



# Новые результаты ЛНСб по исследованию тетракварков

Дзюба Алексей / ЛБФ ОФВЭ ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ

22 сентября 2020, Семинар ОФВЭ

# План доклада

- История исследования тетракварков (с фокусом на  $\chi_{c1}(3872)$  )
- Первое измерение ширины распада  $\chi_{c1}(3872)$
- Модельно-независимые исследования и амплитудный анализ распада  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ . Обнаружение указаний на новые резонансы:  $X_0(2900)$  и  $X_1(2900)$ :
  - тетракварки с открытым очарованием
- Обнаружение структуры в спектре парного рождения  $J/\psi$ -мезонов, и её интерпретация как резонанса  $X(6900)$ 
  - $(cccc)$ -тетракварк

# «Экзотические» кварковые конфигурации

В своих пионерских работах по кварковой теории Гелл-Манн и Цвейг предположили наличие не только известных на тот момент типов адронов:

- мезонов ( $q\bar{q}$ ),
- барионов ( $qqq$ )

но и экзотических адронов:

- тетракварков ( $qqqq$ ),
- пентакварков ( $qqqqq$ )

## A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS \*

M. GELL-MANN

California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon  $b$  if we assign to the triplet  $t$  the following properties: spin  $\frac{1}{2}$ ,  $z = -\frac{1}{3}$ , and baryon number  $\frac{1}{3}$ . We then refer to the members  $u^{\frac{2}{3}}$ ,  $d^{-\frac{1}{3}}$ , and  $s^{-\frac{1}{3}}$  of the triplet as "quarks"  $q$  and the members of the anti-triplet as anti-quarks  $\bar{q}$ . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations  $(qqq)$ ,  $(qqq\bar{q})$ , etc., while mesons are made out of  $(q\bar{q})$ ,  $(q\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assumed that the lowest baryon configuration  $(qqq)$  gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while



# Обнаружение экзотики

2003 год заявления об обнаружении:

- $\Theta^+(1540)$  (до сих пор нет окончательного понимания)
- $\chi(3872)$ , Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 262001

2000-е Много кандидатов нейтральные тетракварки

- См. обзор Phys. Rept. 429 (2006) 243

2008 Belle, Phys. Rev. Lett. 100 142001, 2014 LHCb

- Заряженный тетракварк:  $Z(4430)^- \rightarrow \psi' \pi^-$

2015 LHCb, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 072001

- обнаружение пентакварков со скрытым очарованием в распаде:  $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$

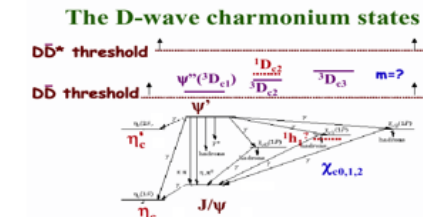
2017 LHCb, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 222001

- Узкая структура –  $P_c(4312)^+$
- Широкая структура, расщепляется на  $P_c(4440)^+$  и  $P_c(4457)^+$

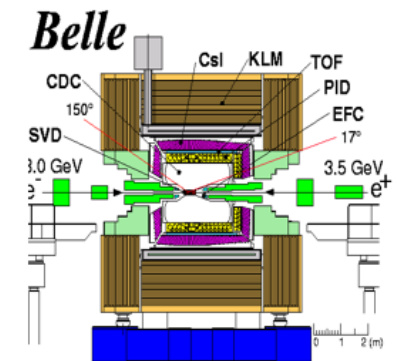
2020 LHCb: Only-charm / open-charm тетракварки?  
(тема этого семинара)

## Observation of a new narrow charmonium state in exclusive $B \rightarrow K \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays

S.K. Choi, Gyeongsang Univ. and H.Guler & S.L. Olsen, Univ. of Hawaii  
(For the Belle Collaboration)

