

Физические результаты эксперимента LNCb за 2018

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

Опубликовано в 2018 году: 48 работ

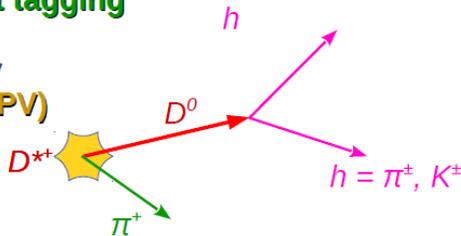
Ожидает публикации (направлены в печать): 10 работ

Рождение очарованных и прелестных адронов

- Глюонный синтез – основной механизм рождения кварк-антикварковых пар (c & b)
- Адроны вылетают преимущественно вперед (LHCb имеет угловой акцептанс $2 < \eta < 5$)
- Большое время жизни + СТО \rightarrow отлёт c - & b -адронов от первичной вершины \rightarrow критерий отбора

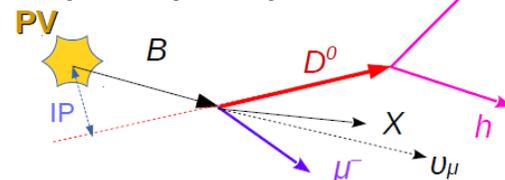
Prompt tagging

Primary vertex (PV)

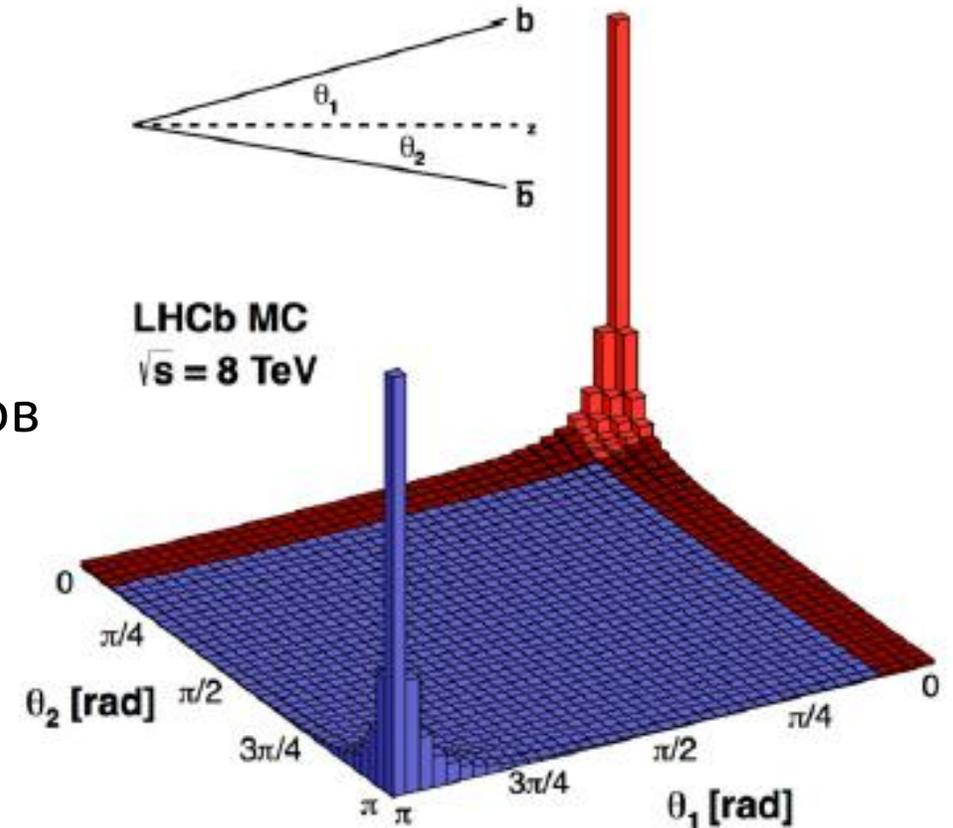


Higher tagging rate

Secondary (semileptonic)



More efficient triggering



LHCb: Find \ Identify \ Measure

Определение первичной вершины взаимодействия позволяет отбирать события с рождением тяжелых ароматов / измерение времени жизни / разделение первичных и вторичных адронов

Точка взаимодействия протонов

Идентификация типа адрона – подавление фонов && исследование различных мод распада

Треккинг

Мюонная система – таггинг & возможность поиска редких распадов

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

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

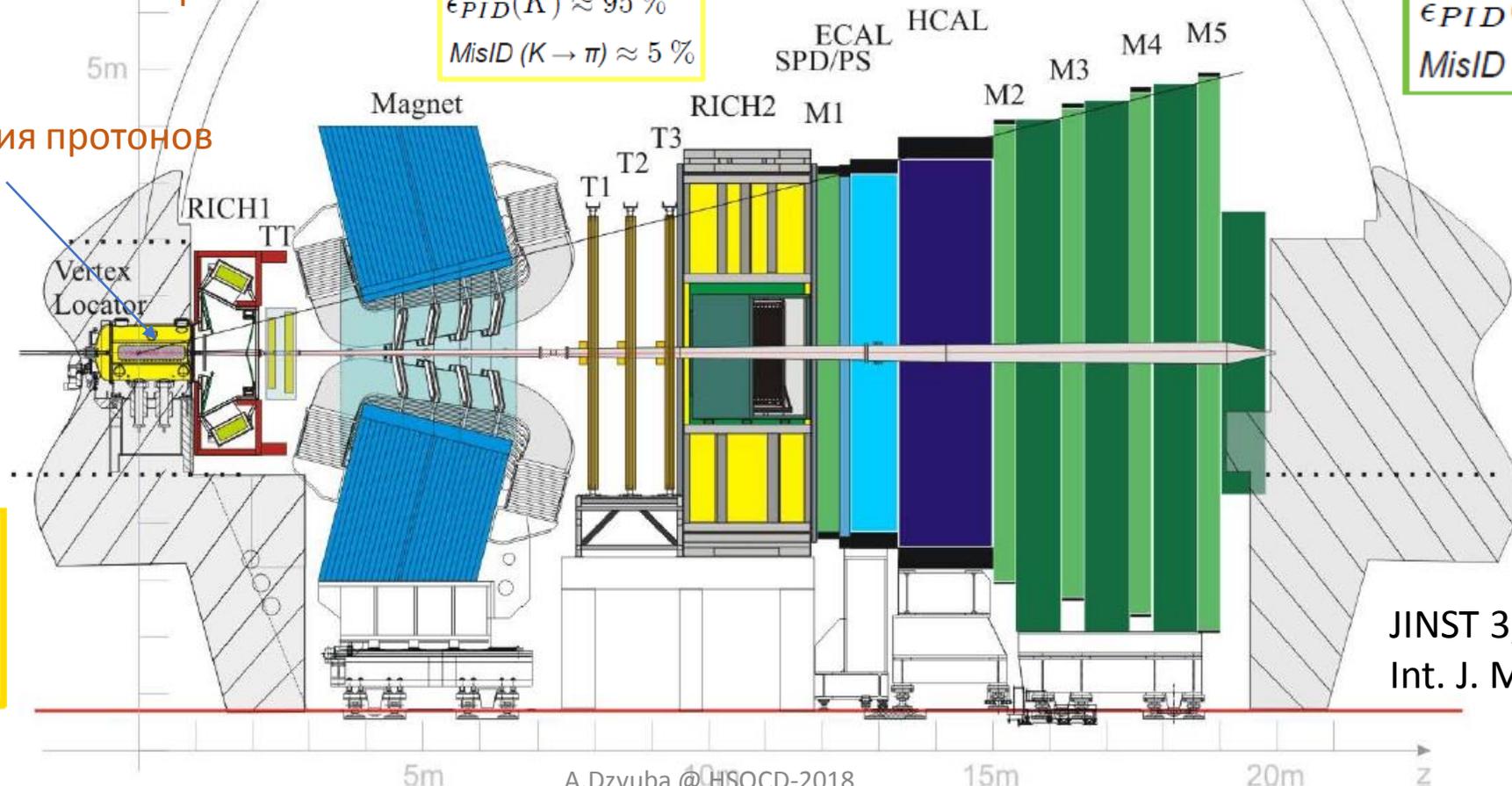
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

