

Физика очарованных адронов в эксперименте ЛНСб

Алексей Дзюба

10 октября 2017, Гатчина

Семинар Отделения физики высоких энергий ПИЯФ



National Research Centre "Kurchatov Institute"
B.P.KONSTANTINOV
PETERSBURG NUCLEAR PHYSICS INSTITUTE

Важные свойства:

- Большая масса [упрощение расчетов КХД]
- Эффекты CP нарушения [в Стандартной Модели (СМ) описываются **комплексной фазой элементов матрицы квакового смешивания (ККМ / СКМ)**] очень малы
- Подавлены переходы, проходящие под действием **нейтральных токов нарушающих аромат** [**flavor changing neutral current / FCNC**]
- **Смешивание для нейтральных очарованных мезонов** измерено, но не интенсивно (параметры смешивания малы $x \sim \Delta m$, $y \sim \Delta \Gamma$)

с-кварк

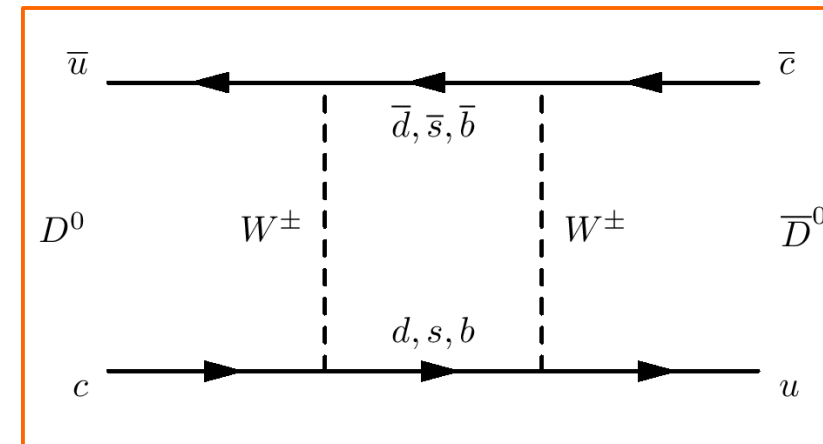
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

$$\arg(V_{cd}) \sim 10^{-4}$$

$$\arg(V_{cs}) \sim 10^{-5}$$

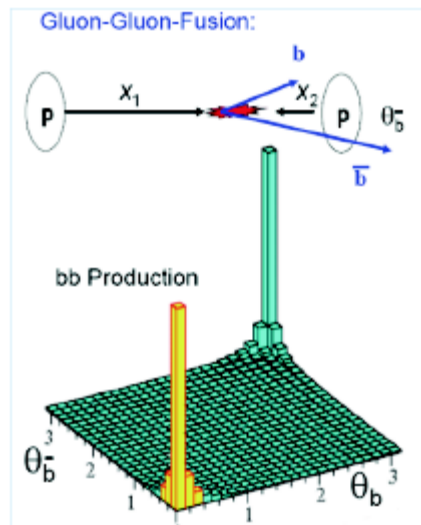
Физика с-адронов на LHCb:

- Спектроскопия очарованных барионов – естественный мост между спектроскопией кваркония и легких адронов
- Поиск Новой физики (CP нарушения в очарованном секторе / поиск редких FCNC распадов)



смешивание / нейтральные токи нарушающие аромат

LHCb – фабрика тяжелых ароматов



Триггерирование, таггирование & большой потенциал для поиска редких ди-мюонных распадов

Прекрасная идентификация частиц позволяет подавлять фоновые процессы и исследовать множество каналов распада

$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$
 $MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3\%$

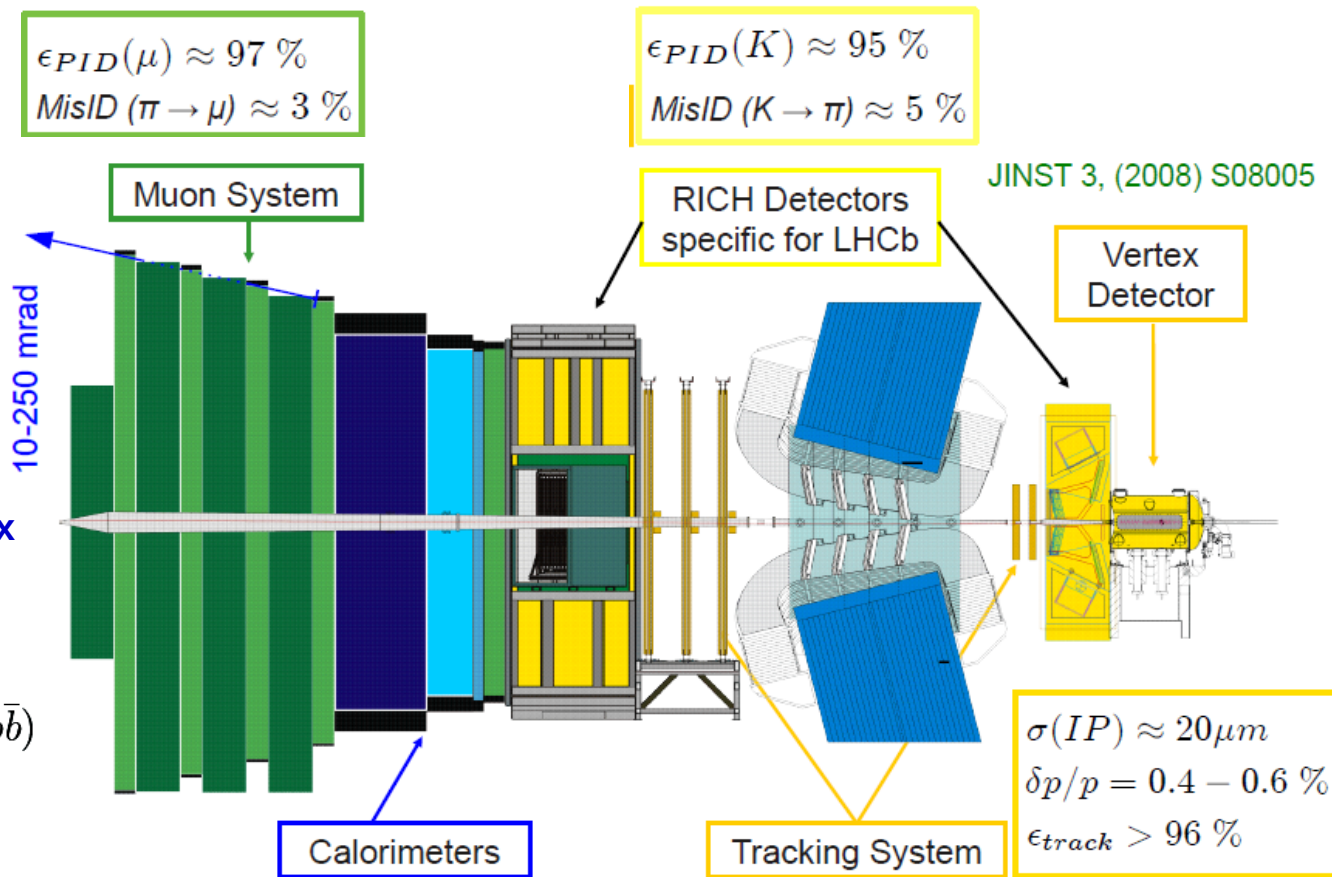
$\epsilon_{PID}(K) \approx 95\%$
 $MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5\%$

Подходящий акцептанс для рождения пар тяжелых кварков в pp -соударениях

$\sigma(b\bar{b}) = 75.3 \pm 5.4 \pm 13.0 \mu b$
 Phys.Lett.B694 (2010) 209-216

$\sigma(c\bar{c}) = 1419 \pm 12 \pm 116 \mu b \sim 20 \times \sigma(b\bar{b})$
 Largest charm samples in the world
 Nucl.Phys.B871 (2013) 1

(at $\sqrt{s} = 7$ TeV)



JINST 3, (2008) S08005

$\sigma(IP) \approx 20 \mu m$
 $\delta p/p = 0.4 - 0.6\%$
 $\epsilon_{track} > 96\%$

Подробнее в:

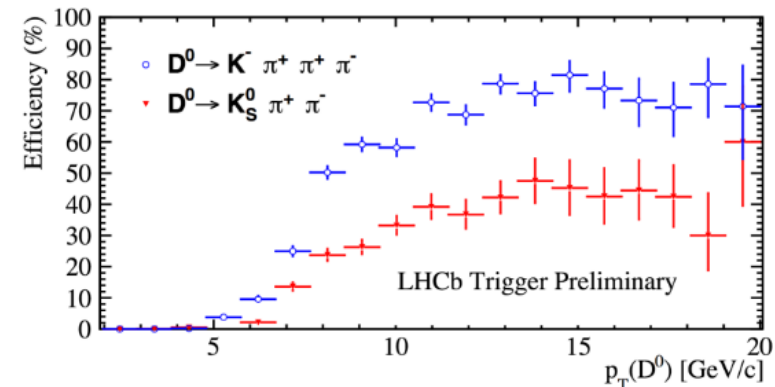
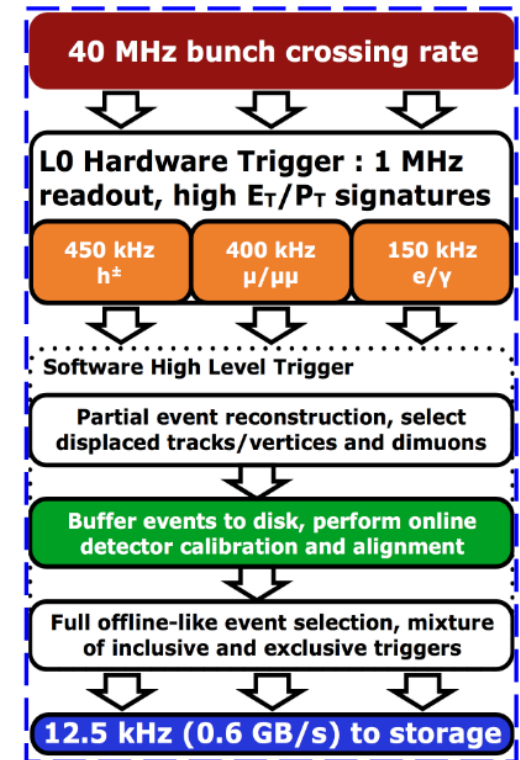
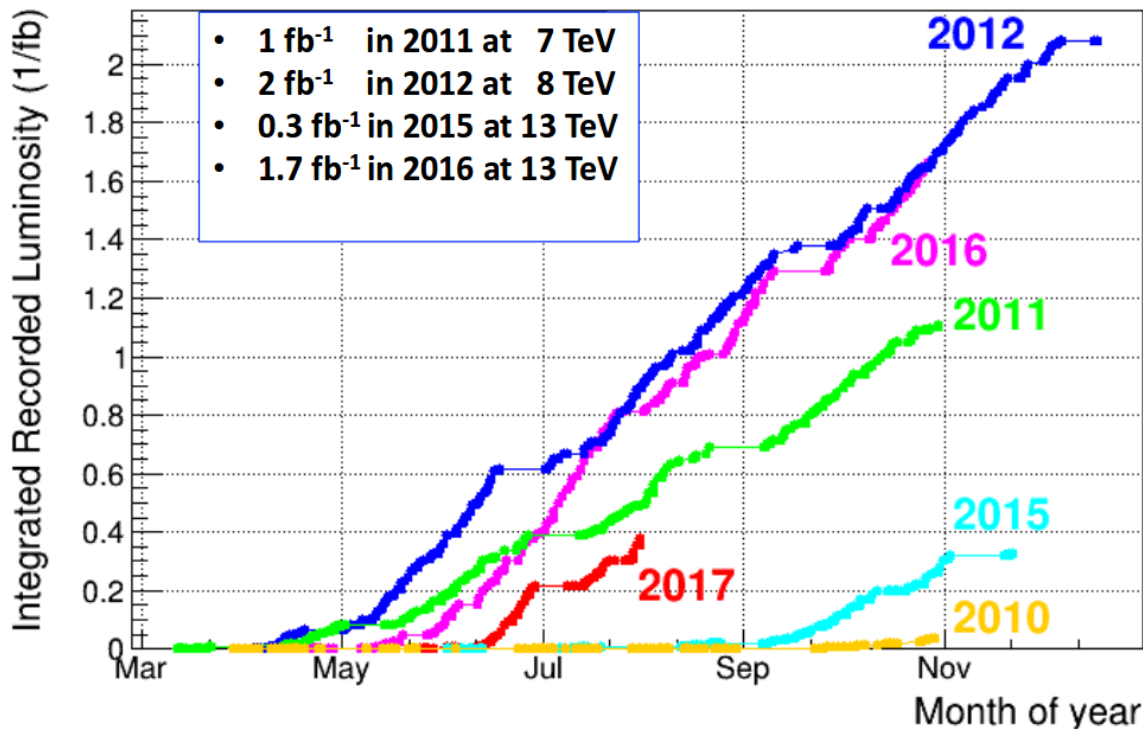
Int. J. Mod. Phys. A 30, 1530022 (2015)

Выделение вершин распадов и трекинг позволяют измерять распределения по времени жизни адрона / триггер для «слабых» распадов / разделение первичного и вторичного рождения

Светимость и триггер

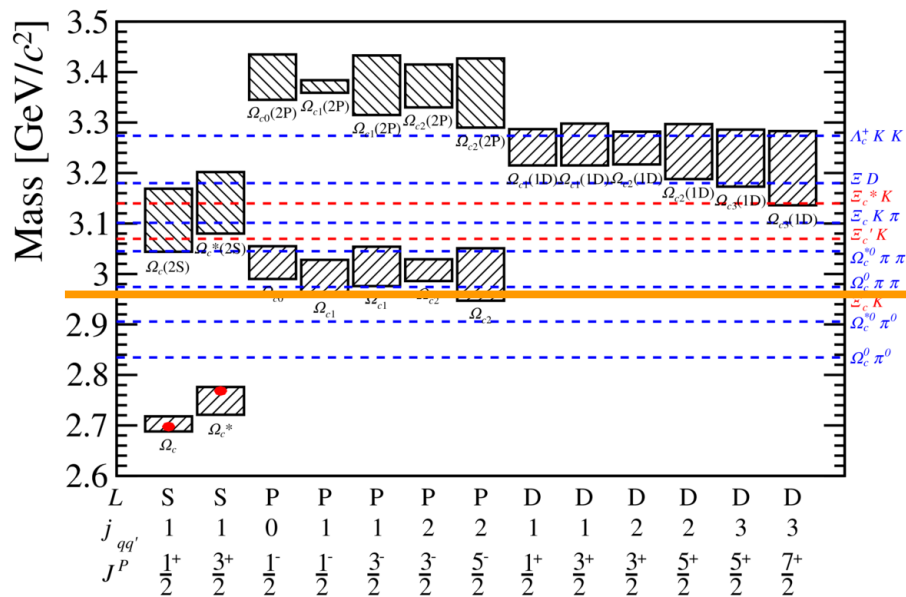
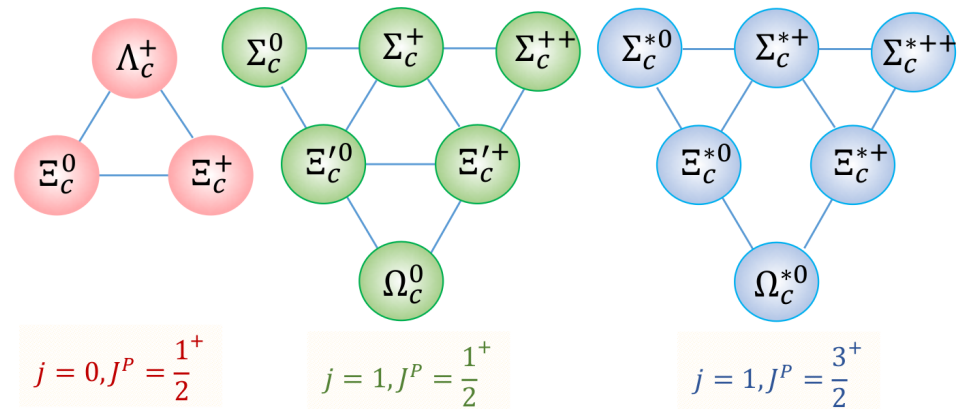
Comput. Phys. Commun. 208 35-42
Int. J. Mod. Phys. A 30, 1530022 (2015)

- Режим с постоянной светимостью
- Эффективный триггер (два этапа) для адронов
- Турбо-режим для Run-II [Части события-кандидата, прошедшие отбор триггера, сохраняются прямо на диск, высокая эффективность]

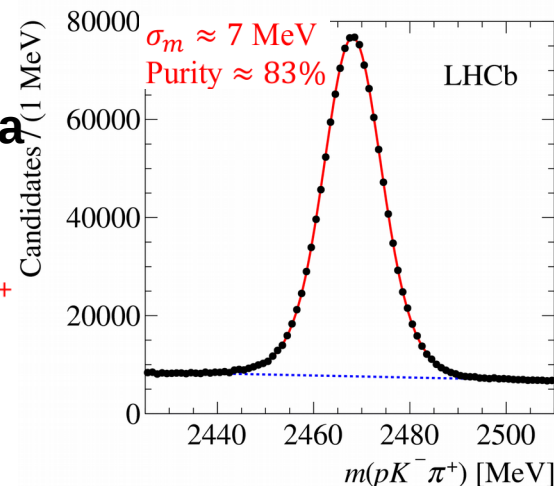
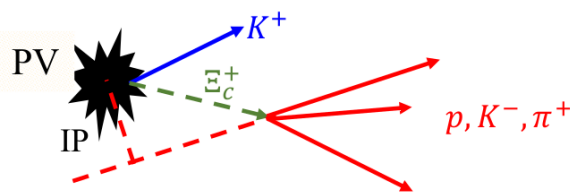


Спектроскопия: 5 новых Ω_c^*

- Барioni с $s = 1$ предсказываются из SU(3) мультиплетов: $3 \otimes 3 = \bar{3} \oplus 6$
- Все основные состояния равно как возбужденные состояния Λ_c , Σ_c и Ξ_c были обнаружены
- До LHCb не было данных об Ω_c^*
- Много возможных каналов:



- 3 fb^{-1} Run I + 0.3 fb^{-1} Run II pp соударения
- **Цепь распадов:** $\Omega_c^{*0} \rightarrow \Xi_c^+ K^-$, $\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$
- Ξ_c^+ : Кабиббо подавленный, но высокая эффективность регистрации на LHCb
- $\tau(\Xi_c^+) \approx 45 \text{ ps}$
- вторичная вершина