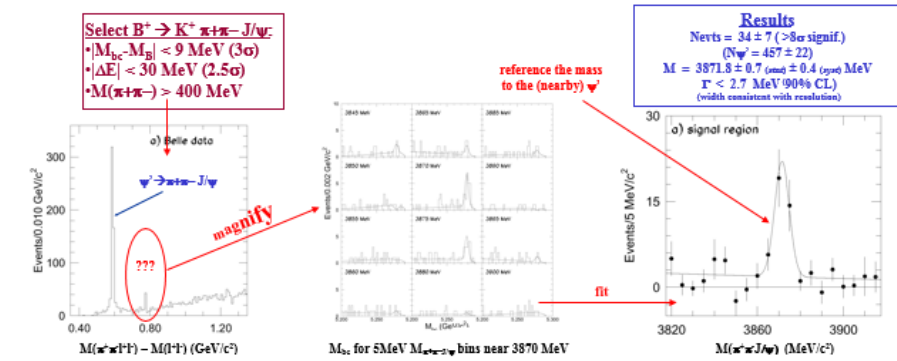


- The  $^3D_{c1}$  dominates the  $\psi(3770)$ , a  $^3D_{c1}$ - $\psi(2S)$  mixture
- $\psi \rightarrow D\bar{D}$  is OK  $\Rightarrow \psi$  is "wide" ( $\Gamma_{tot} \approx 24$  MeV)
- The  $^1D_{c2}$ ,  $^3D_{c2}$ , &  $^3D_{c3}$  have not been seen
- $^1,^3D_{c2} \rightarrow D\bar{D}$ . If  $M(^1,^3D_{c2}) < M_0 + M_{D^*}$ , they are *narrow*
- $^3D_{c2} \rightarrow ggg$  &  $^3D_{c2} \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$  would be important
- $^1D_{c2} \rightarrow ggg$  &  $^1D_{c2} \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$  allowed;  $^1D_{c2} \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$
- $^3D_{c3} \rightarrow D\bar{D}$  is OK; expected to be "wide."
- $B \rightarrow ^3D_{c2} \rightarrow K \pi^+ \pi^- J/\psi$  is a good  $^3D_{c2}$ -discovery reaction.



The Belle detector [1] runs at KEKB [2], an asymmetric energy  $e^+e^-$  collider operating at the Y(4S) ( $\sqrt{s} = 10.6$  GeV) with world-record-setting luminosity of  $L = 10^{34}$   $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

B-meson decays are well suited for charmonium searches [3]. In 2002, Belle found the  $\eta_c(2S)$  in  $B \rightarrow K K_S^0 \pi \pi$  decays [4]. Here we report the 1<sup>st</sup> observation of a narrow state in  $B \rightarrow K \pi^+ \pi^- J/\psi$  decays. This could either be the  $^3D_{c2}$ , a  $DD^*$  molecular state [5], or some mixture of the two.



### What is it?

We see a strong ( $8\sigma$ ) signal for a narrow charmonium state at  $M = 3781.8 \pm 0.7 \pm 0.4$  MeV. This overlaps, within ( $\sim 1$ MeV) errors, the lowest  $DD^*$  mass threshold:

$$M(D^0) + M(D^{*0}) = 3871.3 \pm 0.5 \text{ MeV [6]}$$

The narrow width and the decay to  $\pi^+\pi^- J/\psi$  correspond to expectations for the  $^3D_{c2}$  "missing" charmonium state, but the mass value is  $\sim 60$  MeV above the center-of-gravity of the  $1^3D$  triplet prediction by the Cornell [7] and the Buchmuller-Tye [8] potentials: both models give  $M_{CG}(1^3D) \approx 3810$  MeV. Moreover, the lowest member of the triplet, the  $1^3D_{c1}$ , has been identified as the dominant component of the  $\psi'$ :  $M = 3770$  MeV, which seems comfortably close to potential model expectations.

The close correspondence with the  $DD^*$  mass threshold is very suggestive of a loosely bound  $DD^*$  molecular-type multiquark state as proposed by De Rujula, Georgi and Glashow in 1977 [5].

### The $\pi^+\pi^-$ mass distribution

The  $\pi^+\pi^-$  invariant masses from  $\chi_c(3870) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  (Fig. a) concentrate near the upper kinematic limit, as is the case for  $\psi \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  decays (Fig. b). The shaded histogram in Fig. a is sideband-estimated background.

In the case of  $\chi_c(3870)$ , however, the boundary is in the  $\rho$  mass region. If it is, in fact,  $\chi_c(3870) \rightarrow \rho J/\psi$  decay, this would violate isospin for the case where  $\chi_c(3870)$  is the  $^3D_{c2}$ , in which case it should be strongly suppressed. With more data, we can probably distinguish whether or not the  $\pi^+\pi^-$  system is coming from  $\rho$  meson decay.

### Acknowledgement

This research was made possible by the strong and dedicated efforts of the KEKB team and the extraordinary performance of the KEKB storage ring.