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

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

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

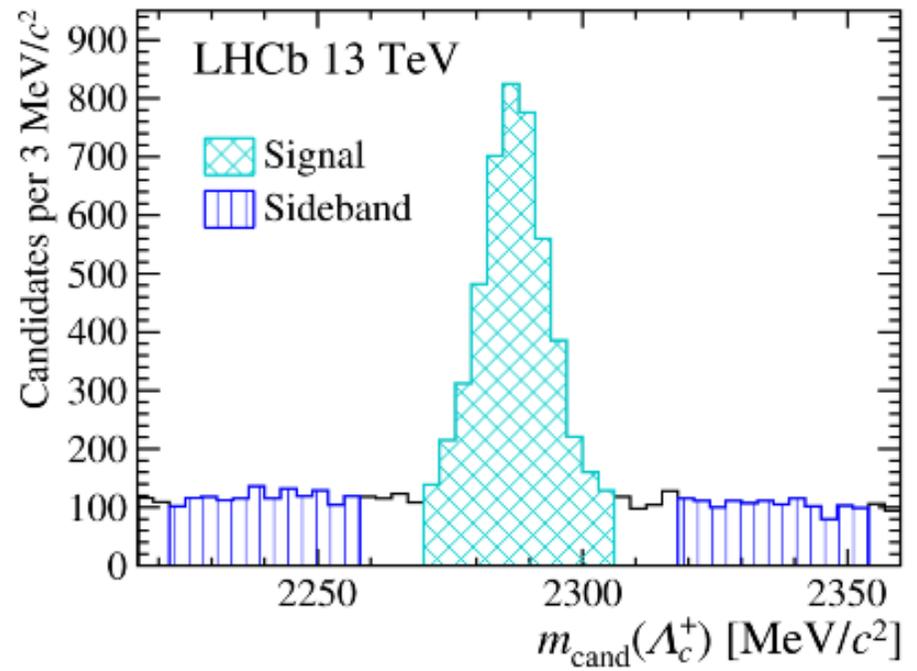
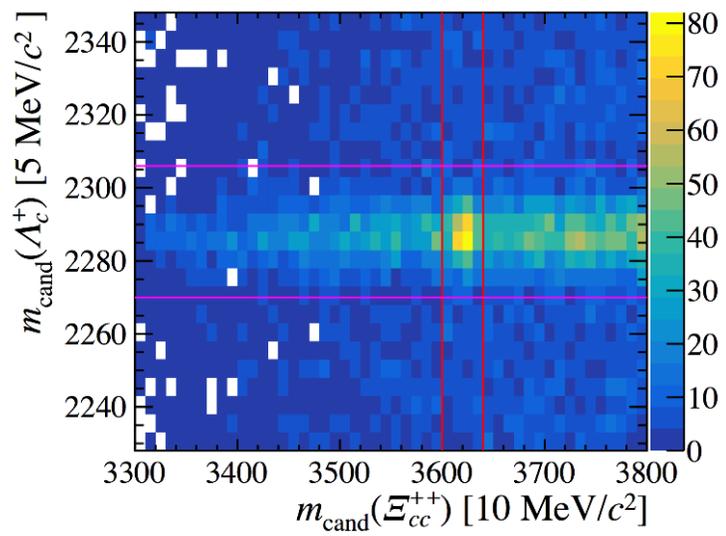
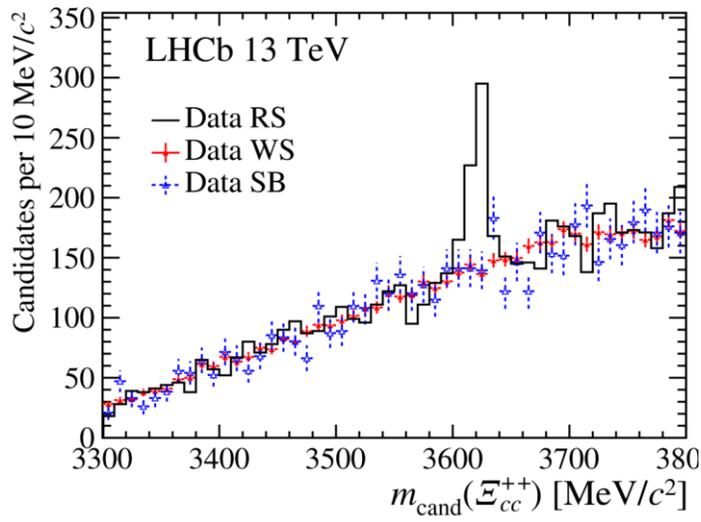
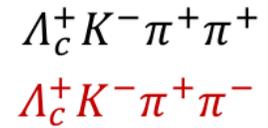
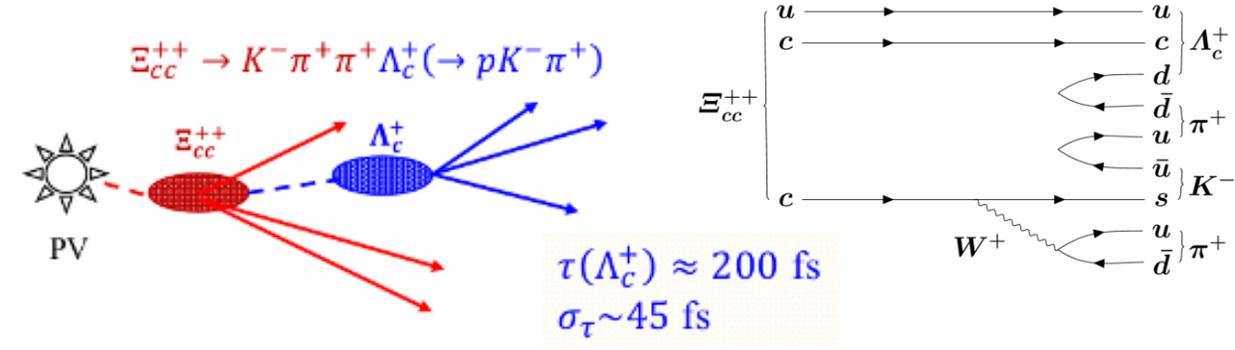
$$\epsilon_{track} > 96\%$$



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

Открытие Ξ_{cc}^{++}

- Данные Run II, интегральная светимость 1.7 fb^{-1} , Триггер с реконструкцией события налету (Turbo) / подтверждено на данных Run-I, светимость 2 fb^{-1}
- Парциальная ширина 10% от полной
- Проверка с использованием различных категорий событий:
 - RS – правильная комбинация
 - WS – неправильная комбинация
 - SB – комбинаторный фон



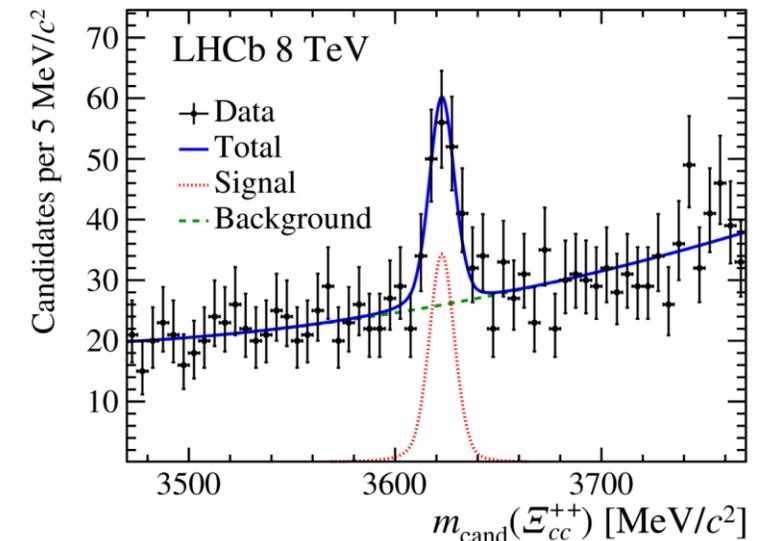
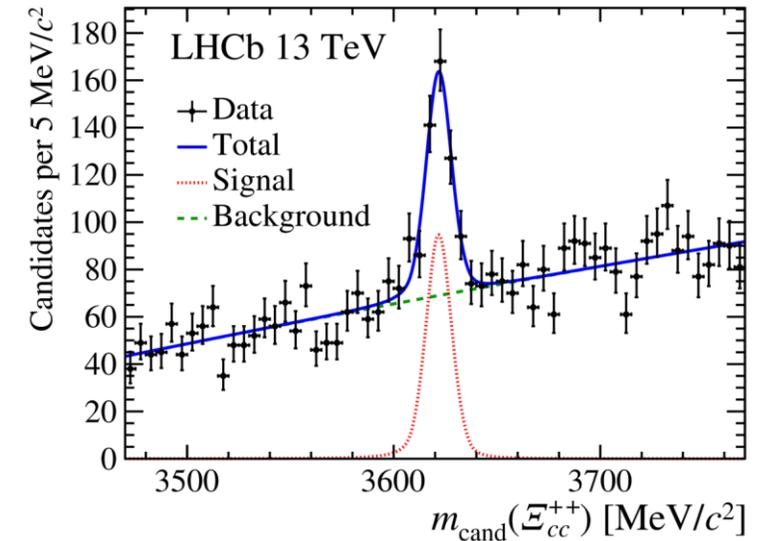
Discovery of Ξ_{cc}^{++}

- Найдено 313 ± 33 событий
- Локальная статистическая значимость 12σ
- Подтверждено на Run-I (113 ± 21 ev. / $>7\sigma$ sign.)

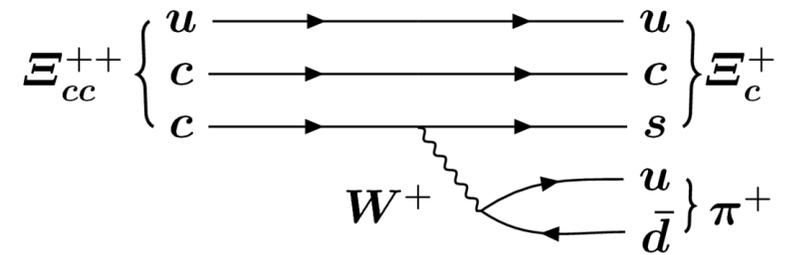
$$m(\Xi_{cc}^{++}) = 3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+) \text{ MeV}$$

$$m(\Xi_{cc}^{++}) - m(\Lambda_c^+) = 1134.94 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \text{ MeV}$$

