

# Основные результаты ЛНСб в 2022 году

Дзюба Алексей, ЛБФ ОФВЭ

**Группа ПИЯФ:** Воробьев А. Бондарь Н., Бочин Б., Гец С., Граник А., Дзюба А., Маев О., Сагидова Н., Чубыкин А., Чуликов В.

Опубликовано в 2022 году:	31 работа
Ожидают публикации (направлены в печать):	44 работы
Доклады на конференциях:	3 доклада

# 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.

# LHCb: Find \ Identify \ Measure

Excellent vertexing allows efficient heavy quark hadrons selection / gives access to decay time distribution / prompt-secondary separation for charm

Protons collision point

Excellent PID allows to suppress background dramatically and explore many decay modes

Excellent tracking

Muon system – nice tagging & great potential to search for rare decays with di-muons

$$\sigma(IP) \approx 20\mu m$$

$$\delta p/p = 0.4 - 0.6 \%$$

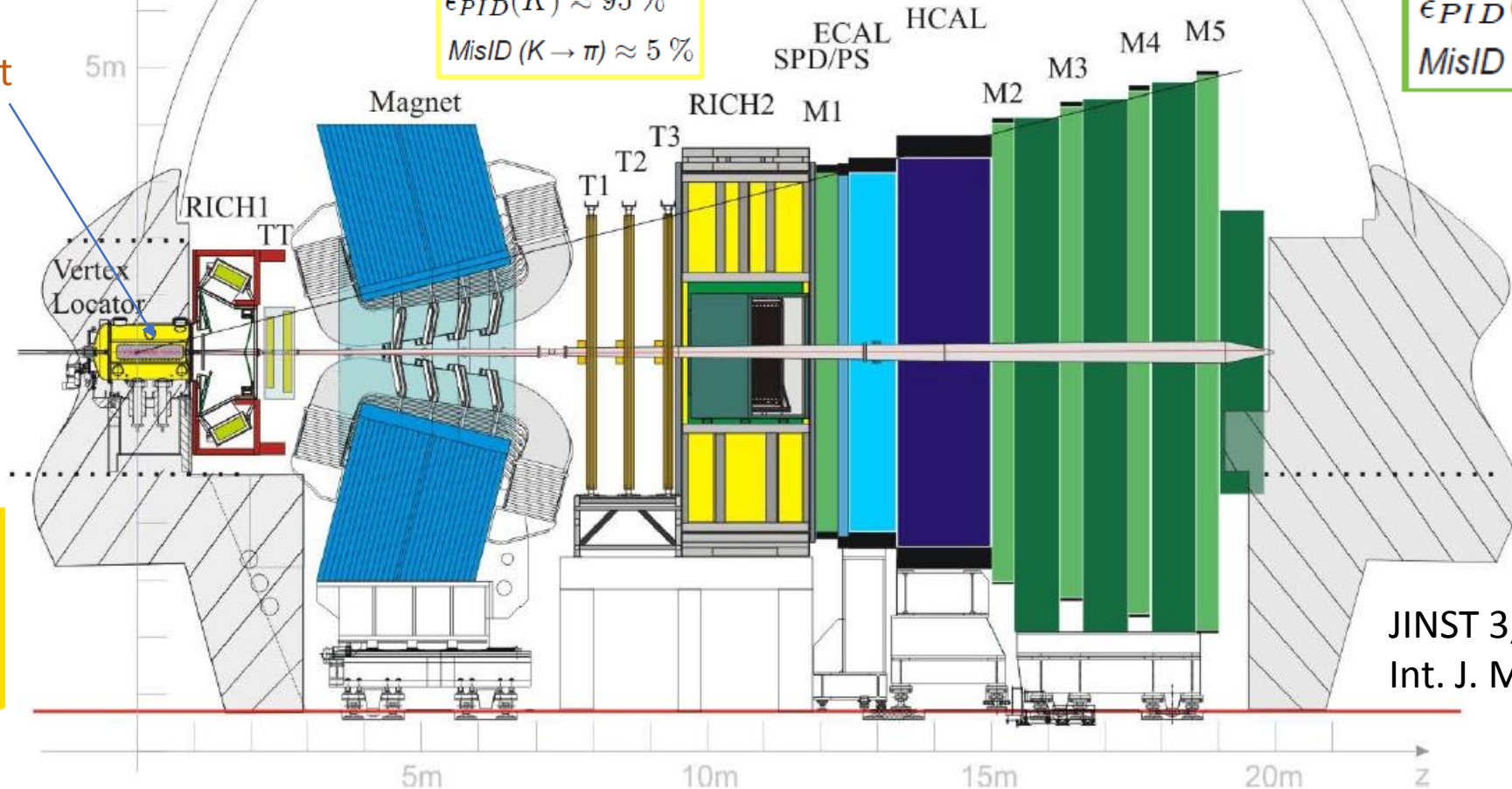
$$\epsilon_{track} > 96 \%$$

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95 \%$$

$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5 \%$$

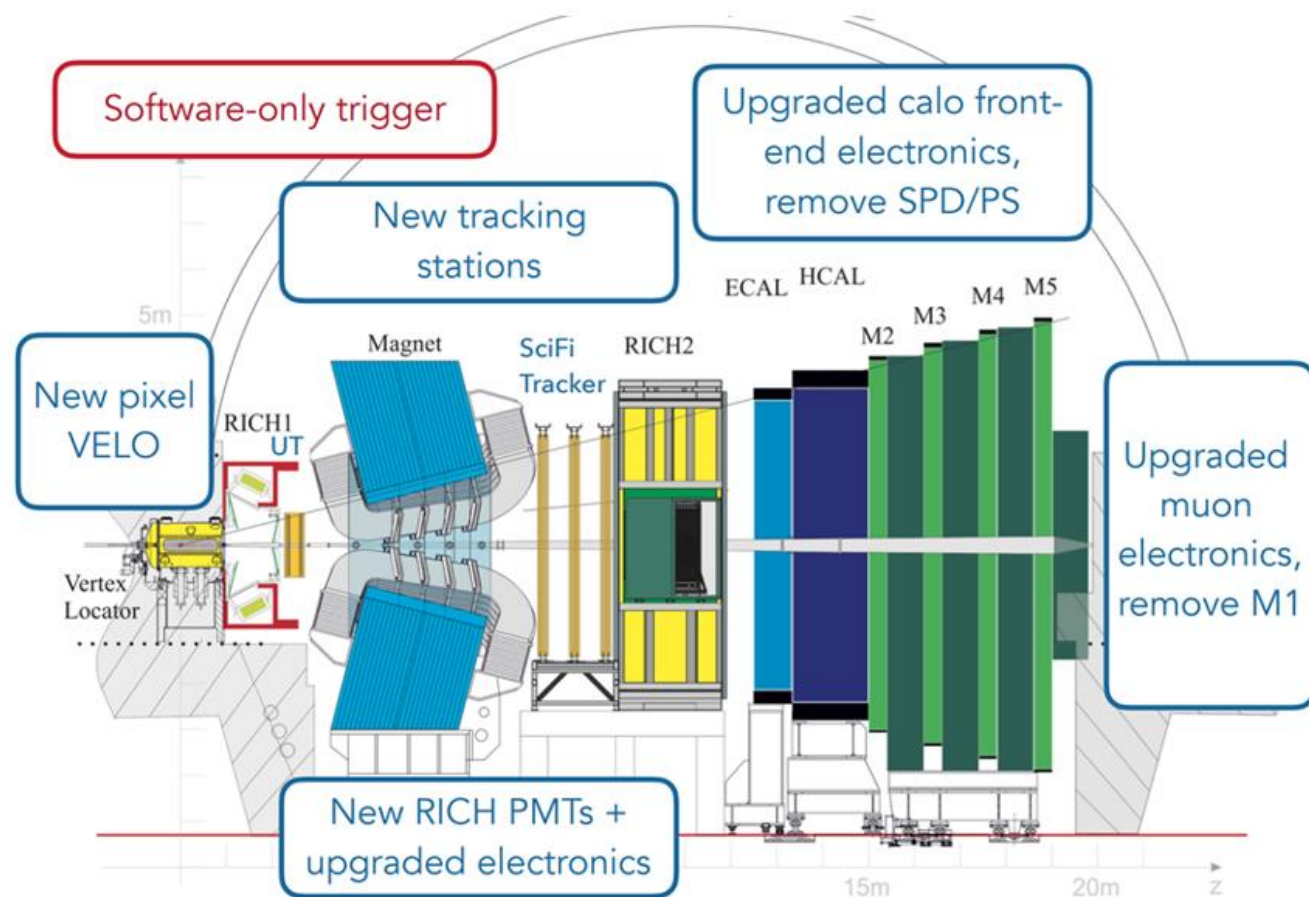
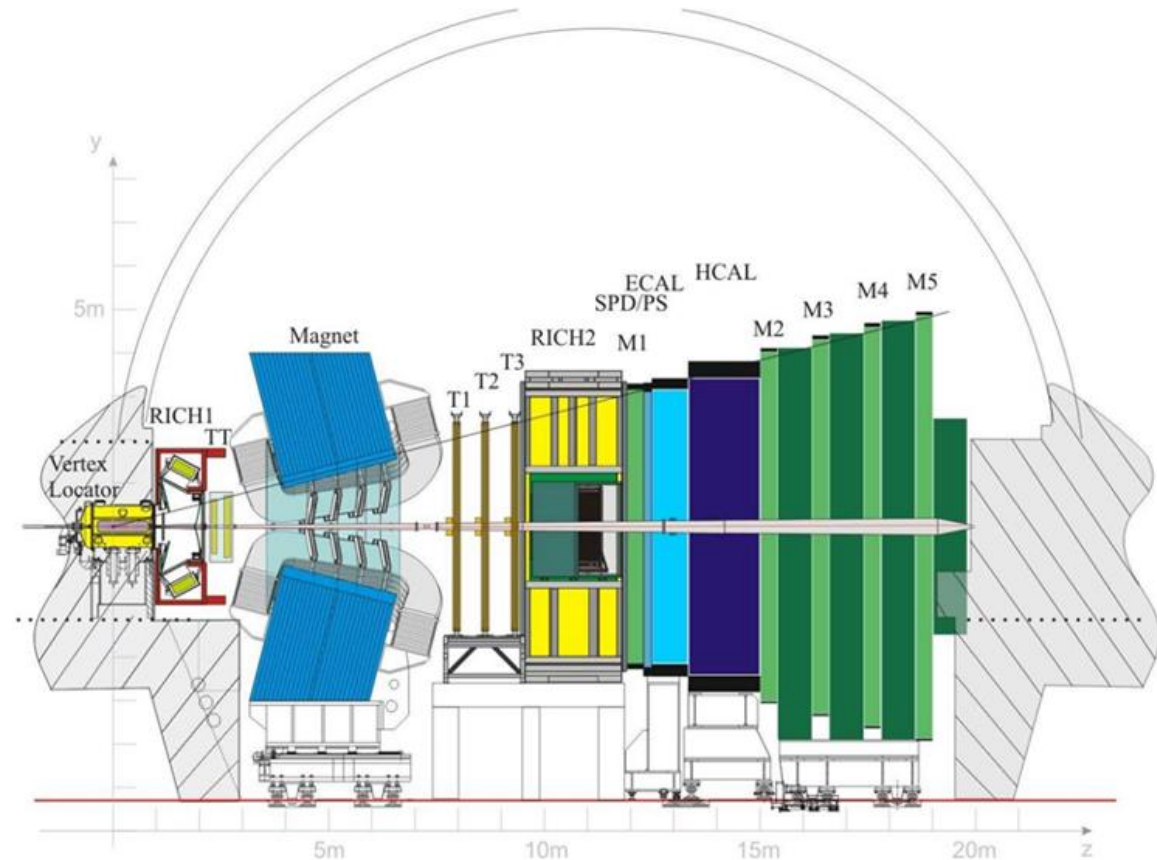
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97 \%$$