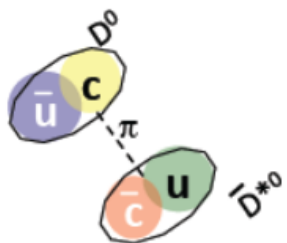
### References

1. A. Abashian et al. (Belle), Nucl. Instr. & Meth. A479, 117 (2002).
2. S. Kurokawa and E. Kikutani (KEKB), Nucl. Instr. Meth. A499, 1 (2002).
3. E. Eichten, K. Lane and C. Quigg, Phys. Rev. Lett. 89, 162002 (2002).
4. S.K. Choi et al. (Belle), Phys. Rev. Lett. 89, 102001 (2002).
5. A. De Rujula, M. Georgi and S.L. Glashow, Phys. Rev. Lett. 38, 317 (1977).
6. D.E. Groom et al. (PDG), Eur. Phys. Jour. C15, 1 (2002).
7. E. Eichten, K. Gottfried, T. Kinoshita, K. Lane & T.M. Yan, Phys. Rev. D21, 203 (1980).
8. W. Buchmuller and S.M.M. Tye, Phys. Rev. D24, 132 (1981).

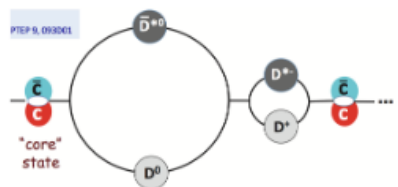
# Тетракварки

Некоторые, но далеко не все, тетракварки (и пентакварки) обнаружены на пороге рождения систем с открытым очарованием  $\rightarrow$

Возможная интерпретация  $X(3872)$



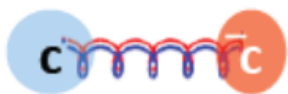
molecules?



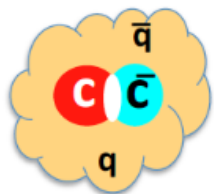
coupled channel system?



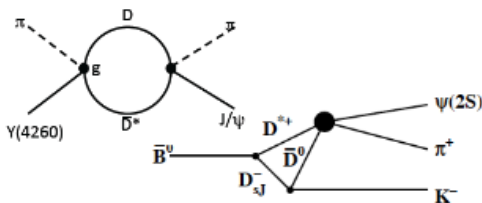
QCD tetraquarks?