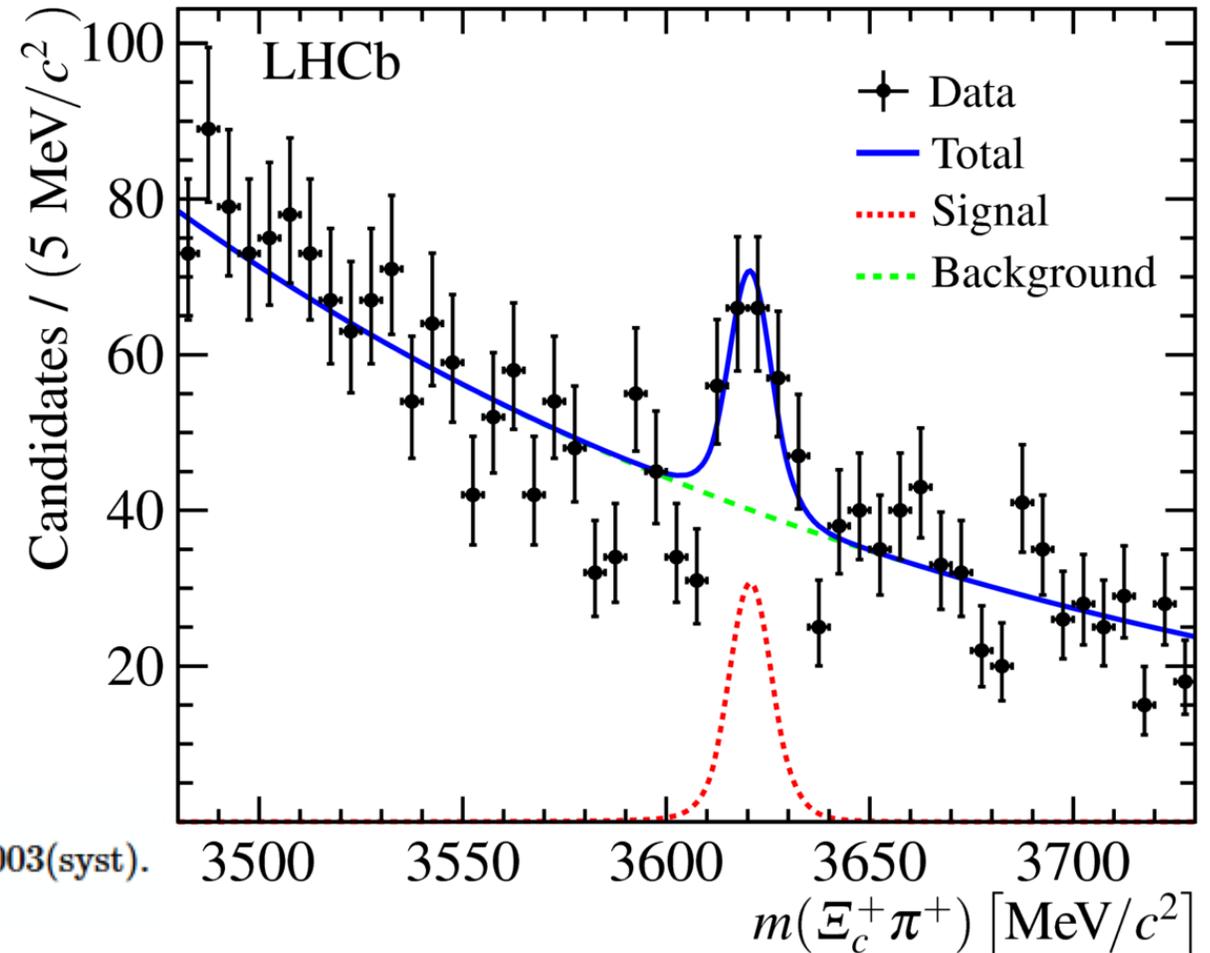
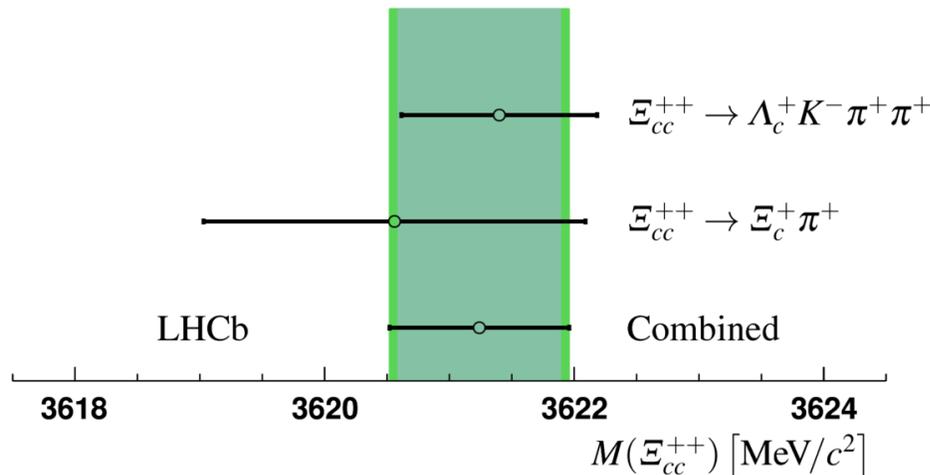
- Погрешность меньше МэВ
- Согласуется с теоретическими ожиданиями (включая решеточные расчеты)
- Слабый распад (время жизни $\sim 0,25$ пс)



Еще один канал распада Ξ_{cc}^{++}



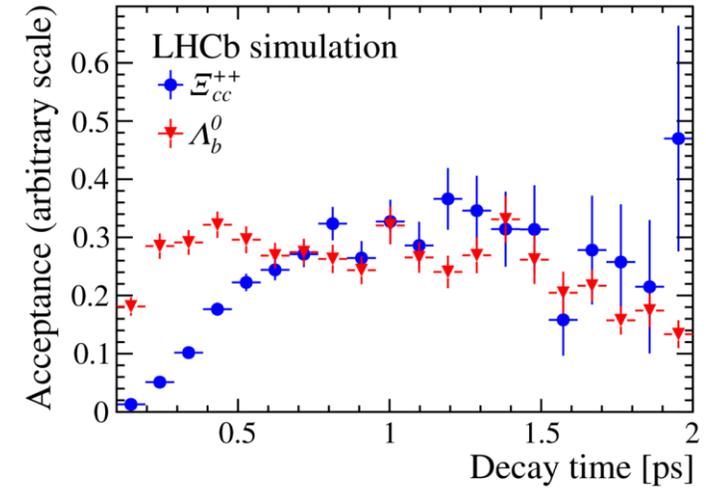
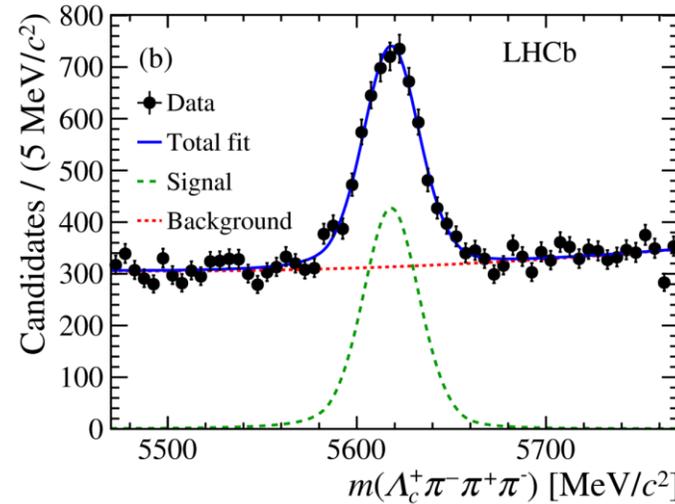
- Ожидалась большая парциальная ширина
- Данные Run II, светимость 1.7 fb^{-1}
- Выход: 90 ± 20 событий, значимость 5.9σ
- Измеренная масса согласуется с предыдущими измерениями



$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+) \times \mathcal{B}(\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+) \times \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)} = 0.035 \pm 0.009(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst}).$$

Измерение времени жизни Ξ_{cc}^{++}

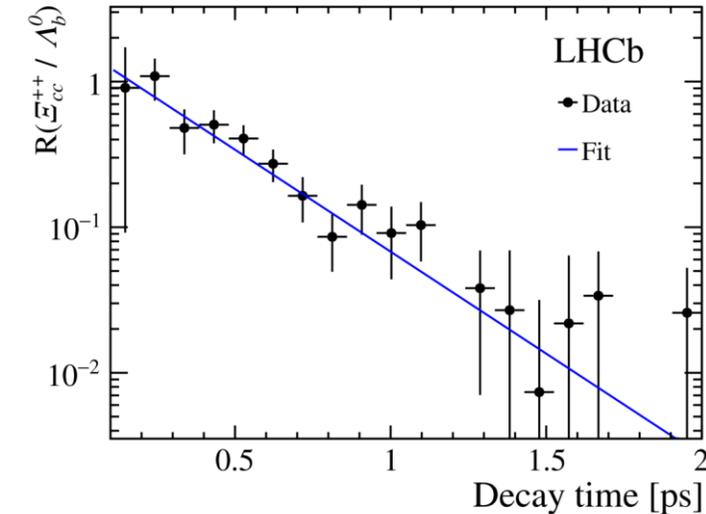
- Существенный выход при ограничениях на малые времена жизни
- Измерения относительно распадов Λ_b^0
- Полубиннированный метод (акцептанс задан в виде гистограммы)



$$\tau(\Xi_{cc}^{++}) = 0.256_{-0.022}^{+0.024} \text{ (stat)} \pm 0.014 \text{ (syst) ps.}$$

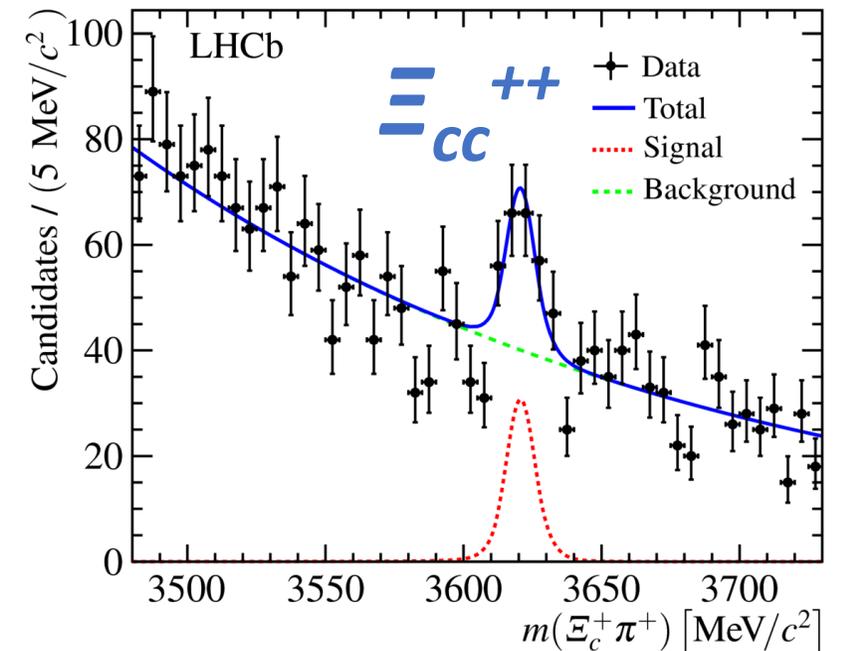
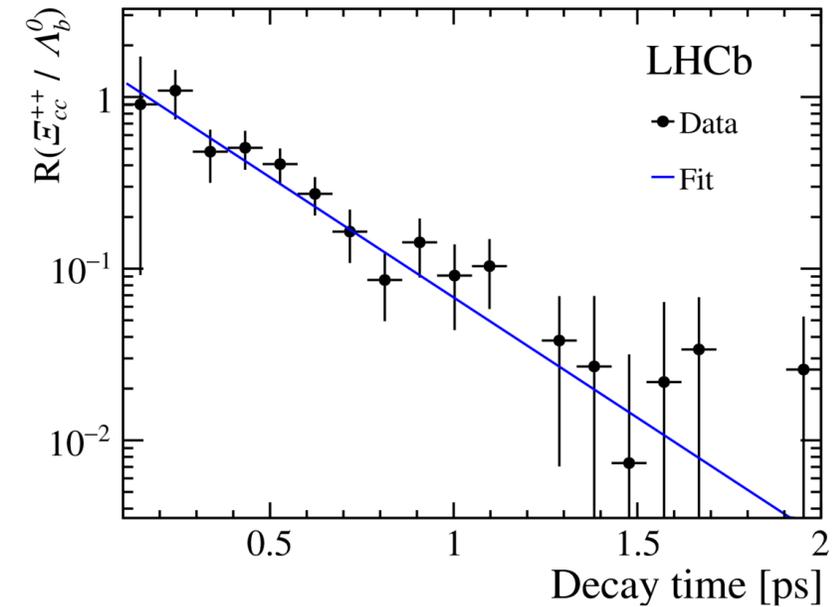
Результат на нижней границе теоретических ожиданий