$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3 \%$$



JINST 3, (2008) S08005;  
Int. J. Mod. Phys. A 30,  
(2015) 153022

# LHCb Upgrade



Маев О.Е., семинар ОФВЭ (12.04.2022)

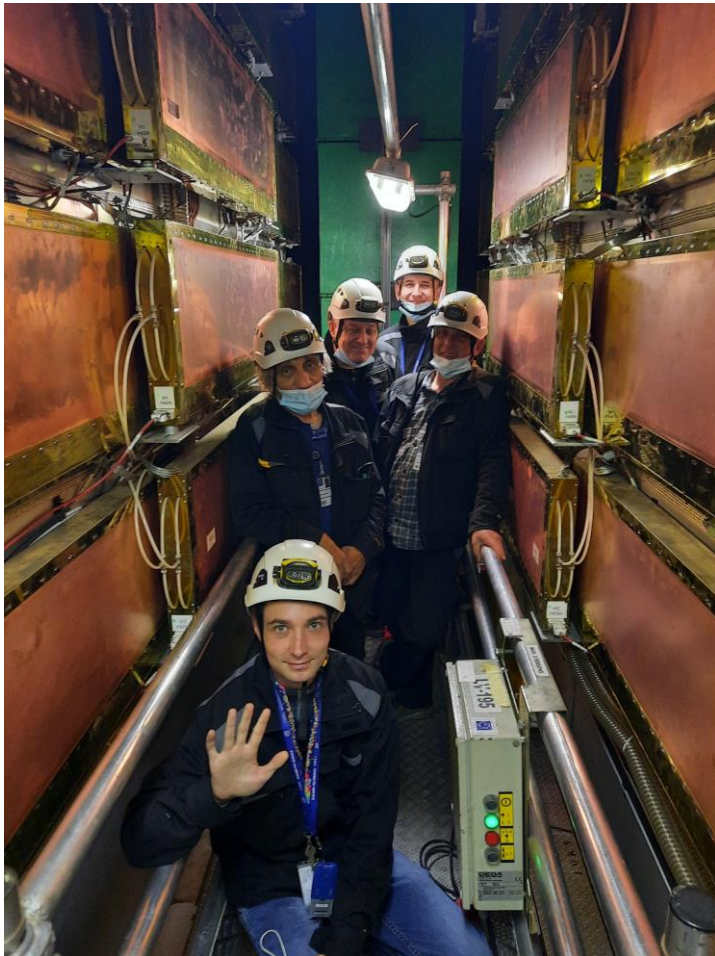
[https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/Semiar\\_PNPI\\_Maev\\_Oleg\\_220412.pdf](https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/Semiar_PNPI_Maev_Oleg_220412.pdf)

[https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/HEPD\\_Seminar\\_Maev.O.E\\_12.04.2022.mp4](https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/HEPD_Seminar_Maev.O.E_12.04.2022.mp4)

# LHCb MUON

Изготовление камер в ОФВЭ ПИЯФ

Работы по подготовке Мюонной системы LHCb к экспериментальному сеансу 2022 выпилены в полном объеме. Осуществляется экспертная поддержка установки (+ LHCb-шифты).



В настоящее время в НИЦ КИ – ПИЯФ продолжается производство новых многопроводных пропорциональных камер высокой гранулярности для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.

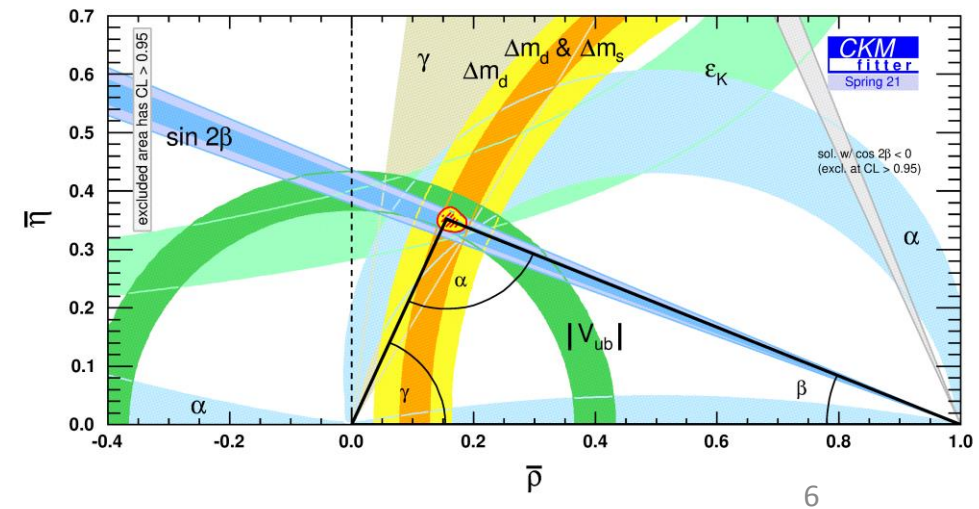
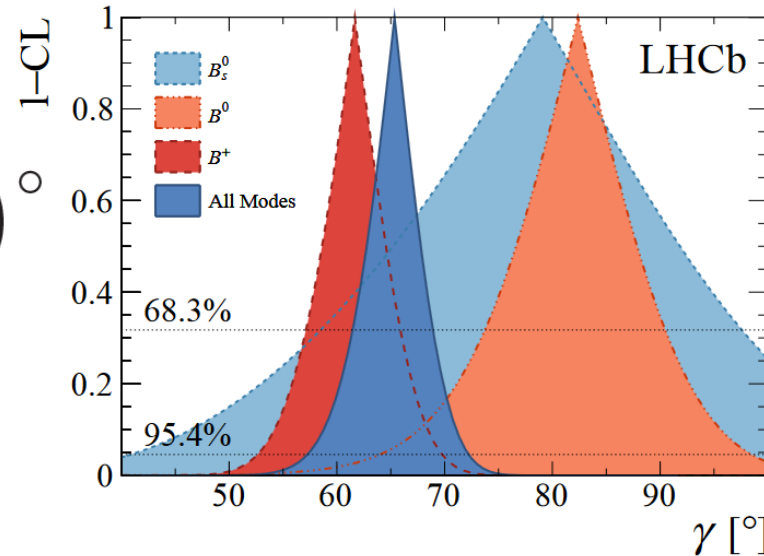
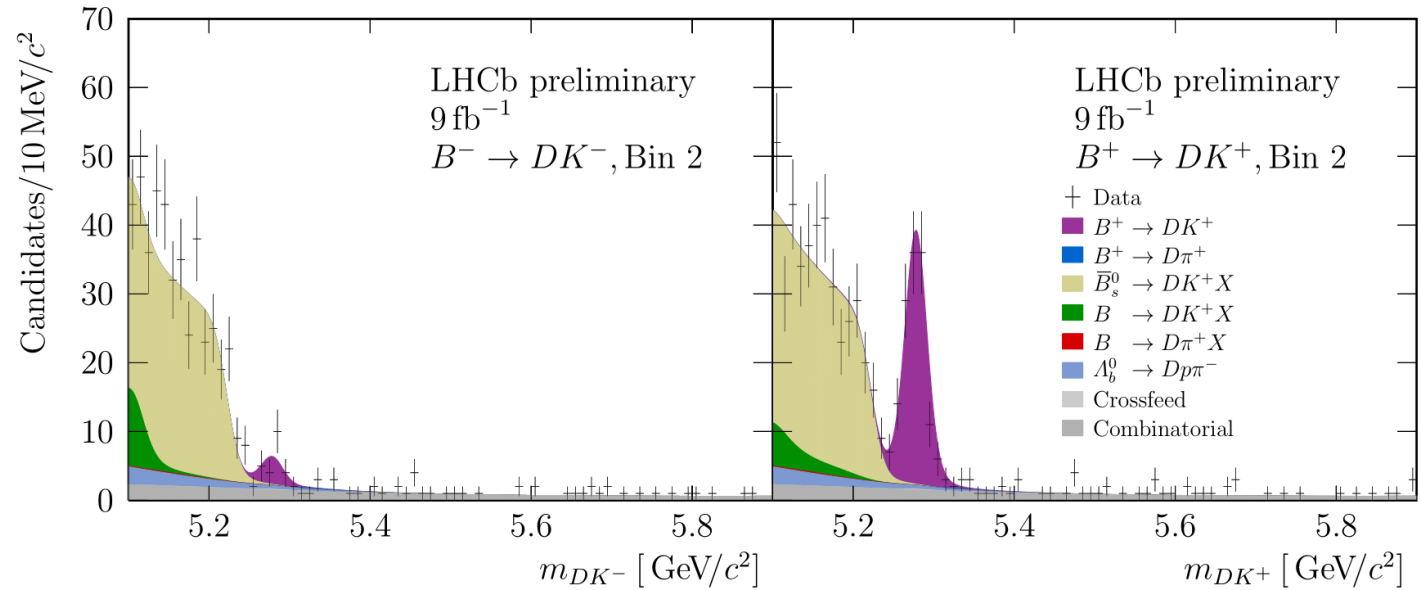
2022: 10 камер 2023: 2+2запасные, установка на LHCb (конец 2023)

# CP нарушение и $b$ сектор SM

- Цепочка распадов  $B^\pm \rightarrow DK^\pm$  и  $D^\pm \rightarrow K^\mp \pi^\pm \pi^\pm \pi^\mp$
- Для некоторых областей фазового пространства распада сигнал от  $B^+$  мезонов более чем в 12 раз интенсивен чем сигнал от  $B^-$  (рекорд)
- Используется для измерения угла  $\gamma$  треугольника унитарности

$$\gamma = \left( 54.8^{+6.0+0.6+6.7}_{-5.8-0.6+4.3} \right)^\circ$$

[arXiv:2209.03692](https://arxiv.org/abs/2209.03692)



# CP нарушение и c сектор SM

Два метода измерения  $A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+)$

- **2019:**  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  и  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$
- $\Delta A_{CP} = A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \neq 0$
- Наличие эффекта CP-нарушения, но не его источник!