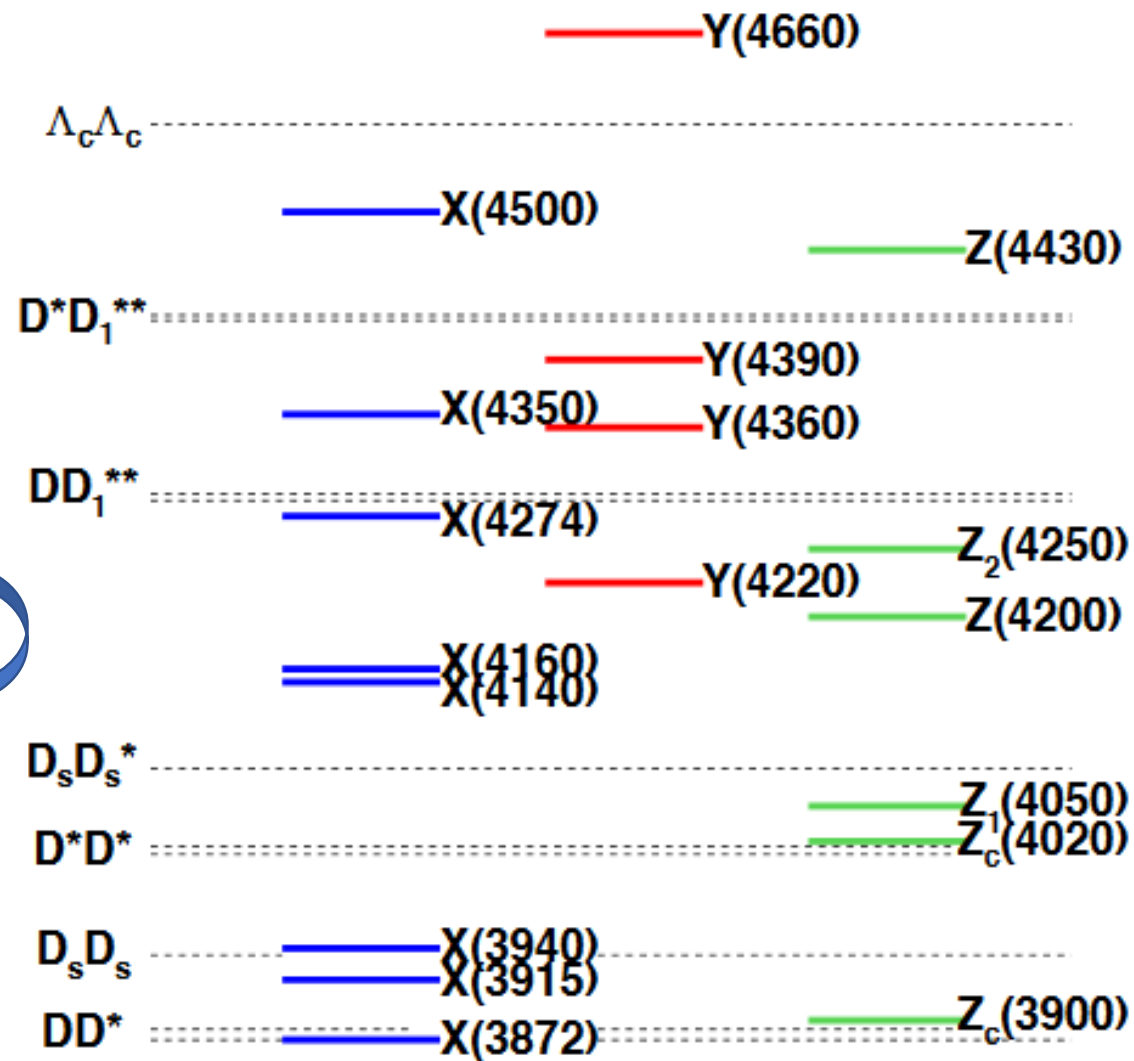
QCD hybrids?



hadrocharmonium?



threshold effects?

