

# Основные научные результаты ЛНСб на БАК

**Группа ПИЯФ:** Воробьев А. (руководитель), Алхазов Г., Бондарь Н., Дзюба А., Котряхова С., Маев О., Сагидова Н., Чубыкин А., Чуликов В.

Опубликовано в 2019 году: 42 работы

Ожидают публикации (направлены в печать): 15 работ

# 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

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

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

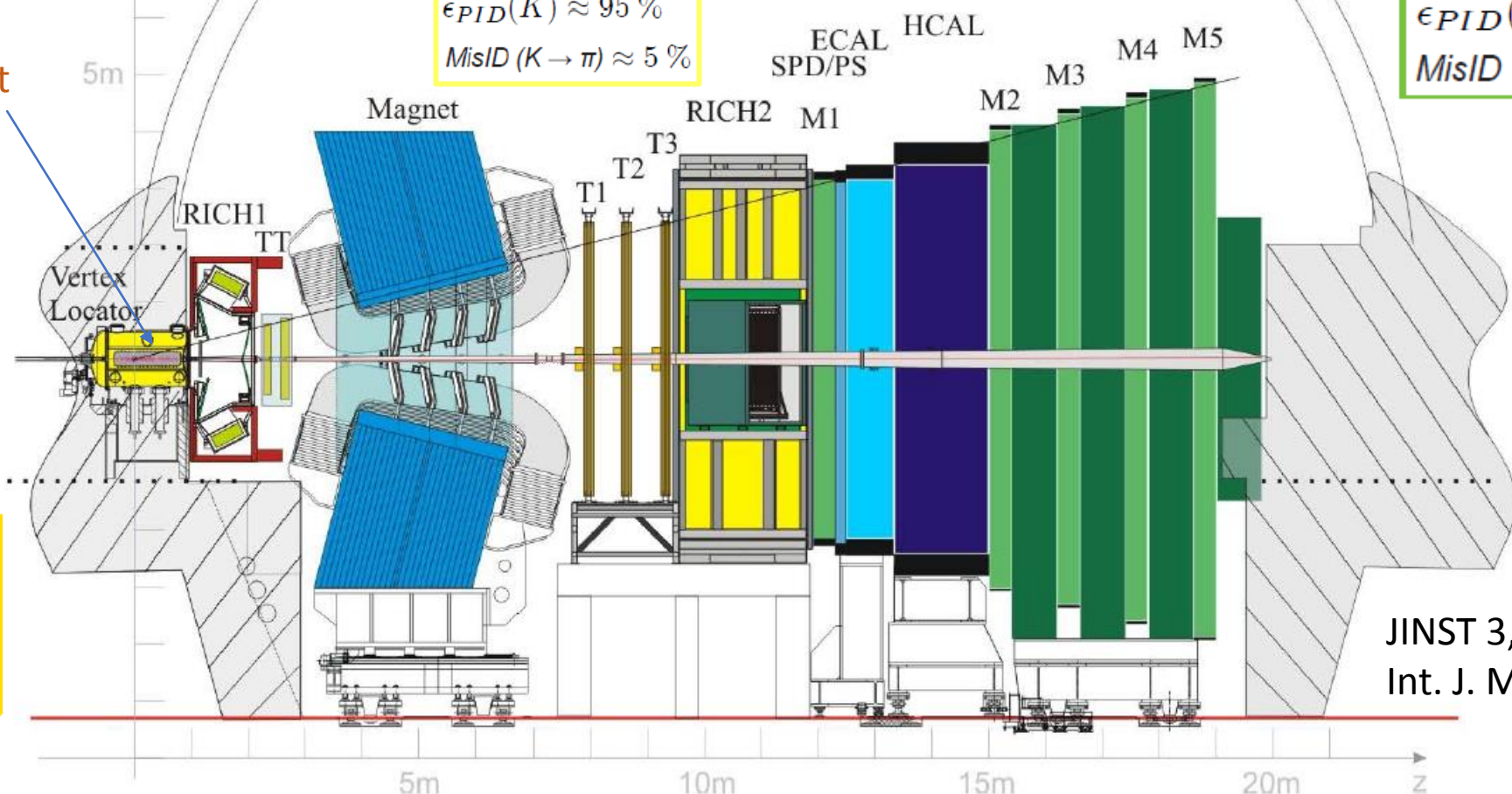
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

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

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

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

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



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

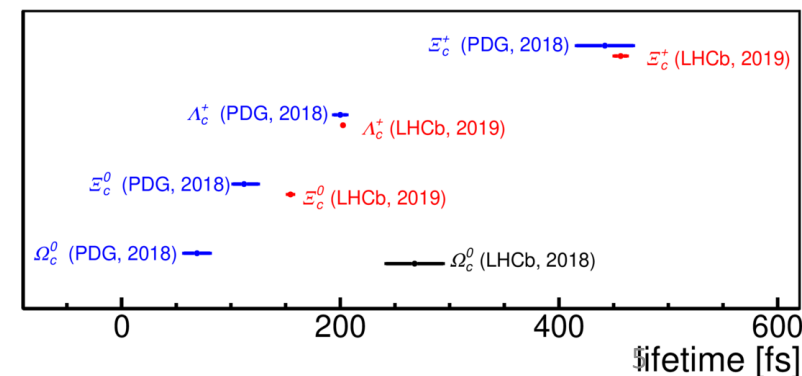
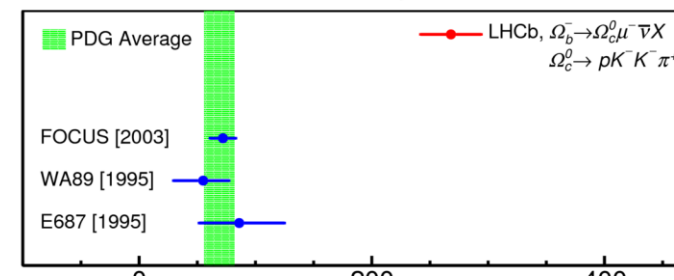
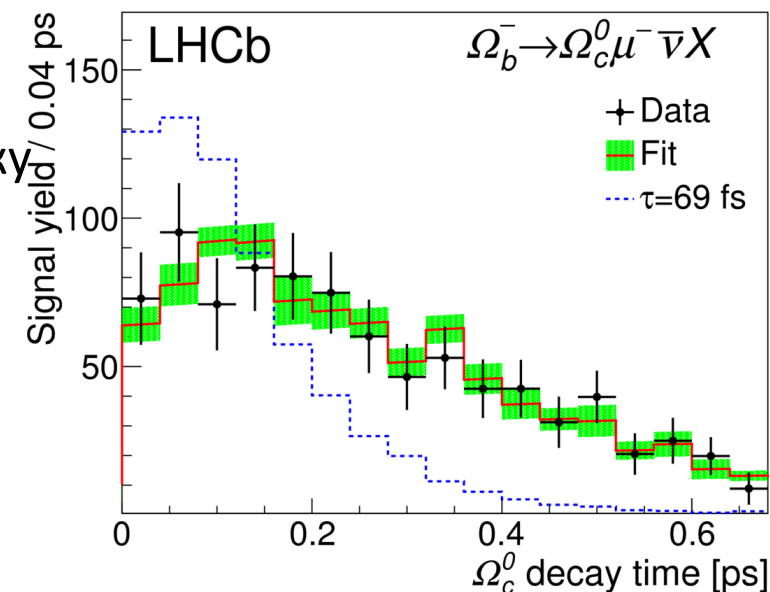
# Очарованные и дважды очарованные барионы

# Группа ПИЯФ-ЛНСб:

1. Изучение отношений сечений рождения очарованных барионов:  $\Lambda_c^+$ ,  $\Sigma_c^{++,0}$ ,  $\Lambda_c(2595)^+$ ,  $\Lambda_c(2625)^+$  во взаимодействии протонов высоких энергий
2. Изучение отношений сечений рождения:  $\Lambda_c^+$  и  $\Xi_c^+$  для энергий взаимодействия протонов 7, 8 и 13 ТэВ.
3. Изучение асимметрии рождения  $\Lambda_c^+$  барионов.
4. Изучение рождения возбужденных состояний  $\Xi_c(2645)^0$  и  $\Xi_c(2815)^+$ .