Source	Uncertainty (ps)
Signal and background mass models	0.005
Correlation of mass and decay-time	0.004
Binning	0.001
Data-simulation differences	0.004
Resonant structure of decays	0.011
Hardware trigger threshold	0.002
Simulated Ξ_{cc}^{++} lifetime	0.002
Λ_b^0 lifetime uncertainty	0.001
Sum in quadrature	0.014



Исследование свойств частиц с двойным очарованием в эксперименте LHCb

- Измерение сечения рождения (относительно сечения рождения Λ_c^0)
- Поиск изотопического партнёра
- Обработка всех данных Run-II



Измерение времени жизни Ω_c бариона

- Иерархия времен жизни очарованных барионов

$$\tau_{\Xi_c^+} > \tau_{\Lambda_c^+} > \tau_{\Xi_c^0} > \tau_{\Omega_c^0}.$$

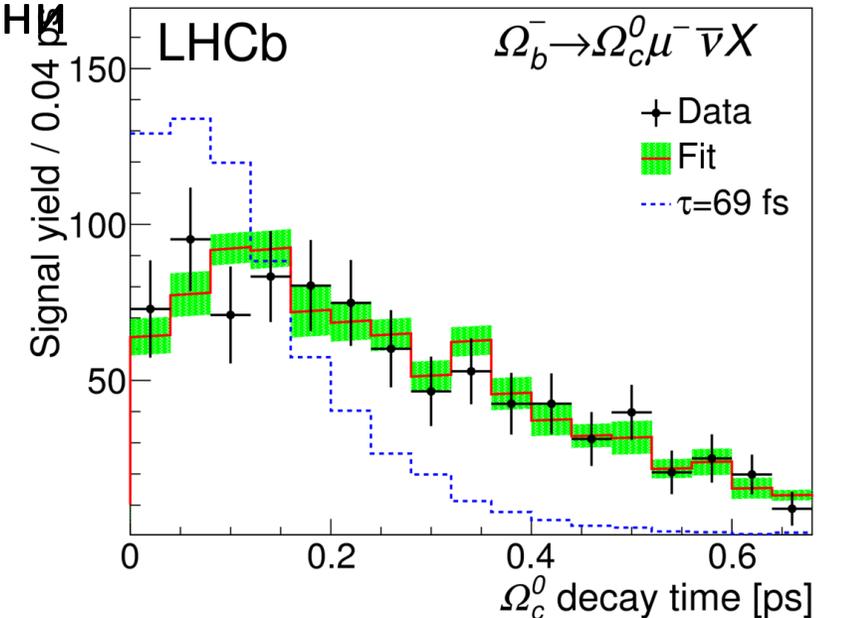
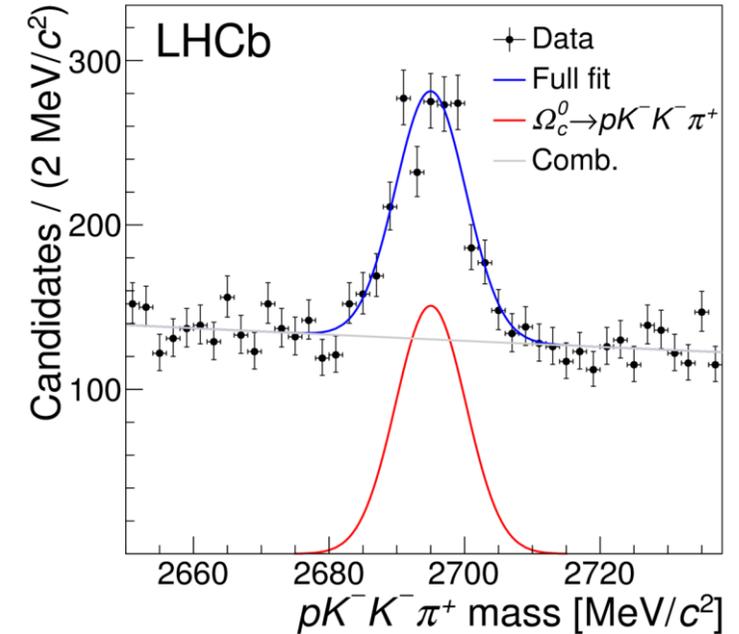
- Мюоны из полулептонных распадов Ω_b барионов и реконструированная вершина распада Ω_c бариона обеспечивают возможность измерения времени жизни

- Для уменьшения систематических погрешностей измерения использовали



$$\tau_{\Omega_c^0} \equiv \frac{\tau_{\Omega_c^0}}{\tau_{D^+}}$$

- Данные несовместны со временем жизни 69 фс (среднее время жизни по данным PDG)**



Измерение времени жизни Ω_c бариона

$$\frac{\tau_{\Omega_c^0}}{\tau_{D^+}} = 0.258 \pm 0.023 \pm 0.010$$

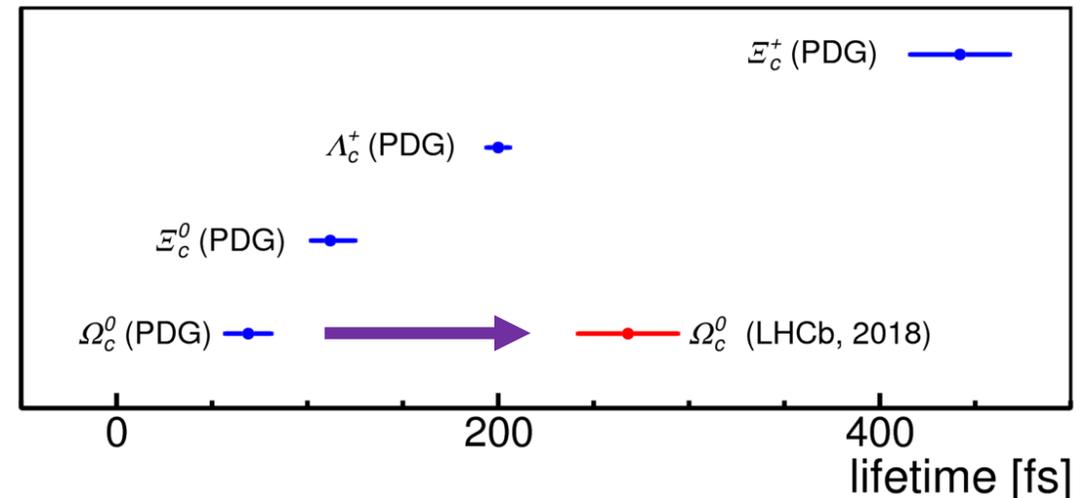
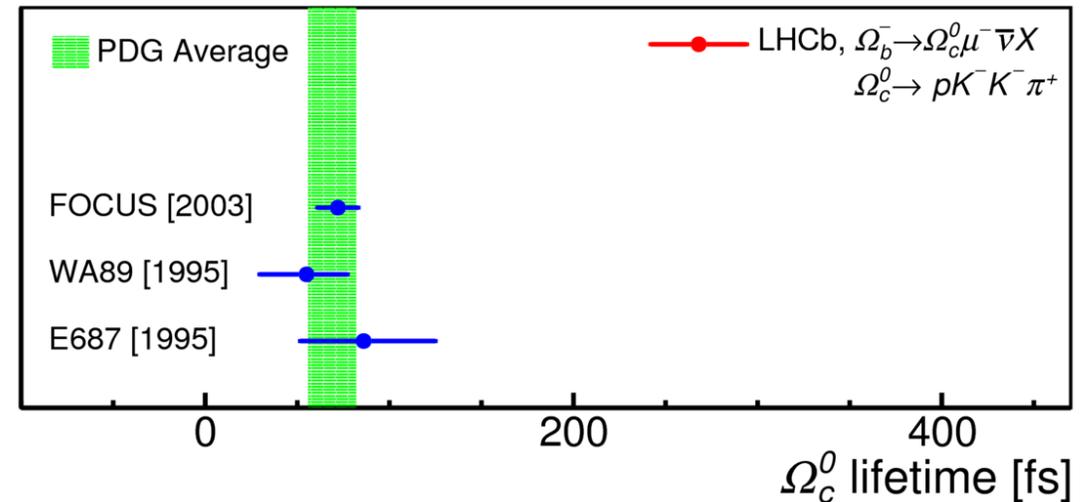
$$\tau_{\Omega_c^0} = 268 \pm 24 \pm 10 \pm 2 \text{ fs,}$$

- Предыдущие эксперименты выполнены на статистике, которая на порядок меньше чем в LHCb

- Новая иерархия времен жизни

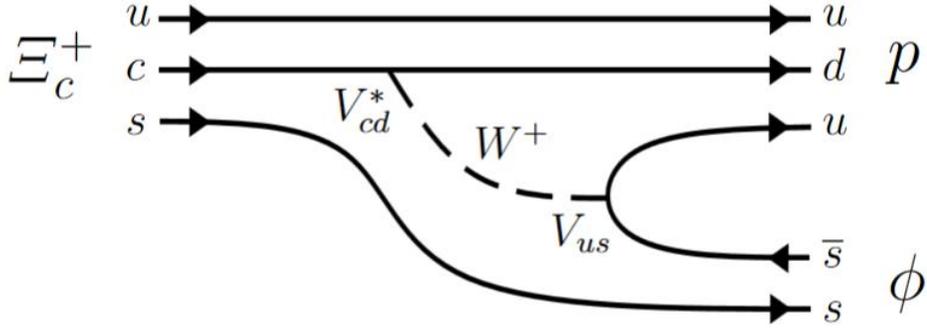
$$\tau_{\Xi_c^+} > \tau_{\Omega_c^0} > \tau_{\Lambda_c^+} > \tau_{\Xi_c^0}.$$

- Влияние “спектаторных” кварков ?