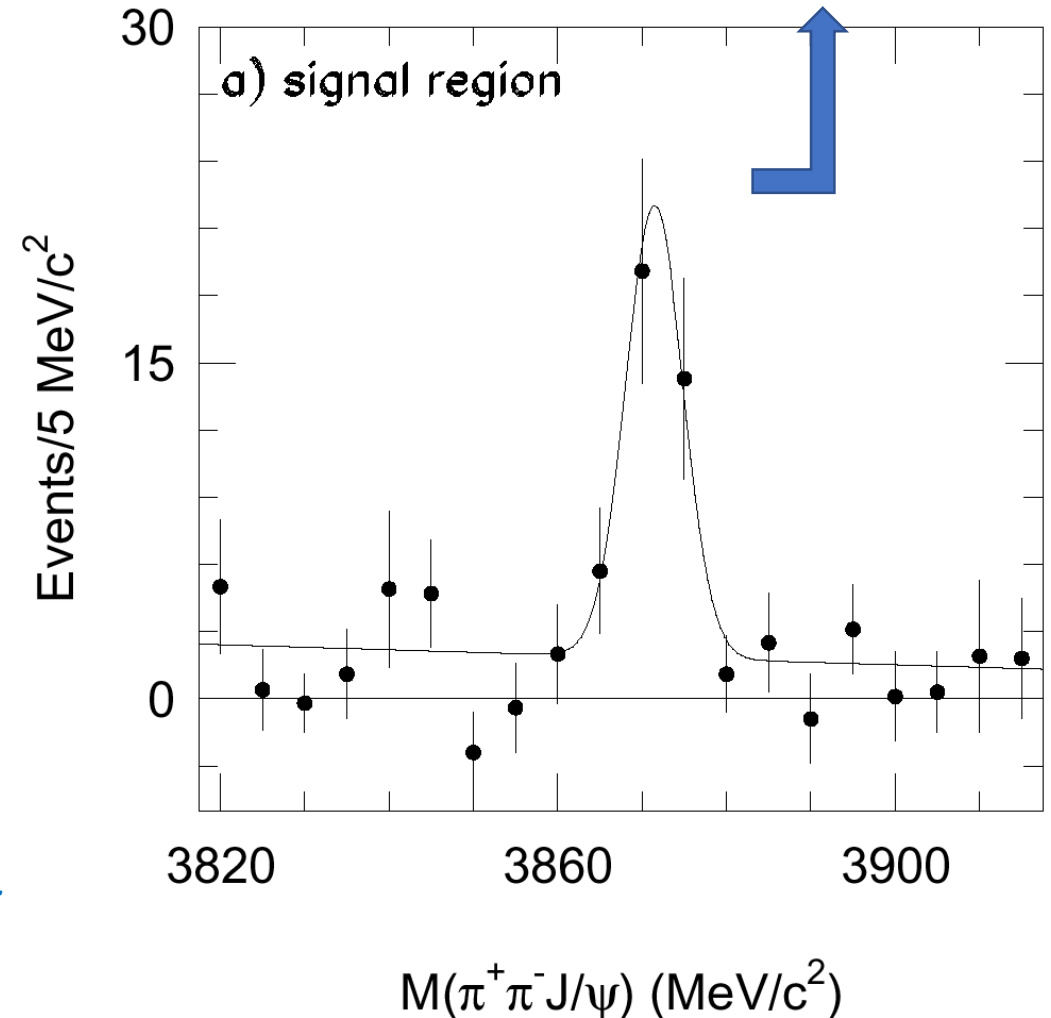


С. Ольсен, PhiPsi-19 <https://indico.inp.nsk.su/event/15/contributions/642/>

# История исследования $\chi_{c1}(3872)$

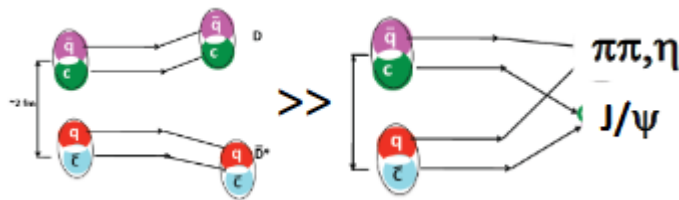
- Открыт Belle (подтвержден измерениями CDF, D0, BaBar)
- Обнаружен не только в распадах прелестных частиц, но и интенсивно рождающимся при взаимодействии ультра-релятивистских адронов (Tevatron, LHC)
- Квантовые числа ( $J^{PC}=1^{++}$ , т.е.  $\chi_{c1}(3872)$ ) определены LHCb (Phys. Rev. Lett. 110, 222001) в цепочке распадов  $B^+ \rightarrow X(3872)K^+$ ,  $X(3872) \rightarrow \rho^0 J/\psi$ ,  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  и  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Results
$N_{\psi'} = 34 \pm 7$ ( $>8\sigma$ signif.)
$(N_{\psi'} = 457 \pm 22)$
$M = 3871.8 \pm 0.7$ (stat) $\pm 0.4$ (syst) MeV
$\Gamma < 2.7$ MeV (90% CL)
(width consistent with resolution)

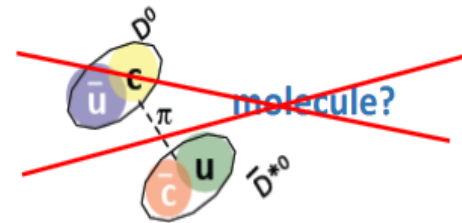


# Теоретическая интерпретация $\chi_{c1}(3872)$

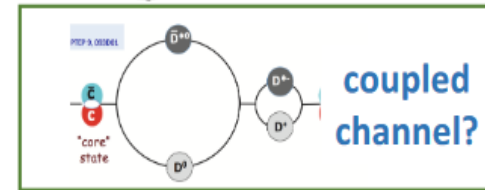
- Слишком узкий резонанс для чармониевой интерпретации
  - 127 MeV в  $^3P_0$  модели и 16 MeV в  $\rho K\rho$
- Трудности чисто молекулярной интерпретации:
  - $d_{\text{mss}}^{-1} \approx a^{-1} = \sqrt{2\mu|BE|} < m_\pi \Rightarrow BE < \frac{m_\pi^2}{2\mu} \approx 10 \text{ MeV (for } 2\mu=m_D)$
  - Мезоны-конституенты должны иметь меньшую ширину, чем  $\Gamma_{\text{молекулы}}$



- **Необходимы измерение ширины!**
- **$\Gamma < 1,2 \text{ МэВ (90\% CL) Belle}$**



