстанавливался из распадов $\Xi_c^+ \pi^-$ и $\Xi_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$, а соответствующий очарованный барион выделялся в массовом спектре $p K^- \pi^+$.
- Большое число треков с определенными зарядами позволило сильно подавить фон случайных совпадений.
- Использовались только те события-кандидаты, которые соответствовали известным резонансам $\Xi_b^{\prime-}$ и Ξ_b^{*-} (требование на массу промежуточной системы $\Xi_b^0 \pi^-$)
- $Q = m(\Xi_b \pi \pi) - m(\Xi_b) - 2m_\pi$.

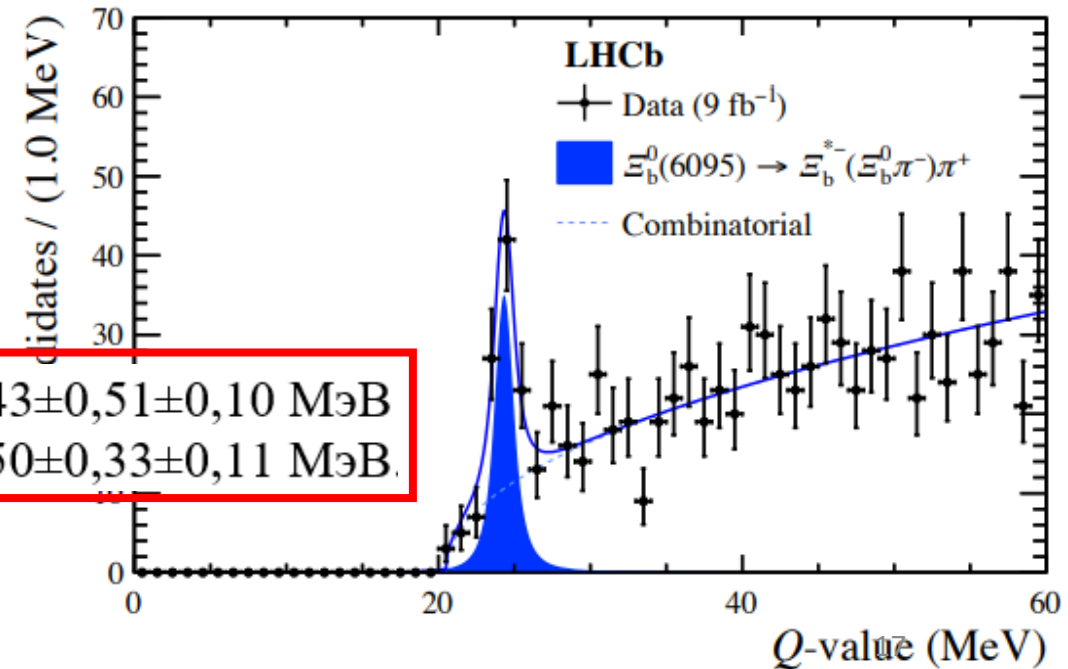
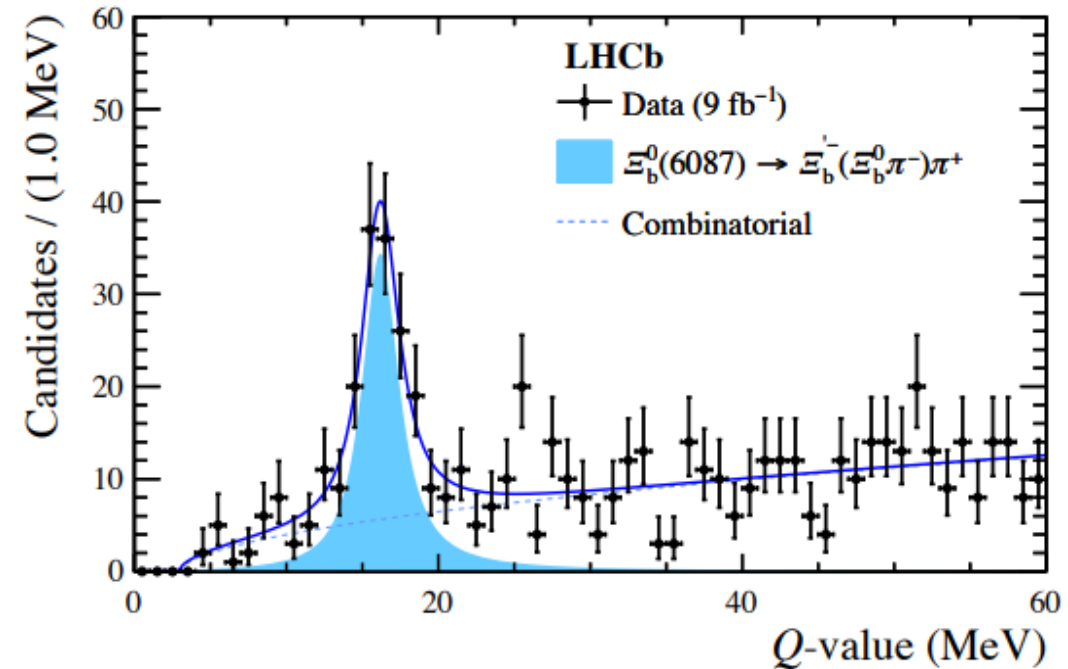
$$\Xi_b(6087)^0: \quad m = 6087.24 \pm 0.11 \pm 0.02 \pm 0.6 \text{ МэВ}/c^2$$