# Измерение времени жизни $\Omega_c$ бариона

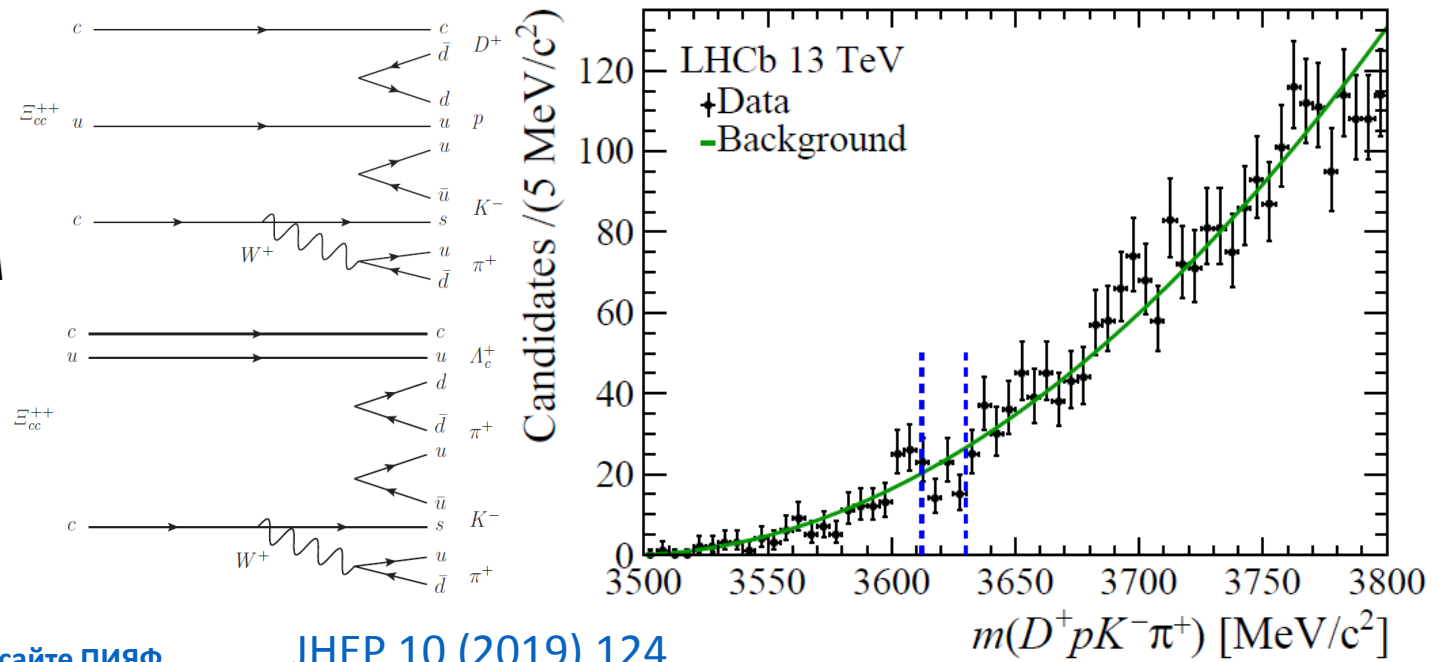
- В сеансах 2010-2018 гг. эксперимент LHCb накопил большую статистику распадов очарованных и прелестных барионов, позволяющую проводить точные измерения их свойств.
- Время жизни очарованного бариона  $\Omega_c$  было измерено с использованием полулептонных распадов прелестных барионов  $\Omega_b$   
**Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 092003**
- Измеренное время жизни  $268 \pm 24_{\text{стат}} \pm 10_{\text{сист}}$  фс оказалось примерно в четыре раза больше предыдущих измерений выполненных на ядерных мишенях с гораздо меньшей статистической обеспеченностью.
- Новое измерение LHCb заставляет пересмотреть иерархию времен жизни очарованных барионов и найти новую теоретическую интерпретацию для неё.
- Новая работа: [Phys. Rev. D100 \(2019\) 032001](#)



# Результаты: $\Xi_{cc}^{++,+}$

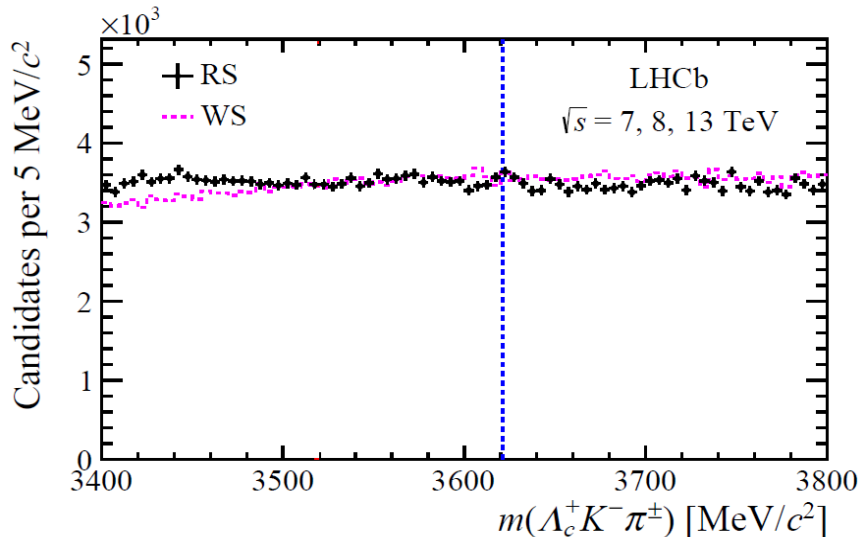
«Как барионный заряд передается на кварковом уровне?»

В новой работе LHCb, искаasz распад  $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow D^+ p K^- \pi^+$ , в котором барионный заряд передается от  $\Xi_{cc}^{++}$  протону, а  $c$  кварк входит в состав  $D^+$  мезона.



 [Заметка на сайте ПИЯФ](#)

[JHEP 10 \(2019\) 124](#)



- в 2019 году был выполнен поиск изотопического партнера  $\Xi_{cc}^{++}$  – бариона  $\Xi_{cc}^+$ , кварковый состав которого  $ccd$ .
- Теоретические расчеты предсказывают, что время жизни  $\Xi_{cc}^+$  намного меньше, чем время жизни её дважды-заряженного партнера, из чего следуют заведомо худшее фоновые условия для регистрации частицы.
- Дважды очарованный барион с единичным зарядом искали в канале распада  $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ .
- Сигнал от распада обнаружен не был

[Sci.China Phys.Mech.Astron. \(2020\) 63 221062](#)

 [Заметка на сайте ПИЯФ](#)

# Результаты: $\Xi_{cc}^{++}$

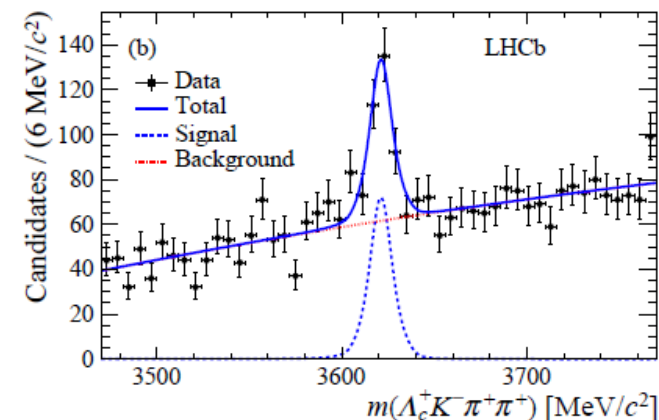
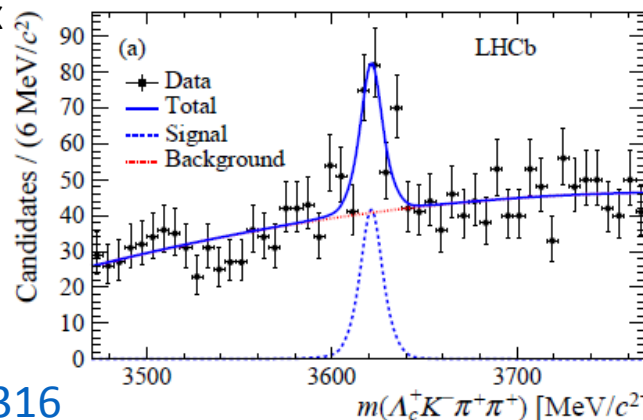
$$R \equiv \frac{\sigma(\Xi_{cc}^{++}) \times \mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+)}{\sigma(\Lambda_c^+)} = \frac{N_{\text{sig}} \varepsilon_{\text{norm}}}{N_{\text{norm}} \varepsilon_{\text{sig}}}$$