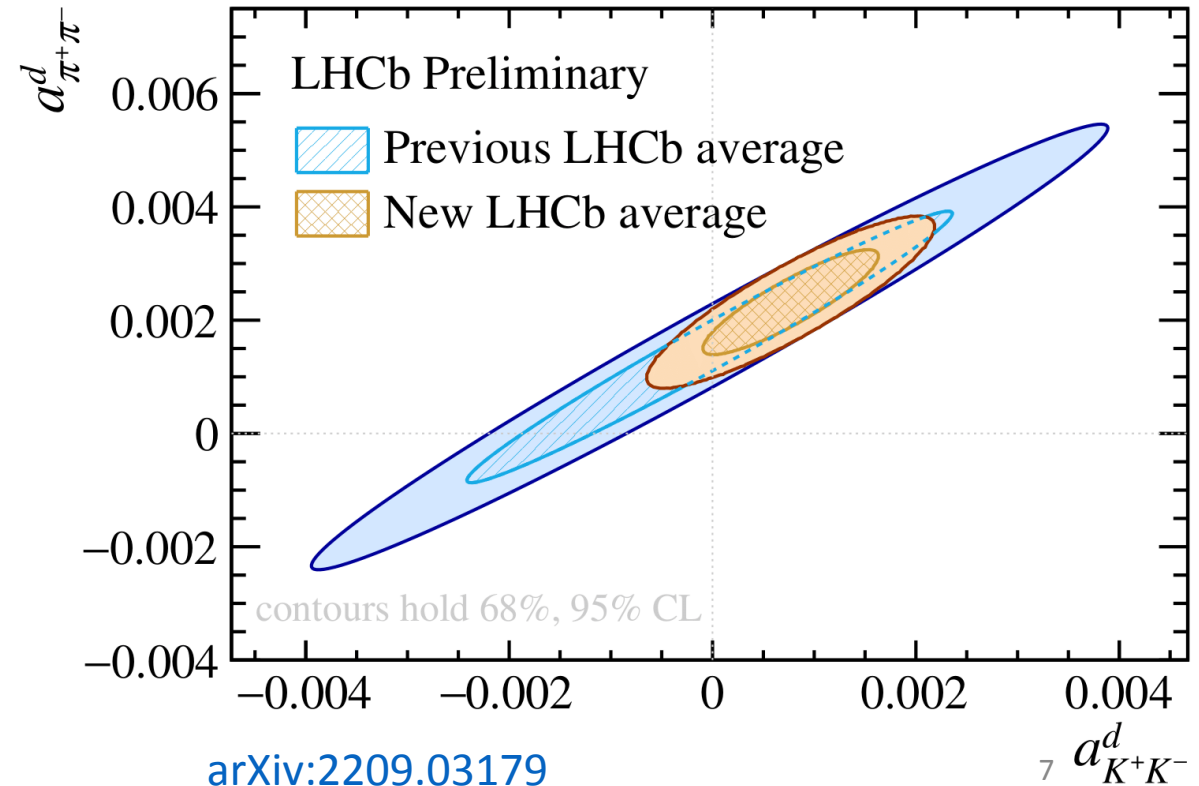
$$A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) = A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- K^+) \pi^+) - A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \pi^+) + A(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) - [A(D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+) - A(K^0)],$$

$$A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) = A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- K^+) \pi^+) - A(D^{*+} \rightarrow (D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \pi^+) + A(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+) - [A(D_s^+ \rightarrow \bar{K}^0 K^+) - A(K^0)].$$

- **2022:**  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  – измерение  $A_{CP}(KK)$
- Два метода коррекции асимметрии рождения и регистрации частиц

$$A_{CP}(KK) = (6.8 \pm 5.4_{\text{стат.}} \pm 2.0_{\text{сист.}}) \times 10^{-4}$$

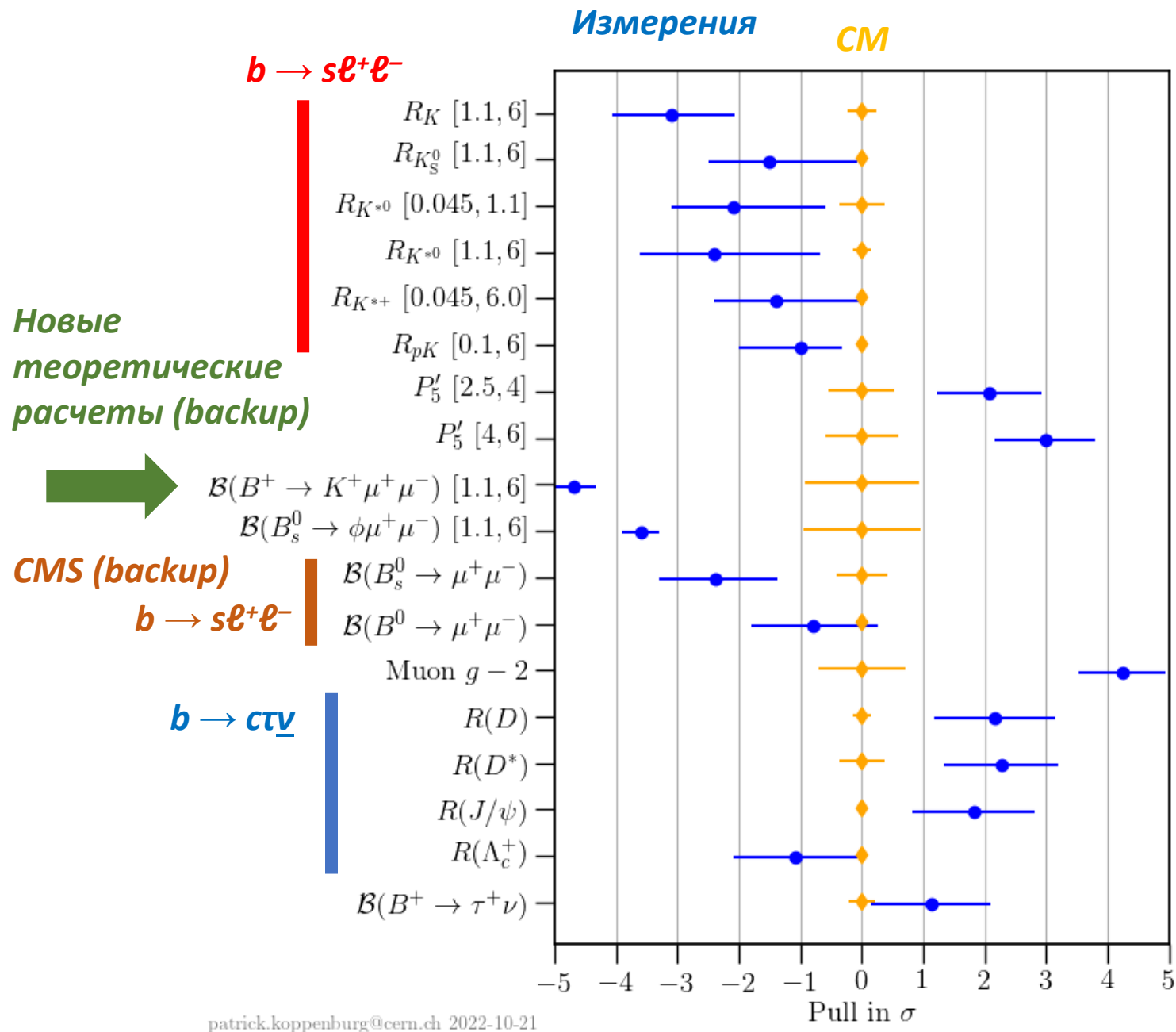
- Используя  $\Delta A_{CP}$ , получены асимметрии амплитуд распада
- $a_{\pi\pi}^d$  отлична от нуля на уровне  $3.8\sigma$
- Указания на прямое нарушение CP-инвариантности в распадах  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$



[arXiv:2209.03179](https://arxiv.org/abs/2209.03179)

[https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/HEPD\\_Seminar\\_Dzyuba.A.A\\_28.06.2022.mp4](https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/HEPD_Seminar_Dzyuba.A.A_28.06.2022.mp4)

<https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2022/slides.pdf>



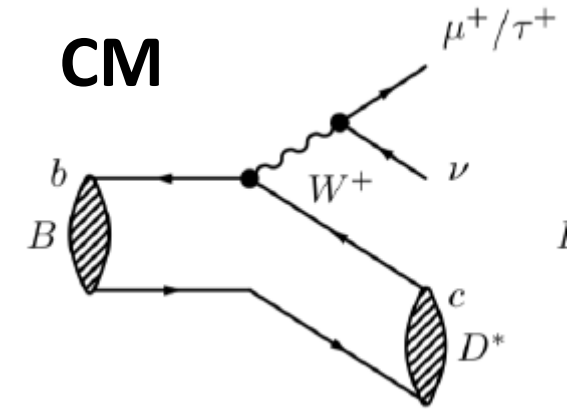
patrick.koppenburg@cern.ch 2022-10-21

# Аномалии физики частиц



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

- Древесные диаграммы с подавлением по  $V_{cb}$
- Плохие фоновые условия

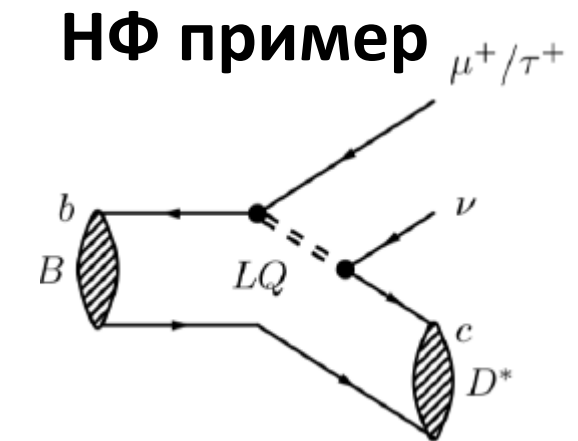


$$R(D^*) = \frac{B(B^0 \rightarrow D^{*-}\tau^+\nu_\tau)}{B(B^0 \rightarrow D^{*-}\mu^+\nu_\mu)}$$