$$\Gamma = 2,43 \pm 0,51 \pm 0,10 \text{ МэВ}$$

$$\Xi_b(6095)^0: \quad m = 6095.36 \pm 0.15 \pm 0.03 \pm 0.5 \text{ МэВ}/c^2$$

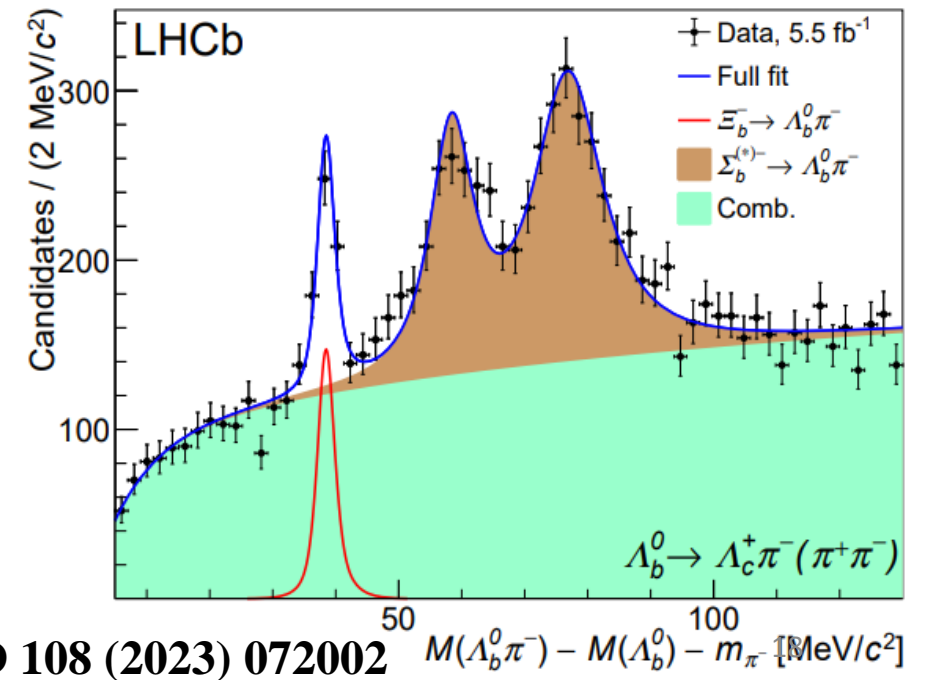
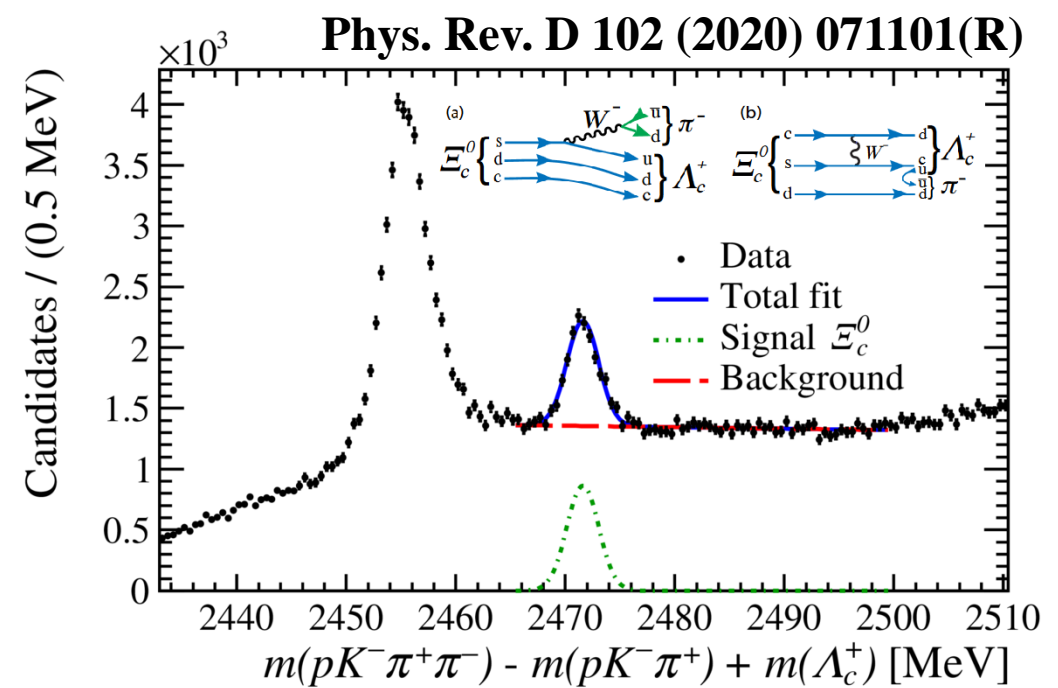
$$\Gamma = 0,50 \pm 0,33 \pm 0,11 \text{ МэВ}$$

Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 171901



Распад s -кварка в тяжелом барионе

- Для набора данных pp взаимодействий происходящих при энергии 13 ТэВ эксперимент LHCb впервые наблюдал распад $\Xi_b^- \rightarrow \Lambda_b^0 \pi^-$
- Распад интересен тем, что в нем прелестный кварк (b) выступает в роли наблюдателя, а распадается странный кварк (s).
- Некоторые теоретические модели предсказывают повышенную вероятность таких распадов.
- Используя известные из литературы значения отношений функций фрагментации $f_{\Xi_b^-} / f_{\Lambda_b^0}$ удалось измерить вероятность открытого канала распада:
- $\mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow \Lambda_b^0 \pi^-) = (0.89 \pm 0.10 \pm 0.07 \pm 0.29) \%$
- Это значение отмечает некоторые теоретические модели, описывающие распад



Свойства тяжелых барионов

arXiv:2308.08512

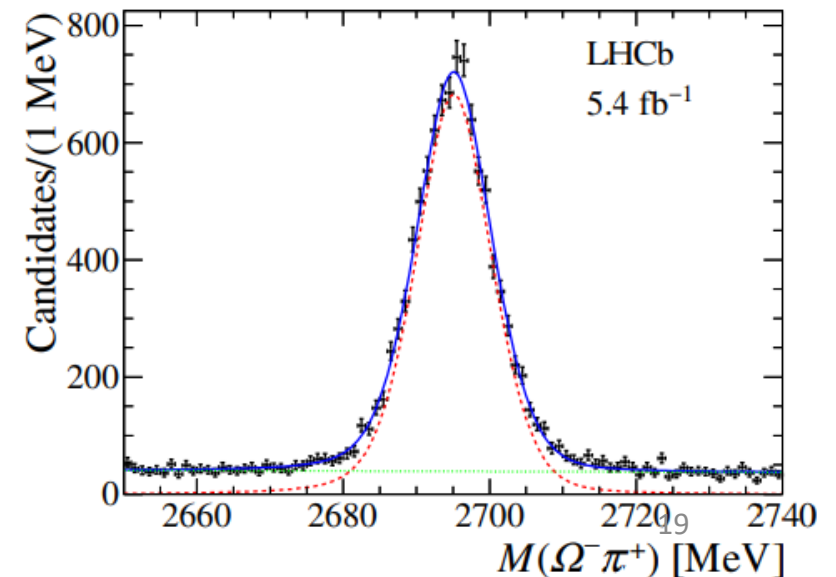
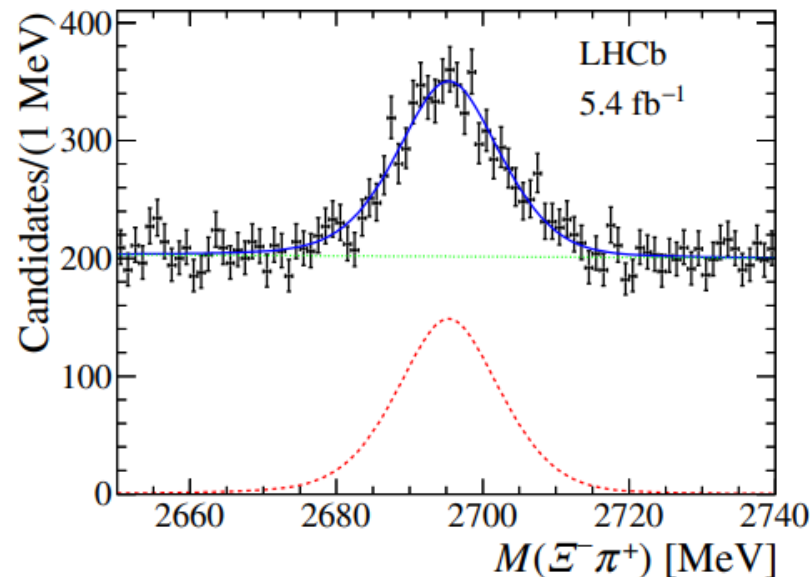
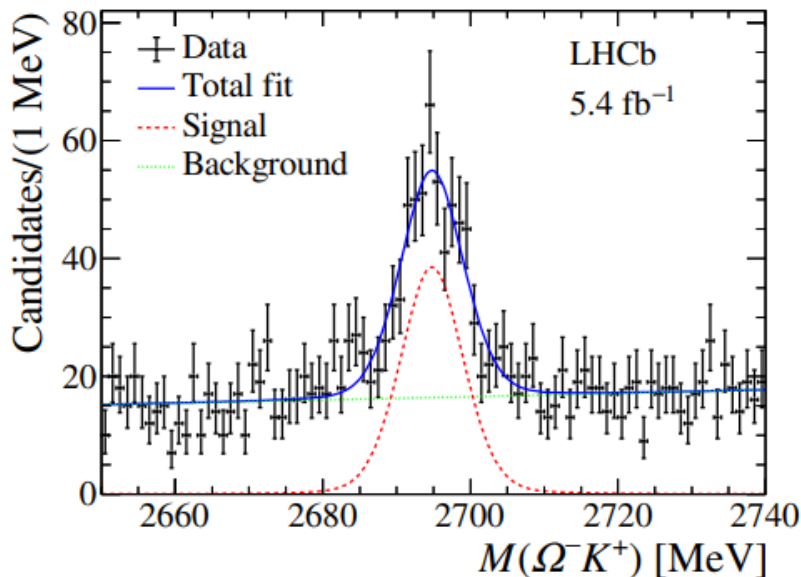
Распады Ω_c^0 барионов (кварковый состав ssc), подавленные по недиагональным элементам матрицы кваркового смешивания, т.е. так называемые Кабиббо-подавленные распады

В распаде $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+$ подавление идет на первом шаге кварковой диаграммы ($c \rightarrow d W [\rightarrow ud]$), а в распаде $\Omega_c^0 \rightarrow \Omega^- K^+$ на втором ($c \rightarrow s W [\rightarrow us]$)