Ссылки на теоретические предсказания в конце доклада

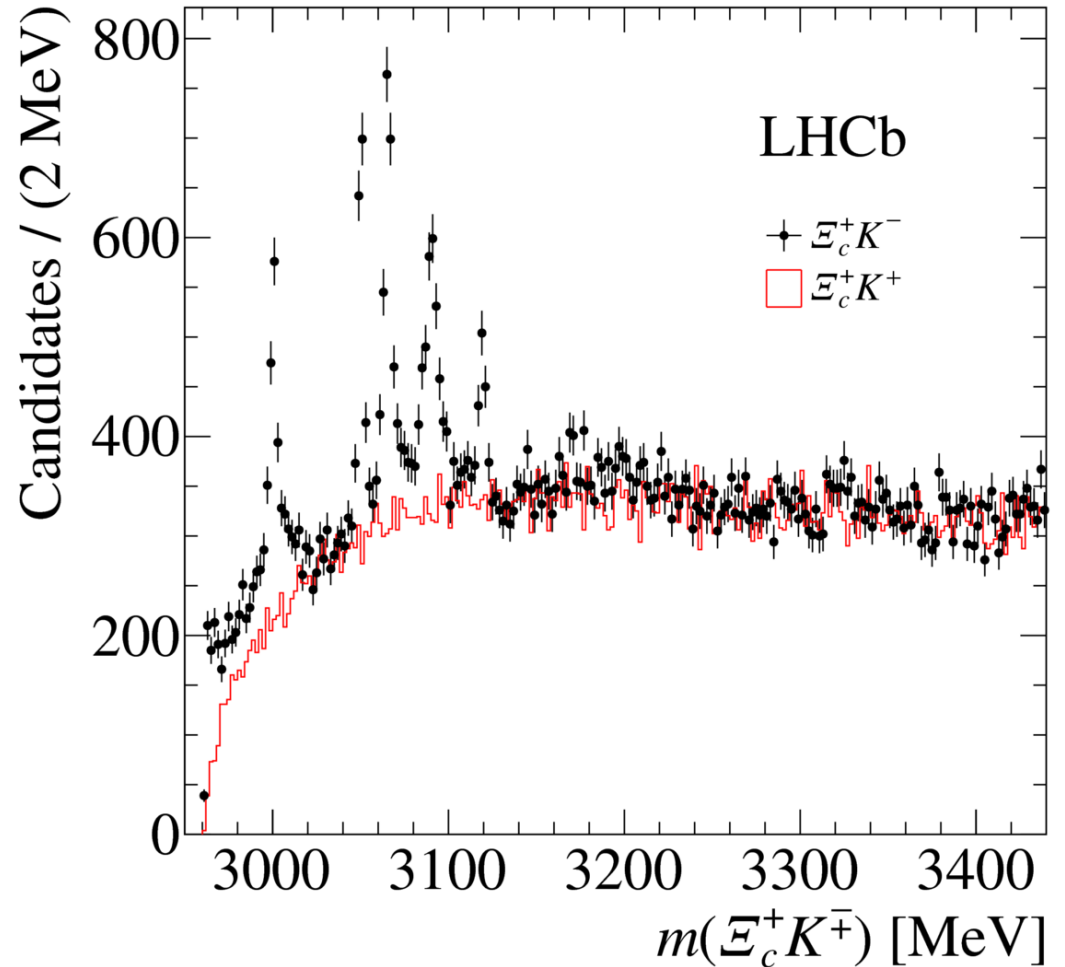
2017-10-10

Семинар ОФВЭ

PRL 118 (2017) 182001

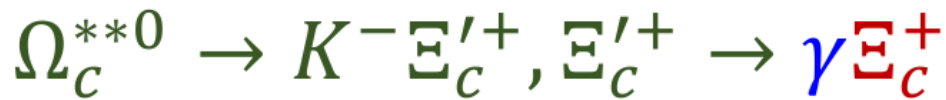
Спектроскопия: 5 новых Ω_c^*

- Ξ_c кандидат на совпадение с каоном
- Пять узких пиков для $\Xi_c^+ K^-$
- Нет структур для $\Xi_c^+ K^+$ инвариантной массы



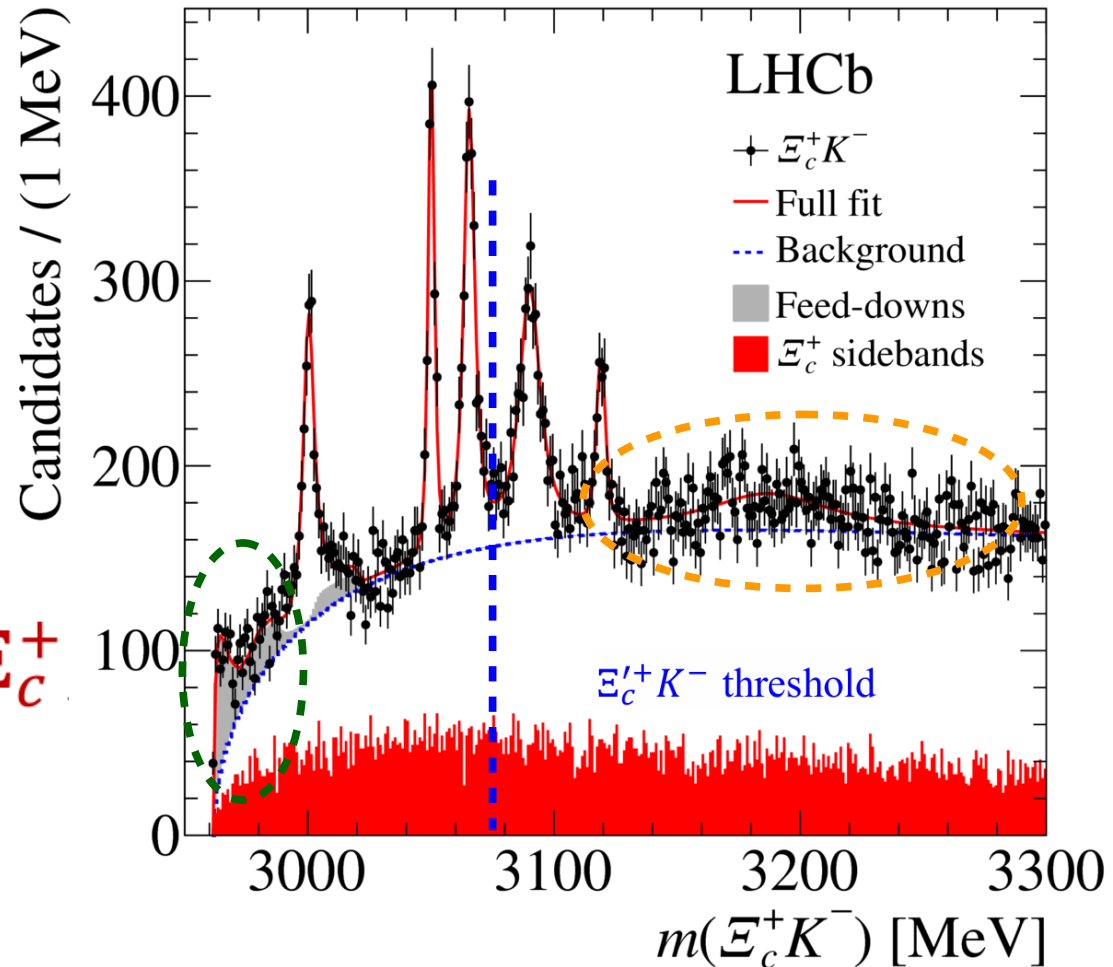
Спектроскопия: 5 новых Ω_c^*

- Ξ_c кандидат на совпадение с каоном
- Пять узких пиков для $\Xi_c^+ K^-$
- Нет структур для $\Xi_c^+ K^+$ инвариантной массы
- Нет пикующихся структур для фона слева и справа от Ξ_c кандидата
- Вклад от частично-реконструированных событий



Не регистрируется

- Качество описания улучшается, если добавить широкий резонанс или несколько перекрывающихся состояний в районе 3200 МэВ

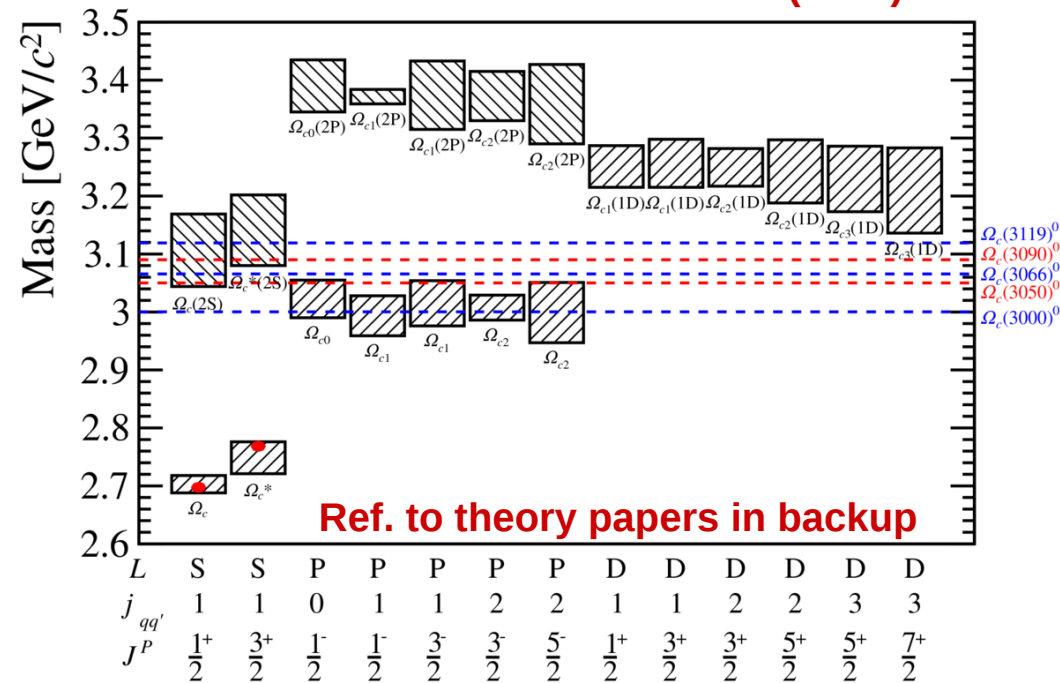


Спектроскопия: 5 новых Ω_c^*

PRL 118 (2017) 182001

Свойства наблюдаемых структур:

Resonance	Mass (MeV)	Γ (MeV)	$N_\sigma = \sqrt{\Delta\chi^2}$
$\Omega_c(3000)^0$	$3000.4 \pm 0.2 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$4.5 \pm 0.6 \pm 0.3$	20.4
$\Omega_c(3050)^0$	$3050.2 \pm 0.1 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$0.8 \pm 0.2 \pm 0.1$	20.4
		$< 1.2 \text{ MeV, 95\% CL}$	
$\Omega_c(3066)^0$	$3065.6 \pm 0.1 \pm 0.3^{+0.3}_{-0.5}$	$3.5 \pm 0.4 \pm 0.2$	23.9
$\Omega_c(3090)^0$	$3090.2 \pm 0.3 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}$	$8.7 \pm 1.0 \pm 0.8$	21.1
$\Omega_c(3119)^0$	$3119.1 \pm 0.3 \pm 0.9^{+0.3}_{-0.5}$	$1.1 \pm 0.8 \pm 0.4$	10.4
		$< 2.6 \text{ MeV, 95\% CL}$	
$\Omega_c(3188)^0$	$3188 \pm 5 \pm 13$	$60 \pm 15 \pm 11$	6.4



– Спектроскопия систем, содержащих тяжелый **c**-кварк и два кварка средней тяжести **S**

– Необходимо выявить спин-четность обнаруженных состояний

– Возможности: 1) Трёх-частичные распады

2) Анализ распадов более тяжелых барионов

Спектроскопия: открытие Ξ_{cc}^{++}

– Два SU(3) триплета предсказаны как части SU(4) барионного 20-плета

– Предсказания масс:

$$M(\Xi_{cc}^{+,++}) \text{ в } [3.5 - 3.7] \text{ ГэВ,}$$

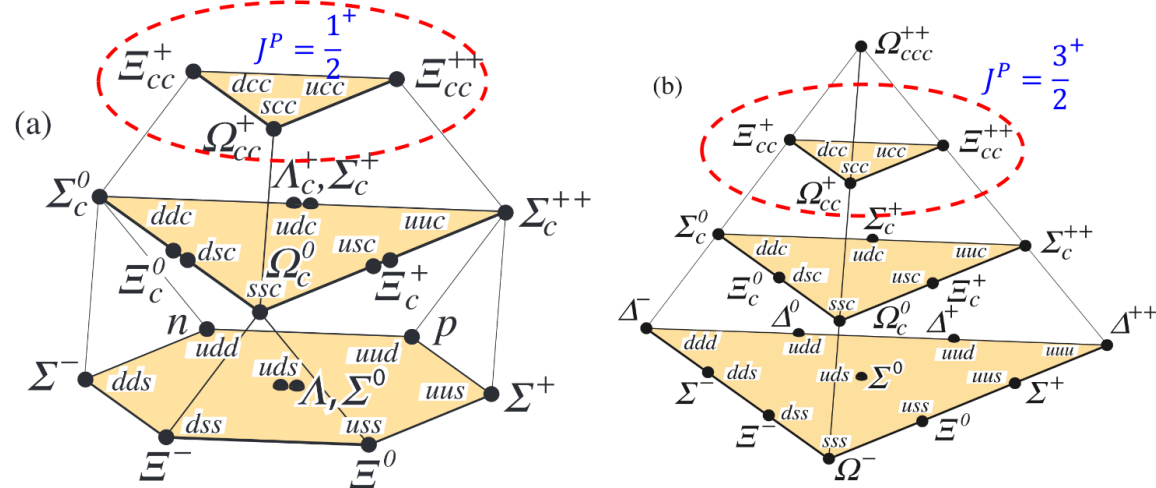
$$M(\Omega_{cc}) \approx M(\Xi_{cc}) + 0.1 \text{ ГэВ}$$

– Разница в несколько МэВ

предсказана для Ξ_{cc}^+ и Ξ_{cc}^{++}

Распады под действием слабых сил

Эл.м. и сильные распады

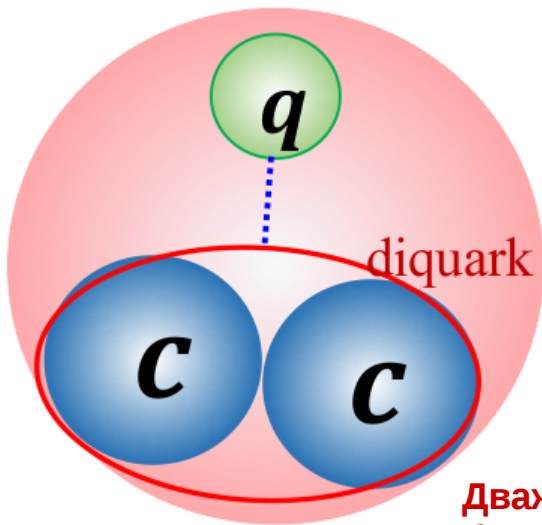


– КХД на решетках: $M(\Xi_{cc}^{+,++}) \approx 3.6 \text{ GeV}$,
 $M(\Omega_{cc}) \approx 3.7 \text{ GeV}$

– HQET: «ядро» из cc -дикварка

– Предсказания для времен жизни:

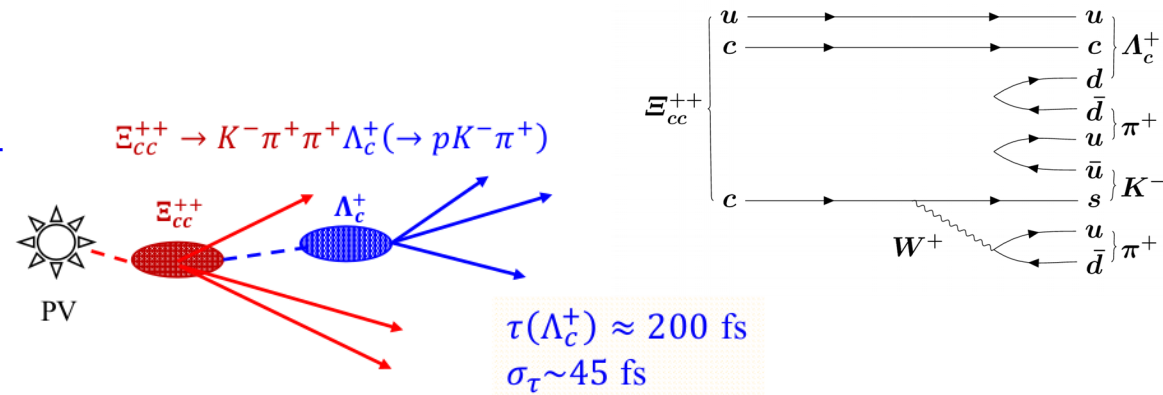
$$\tau(\Xi_{cc}^{++}) \in [200 - 700] \text{ fs} \quad \tau(\Xi_{cc}^{++}(ccu)) \gg \tau(\Xi_{cc}^+(ccd))$$



Дважды тяжелый барион похож на тяжелый Qq мезон

Спектроскопия: открытие Ξ_{cc}^{++}

- Run-II pp 1.7 fb^{-1} , Турбо-режим
- Run-I (2012) 2 fb^{-1} для проверки
- Ожидалось, до 10% рожденных Ξ_{cc}^{++} распадаются по этому каналу



Инвариантная масса для:

«Правильная» зарядовая

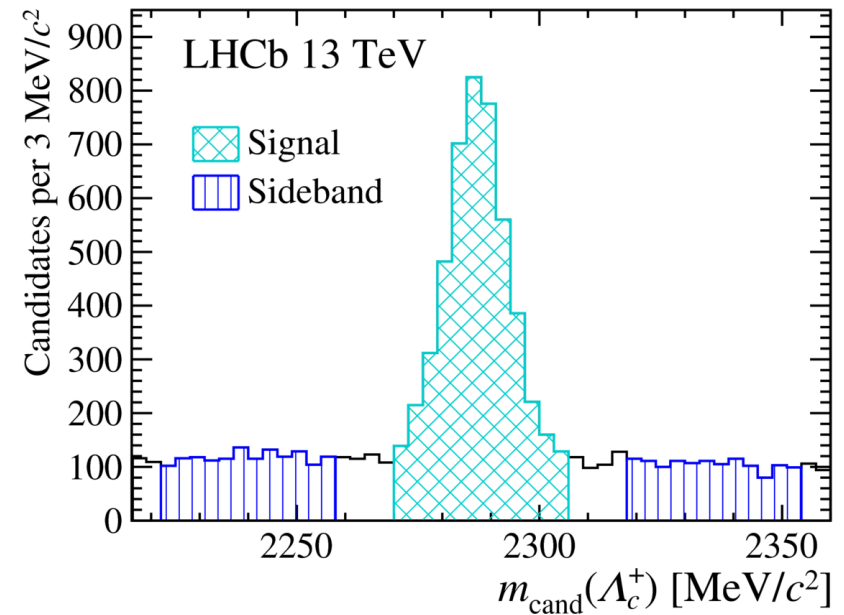
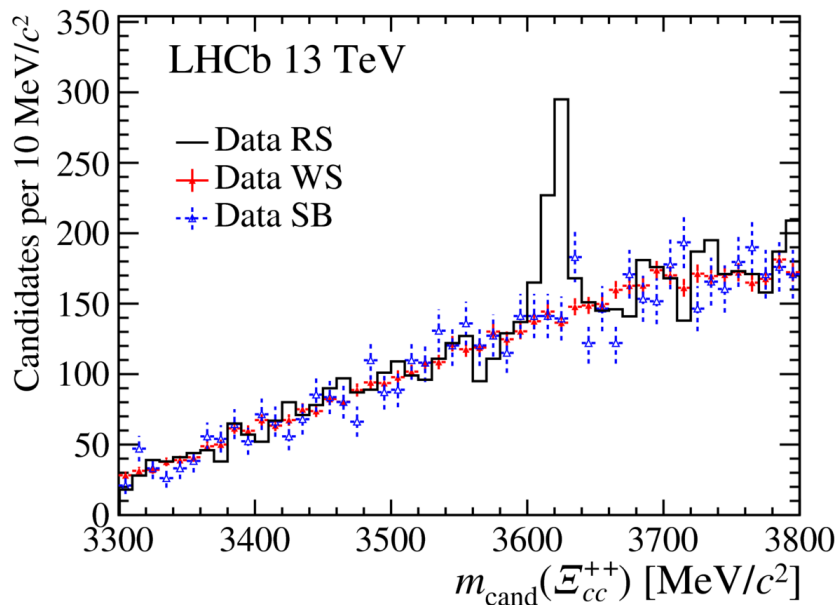
комбинация (RS):

$$\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$$

«Неправильная» (WS) :