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

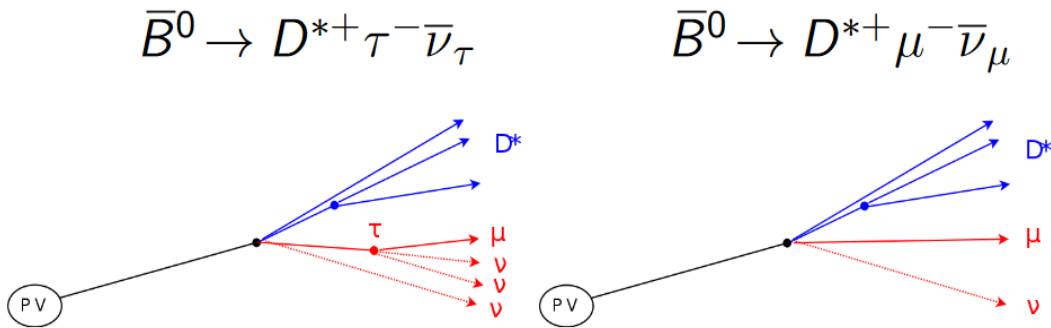
$$R(D^*)_{SM} = 0.258 \pm 0.005$$

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



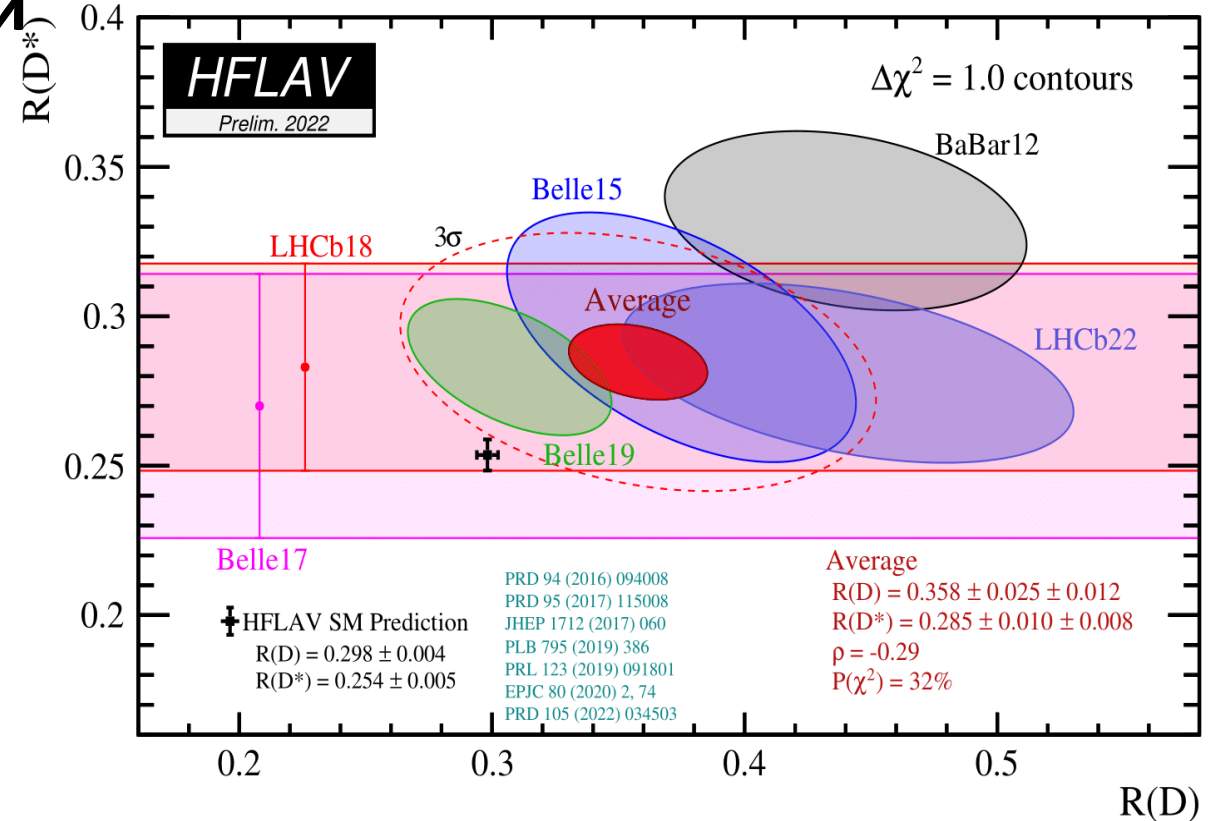
# Заряженные токи (распады $B \rightarrow D\tau\nu$ )

- Впервые для LHCb величины  $R(D^0)$  и  $R(D^*)$  измерялись одновременно



- $R(D^*) = 0.281 \pm 0.018 \pm 0.024$
- $R(D) = 0.441 \pm 0.060 \pm 0.066$
- Новое измерение не изменило мировое средние
- $3\sigma$ -расхождение с предсказаниями СМ

<https://indico.cern.ch/event/1187939/>



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

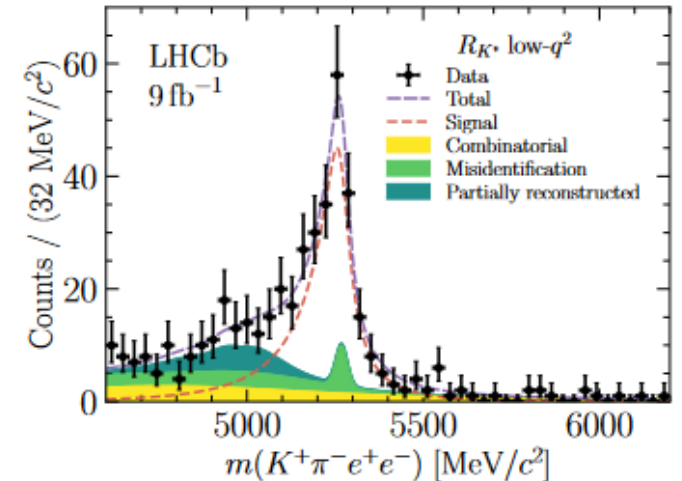
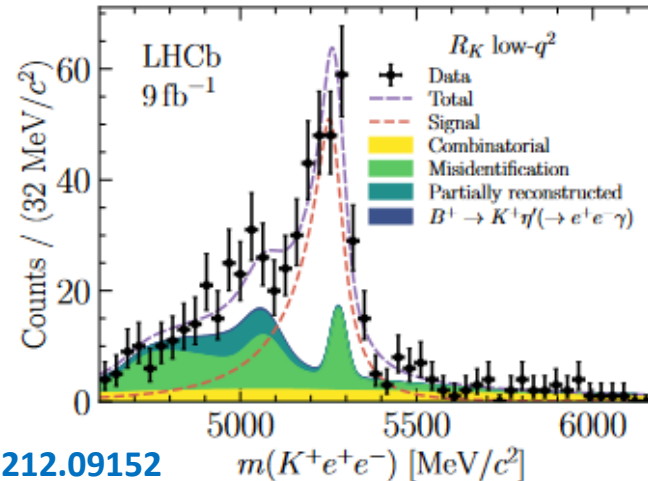
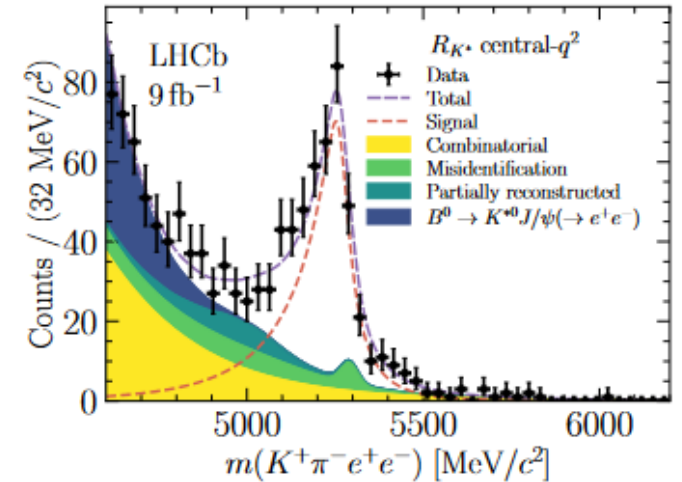
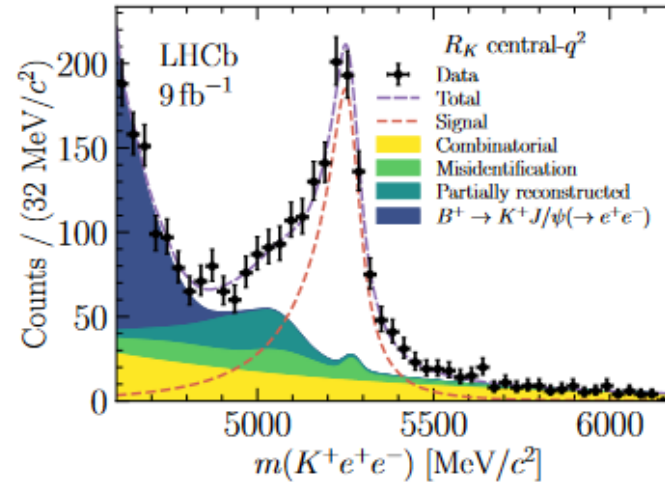
# Нейтральные токи ( $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ )

- Чувствительно к моделям НФ, в которых частица медиатор связаны с электронами и мюонами неуниверсальным образом
- В СМ  $R_H = 1$ , если пренебречь массами лептонов
- При этом КЭД поправки из-за отбора по  $q^2$  имеют %-й характер и хорошо контролируются.
- Аномалия =  $R_H < 1$
- Основная проблема – измерение в  $e^+e^-$  канале →

$$R_H [q_{\min}^2, q_{\max}^2] = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow H\mu^+\mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow He^+e^-)}{dq^2}}, \quad q^2 = m^2(\ell\ell)$$

$B$ :  $B^+, B^0, B_s^0, \Lambda_b^0$

$H$ :  $K^+, K^{*0}, pK, \phi \dots$

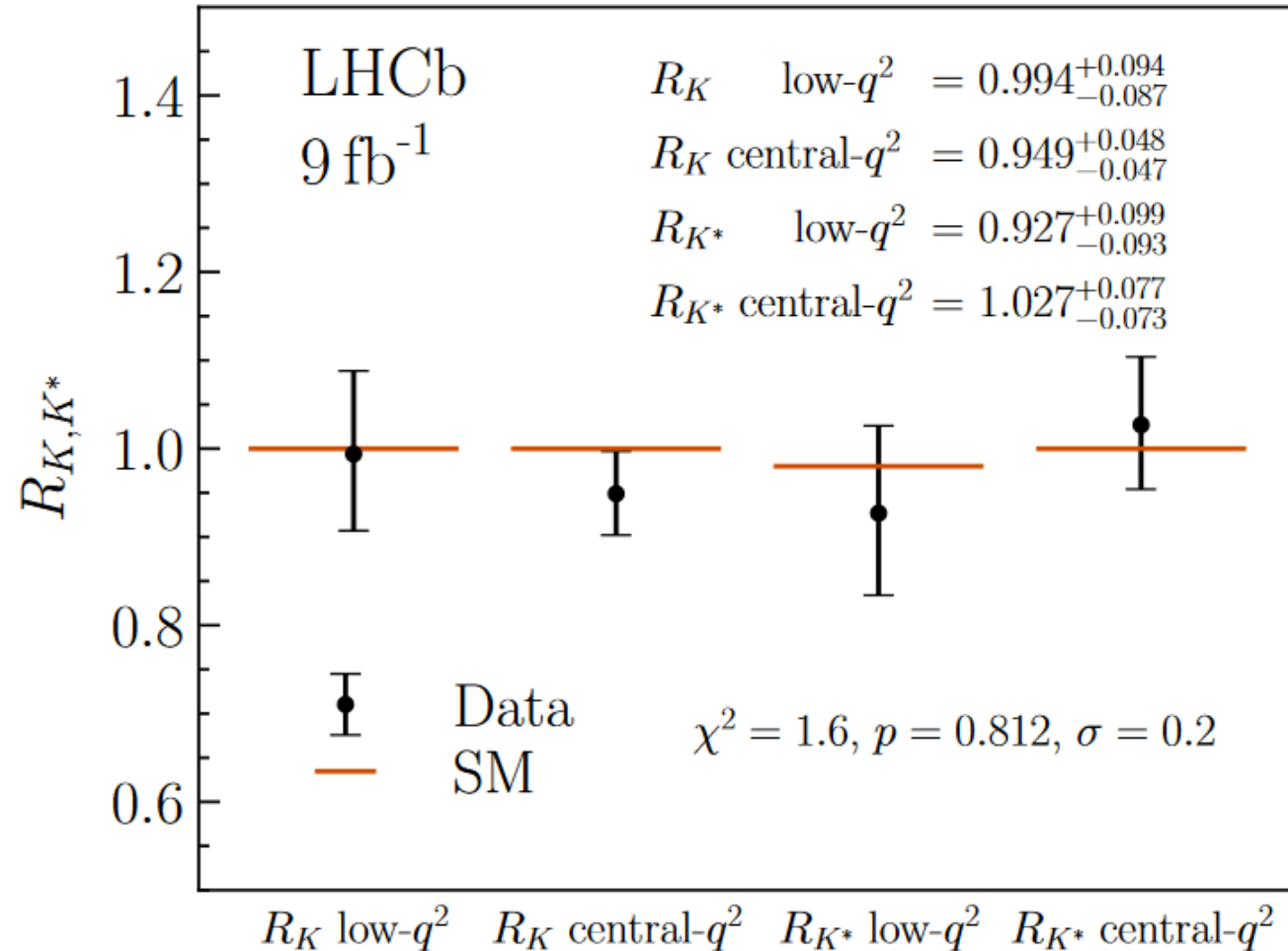


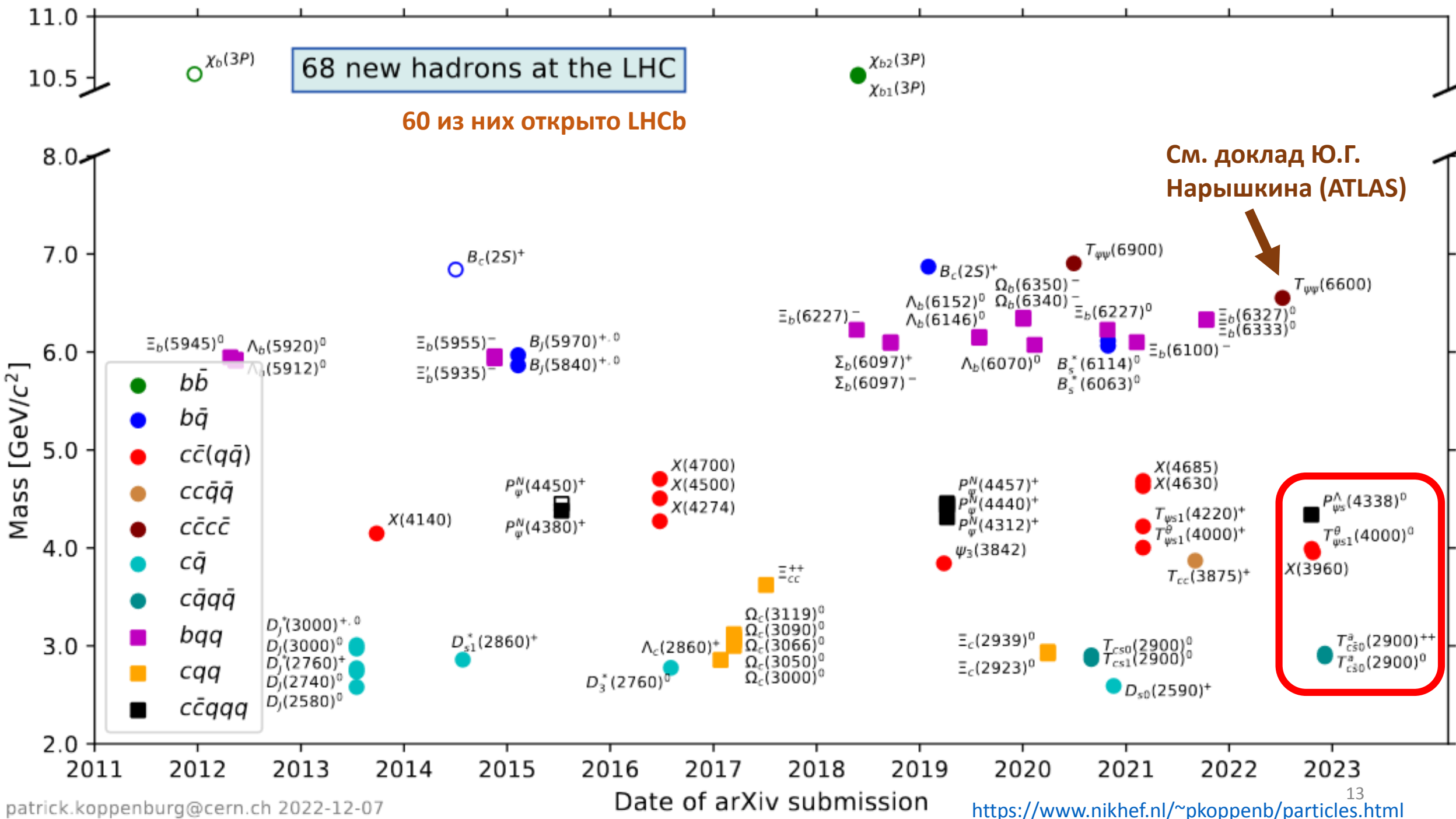
[arxiv:2212.09152](https://arxiv.org/abs/2212.09152)

[arxiv:2212.09153](https://arxiv.org/abs/2212.09153)