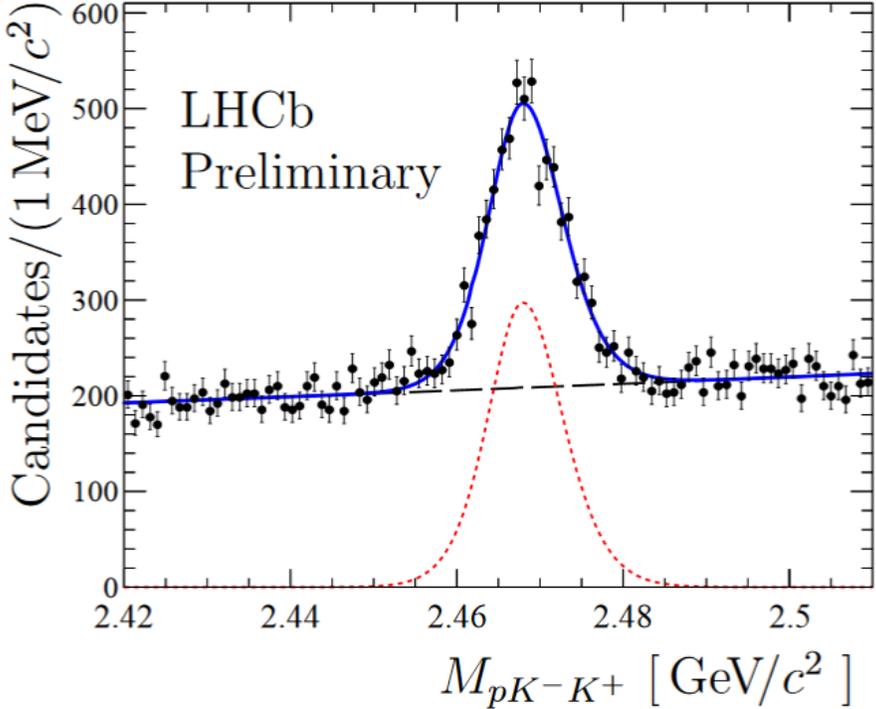
Дважды подавленный распад Ξ_c^+

- Дважды Кабиббо подавленные распады очарованных барионов могут пролить свет на эффекты Паули-интерференции в конечном состоянии



- Данные 2012, светимость 2 фб⁻¹
- Фактически в 2018 анализ данных был выполнен повторно (много мелких улучшений)
- Статистическая значимость сигнала больше 15σ

$M_{pK} < 1070 \text{ МэВ}/c^2$



Дважды подавленный распад Ξ_c^+

Отношение выходов

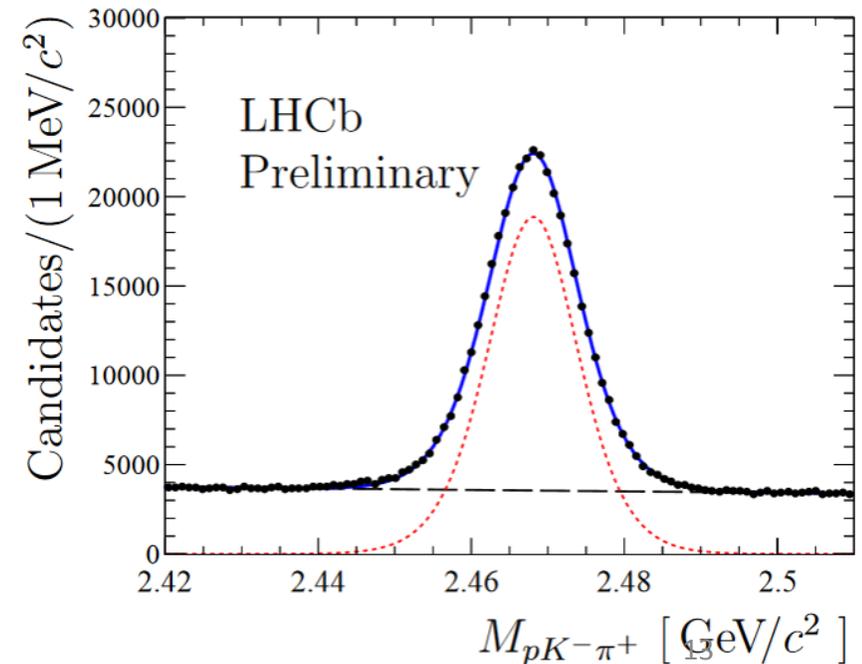
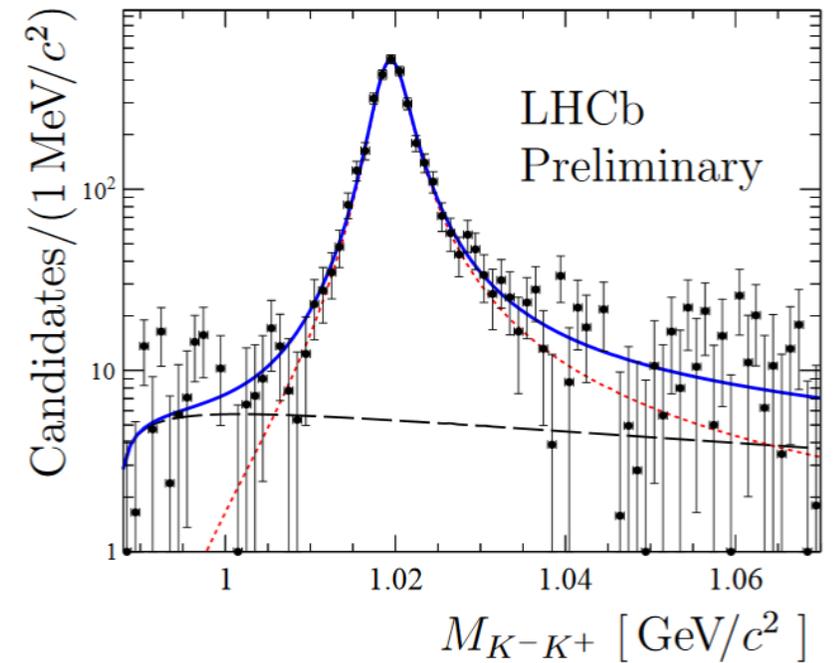
$$R_{p\phi} = \frac{N_{pKK} f_\phi}{\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)} \times \frac{1}{N_{pK\pi}} \times \frac{\epsilon_{\text{total}}^{pK\pi}}{\epsilon_{\text{total}}^{p\phi}}.$$

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{acc}} \times \epsilon_{\text{rec\&sel|acc}} \times \epsilon_{\text{software|rec\&sel}} \times \epsilon_{\text{hardware|rec\&sel}} \times \epsilon_{\text{PID}},$$

- Указание на не- ϕ вклад (значимость 3.5σ)
- Основная систематика – триггер и идентификация частиц

Preliminary, LHCb-PAPER-2018-040

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_c^+ \rightarrow p\phi)}{\mathcal{B}(\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+)} = (19.9 \pm 0.7 \pm 0.9 \pm 0.2) \times 10^{-3},$$



Смешивание и CP нарушения для D^0

– RS, когда нет смешивания И Кабиббо-разрешенный (CF) распад

– WS либо [Смешивание И CF] или [нет смешивания И дважды-Кабиббо подавленный распад]

– Тест различных видов CP нарушения (прямого, при смешивании и их интерференция)

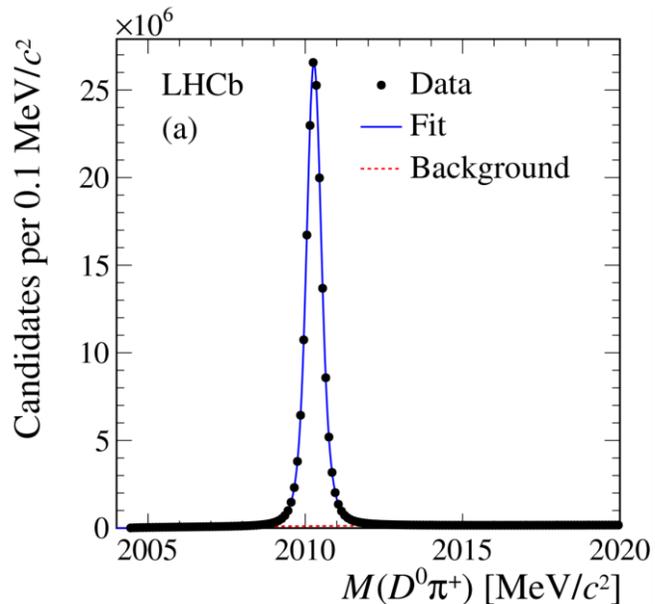
– Параметры смешивания (x' и y') малы поэтому соотношение WS / RS записывается как

$$R(t)^\pm = R_D^\pm + \sqrt{R_D^\pm} y'^\pm \left(\frac{t}{\tau}\right) + \frac{(x'^\pm)^2 + (y'^\pm)^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2,$$

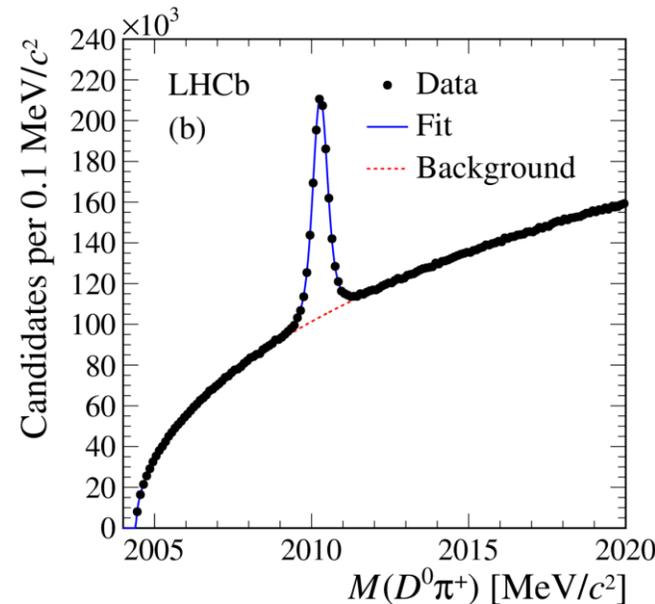
$$R_D^+ = |\mathcal{A}_{\bar{f}}/\mathcal{A}_f|^2 \quad R_D^- = |\bar{\mathcal{A}}_f/\bar{\mathcal{A}}_{\bar{f}}|^2 \quad R_D^+ \neq R_D^- \Rightarrow \text{direct CPV}$$

$$\begin{aligned} x'^+ \neq x'^- &\Rightarrow \text{CPV in mixing} \\ y'^+ \neq y'^- &\Rightarrow \text{and interference} \end{aligned}$$