Trigger On Signal

Trigger Independent of Signal

$R$  была впервые измерена для диапазона поперечных импульсов бариона от 4 до 16 ГэВ/с и диапазона быстрот [2.0, 4.5]

Отношение сечений рождения  $\Xi_{cc}^{++}$  к сечению рождения  $\Lambda_c^+$  бариона составило  $(2.22 \pm 0.27 \pm 0.29) \times 10^{-4}$



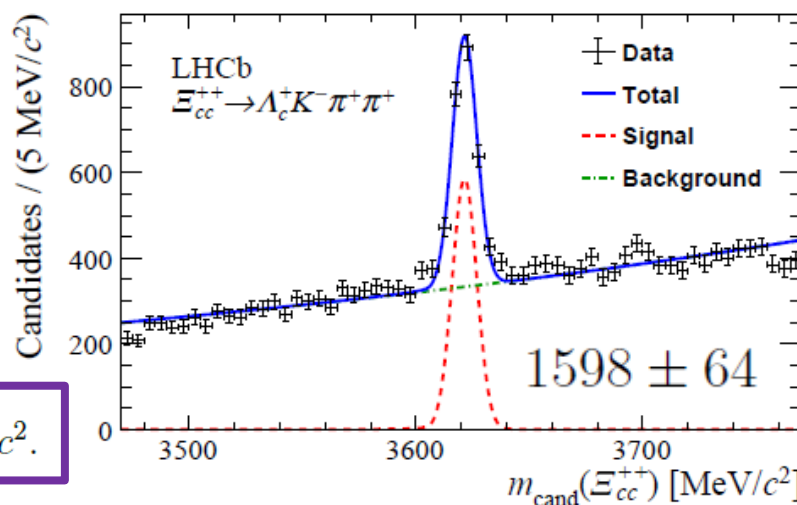
Заметка на сайте ПИЯФ

[arXiv:1910.11316](https://arxiv.org/abs/1910.11316)

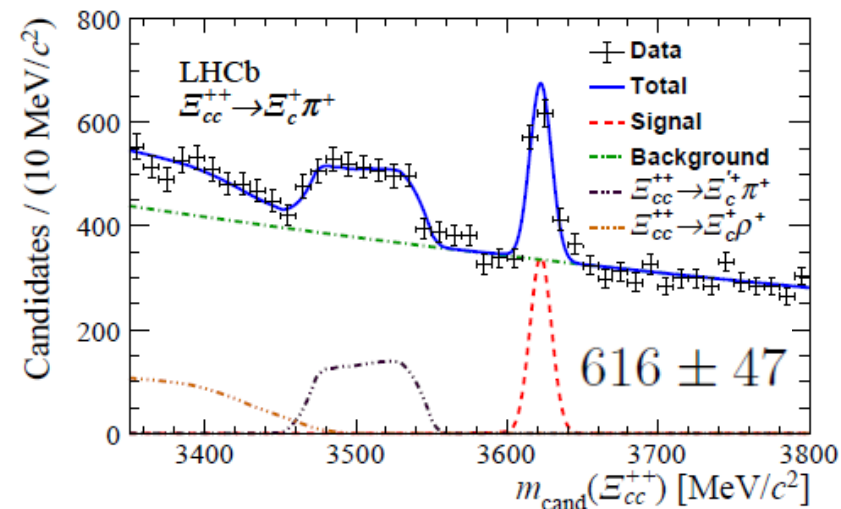
Вся статистика Run-II

Новые (частично восстановленные) каналы распада

Измерение массы



$3621.55 \pm 0.23 \text{ (stat)} \pm 0.30 \text{ (syst)} \text{ MeV}/c^2$



[arXiv:1911.08594](https://arxiv.org/abs/1911.08594)



Заметка на сайте ПИЯФ

# Смешивание и $CP$ нарушение для $D^0$ мезонов



# Наблюдение $CP$ нарушения в распадах очарованных адронов

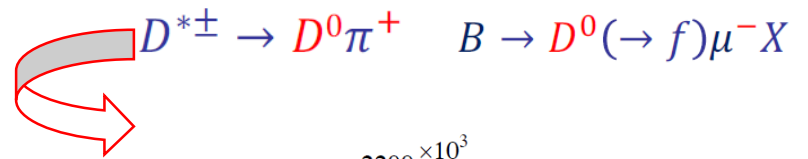
- Стандартная Модель предсказывает малость эффекта нарушения  $CP$  четности для  $c$ -кварков. LHCb достиг чувствительности на уровне СМ
- Измерялась разница  $CP$  асимметрий для  $CP$ -четных распадов  $D^0$  мезона, что позволило существенно уменьшить систематику, связанную с асимметрией их рождения в  $pp$  взаимодействиях, и асимметрией детектирования частицы-таггера.

$CP$  асимметрия:

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

где  $f = \pi^- \pi^+, K^- K^+$

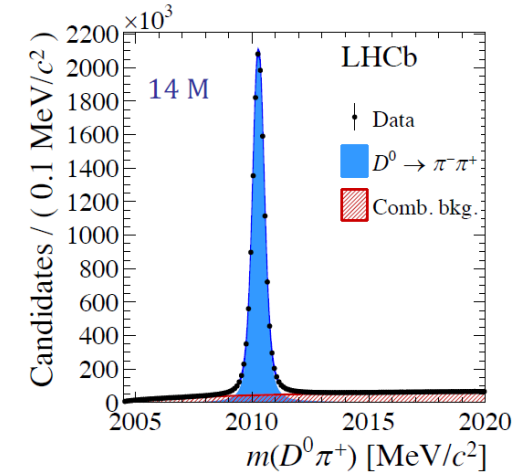
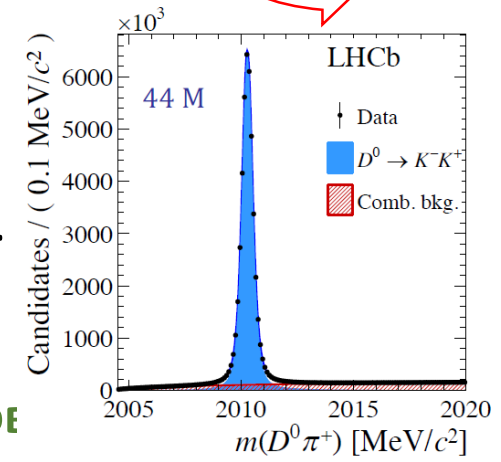
Таггинг:



$\Delta A_{CP} \neq 0 \rightarrow$  Нарушение  $CP$

$$\Delta A_{CP} \equiv A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi) = A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi)$$

- Аромат начального состояния измеряется при помощи процедуры *таггинга*: заряд пиона / мюона аромат  $D$  мезона.
- Стат. значимость отклонения от нуля  $5,3\sigma \rightarrow$  **Первое наблюдение  $CP$  нарушения в распадах очарованных адронов**
- Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 211803



Результат Run 1 + Run 2 :

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$$

Наблюдаемая чувствительна к прямому нарушению  $CP$  четности

# «Непрямое» $CP$ нарушение ( $A_{\Gamma}$ )

[arXiv:1911.01114](https://arxiv.org/abs/1911.01114)

Измерение  $CP$  нарушения, возникающего при смешивании  $D^0$  и анти- $D^0$  мезонов, а также в интерференции процессов распада и смешивания.