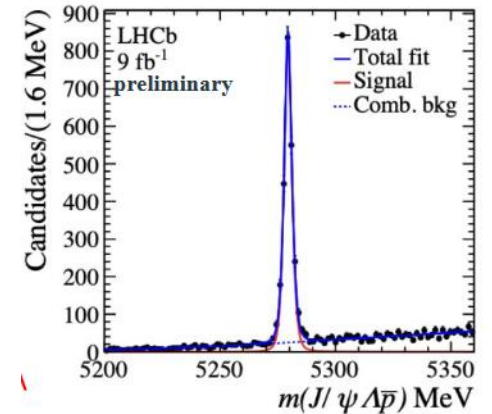
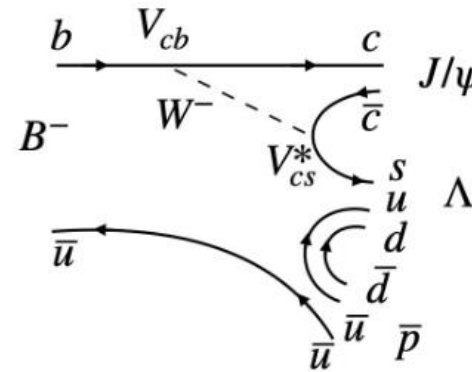
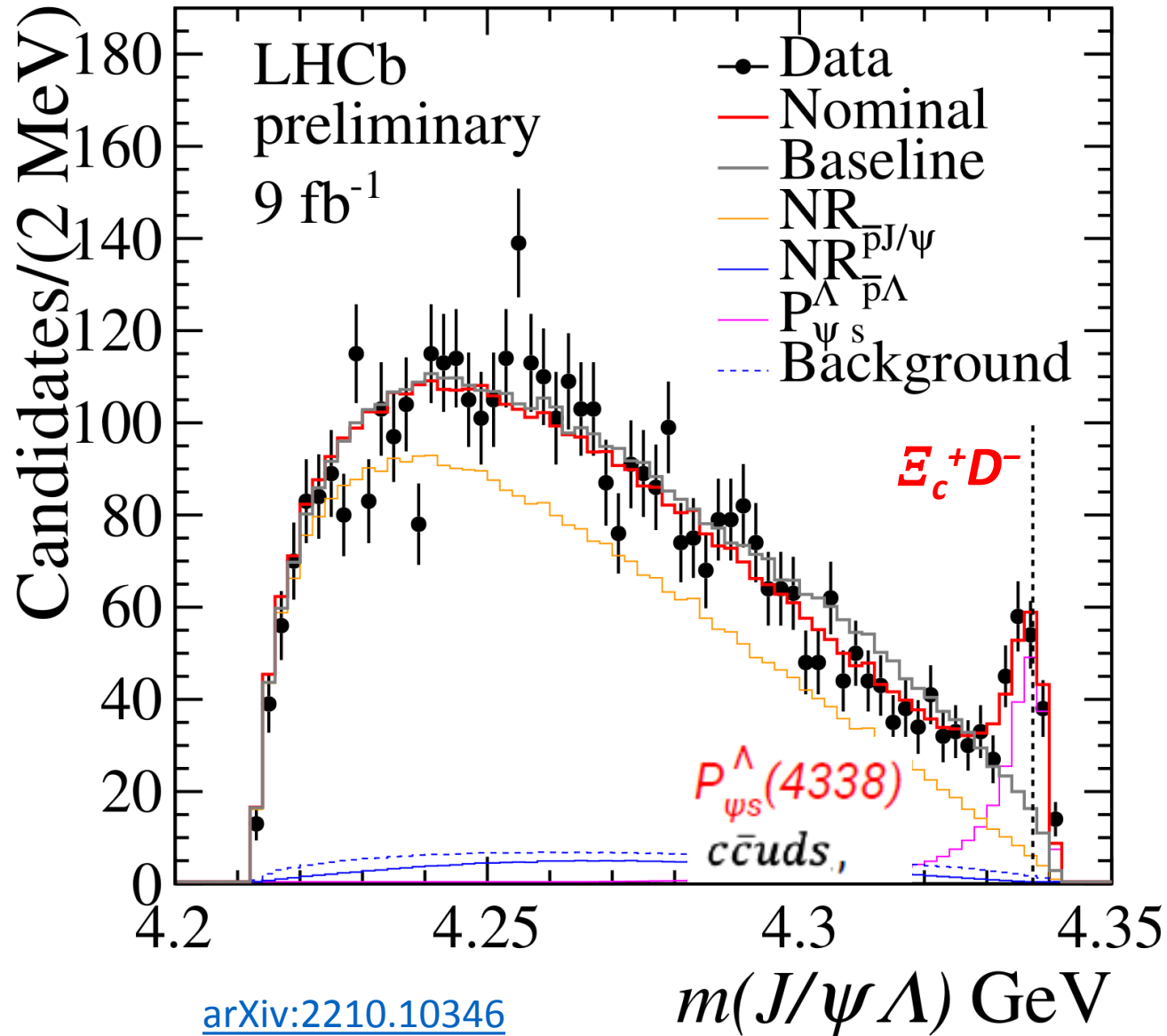
# Проверка принципа лептонной универсальности

- Декабрь 2022 – новые измерения величин  $R_K$  и  $R_{K^*}$
- Использован весь набор данных Run-1 и 2
- Полученные значения находятся в согласии с предсказаниями СМ
- [arxiv:2212.09152](https://arxiv.org/abs/2212.09152)
- [arxiv:2212.09153](https://arxiv.org/abs/2212.09153)
- Семинар ЛHC (20/12/2022): <https://indico.cern.ch/event/1187945/>





# Новое пентакварковое состояние $P_{\psi s}^{\Lambda} (4338)^0$

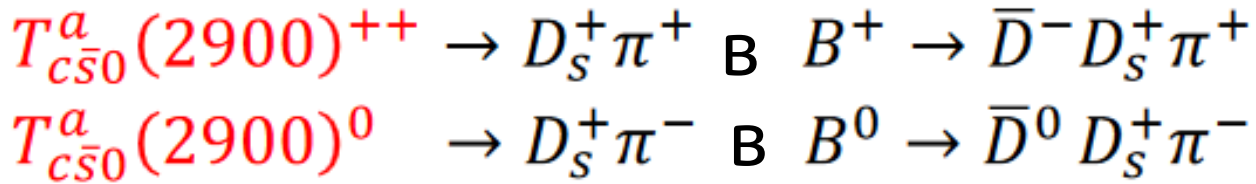


- 4600 событий-кандидатов
- Пик в распределении  $J/\psi\Lambda$
- Значимость  $>10\sigma$
- Нельзя объяснить  $K^{*2,3,4}$

$$M_{P_{cs}} = 4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{P_{cs}} = 7.0 \pm 1.2 \pm 1.3 \text{ MeV} \quad J^P = 1/2^-$$

# Новые тетракварки

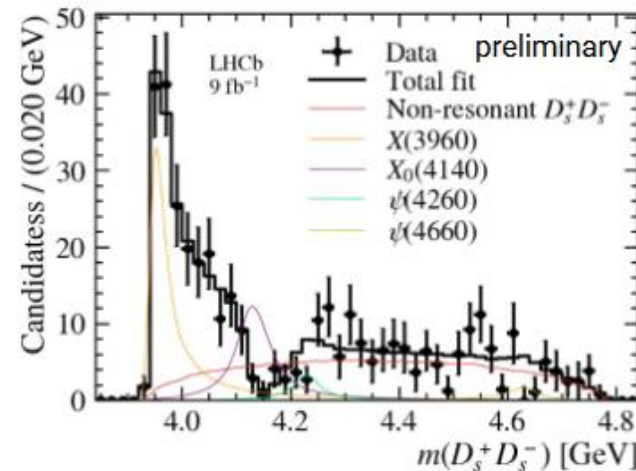
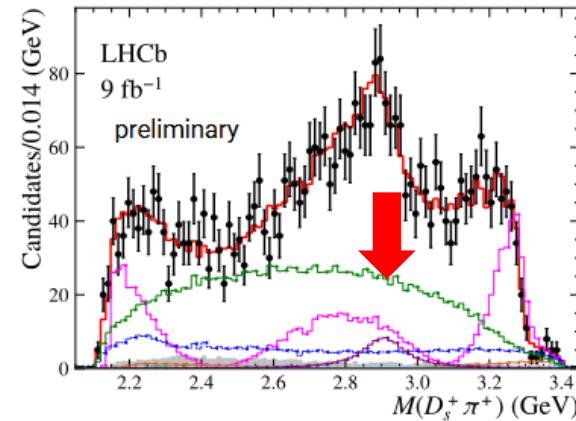
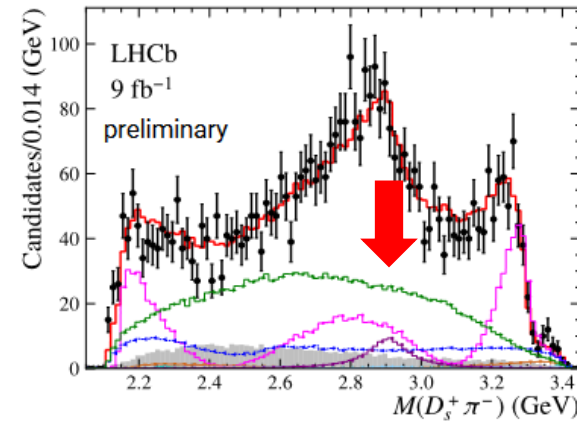
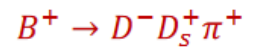
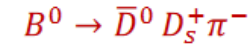


- Кварковый состав :  $[c\bar{s}u\bar{d}]$ ,  $[c\bar{s}u\bar{d}]$

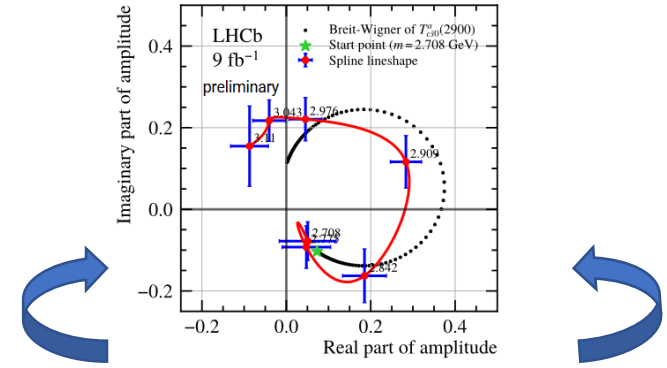


- Кварковый состав  $[c\bar{c}s\bar{s}]$  ?

LHCb-PAPER-2022-026  
LHCb-PAPER-2022-027



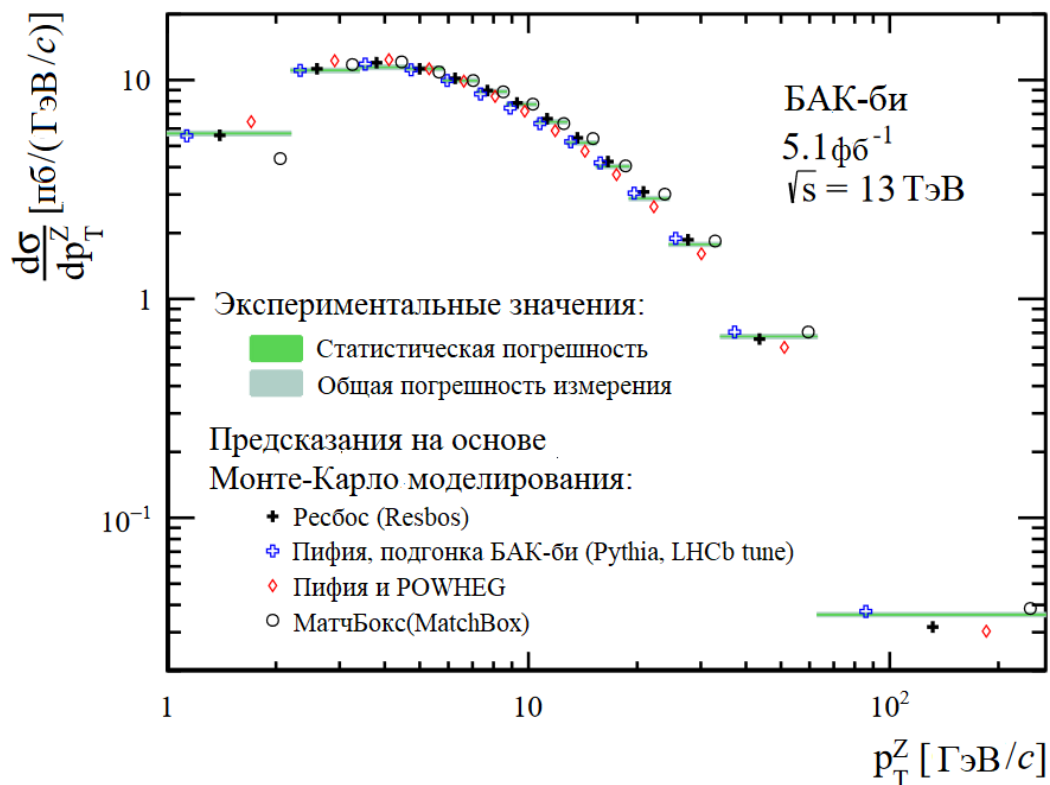
LHCb-PAPER-2022-018  
LHCb-PAPER-2022-019