Right sign (RS) $D^{*-} / K^-\pi^+$



Wrong sign (RS) $D^{*-} / K^+\pi^-$



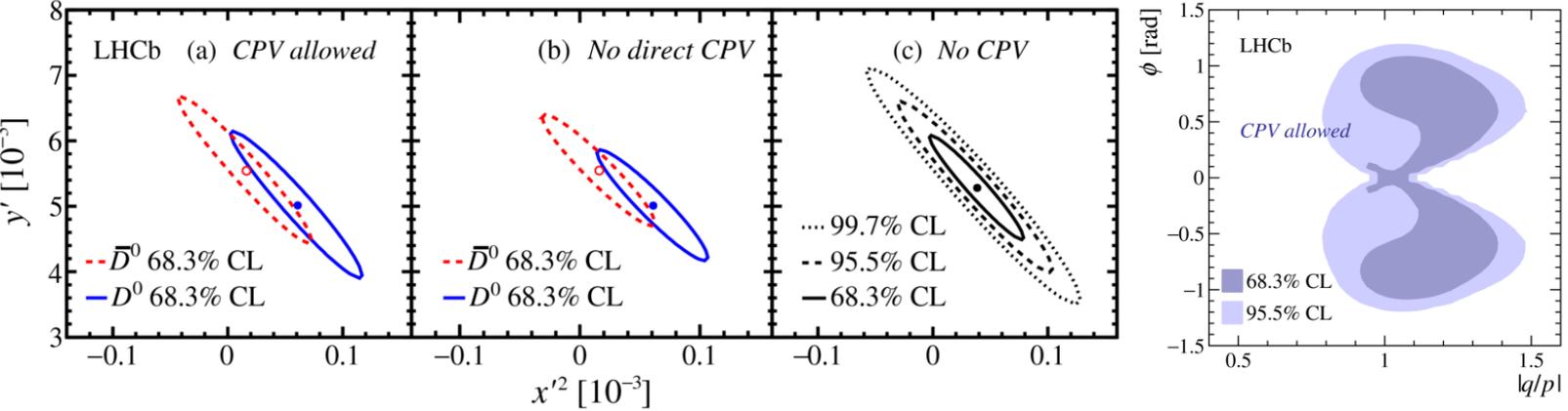
Использовались данные Run I и II

Интегральная светимость 5 fb^{-1}

Смешивание и CP нарушения для D^0

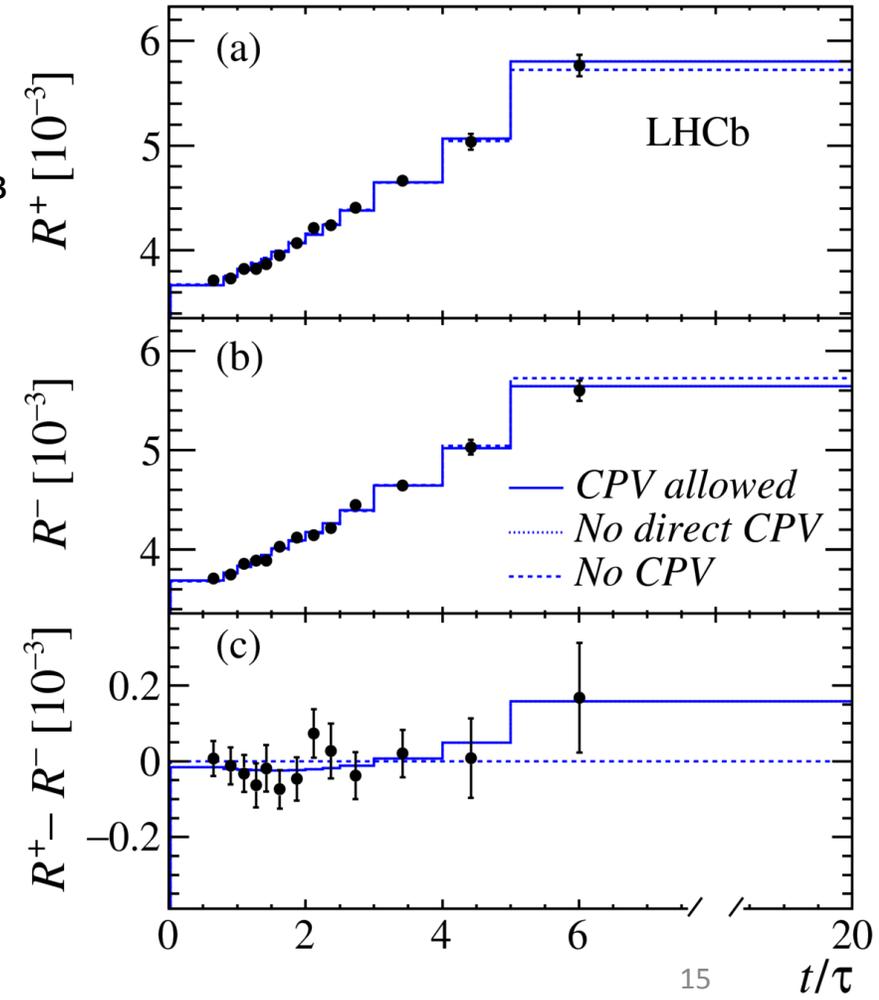
- Систематика: асимметрия детектирования / пикующийся фон / D -из- b / неправильная реконструкция медленных пионов
- Параметры смешивания получены при различных гипотезах о CP нарушении
- Точности определения a -параметров смешивания на порядок выше чем в других экспериментах

No CP violation	
Parameter	Value
R_D	$3.454 \pm 0.028 \pm 0.014$
y'	$5.28 \pm 0.45 \pm 0.27$
x'^2	$0.039 \pm 0.023 \pm 0.014$



- Ограничения на параметры непрямого CP нарушения

$1.00 < |q/p| < 1.35$ @ 68.3% C.L.
 $0.82 < |q/p| < 1.45$ @ 95.5% C.L.



Редкие распады очарованных мезонов

$$D^0 \rightarrow \mu^+ e^-$$

$$D^0 \rightarrow \rho e^-$$

$$D_{(s)}^+ \rightarrow h^+ \mu^+ e^-$$

$$D_{(s)}^+ \rightarrow \pi^+ l^+ l^-$$

$$D_{(s)}^+ \rightarrow K^+ l^+ l^-$$

$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ l^+ l^-$$

$$D^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$$

$$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ V (\rightarrow ll)$$

$$D^0 \rightarrow \rho^- V (\rightarrow ll)$$

$$D^0 \rightarrow K^+ K^- V (\rightarrow ll)$$

$$D^0 \rightarrow \phi^- V (\rightarrow ll)$$

$$D^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$$

$$D^0 \rightarrow (\phi, \rho, \omega) \gamma$$

$$D_s^+ \rightarrow \pi^+ \phi (\rightarrow ll)$$

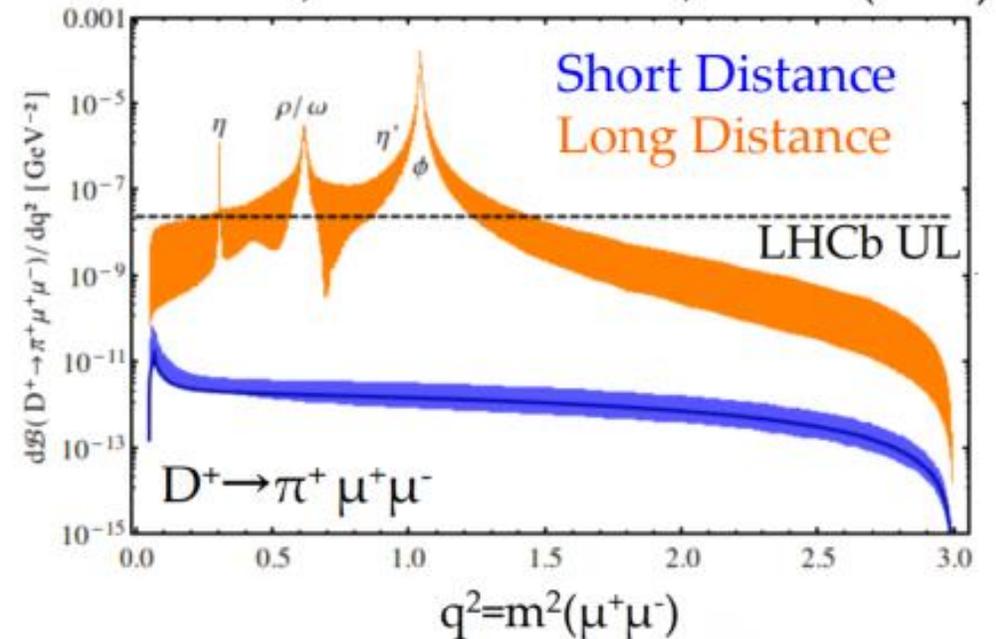
LFV, LNV, BNV	FCNC						VMD			Radiative		
0	10^{-15}	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
$D_{(s)}^+ \rightarrow h^- l^+ l^+$								$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- V (\rightarrow ll)$	$D^+ \rightarrow \pi^+ \phi (\rightarrow ll)$			
$D^0 \rightarrow X^0 \mu^+ e^-$				$D^0 \rightarrow ee$	$D^0 \rightarrow \mu\mu$	$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ l^+ l^-$	$D^0 \rightarrow \rho^- l^+ l^-$	$D^0 \rightarrow \bar{K}^0 V (\rightarrow ll)$	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ V (\rightarrow ll)$			
$D^0 \rightarrow X^- l^+ l^+$						$D^0 \rightarrow K^+ K^- l^+ l^-$	$D^0 \rightarrow \phi^- l^+ l^-$	$D^0 \rightarrow \gamma\gamma$	$D^0 \rightarrow K^{*0} V (\rightarrow ll)$			

[PRD 66 (2002) 014009]

Векторные резонансы, распадающиеся в ди-мюоны скрывают вклад Стандартной Модели

- Пределы на вероятности распадов
- CP- и T-асимметрии
- Нарушение лептонного числа (LFV)
- Лептонная универсальность(LU)
- Угловой и амплитудный анализы

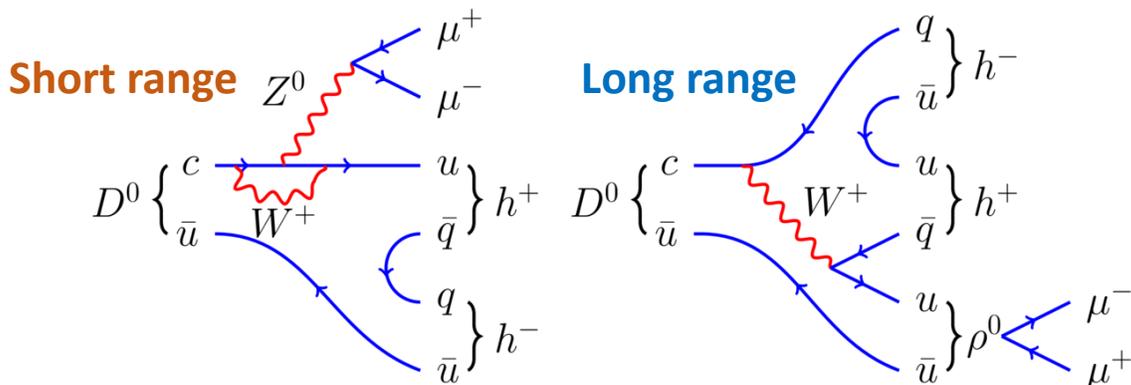
S.de Boer, G.Hiller PRD 93, 074001(2016)



$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$ и $D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-$