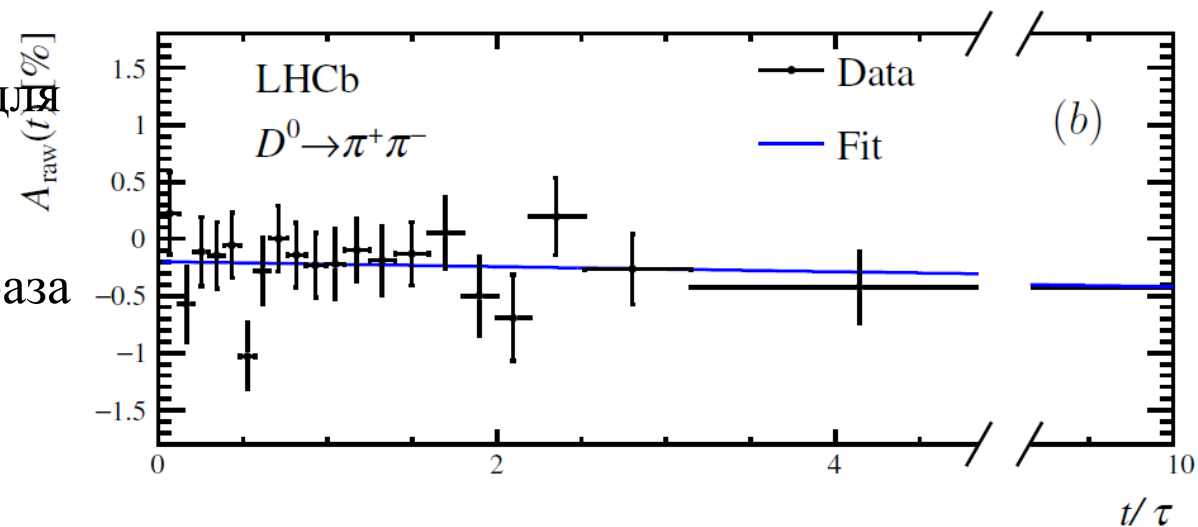
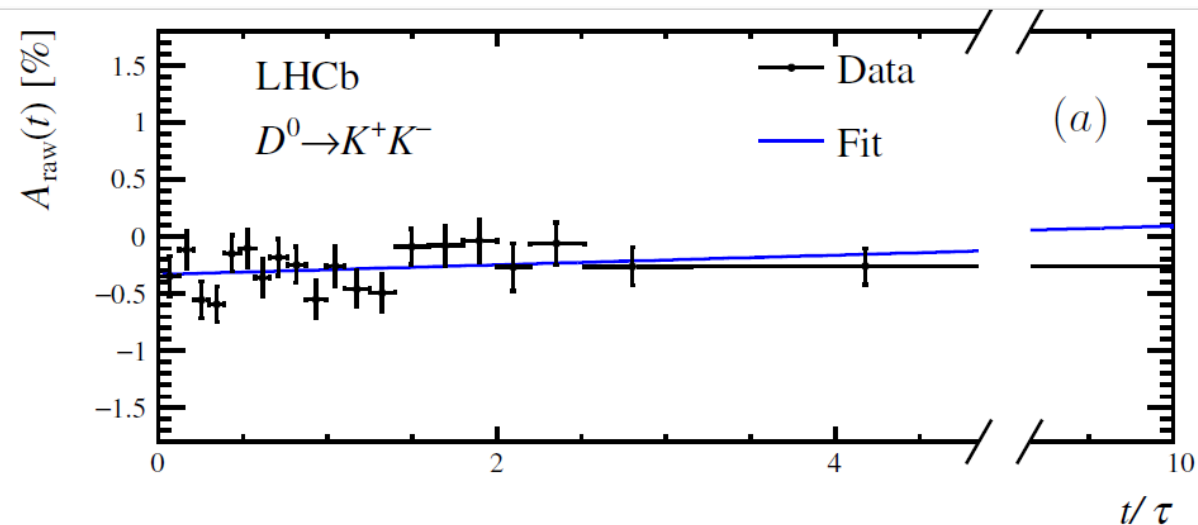
$CP$ -четные распады:  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  или  $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$

Наклон асимметрии распадов обозначают  $A_{\Gamma}$ .

$A_{\Gamma}$  чувствительна к эффектам непрямого  $CP$  нарушения.

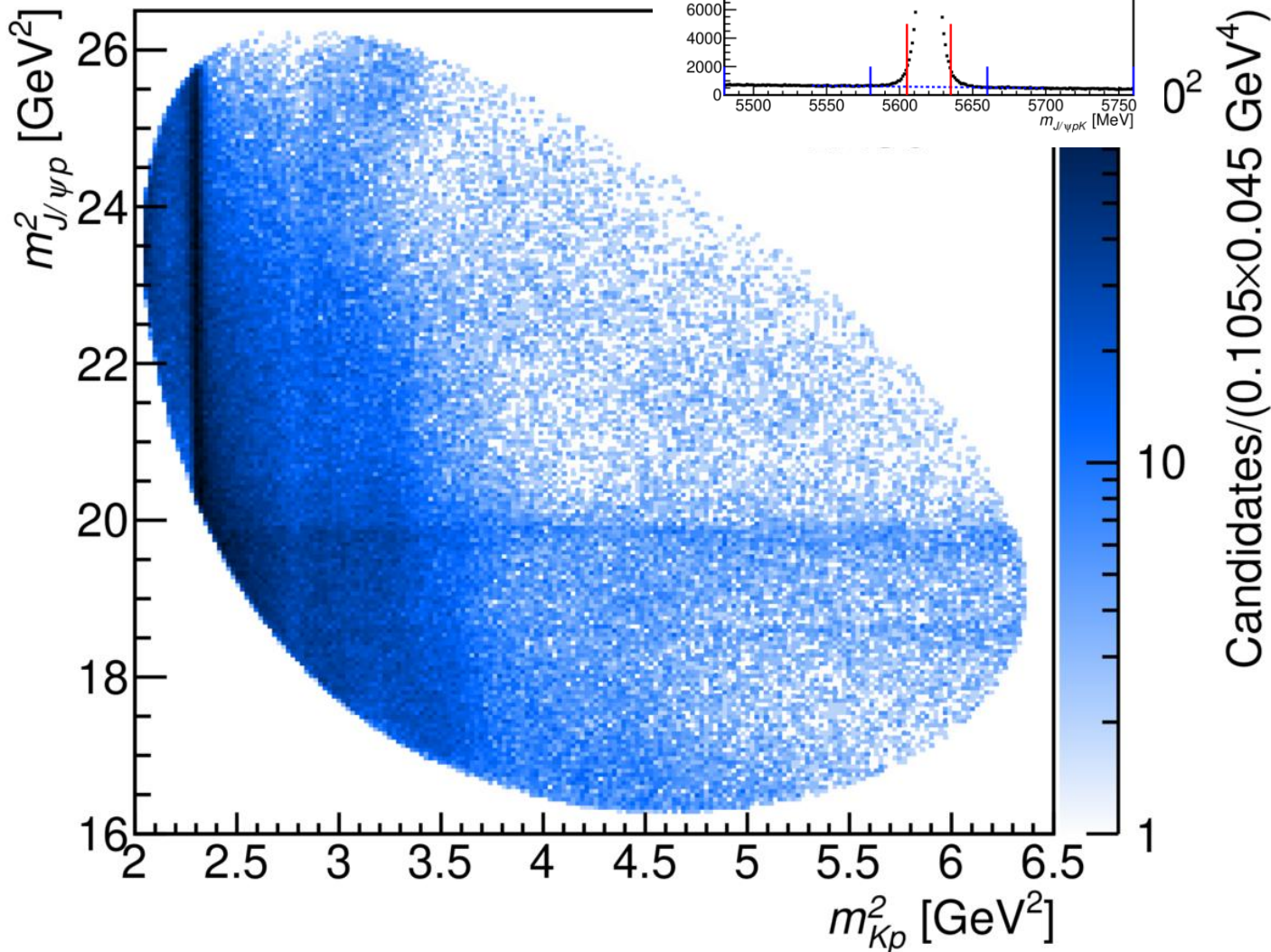
По результатам новой работы LHCb мировое среднее для  $A_{\Gamma}$  составляет  $(-2.9 \pm 2.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$ .

Статистическая погрешность измерения почти, в три раза превосходит систематическую, что внушает определенный оптимизм относительно перспектив дальнейших исследований.