# Измерение сечений рождения $Z$ бозона в $pp$ взаимодействиях при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ на LHCb

- В рамках КХД сечение рождения  $Z$  вычисляется в третьем порядке теории возмущений ( $N^3LO$ ).
- Измерение дифференциальных сечений рождения  $Z$  в кинематической области, доступной в эксперименте LHCb (БАК-би), позволит существенно уменьшить неопределенность партонных распределений для валентных кварков в области малых ( $x \sim 5 \times 10^{-5}$ ) и больших ( $x \sim 0,8$ ) долей импульса

796 000 событий-кандидатов.

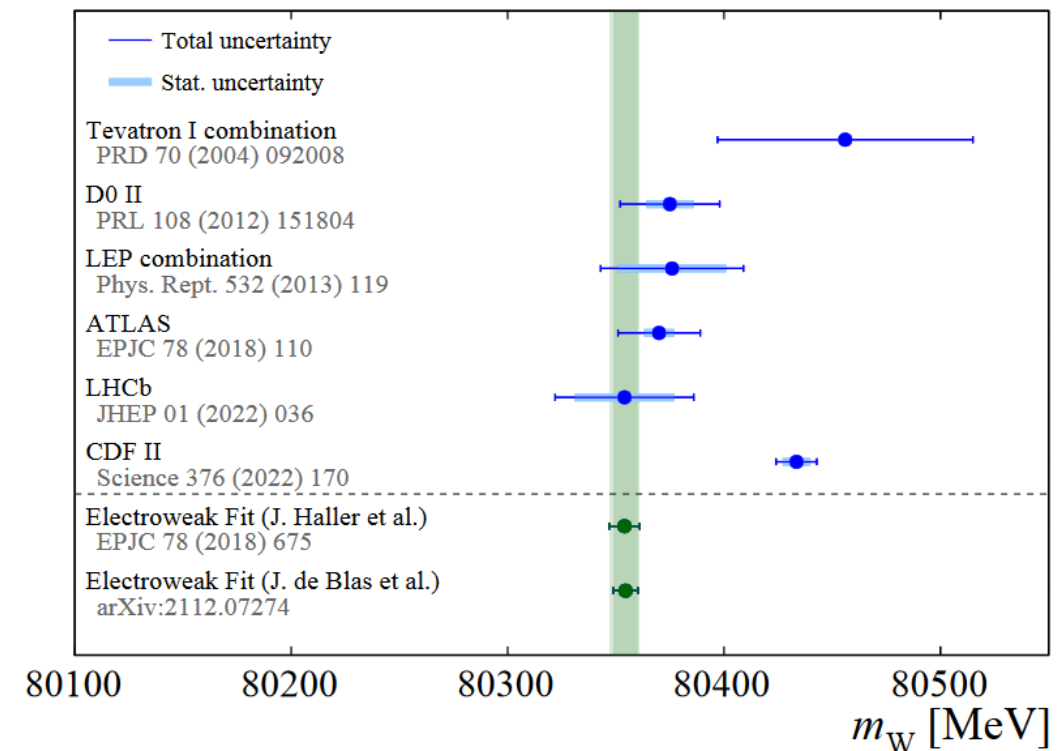
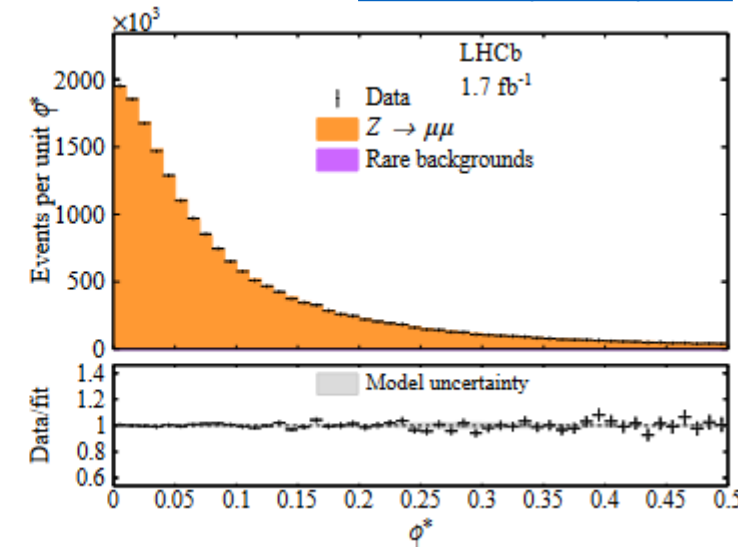
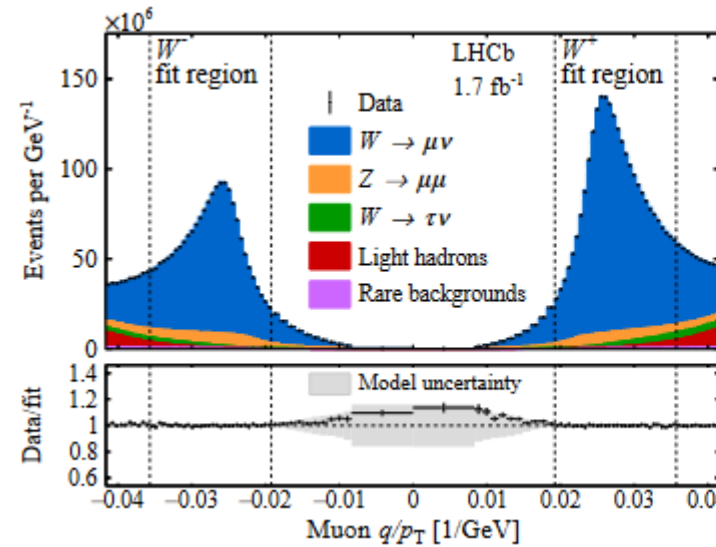


- Измерение дифференциальных характеристик рождения  $Z$  бозона производилось при помощи выделения событий распада  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  в наборе данных LHCb при  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ.
- Был проведен анализ угловых распределений и распределений поперечному импульсу
- Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями.
- Результаты работы опубликованы: **JHEP 07 (2022) 26**
- Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, обеспечивали бесперебойную работу Мюонной системы LHCb и принимавших активное участие в подготовке публикации



# Масса $W$ бозона

- Для калибровочных  $W^\pm$  и  $Z$  бозонов масса, возникающая при взаимодействии бозонных полей с полем Хиггса, – величина, которая может быть рассчитана, исходя из остальных параметров СМ
- Сравнение предсказаний СМ и прямых измерений
- Измерения базируются на описании  $p_T$ -распределения для мюонов из распада  $W$
- Контроль по параметрам мюонов из распадов  $Z$
- $m_W = 80354 \pm 23_{\text{stat}} \pm 10_{\text{exp}} \pm 17_{\text{theory}} \pm 9_{\text{PDF}} \text{ MeV}$
- Измерения CDF II (апрель 2022) отклонение измеренной массы  $W$ , от предсказаний СМ.
- Индивидуально каждое предыдущее измерение находится в согласии с результатами CDF, но общая картина явно свидетельствует о расхождении



# 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 продолжается производство новых многопроволочных пропорциональных камер высокой гранулярности для Мюонной системы детектора LHCb, рассчитанных на работу в условиях высокой загрузки.
- Группа ОФВЭ участвовал в работах по подготовке Мюонной системы детектора LHCb к следующему экспериментальному сеансу, а также по сопровождению этой детекторной системы:
  - Мюонная система детектора успешно введена в эксплуатацию
  - Новое программное обеспечение систем контроля детектора
- Основные результаты LHCb, представленные в 2022 году:
  - Проверка принципа лептонной универсальности в распадах прелестных адронов
  - Исследование  $CP$  нарушения в  $b$  и  $c$  секторах
  - Обнаружение новых экзотических адронов
  - Физика электрослабых взаимодействий



Запасные слайды

# Новые теоретические расчеты ( $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ )

Standard Model predictions for  $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ ,  
 $B \rightarrow K \ell_{-1} \ell_{+2}$  and  $B \rightarrow K \nu \nu^-$  using form factors  
 from  $N_f=2+1+1$  lattice QCD

[W. G. Parrott](#), [C. Bouchard](#), [C. T. H. Davies](#)

Channel	Result	$q^2/\text{GeV}^2$ range	$B \times 10^7$	Tension with HPQCD '22
$B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$	LHCb '21	(1.1, 6)	$1.401^{+0.074}_{-0.069} \pm 0.064$	$-3.3\sigma$ ( $-3.0\sigma$ )
$B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$	HPQCD '22	(1.1, 6)	$2.07 \pm 0.17(\pm 0.10)_{\text{QED}}$	-
$B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$	Belle '19	(1, 6)	$1.66^{+0.32}_{-0.29} \pm 0.04$	$-1.2\sigma$ ( $-1.2\sigma$ )
$B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$	HPQCD '22	(1, 6)	$2.11 \pm 0.18(\pm 0.11)_{\text{QED}}$	-
$B^0 \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$	LHCb '14A	(1.1, 6)	$0.92^{+0.17}_{-0.15} \pm 0.044$	$-3.6\sigma$ ( $-3.5\sigma$ )
$B^0 \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$	HPQCD '22	(1.1, 6)	$1.74 \pm 0.15(\pm 0.04)_{\text{QED}}$	-
$B^0 \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$	LHCb '14A	(15, 22)	$0.67^{+0.11}_{-0.11} \pm 0.035$	$-3.2\sigma$ ( $-3.1\sigma$ )
$B^0 \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$	HPQCD '22	(15, 22)	$1.16 \pm 0.10(\pm 0.02)_{\text{QED}}$	-
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	Belle '19	(1, 6)	$2.30^{+0.41}_{-0.38} \pm 0.05$	$+0.4\sigma$ ( $+0.4\sigma$ )
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	HPQCD '22	(1, 6)	$2.11 \pm 0.18(\pm 0.04)_{\text{QED}}$	-
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	LHCb '14A	(1.1, 6)	$1.186 \pm 0.034 \pm 0.059$	$-4.7\sigma$ ( $-4.6\sigma$ )
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	HPQCD '22	(1.1, 6)	$2.07 \pm 0.17(\pm 0.04)_{\text{QED}}$	-
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	LHCb '14A	(15, 22)	$0.847 \pm 0.028 \pm 0.042$	$-3.4\sigma$ ( $-3.3\sigma$ )
$B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$	HPQCD '22	(15, 22)	$1.26 \pm 0.11(\pm 0.03)_{\text{QED}}$	-