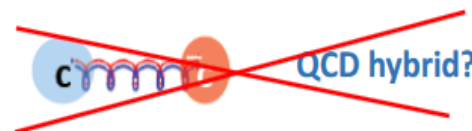
Produced promptly in HE pp collisions  
no isospin-related states are seen



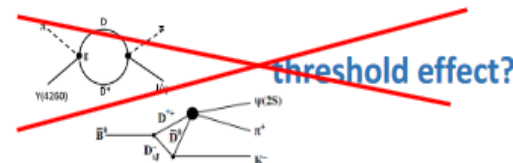
good description PTEP 9, 093D01 (2013)



PRD 71 014028 (2005)  
no  $1^{++}$  partner states seen



mass is 500 MeV below  
LQCD's lightest  $1^{++}$  hybrid



width is too narrow; mass  
too close to threshold

# ЛHCb: Найти \ Идентифицировать \ Измерить

Выделение первичных и вторичных вершины / распределение по времени распада / первичные и вторичные очарованные адроны

Точка взаимодействия протонов

Идентификация частиц – отбор каонов

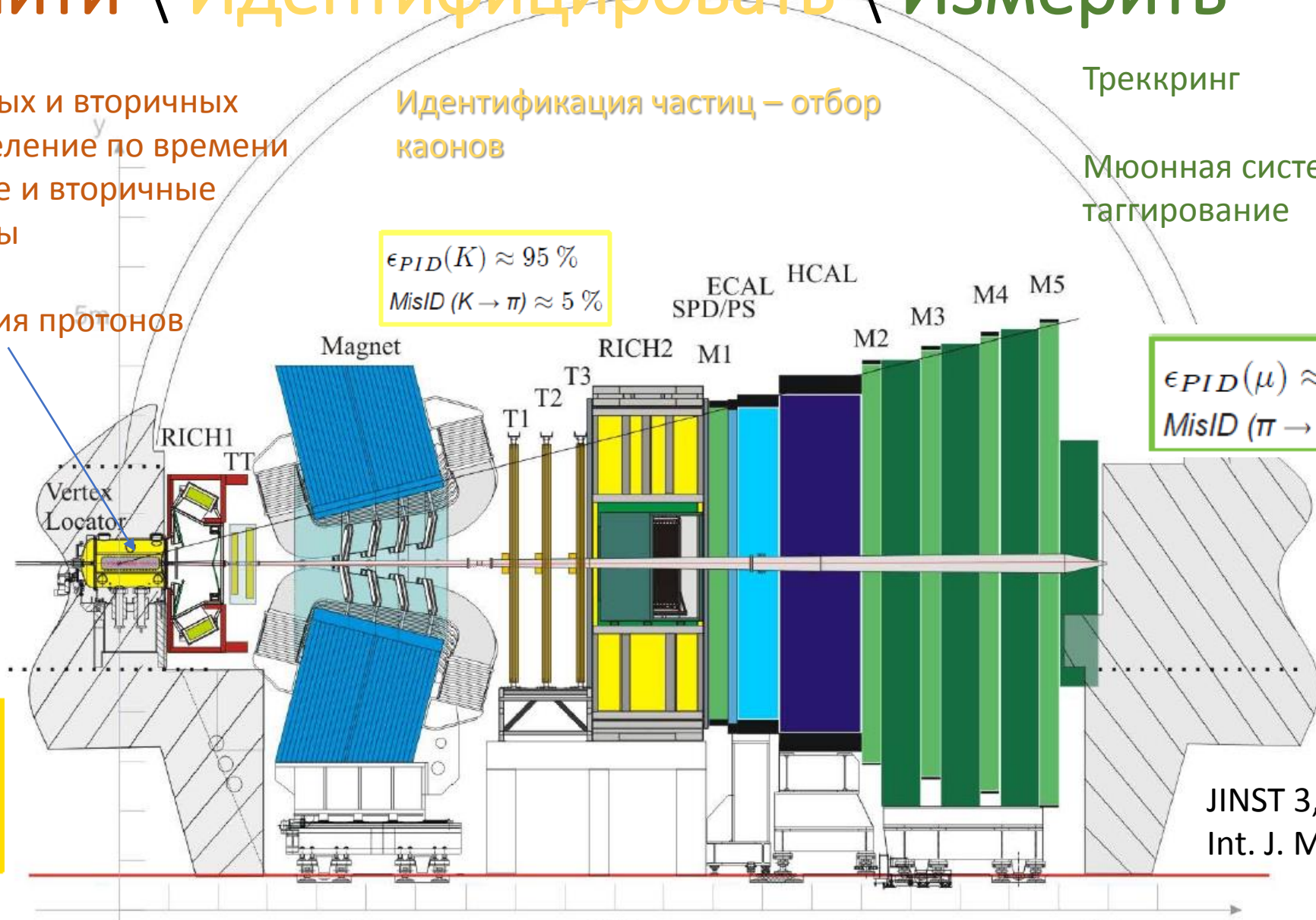
Треккинг

Мюонная система – таггирование

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

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

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



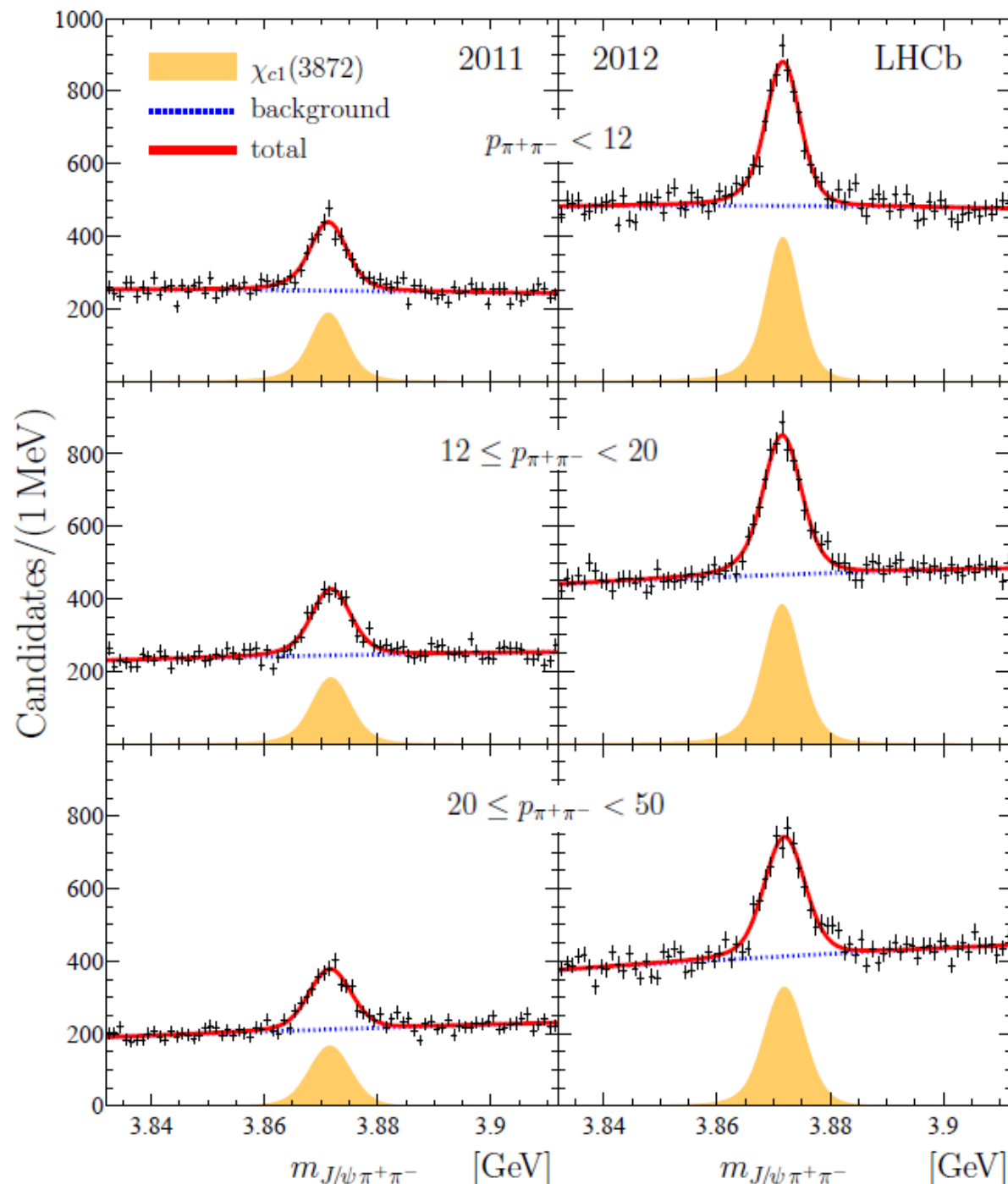
JINST 3, (2008) S08005;  
 Int. J. Mod. Phys. A 30,  
 (2015) 153022