# Тяжелые пентакварки + новые частицы

# Данные Run-2

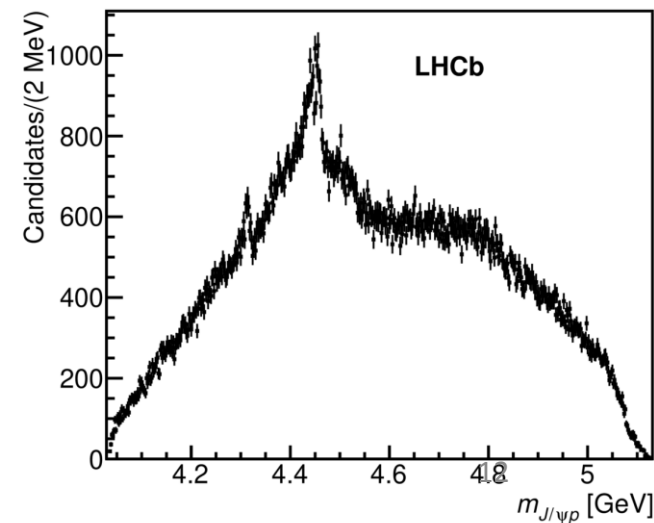


**Статистика в Run-2 увеличена в 9 раз (относительно Run-1):**

Улучшение отбора данных (x2),  
интегральная светимость (x3) и  
увеличившееся сечение (x1.5)

**246к  $\Lambda_b$  сигнал \ 6.4% фон**

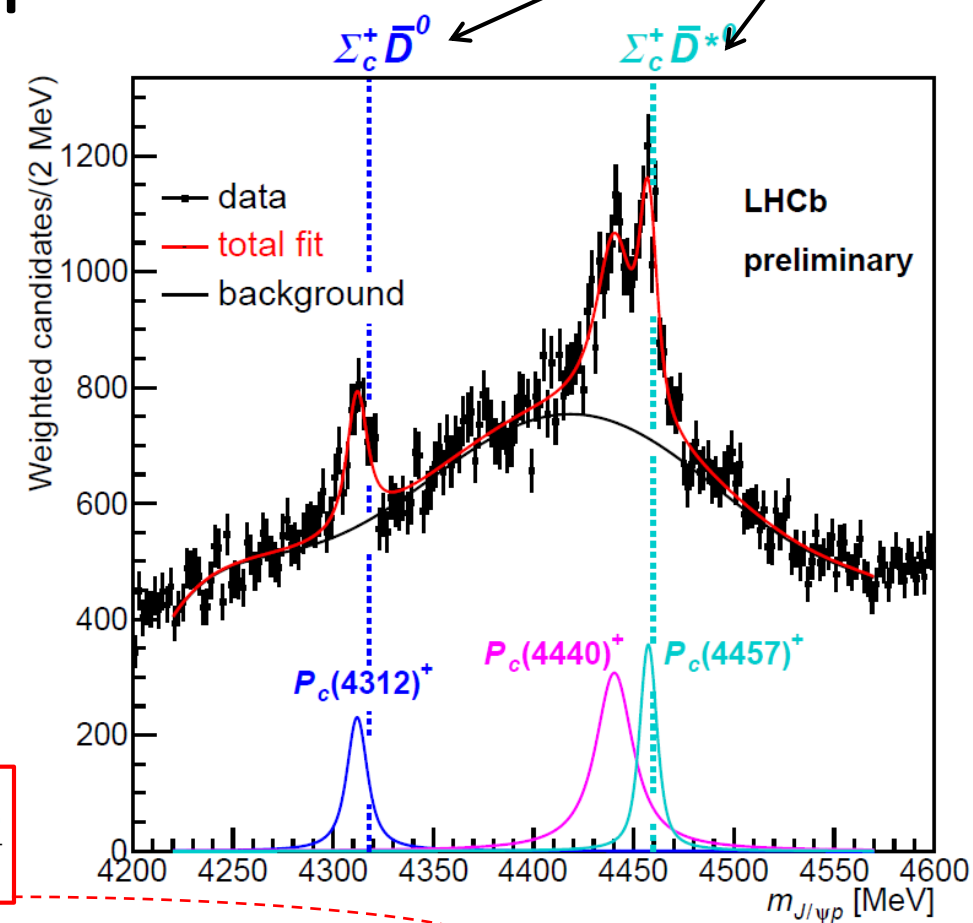
Разрешение по массе  $J/\psi p$  2.3-  
2.7 MeV (RMS) для диапазона 4.3-  
4.6 GeV



# Обнаружение узких пентакварковых резонансов

Пороги открытия сопряженных каналов распада

- На данных Run-I эксперимент LHCb установил существование промежуточных пентакварковых резонансов в системе  $p\text{-}J/\psi$  для распадов типа  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  (*Phys. Rev. Lett.* **115**, 072001).
- Используя данные Run-2, удалось выделить **три новых узких пентакварковых резонанса**:  $P_c(4312)^+$ ,  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$  проявляющихся на пороге открытия сопряженных каналов распада на барион-мезонную пару с открытым очарованием.
- Для открытых состояний были измерены массы, ширины и соотношение вероятностей распада ( $\mathcal{R}$ ).



*Phys. Rev. Lett.* **122** (2019) 222001

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-) \mathcal{B}(P_c^+ \rightarrow J/\psi p)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)}$$

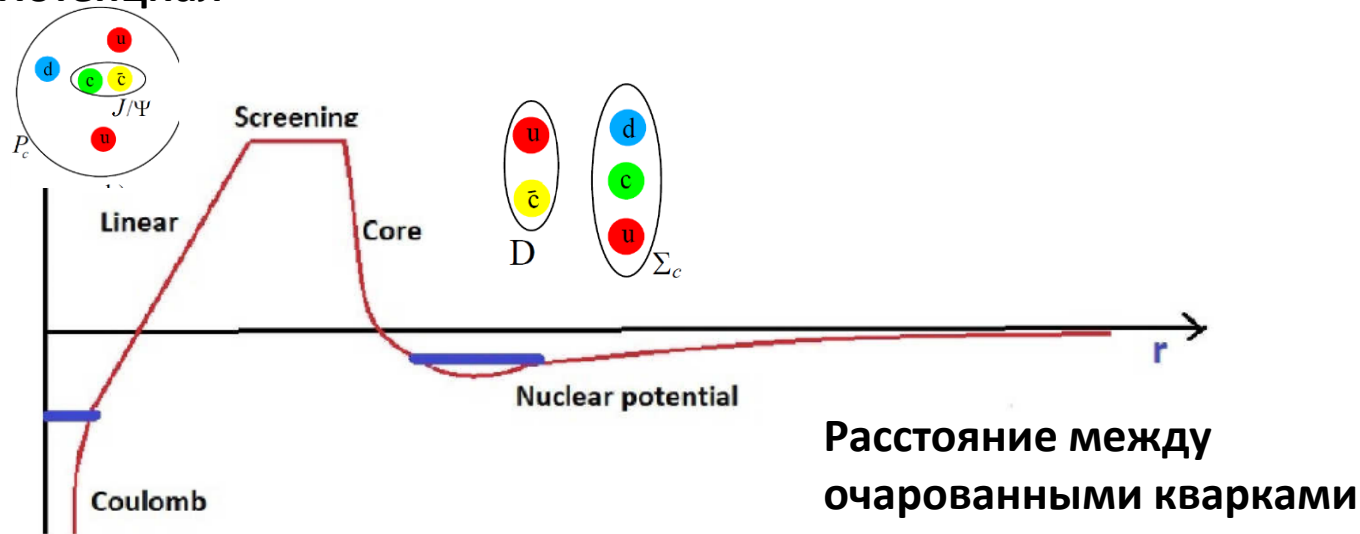
- Две конкурирующие модели для объяснения  $P_c$ : **компактный адрочармоний** и **адронная молекула** (см. [материалы объединенного семинара ОФВЭ и ОТФ от 30.05.2019](#))

State	$M$ [MeV]	$\Gamma$ [MeV]	(95% CL)	$\mathcal{R}$ [%]
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$	(< 27)	$0.30 \pm 0.07^{+0.34}_{-0.09}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$	(< 49)	$1.11 \pm 0.33^{+0.22}_{-0.10}$
$P_c(4457)^+$	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$	(< 20)	$0.53 \pm 0.16^{+0.15}_{-0.13}$

# Как интерпретировать пентакварки?

## Born-Oppenheimer approximation

Потенциал



**Молекулярная модель (трудности):**

если предположить, что за формирование структуры в районе масс 4450 МэВ несет ответственность за обмен  $\pi$ -мезонами, то очень сложно объяснить ее расщепление на  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ .

В системе  $\Sigma_c^+$  анти- $D^0$  однопионный обмен невозможен и для описания нужно привлекать более тяжелые частицы –  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\sigma$ , что приводит к энергиям связи порядка 50 МэВ и характерным размерам  $P_c(4312)^+$  порядка 1 Фм, что уже не похоже на слабосвязанное молекулярное состояние.

Однако, кластерная модель также встречается с некоторыми трудностями. Так, очень сложно объяснить различные ширины распадов  $P_c(4312)^+$ ,  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$ .

«Оба сценария объясняют новые данные LHCb с трудом, но молекулярный хуже»

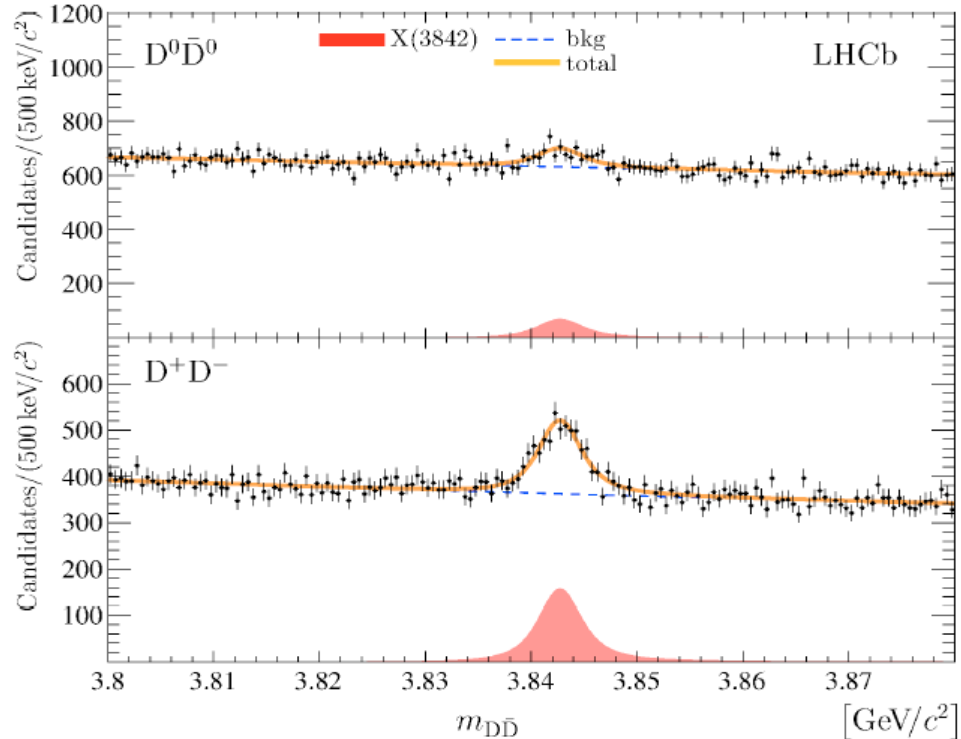
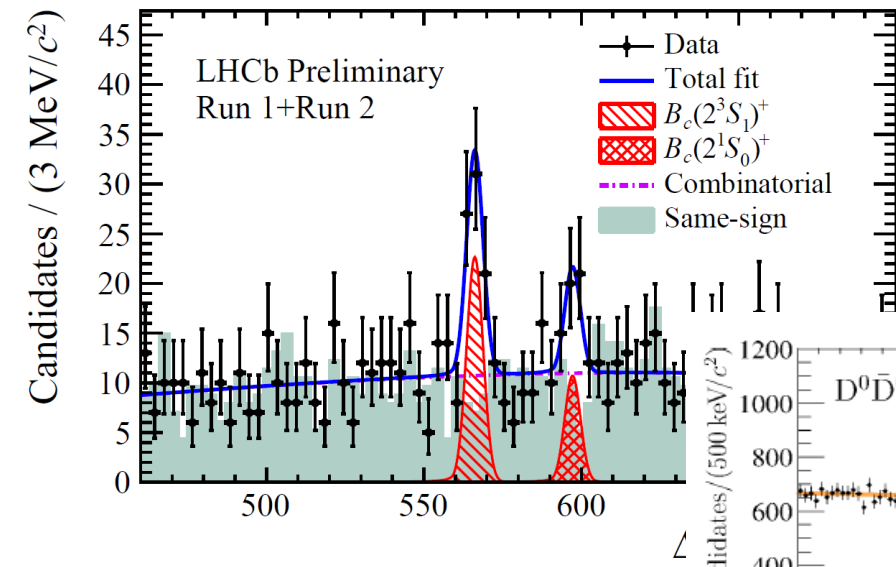


# Новые частицы: $B_c$ , чармоний и прелестные барионы

## Подтверждение результатов CMS

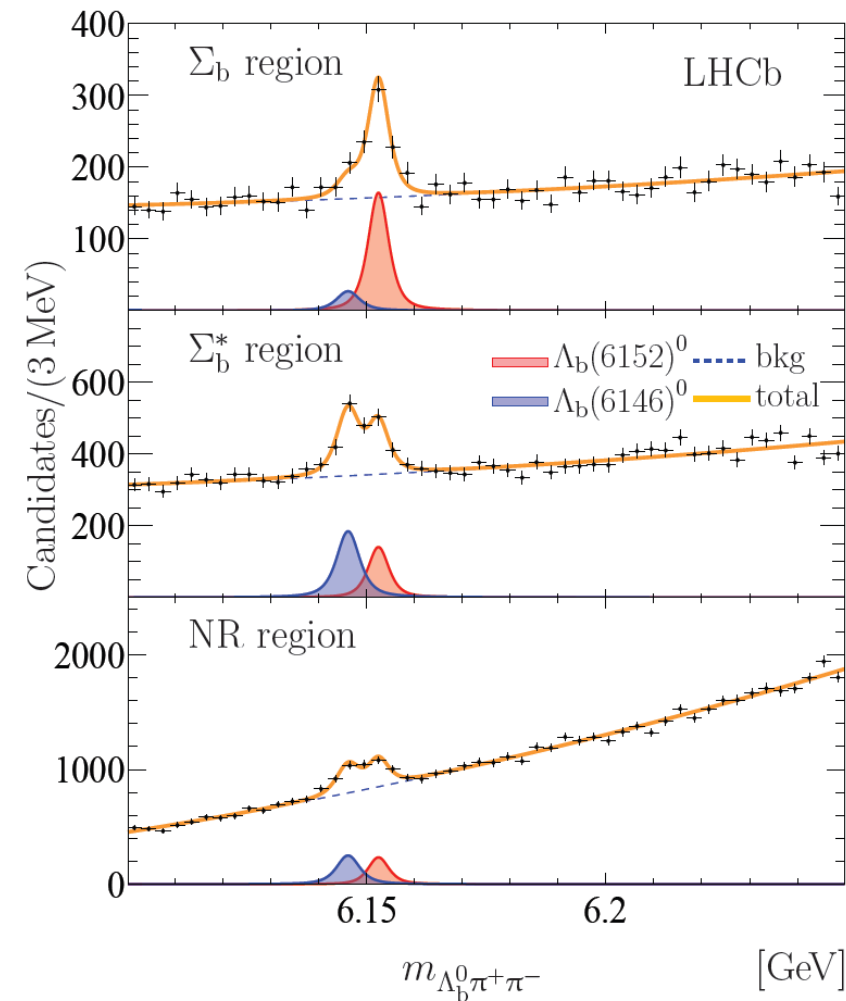
### Чармониевое состояние со спином-3 $X(3842)$

[JHEP 07 \(2019\) 035](#)



[Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 232001](#)

## Новые $\Lambda_b$ барионы



[Phys. Rev. Lett. 122\(2019\) 012001](#)