# ~~Latest~~ $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ combination

- **LHCb**, PRL 118 (2017) 191801

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0 \pm 0.6^{+0.3}_{-0.2}) \times 10^{-9} \quad 7.8\sigma$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.4 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

- **CMS**, JHEP 04 (2020) 188

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.9 \pm 0.7 \text{ (exp)} \pm 0.2 \text{ (frag)}) \times 10^{-9} \quad 5.6\sigma$$

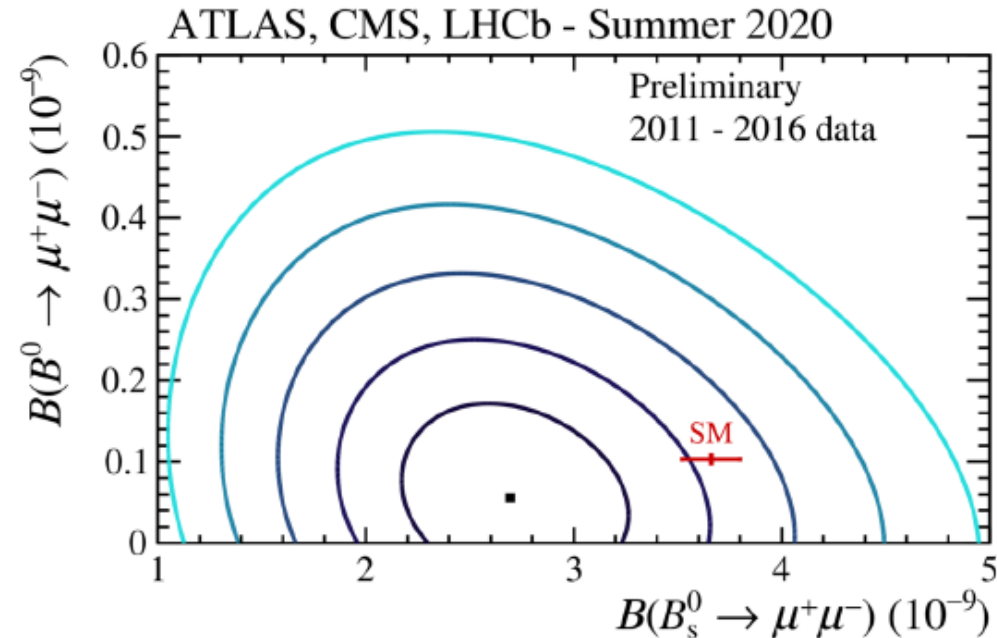
$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.6 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

- **ATLAS**, JHEP 04 (2019) 098

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.8^{+0.8}_{-0.7}) \times 10^{-9} \quad 4.6\sigma$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 2.1 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

LHCb-CONF-2020-002  
CMS PAS BPH-20-003  
ATLAS-CONF-2020-049



Era of precision measurements of  $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$  has started

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.69^{+0.37}_{-0.35}) \times 10^{-9}$$

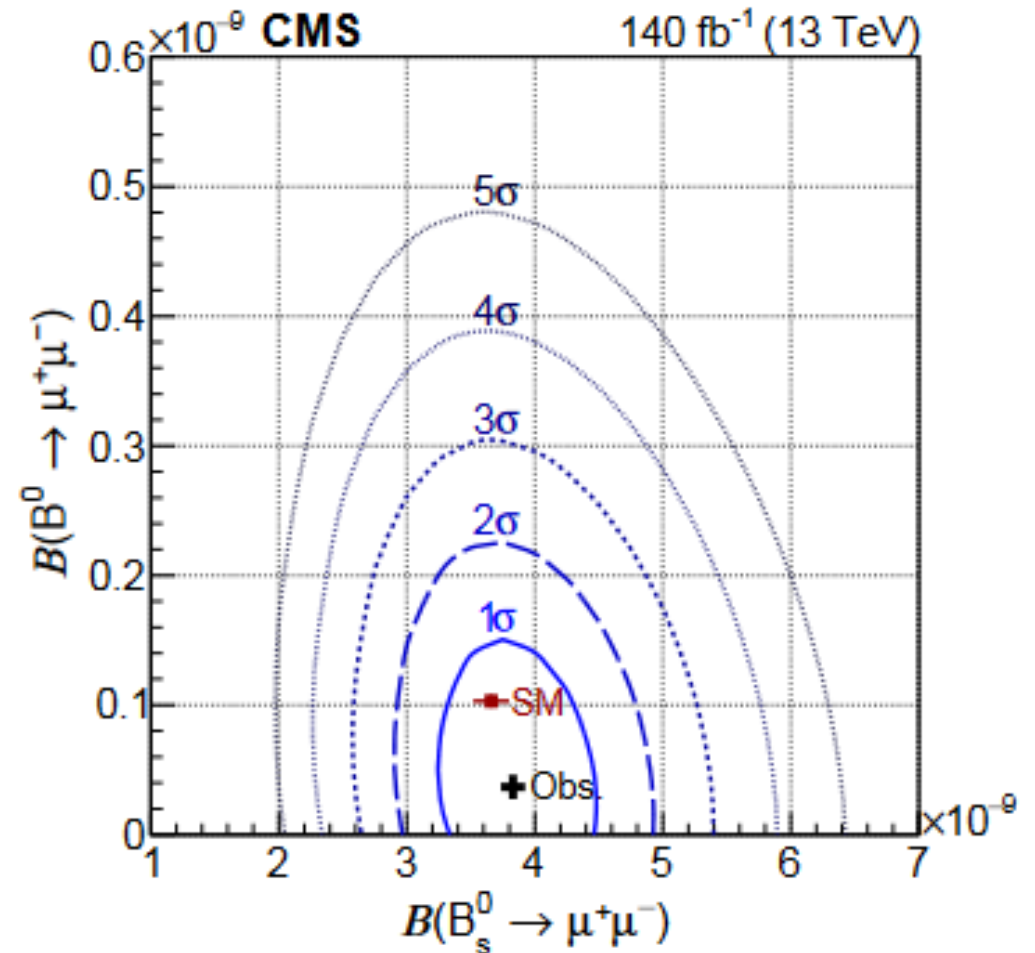
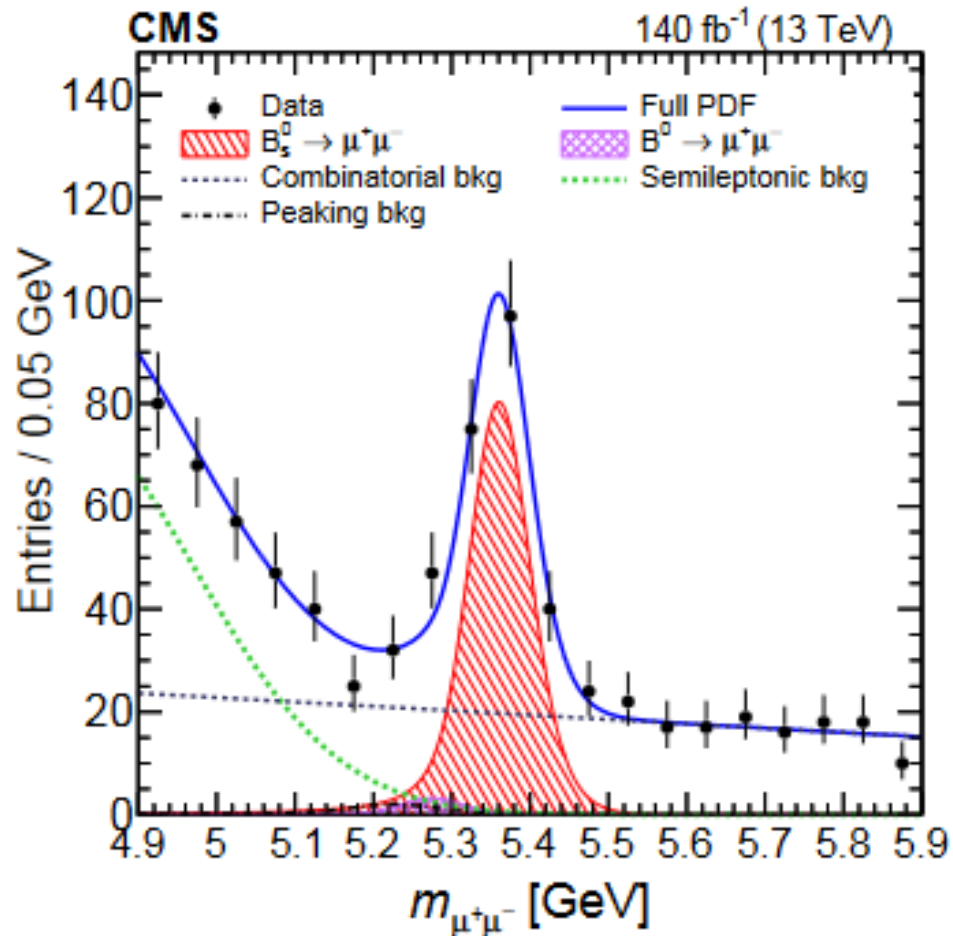
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.9 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

2.1  $\sigma$  below SM  
prediction (2D  
compatibility)

# Новый результат CMS

- Аномалии не наблюдается

<https://indico.cern.ch/event/1178959/>



<https://arxiv.org/abs/2212.10311>