Цель: Поиск Новой физики в $c \rightarrow u$ переходах, проявляющейся на **малых расщеплениях**, которая очень подавлена в СМ ($< 10^{-9}$)

Большие расстояния вклад от ρ, ω, ϕ распадающиеся в пару $\mu^+\mu^-$ (утечка событий в малые массы трудно рассчитать)

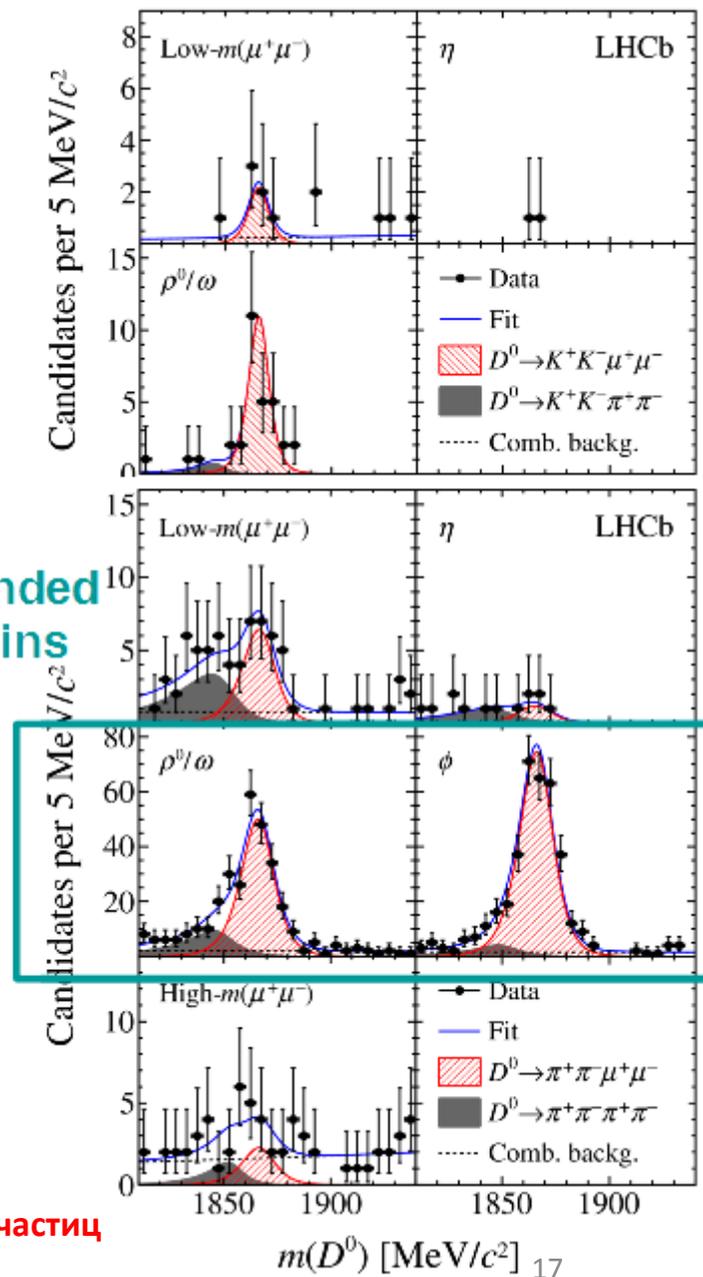


Обнаружены выполнено на светимости 2 fb^{-1}

$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-) = (9.64 \pm 0.48 \pm 0.51 \pm 0.97) \times 10^{-7},$$

$$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-) = (1.54 \pm 0.27 \pm 0.09 \pm 0.16) \times 10^{-7}.$$

Non-blinded mass bins



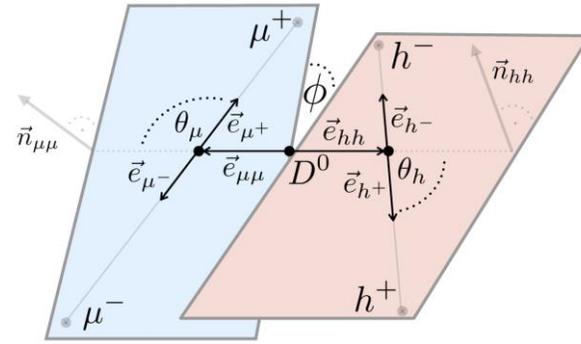
Редчайшие из открытых распадов очарованных частиц

$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$ и $D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-$

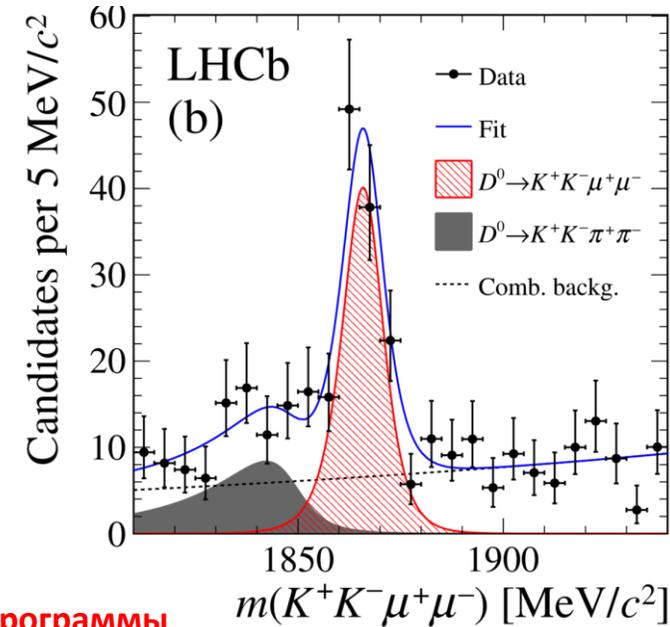
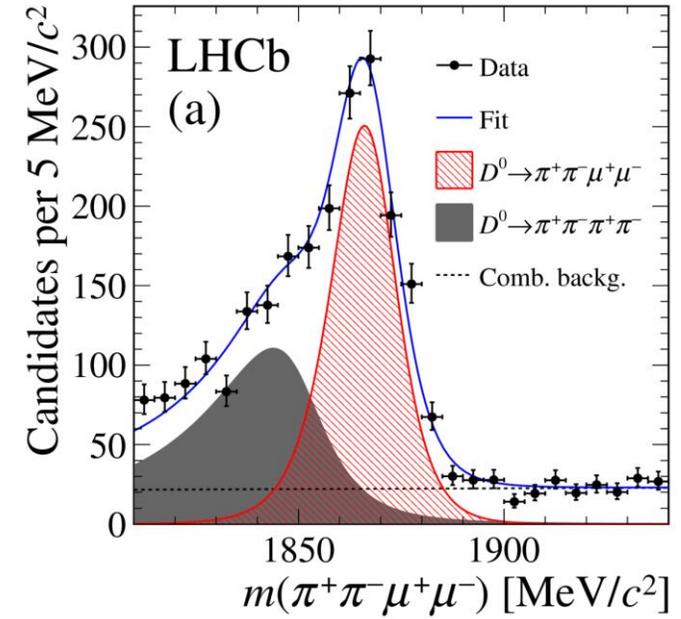
Наблюдение на светимости 2 fb^{-1} / Изучение свойств (асимметрий) на 5 fb^{-1}

- A_{FB} – асимметрия вперед-назад для $\mu^+\mu^-$
- $A_{2\phi}$ – triple-product асимметрия →
- A_{CP} – CP асимметрия (используя таггинг D^*)

Многообещающие для поиска Новой физики



$$\sin 2\phi = 2(\vec{n}_{hh} \cdot \vec{n}_{\mu\mu})(\vec{n}_{hh} \times \vec{n}_{\mu\mu}) \cdot \vec{e}_{hh}$$



$m(\mu^+\mu^-)$ [MeV/c ²]	Efficiency-weighted yields			Signal asymmetries		
	Signal	Misid. back.	Comb. back.	A_{FB} [%]	$A_{2\phi}$ [%]	A_{CP} [%]
$D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$						
< 525	90 ± 17	233 ± 25	108 ± 22	$2 \pm 20 \pm 2$	$-28 \pm 20 \pm 2$	$17 \pm 20 \pm 2$
525–565	–	–	–	–	–	–
565–780	326 ± 23	253 ± 24	145 ± 21	$8.1 \pm 7.1 \pm 0.7$	$7.4 \pm 7.1 \pm 0.7$	$-12.9 \pm 7.1 \pm 0.7$
780–950	141 ± 14	159 ± 15	89 ± 14	$7 \pm 10 \pm 1$	$-14 \pm 10 \pm 1$	$17 \pm 10 \pm 1$
950–1020	244 ± 16	63 ± 13	43 ± 9	$3.1 \pm 6.5 \pm 0.6$	$1.2 \pm 6.4 \pm 0.5$	$7.5 \pm 6.5 \pm 0.7$
1020–1100	258 ± 14	33 ± 9	44 ± 9	$0.9 \pm 5.6 \pm 0.7$	$1.4 \pm 5.5 \pm 0.6$	$9.9 \pm 5.5 \pm 0.7$
> 1100	–	–	–	–	–	–
Full range	1083 ± 41	827 ± 42	579 ± 39	$3.3 \pm 3.7 \pm 0.6$	$-0.6 \pm 3.7 \pm 0.6$	$4.9 \pm 3.8 \pm 0.7$
$D^0 \rightarrow K^+K^-\mu^+\mu^-$						
< 525	32 ± 8	5 ± 13	124 ± 20	$13 \pm 26 \pm 4$	$9 \pm 26 \pm 3$	$-33 \pm 26 \pm 4$
525–565	–	–	–	–	–	–
> 565	74 ± 9	39 ± 7	48 ± 8	$1 \pm 12 \pm 1$	$22 \pm 12 \pm 1$	$13 \pm 12 \pm 1$
Full range	110 ± 13	49 ± 12	181 ± 19	$0 \pm 11 \pm 2$	$9 \pm 11 \pm 1$	$0 \pm 11 \pm 2$