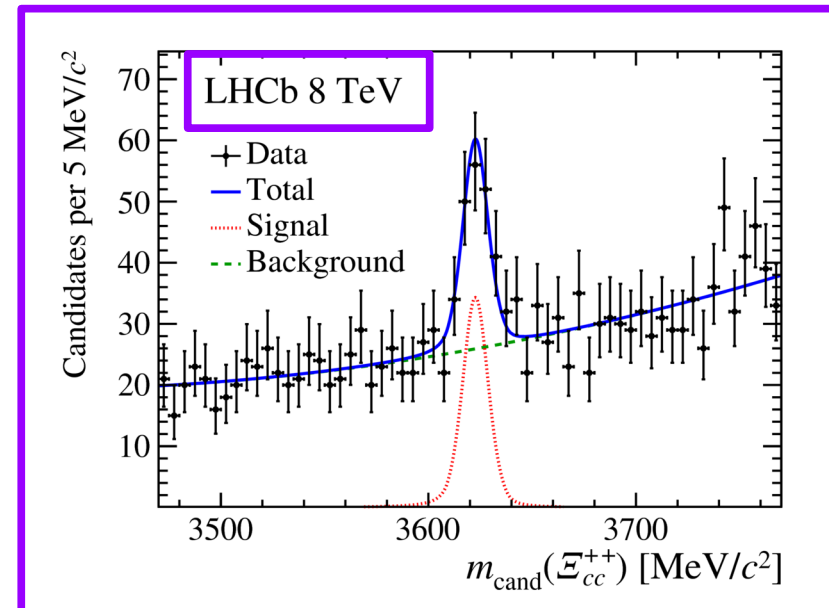
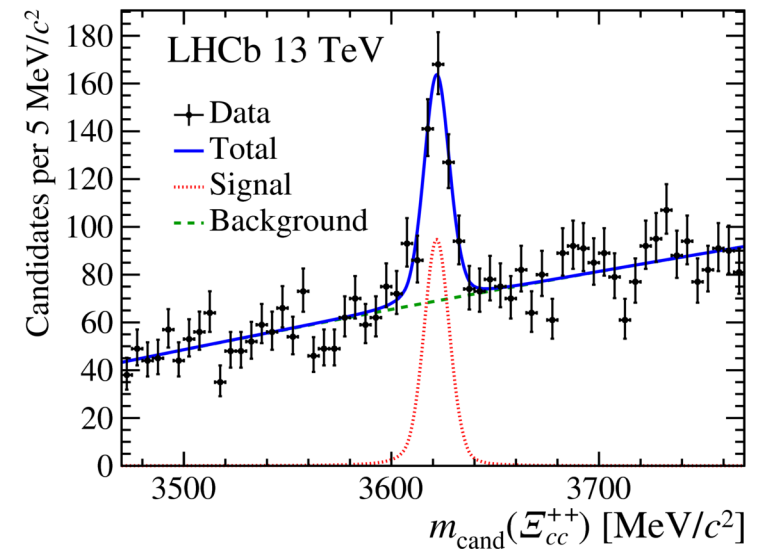
$$\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^-$$

Вне сигнала от Λ_c



Спектроскопия: открытие Ξ_{cc}^{++}

- Выход: 313 ± 33 события
- Разрешение по инв.массе: 6.6 ± 0.8 MeV
- Локальная значимость $> 12\sigma$
 - $m(\Xi_{cc}^{++}) = 3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+)$ MeV
 - $m(\Xi_{cc}^{++}) - m(\Lambda_c^+) = 1134.94 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst})$ MeV
- Точность доли-МэВ для первого наблюдения!
- Полученные значения лежат в интервале предсказаний (включая КХД на решетках)
- Сигнал для Run-I $> 7\sigma$ локальной значимости (113 ± 21 событий)

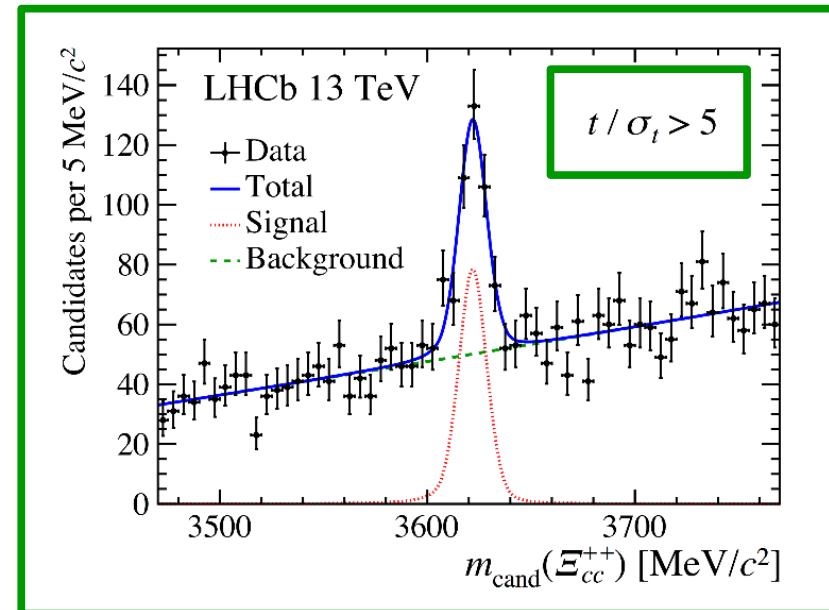
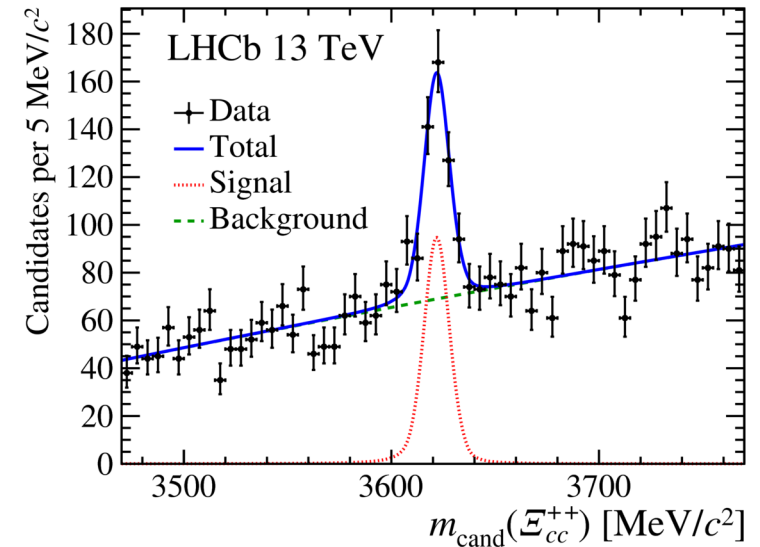


Спектроскопия: открытие Ξ_{cc}^{++}

- Выход: 313 ± 33 события
- Разрешение по инв.массе: 6.6 ± 0.8 MeV
- Локальная значимость $> 12\sigma$
 - $m(\Xi_{cc}^{++}) = 3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+)$ MeV
 - $m(\Xi_{cc}^{++}) - m(\Lambda_c^+) = 1134.94 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst})$ MeV
- Точность доли-МэВ для первого наблюдения!
- Полученные значения лежат в интервале предсказаний (включая КХД на решетках)
- Сигнал для Run-I $> 7\sigma$ локальной значимости (113 ± 21 событий)

– Пик сохраняется для событий, отобранных с условием $t > 5\sigma_t$

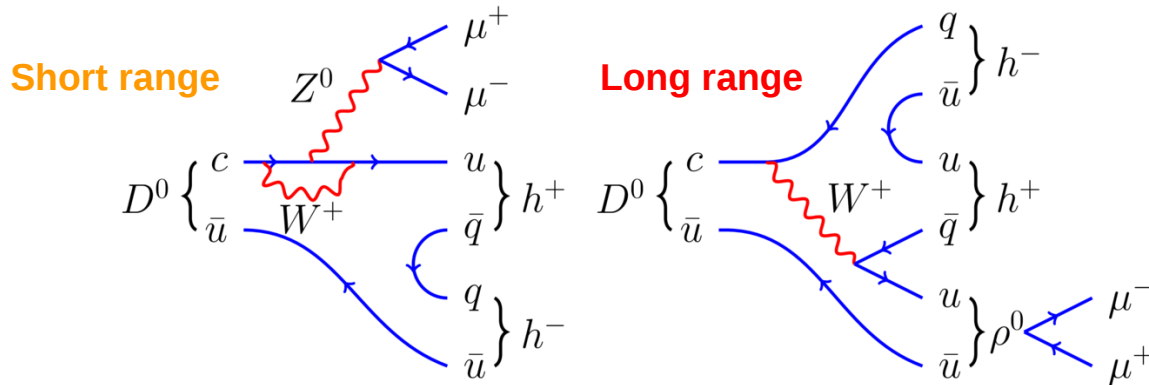
– Распад идет под действием слабых сил



Редкий распад: $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$ ($h = \pi, K$)