$$B(\Omega_c^0 \rightarrow \Omega^- K^+) / B(\Omega_c^0 \rightarrow \Omega^- \pi^+) = 0.0608 \pm 0.0051_{\text{стат}} \pm 0.0040_{\text{сист}},$$

$$B(\Omega_c^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+) / B(\Omega_c^0 \rightarrow \Omega^- \pi^+) = 0.1581 \pm 0.0087_{\text{стат}} \pm 0.0043_{\text{сист}} \pm 0.0016_{\text{сист}2}$$

$$m(\Omega_c^0) = 2695.28 \pm 0.07_{\text{стат}} \pm 0.27_{\text{сист}} \pm 0.30_{\text{сист}2} \text{ MeV}/c^2$$



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)
- В настоящее время в НИЦ КИ – ПИЯФ **завершается производство новых многопроволочных пропорциональных камер высокой гранулярности** для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.
- Группа ОФВЭ осуществляла **техническое сопровождение Мюонной системы детектора LHCb** :
 - Мюонная система детектора успешно эксплуатировалась
 - **Измерение светимости при помощи Мюонного спектрометра**
- Основные результаты LHCb, представленные в 2023 году:
 - **Проверка принципа лептонной универсальности в распадах прелестных адронов**
 - **Проверка предсказаний КМ-механизма (параметры CP нарушения)**
 - **Спектроскопия тяжелых адронов**