Начало большой экспериментальной программы

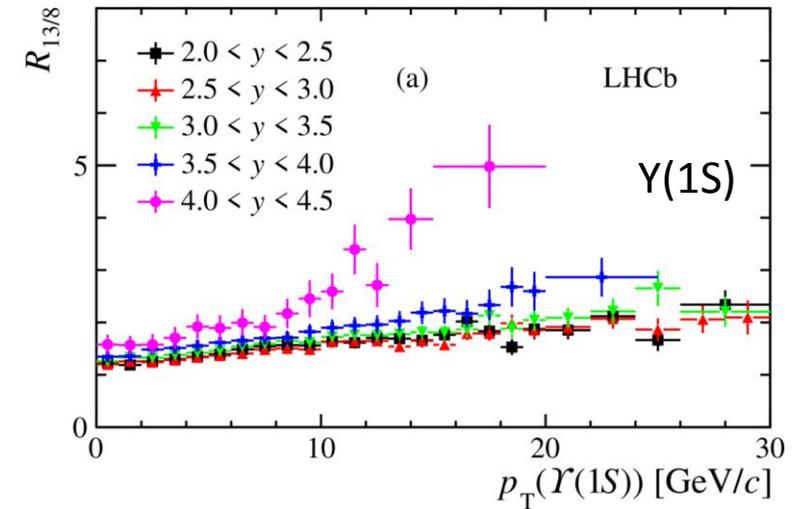
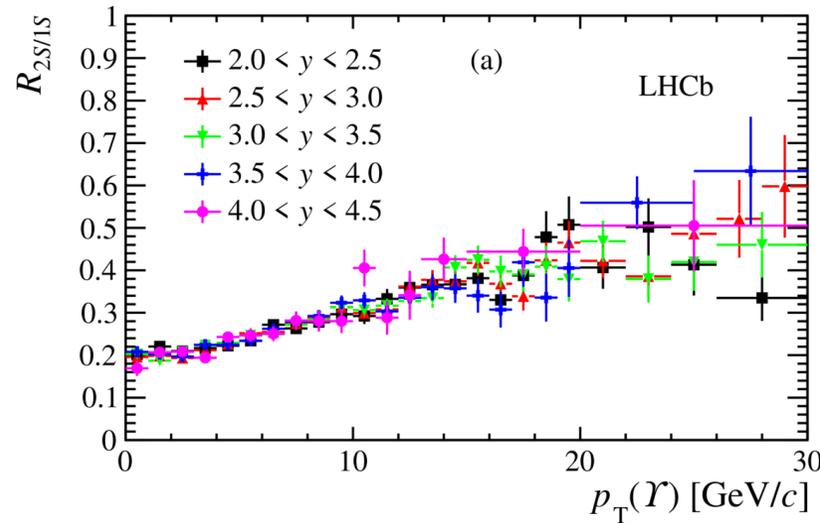
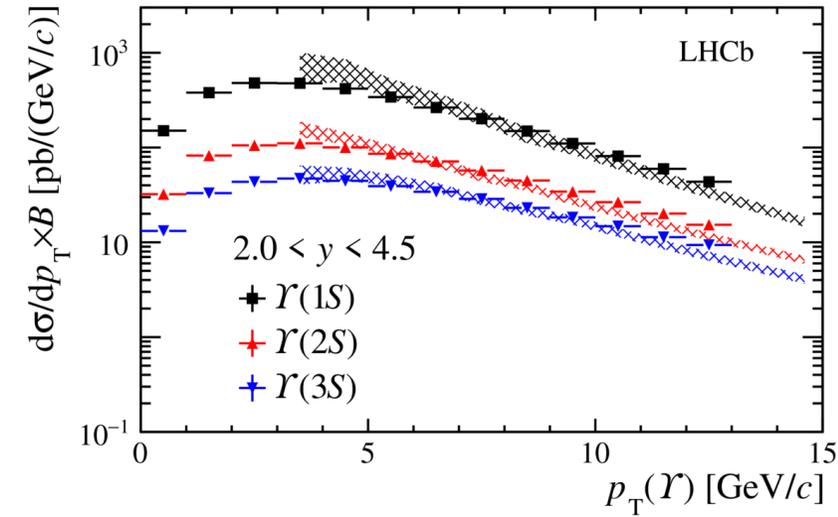
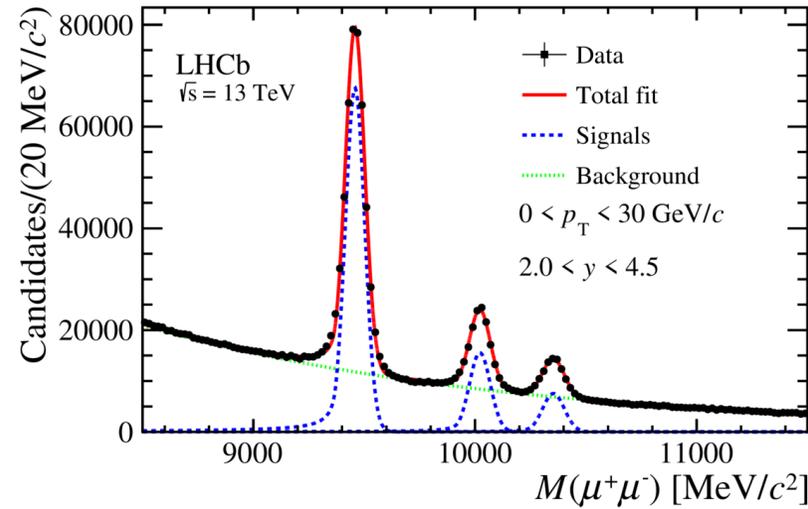
Изучение рождения Υ резонансов на 13 ТэВ

Измерение дважды-дифференциальных сечений рождения $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$ резонансов при 13 ТэВ

Результаты согласуются с предсказаниями NRQCD

p_T -спектр $\Upsilon(2S)$ и $\Upsilon(3S)$ жёстче чем $\Upsilon(1S)$

Сравнение с данными на 8 ТэВ



Работы 2018 года \ Новые распады и резонансы

1. Evidence for an $\eta_c(1S)\pi^-$ -resonance in $B^0 \rightarrow \eta_c(1S)K^+\pi^-$ decays \ [Eur. Phys. J. C78 \(2018\) 1019](#)
2. Observation of two resonances in the $\Lambda^0_b \pi^\pm$ systems and precise measurement of Σ^\pm_b and $\Sigma^{*\pm}_b$ properties [arXiv:1809.07752](#)
3. First observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi^{++}cc \rightarrow \Xi^+c\pi^+$ \ [Phys. Rev. Lett. 121 162002 \(2018\)](#)
4. Observation of $B^0_s \rightarrow D^{*0}\phi$ and search for $B^0 \rightarrow D^0\phi$ decays \ [Phys. Rev. D98 071103\(R\) \(2018\)](#)
5. Observation of the decay $B^0_s \rightarrow D^0K^+K^-$ \ [Phys. Rev. D98 072006 \(2018\)](#)
6. Observation of the decay $B^0_s \rightarrow \chi_{c2}K^+K^-$ in the ϕ mass region \ [JHEP 08 \(2018\) 191](#)
7. Observation of the decay $\Lambda^0_b \rightarrow \psi(2S)p\pi^-$ \ [JHEP 08 \(2018\) 131](#)
8. Observation of a new Ξ^-_b resonance \ [Phys. Rev. Lett. 121 \(2018\) 072002](#)
9. Observation of the decay $\Lambda^0_b \rightarrow \Lambda^+c p p \pi^-$ \ [Phys. Lett. B784 \(2018\) 101](#)
10. Evidence for the decay $B^0_s \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-$ \ [JHEP 07 \(2018\) 020](#)

Работы 2018 года \ CP-нарушение

1. Measurement of the branching fraction and CP asymmetry in $B^+ \rightarrow J/\psi \rho^+$ decays \ [arXiv:1812.07041](#)
2. Search for CP violation through an amplitude analysis of $D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ decays \ [arXiv:1811.08304](#)
3. Measurement of the charm-mixing parameter γ_{CP} \ [arXiv:1810.06874](#)
4. Search for CP violation in $\Lambda^0 b \rightarrow p K^-$ and $\Lambda^0 b \rightarrow p \pi^-$ decays \ [Phys. Lett. B784 \(2018\) 101](#)
5. Measurement of angular and CP asymmetries in $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ and $D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$ decays \ [Phys. Rev. Lett. 121 \(2018\) 091801](#)
6. Measurement of the time-integrated CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K^0 S K^0 S$ decays \ [JHEP 11 \(2018\) 048](#)
7. Measurement of the CKM angle γ using $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ with $D \rightarrow K^0 S \pi^+ \pi^-$, $K^0 S K^+ K^-$ decays \ [JHEP 08 \(2018\) 176](#), [JHEP 10 \(2018\) 107](#)
8. Measurement of CP asymmetries in two-body $B^0(s)$ -meson decays to charged pions and kaons \ [Phys. Rev. D98 \(2018\) 032004](#)
9. Search for CP violation using triple product asymmetries in $\Lambda^0 b \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$, $\Lambda^0 b \rightarrow p K^- K^+ K^-$ and $\Xi^0 b \rightarrow p K^- K^- \pi^+$ decays \ [JHEP 08 \(2018\) 039](#)
10. Measurement of CP violation in $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$ decays \ [JHEP 06 \(2018\) 084](#)
11. Measurement of the CP asymmetry in $B^- \rightarrow D^- s D^0$ and $B^- \rightarrow D^- D^0$ decays \ [JHEP 05 \(2018\) 160](#)

Работы 2018 года \ Протон-ядерные взаимодействия

1. First measurement of charm production in fixed-target configuration at the LHC [arXiv:1810.07907 Submitted to PRL](#)
2. Study of Υ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV [JHEP 11 \(2018\) 194](#)
3. Prompt Λ_c^+ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV [arXiv:1809.01404 Submitted to JHEP](#)
4. Measurement of antiproton production in pHe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=110$ GeV [Phys. Rev. Lett. 121 \(2018\) 222001](#)

Работы 2018 года

1. Search for lepton-flavour-violating decays of Higgs-like bosons [Eur. Phys. J. C78 \(2018\) 1008](#)
2. Search for beautiful tetraquarks in the $Y(1S)\mu^+\mu^-$ invariant-mass spectrum [JHEP 10 \(2018\) 086](#)
3. Measurement of $Z\rightarrow\tau^+\tau^-$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV [JHEP 09 \(2018\) 159](#)
4. Central exclusive production of J/ψ and $\psi(2S)$ mesons in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV [JHEP 10 \(2018\) 167](#)
5. Measurement of $D^{\pm s}$ production asymmetry in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ and 8 TeV [JHEP 08 \(2018\) 008](#)
6. Measurement of Y production in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV [JHEP 07 \(2018\) 134](#)
7. Measurement of the inelastic pp cross-section at a centre-of-mass energy of 13 TeV [JHEP 06 \(2018\) 100](#)
8. Measurement of forward top pair production in the dilepton channel in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV [JHEP 08 \(2018\) 174](#)

Заключение

- Статистика Run-1 + Run-2 более 9 фб^{-1} !
- Более 50 новых работ
- Исследование очарованных частиц
 - новые каналы распадов барионов
 - измерение времен жизни
 - редкие распады с мюонами

Спасибо за внимание! С Новым Годом!