Цель: поиск Новой Физики в $c \rightarrow u$ переходах, проявляющихся на **коротких расстояниях**, кот. очень подавлены в СМ ($< 10^{-9}$)

Вклад (большие расстояния) от ρ, ω, ϕ распадающихся в $\mu^+ \mu^-$ пару (сложно предсказать «утечку» таких событий в соседние регионы поиска НФ)

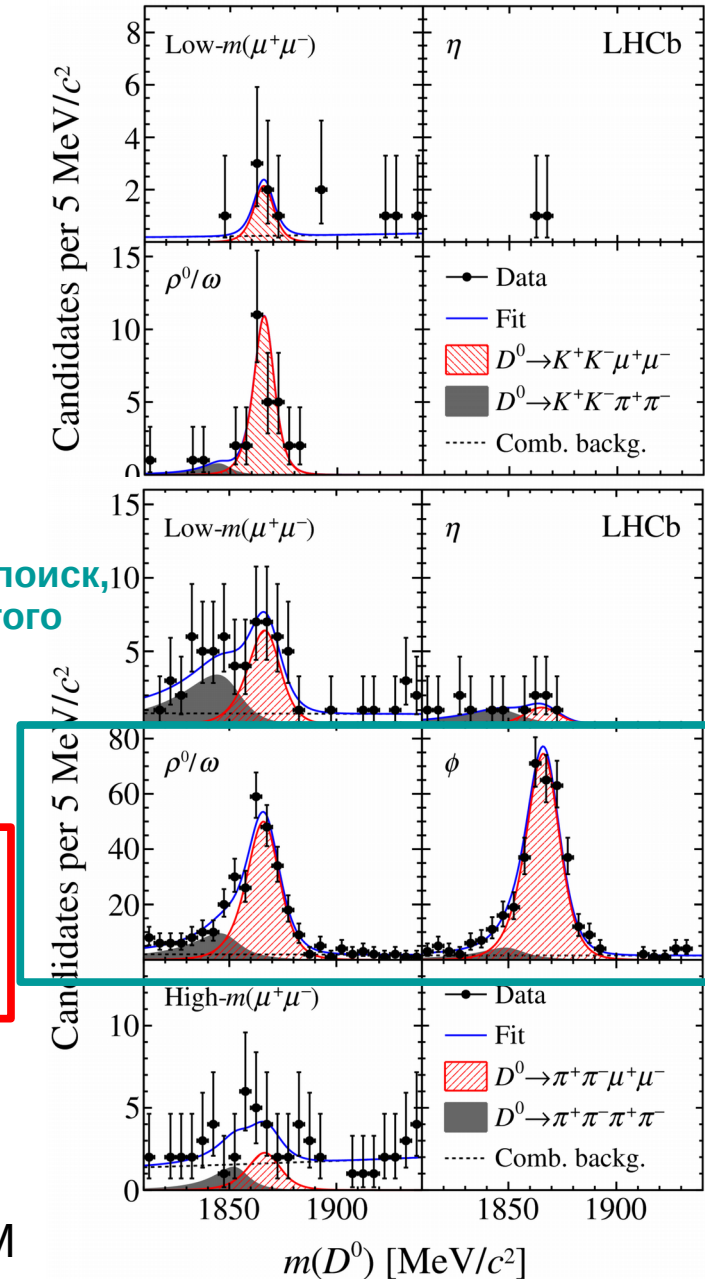


Слепой поиск, кроме этого региона

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

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

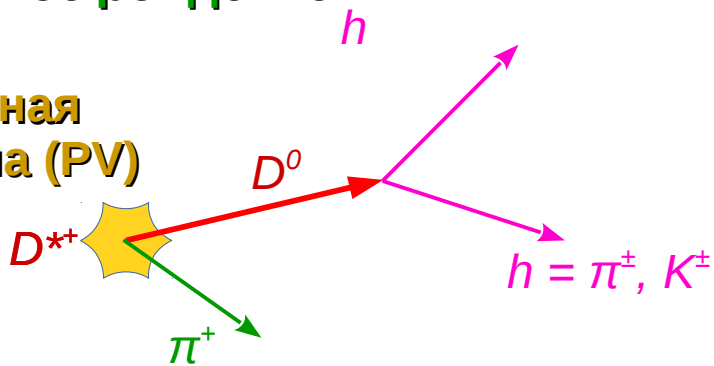
- Редчайший из когда-либо наблюдаемых распадов очарованных частиц
- Измеренная вероятность совпадает с предсказаниями СМ



Таггирование аромата

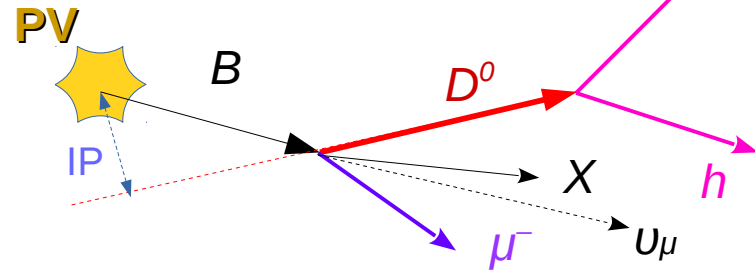
Первичное рождение

Первичная
вершина (PV)



Больше скорость

Вторичное рождение (полулептонный)



Выше эффективность

Смешивание & CP нарушение

Right sign (RS) $D^* / K^- \pi^+$: 1.7M

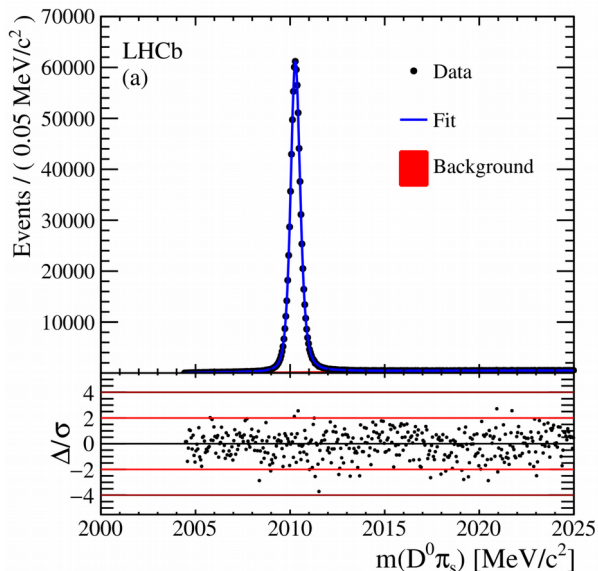
Wrong sign (WS) $D^* / K^+ \pi^-$: 6.7k

– $D^0 \rightarrow K\pi$ с **двойным** таггированием

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

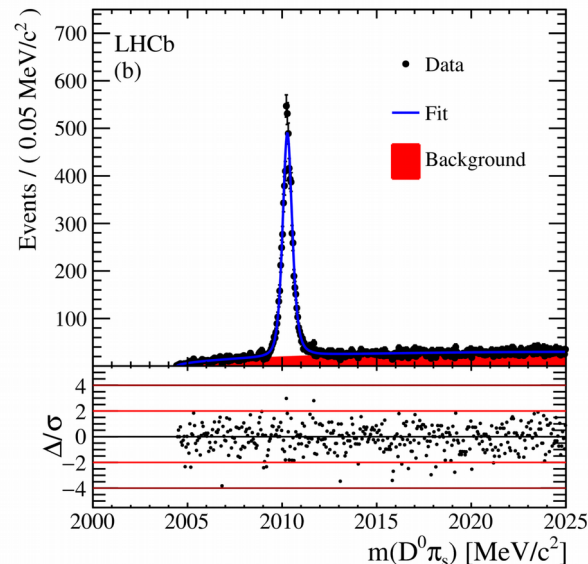
– WS когда [смешивание И CF] **или** [нет смешивания И дважды-Кабиббо-подавленный распад]

– Все 3 типа CPV (прямое, в смешивании, в интерференции)



2017-10-10

PR D95 (2017) 052004



Семинар ОФВЭ

Смешивание & CPV

– Т.к. параметры смешивания (x' и y') малы, отношение WS / RS может быть разложено в ряд по (t/τ) :

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

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

$x'^+ \neq x'^-$
 $y'^+ \neq y'^-$ \Rightarrow CP нарушение при смешивании и в интерференции