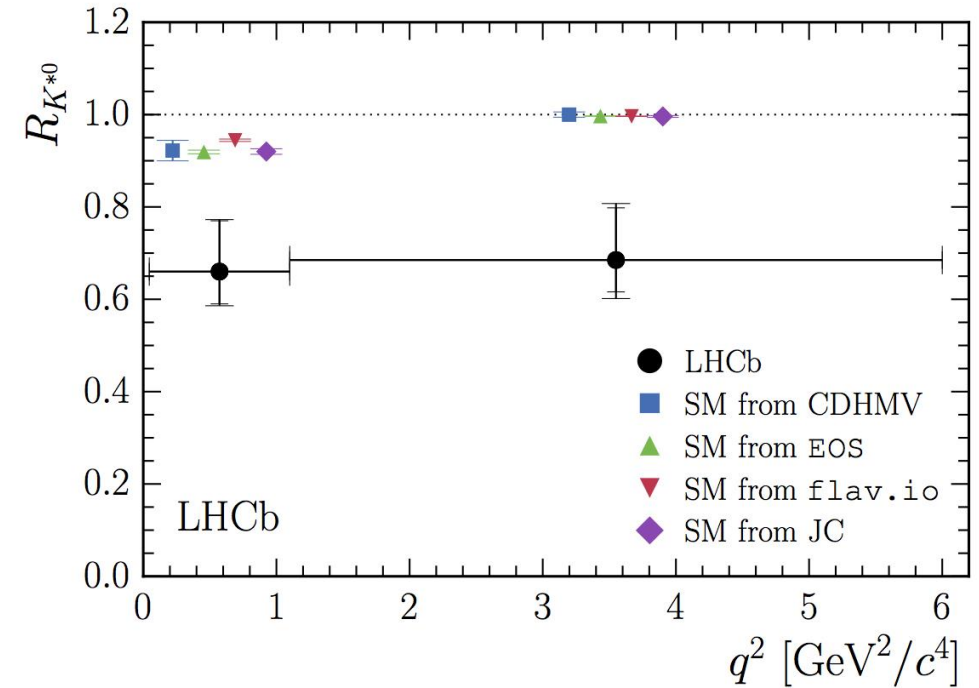
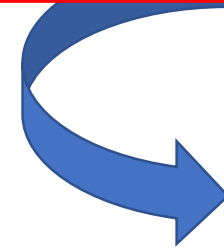
# Проверка лептонной универсальности СМ



# Поиск нарушения лептонной универсальности в распадах $b$ -адронов



$$R_H = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma[B \rightarrow H\mu^+\mu^-]}{dq^2} dq^2}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma[B \rightarrow He^+e^-]}{dq^2} dq^2}$$

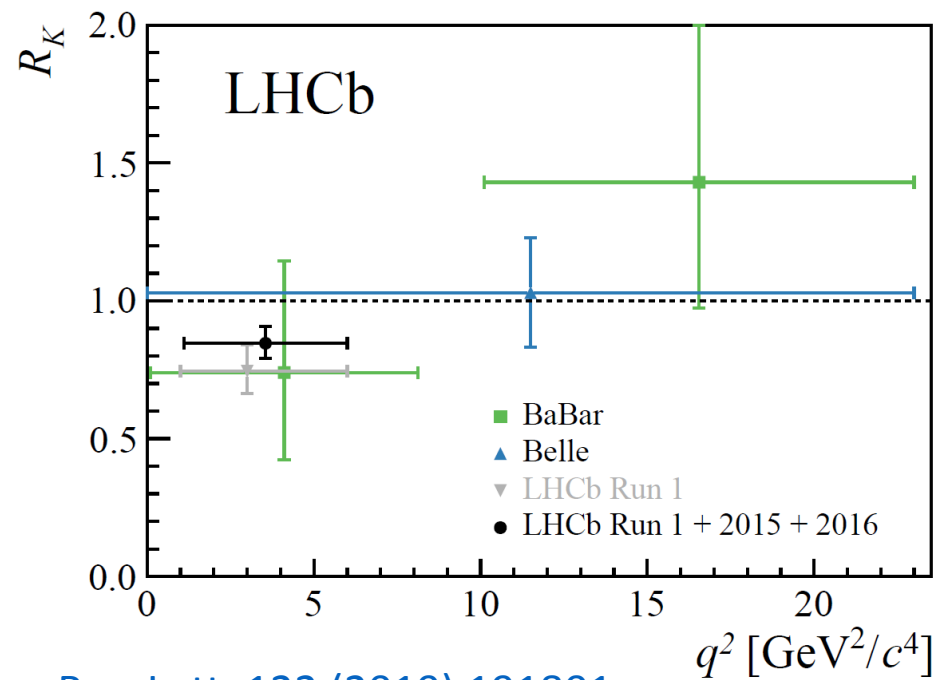


# Проверка ЛУ. Измерение $R_{K^+}$

Сигнал выделяется для диапазона  $1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2$ .

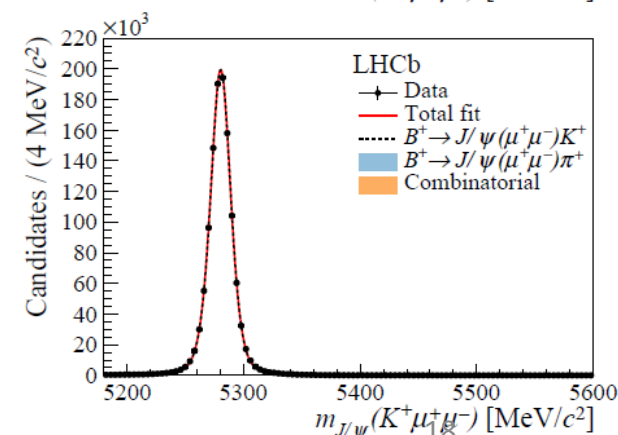
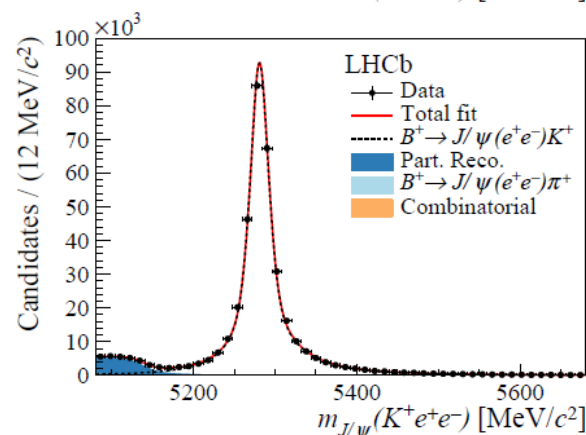
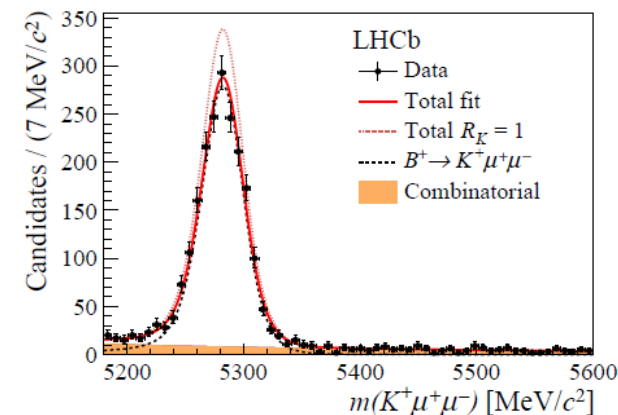
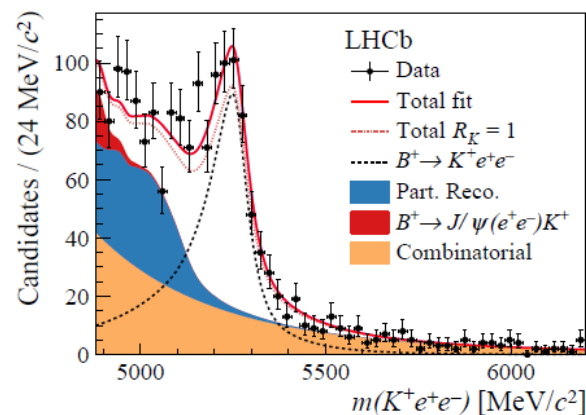
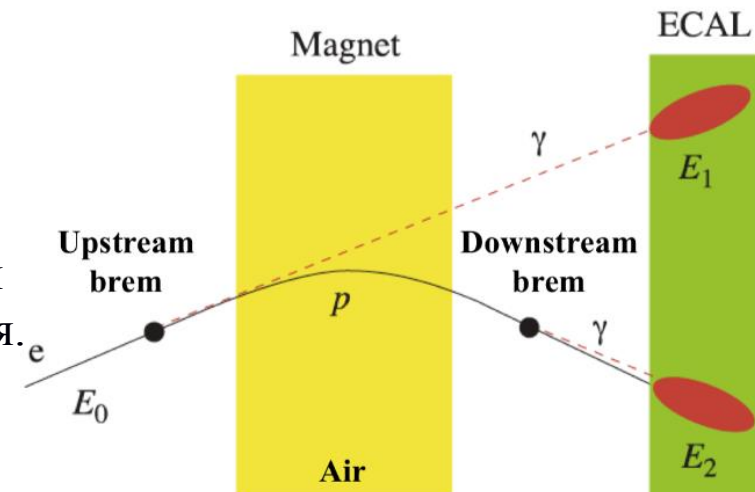
$R(K^+)$  составило  $0.846^{+0.060}_{-0.054} {}^{+0.016}_{-0.014}$ ,

Результаты измерения расходятся с предсказаниями СМ на 2,5 стандартных отклонения.



[Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 191801](#)

Поправка на эффекты тормозного излучения.



# Проверка ЛУ. Измерение $R_{pK}$

arXiv:1912.08139

Проверка ЛУ для распадов прелестных барионов

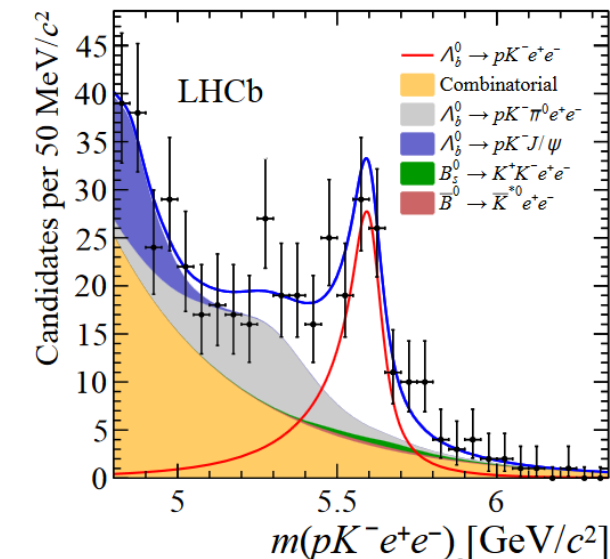
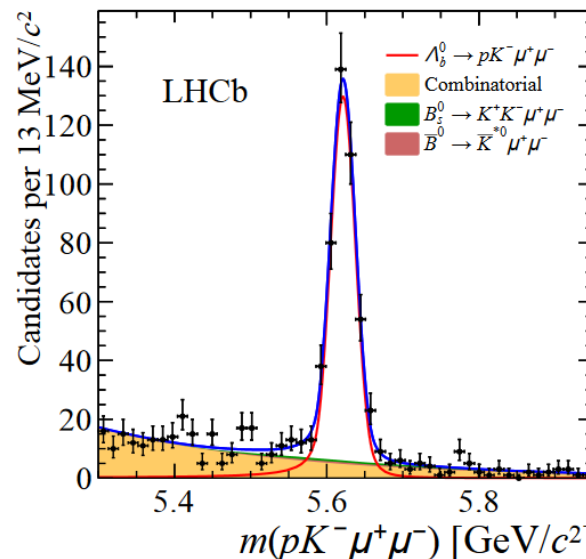
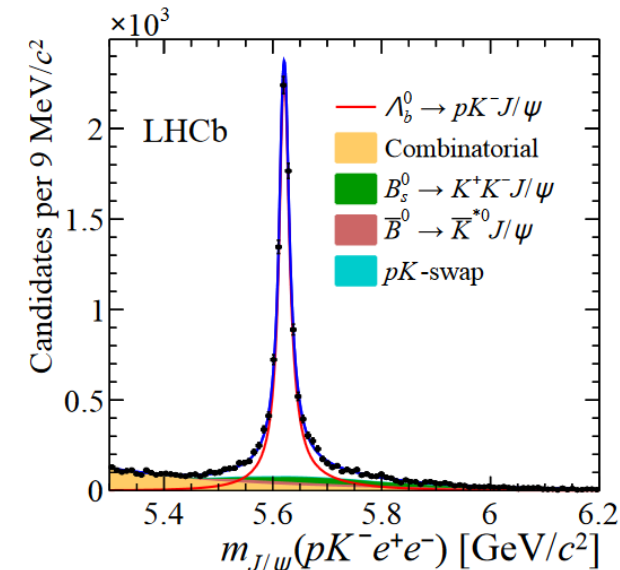
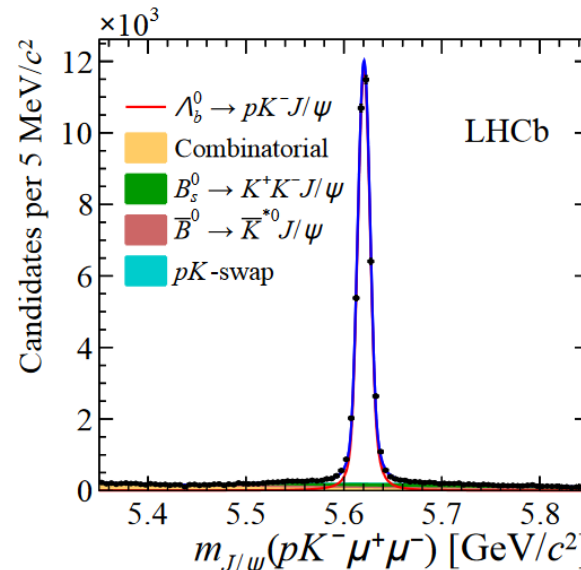
## Впервые измерен $\Lambda_b^0 \rightarrow pK e^+e^-$

ЛНСб измеряли так называемое **двойное отношение**, контролируя отбор конечного состояния  $pKl^+l^-$  с использованием распадов через промежуточный  $J/\psi$  резонанс – распады типа  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow l^+l^-) pK$ .

Измерения проводились для диапазона квадрата масс системы лептонов от 0.1 до 6.0 ГэВ<sup>2</sup> и условия, что масса системы  $pK$  меньше 2.6 ГэВ<sup>2</sup>.

Измеренное значение  $R_{pK^+}$  составило  $0.86^{+0.14}_{-0.11} \pm 0.05$

Этот результат согласуется как с предсказаниями СМ, так и с предыдущими результатами, полученными для  $B$  мезонов ( $R_K$  и  $R_{K^*} < 1$ ).



# С Новым годом!

- Важнейшие достижения LHCb 2019:
  - Проверка лептонной универсальности
  - Открытие CP нарушения в секторе очарованных частиц
  - Новые пентакварки
  - Новые результаты по дважды-очарованным барионам

Также много новых результатов на сайте эксперимента:

[http://lhcbproject.web.cern.ch/lhcbproject/Publications/LHCbProjectPublic/Summary\\_all.html](http://lhcbproject.web.cern.ch/lhcbproject/Publications/LHCbProjectPublic/Summary_all.html)



Запасные слайды

# Обнаружение дважды Кабиббо подавленного распада $\Xi_c^+$ бариона

- В СМ распады с превращениями кварков  $c \rightarrow d$  и  $u \rightarrow s$  сильно подавлены за счет структуры матрицы кваркового смешивания (матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы)
- Распады, в которых реализуются оба этих перехода, называют **дважды Кабиббо подавленными**. Их изучение позволит понять влияние спектаторных кварков (в особенности влияние принципа запрета Паули) на динамику распадов, что **важно для объяснения иерархии времен жизни очарованных частиц** (см. LHCb: *Phys. Rev. D 100 (2019) 032001*).
- Сигнал от распада  $\Xi_c^+ \rightarrow p\phi$  был выделен с высокой статистической значимостью ( $>15\sigma$ ), также было получено указание ( $3,5\sigma$ ) на несвязанный с  $\phi$  мезоном вклад в распад  $\Xi_c^+ \rightarrow pK^+K^-$
- Было измерено отношение вероятностей распадов  $\Xi_c^+ \rightarrow p\phi$  и  $\Xi_c^+ \rightarrow pK^+\pi^-$
- Анализ данных выполнен физиками ОФВЭ ПИЯФ (*JHEP 04 (2019) 084*).