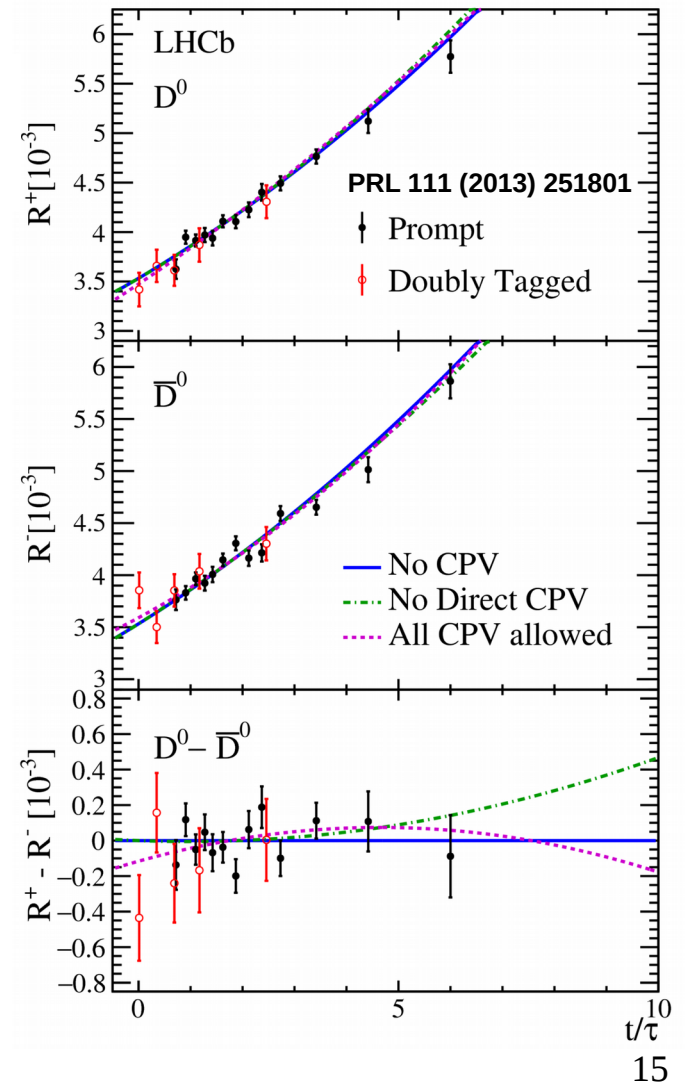
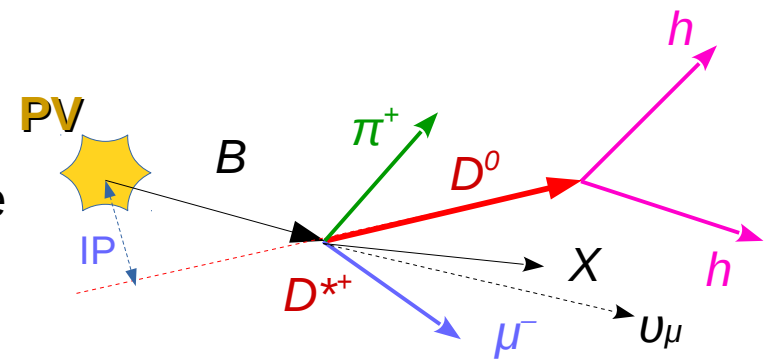
– Результат при включенном CPV вкладе

PR D95 (2017) 052004

Параметр	Двойной+Первичный	Первичный
$R_D^+ [10^{-3}]$	3.474 ± 0.081	3.545 ± 0.095
$(x'^+)^2 [10^{-4}]$	0.11 ± 0.65	0.49 ± 0.70
$y'^+ [10^{-3}]$	5.97 ± 1.25	5.1 ± 1.4
$R_D^- [10^{-3}]$	3.591 ± 0.081	3.591 ± 0.090
$(x'^-)^2 [10^{-4}]$	0.61 ± 0.61	0.60 ± 0.68
$y'^- [10^{-3}]$	4.50 ± 1.21	4.5 ± 1.4

– Высокое соотношение сигнал-шум и «дополняющие» покрытие по времени жизни позволяет улучшить точность на 10-20% процентов, добавив 1-2% данных

– Не обнаружено указаний на CP нарушения



Прямое CP нарушение

Наблюдаемая величина:

$$A_{\text{raw}} \equiv \frac{N(D^0 \rightarrow K^- K^+) - N(\bar{D}^0 \rightarrow K^- K^+)}{N(D^0 \rightarrow K^- K^+) + N(\bar{D}^0 \rightarrow K^- K^+)},$$

Для получения CPV-наблюдаемых необходима коррекция на асимметрию рождения и детектирования

Например для **первичного таггирования**:

$$A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) = A_{\text{raw}}(D^0 \rightarrow K^- K^+) - A_P(D^{*+}) - A_D(\pi_s^+),$$

Комбинация результатов для **первичного** и **полулептонного** таггирования (точность на уровне тысячных):

$$A_{CP}^{\text{comb}}(\pi^- \pi^+) = (0.07 \pm 0.14 (\text{stat}) \pm 0.11 (\text{syst}))\%,$$

$$A_{CP}^{\text{comb}}(K^- K^+) = (0.04 \pm 0.12 (\text{stat}) \pm 0.10 (\text{syst}))\%.$$

Другие каналы распада тоже исследуются:

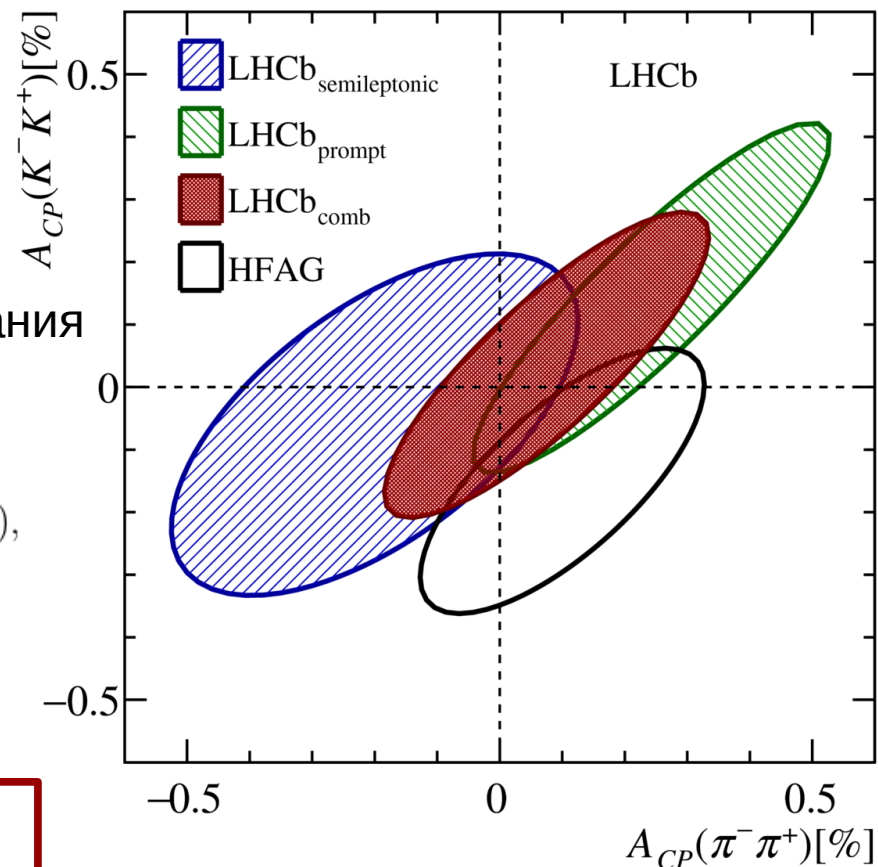
$$D^{\pm}(s) \rightarrow \eta' \pi^{\pm}$$

[PLB 771 (2017) 21]

$$D^0 \rightarrow 4\pi$$

[PLB 769 (2017) 345]

PLB 767 (2017) 177



Непрямое CP нарушение

PRL 118 (2017) 261803

Прямое CP нарушение, а также
параметры смешивания малы:

$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)}{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)} \simeq a_{\text{dir}}^f - A_{\Gamma} \frac{t}{\tau_D}$$

Прямое CPV ≈ 0

CPV при смешивании / интерференции
Ожидание < 0.005

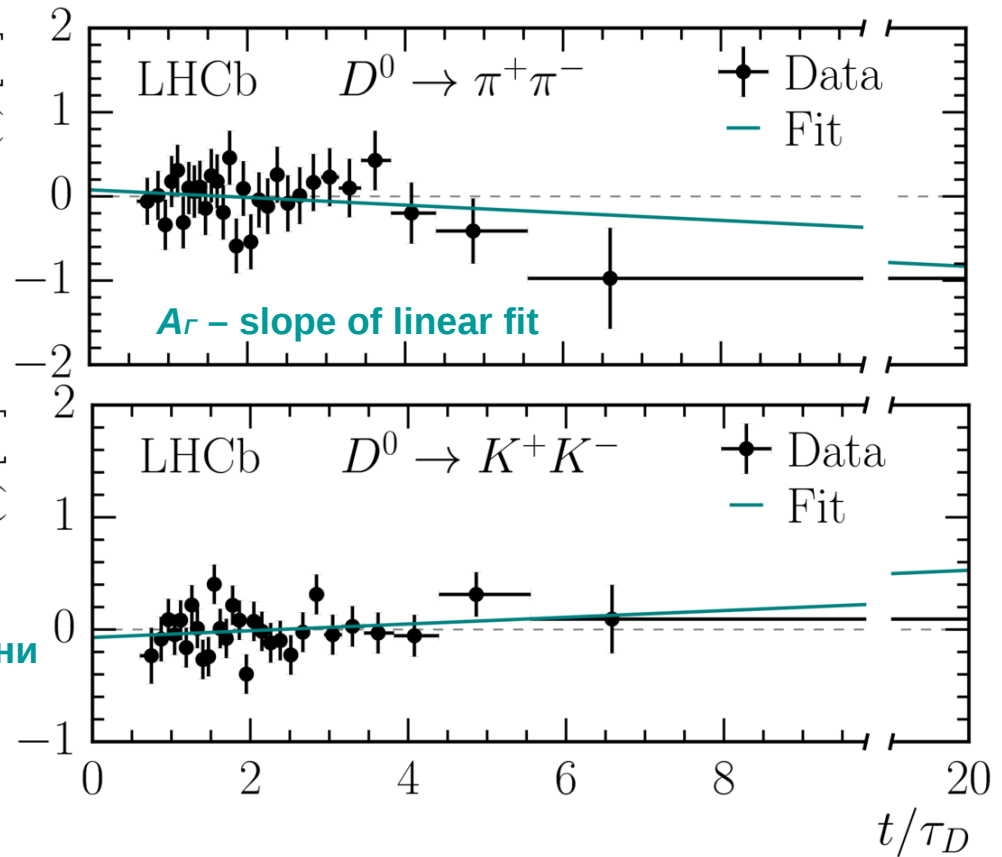
$$A_{\Gamma} \equiv \frac{\hat{\Gamma}_{D^0 \rightarrow f} - \hat{\Gamma}_{\bar{D}^0 \rightarrow f}}{\hat{\Gamma}_{D^0 \rightarrow f} + \hat{\Gamma}_{\bar{D}^0 \rightarrow f}}$$

Обратная величина
эффективному времени жизни

- Первичное D^* таггирование
- Распад $D \rightarrow K\pi$ использовался для получения данных об асимметриях рождения и детектирования

$$A_{\Gamma} = (-0.13 \pm 0.28 \pm 0.10) \times 10^{-3}$$

Лучшая точность параметров CPV для s :



Комбинация результатов с полулептонным таггированием [JHEP 04 (2015) 043]:

$$A_{\Gamma} = (-0.29 \pm 0.28) \times 10^{-3}$$

Заключение

- LHCb – лучшая (на сегодняшний день) установка для изучения очарованных адронов
- Огромная физическая программа, включая:
 - спектроскопия (5 новых Ω_c^* и Ξ_{cc}^{++}),
 - поиски НФ в редких распадах ($D \rightarrow hh\mu\mu$)
и CP нарушениях (WS / RS , time-int. A_{CP} , A_T)
- Ожидается много новых результатов (Run-I & II)
- Спасибо!

Backup

Mass Ξ_{cc}

S. S. Gershtein, V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and A. I. Onishchenko, Phys. Atom. Nucl. **63**, 274 (2000), [Yad. Fiz. 63, 334 (2000)], arXiv:hep-ph/9811212 [hep-ph].
S. S. Gershtein, V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and A. I. Onishchenko, Mod. Phys. Lett. **A14**, 135 (1999), arXiv:hep-ph/9807375 [hep-ph].
C. Itoh, T. Minamikawa, K. Miura, and T. Watanabe, Phys. Rev. **D61**, 057502 (2000).
S. S. Gershtein, V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and A. I. Onishchenko, Phys.Rev. **D62**, 054021 (2000).
K. Anikeev *et al.*, in *Workshop on B physics at the Tevatron: Run II and beyond, Batavia, Illinois, September 23-25, 1999* (2001) arXiv:hep-ph/0201071 [hep-ph].
V. Kiselev and A. Likhoded, Phys.Usp. **45**, 455 (2002), arXiv:hep-ph/0103169 [hep-ph].
D. Ebert, R. Faustov, V. Galkin, and A. Martynenko, Phys.Rev. **D66**, 014008 (2002), arXiv:hep-ph/0201217 [hep-ph].
D.-H. He, K. Qian, Y.-B. Ding, X.-Q. Li, and P.-N. Shen, Phys.Rev. **D70**, 094004 (2004), arXiv:hep-ph/0403301 [hep-ph].
C.-H. Chang, C.-F. Qiao, J.-X. Wang, and X.-G. Wu, Phys.Rev. **D73**, 094022 (2006), arXiv:hep-ph/0601032 [hep-ph].
W. Roberts and M. Pervin, Int.J.Mod.Phys. **A23**, 2817 (2008), arXiv:0711.2492 [nucl-th].
A. Valcarce, H. Garcilazo, and J. Vijande, Eur.Phys.J. **A37**, 217 (2008), arXiv:0807.2973 [hep-ph].
J.-R. Zhang and M.-Q. Huang, Phys.Rev. **D78**, 094007 (2008), arXiv:0810.5396 [hep-ph].

Z.-G. Wang, Eur.Phys.J. **A45**, 267 (2010), arXiv:1001.4693 [hep-ph].
M. Karliner and J. L. Rosner, Phys. Rev. **D90**, 094007 (2014), arXiv:1408.5877 [hep-ph].
K.-W. Wei, B. Chen, and X.-H. Guo, Phys. Rev. **D92**, 076008 (2015), arXiv:1503.05184 [hep-ph].
Z.-F. Sun and M. J. Vicente Vacas, Phys. Rev. **D93**, 094002 (2016), arXiv:1602.04714 [hep-ph].
C. Alexandrou and C. Kallidonis, (2017), arXiv:1704.02647 [hep-lat].
B. O. Kerbikov, M. I. Polikarpov, and L. V. Shevchenko, Nucl. Phys. **B331**, 19 (1990).
S. Fleck and J.-M. Richard, Prog. Theor. Phys. **82**, 760 (1989).
S. Chernyshev, M. A. Nowak, and I. Zahed, Phys. Rev. **D53**, 5176 (1996), arXiv:hep-ph/9510326 [hep-ph].
T. M. Aliev, K. Azizi, and M. Savcı, Nucl. Phys. **A895**, 59 (2012), arXiv:1205.2873 [hep-ph].
Z.-F. Sun, Z.-W. Liu, X. Liu, and S.-L. Zhu, Phys. Rev. **D91**, 094030 (2015), arXiv:1411.2117 [hep-ph].
N. Mathur, R. Lewis, and R. M. Woloshyn, Phys. Rev. **D66**, 014502 (2002), arXiv:hep-ph/0203253 [hep-ph].
Y. Namekawa *et al.* (PACS-CS collaboration), Phys. Rev. **D87**, 094512 (2013), arXiv:1301.4743 [hep-lat].
Z. S. Brown, W. Detmold, S. Meinel, and K. Orginos, Phys. Rev. **D90**, 094507 (2014), arXiv:1409.0497 [hep-lat].
M. Padmanath, R. G. Edwards, N. Mathur, and M. Peardon, Phys. Rev. **D91**, 094502 (2015), arXiv:1502.01845 [hep-lat].
P. Pérez-Rubio, S. Collins, and G. S. Bali, Phys. Rev. **D92**, 034504 (2015), arXiv:1503.08440 [hep-lat].
Y. Liu and I. Zahed, Phys. Rev. **D95**, 116012 (2017), arXiv:1704.03412 [hep-ph]; (2017), arXiv:1705.01397

Lifetimes Ξ_{cc}

K. Anikeev *et al.*, in *Workshop on B physics at the Tevatron: Run II and beyond, Batavia, Illinois, September 23-25, 1999* (2001) arXiv:hep-ph/0201071 [hep-ph].

V. Kiselev and A. Likhoded, *Phys.Usp.* **45**, 455 (2002), arXiv:hep-ph/0103169 [hep-ph].

M. Karliner and J. L. Rosner, *Phys. Rev.* **D90**, 094007 (2014), arXiv:1408.5877 [hep-ph].

S. Fleck and J.-M. Richard, *Prog. Theor. Phys.* **82**, 760 (1989).

B. Guberina, B. Melić, and H. Štefančić, *Eur.Phys.J.* **C9**, 213 (1999), arXiv:hep-ph/9901323 [hep-ph].

V. Kiselev, A. Likhoded, and A. Onishchenko, *Phys.Rev.* **D60**, 014007 (1999), arXiv:hep-ph/9807354 [hep-ph].

C.-H. Chang, T. Li, X.-Q. Li, and Y.-M. Wang, *Commun.Theor.Phys.* **49**, 993 (2008), arXiv:0704.0016 [hep-ph].

A. V. Berezhnoy and A. K. Likhoded, *Phys. Atom. Nucl.* **79**, 260 (2016), [*Yad. Fiz.* 79, 151 (2016)].

Theory references for Ω_c^*

D. Ebert, R. N. Faustov, and V. O. Galkin, *Masses of excited heavy baryons in the relativistic quark-diquark picture*, Phys. Lett. **B659** (2008) 612, arXiv:0705.2957.

W. Roberts and M. Pervin, *Heavy baryons in a quark model*, Int. J. Mod. Phys. **A23** (2008) 2817, arXiv:0711.2492.

H. Garcilazo, J. Vijande, and A. Valcarce, *Faddeev study of heavy-baryon spectroscopy*, J. Phys. **G34** (2007) 961, arXiv:hep-ph/0703257.

S. Migura, D. Merten, B. Metsch, and H.-R. Petry, *Charmed baryons in a relativistic quark model*, Eur. Phys. J. **A28** (2006) 41, arXiv:hep-ph/0602153.

D. Ebert, R. N. Faustov, and V. O. Galkin, *Spectroscopy and Regge trajectories of heavy baryons in the relativistic quark-diquark picture*, Phys. Rev. **D84** (2011) 014025, arXiv:1105.0583.

A. Valcarce, H. Garcilazo, and J. Vijande, *Towards an understanding of heavy baryon spectroscopy*, Eur. Phys. J. **A37** (2008) 217, arXiv:0807.2973.

Z. Shah, K. Thakkar, A. K. Rai, and P. C. Vinodkumar, *Mass spectra and Regge trajectories of Λ_c^+ , Σ_c^0 , Ξ_c^0 and Ω_c^0 baryons*, Chin. Phys. **C40** (2016) 123102, arXiv:1609.08464.

J. Vijande, A. Valcarce, T. F. Carames, and H. Garcilazo, *Heavy hadron spectroscopy: A quark model perspective*, Int. J. Mod. Phys. **E22** (2013) 1330011, arXiv:1212.4383.

Theory references for Ω_c^*

T. Yoshida *et al.*, *Spectrum of heavy baryons in the quark model*, Phys. Rev. **D92** (2015) 114029, [arXiv:1510.01067](#).

H.-X. Chen *et al.*, *P-wave charmed baryons from QCD sum rules*, Phys. Rev. **D91** (2015) 054034, [arXiv:1502.01103](#).

H.-X. Chen *et al.*, *D-wave charmed and bottomed baryons from QCD sum rules*, Phys. Rev. **D94** (2016) 114016, [arXiv:1611.02677](#).

G. Chiladze and A. F. Falk, *Phenomenology of new baryons with charm and strangeness*, Phys. Rev. **D56** (1997) R6738, [arXiv:hep-ph/9707507](#).

M. Padmanath, R. G. Edwards, N. Mathur, and M. Peardon, *Excited-state spectroscopy of singly, doubly and triply-charmed baryons from lattice QCD*, [arXiv:1311.4806](#).