Измерение параметров  $\chi_{c1}(3872)$

# Инклюзивные измерения

- [arXiv:2005.13419](https://arxiv.org/abs/2005.13419)  $L_{\text{int}} = 3 \text{ fb}^{-1}$
- $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$  канал
- События с распадом  $b$ -адронов
  - События-кандидаты должны формировать вторичную вершину (мягкий предотбор)
- Финальный отбор с применением *нейронных сетей*
  - 12 переменных, чувствительных к наличию вторичной вершины
- 15630 событий кандидатов
- Для контроля - отбор распадов  $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$



# Брейт-Вигнеровская ширина

- СИГНАЛ: Свертка распределения Брейта-Вигнера с функцией разрешения (несколько моделей)
  - Основная систематика для  $\Gamma_{\text{BW}}$  из варирования функции разрешения
- ФОН: гладкое распределение (+несколько альтернативных моделей)

$$(m_{J/\psi \pi^+ \pi^-} - m_{J/\psi} - 2m_{\pi^\pm})^{c_0} e^{-m_{J/\psi \pi^+ \pi^-}/c_1}$$

- Следует быть осторожным с интерпретацией, т.к.

$$|m_{D^0} + m_{D^{*0}} - m_{\chi_{c1}(3872)}| < \Gamma_{\text{BW}}$$

Year	$p_{\pi^+\pi^-}$ [GeV]	$\Delta m$ [MeV]	$\Gamma_{\text{BW}}$ [MeV]
2011	$p_{\pi^+\pi^-} < 12$	185.32 ± 0.20	1.88 ± 0.74
2011	$12 \leq p_{\pi^+\pi^-} < 20$	185.78 ± 0.21	1.53 ± 0.74
2011	$20 \leq p_{\pi^+\pi^-} < 50$	185.46 ± 0.21	1.03 ± 0.82
2012	$p_{\pi^+\pi^-} < 12$	185.63 ± 0.13	1.23 ± 0.47
2012	$12 \leq p_{\pi^+\pi^-} < 20$	185.47 ± 0.14	1.48 ± 0.48
2012	$20 \leq p_{\pi^+\pi^-} < 50$	185.81 ± 0.15	1.15 ± 0.57

Total	185.588 ± 0.067	1.39 ± 0.24
-------	-----------------	-------------

Source	Uncertainty [MeV]
Momentum scale	0.066
Radiative corrections	0.014
Fitted $\psi(2S)$ mass uncertainty	0.007
Signal + background model	0.002
Sum in quadrature	0.068

$$m_{\chi_{c1}(3872)} = 3871.695 \pm 0.067 \pm 0.068 \pm 0.010 \text{ MeV},$$

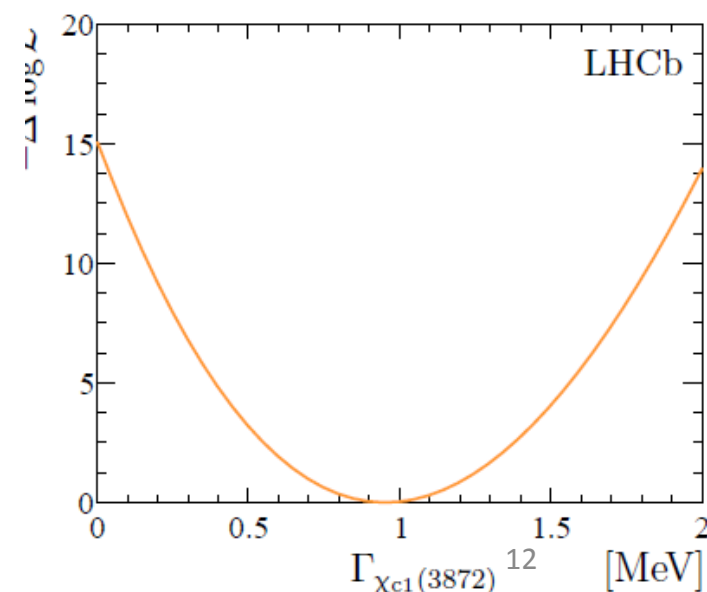
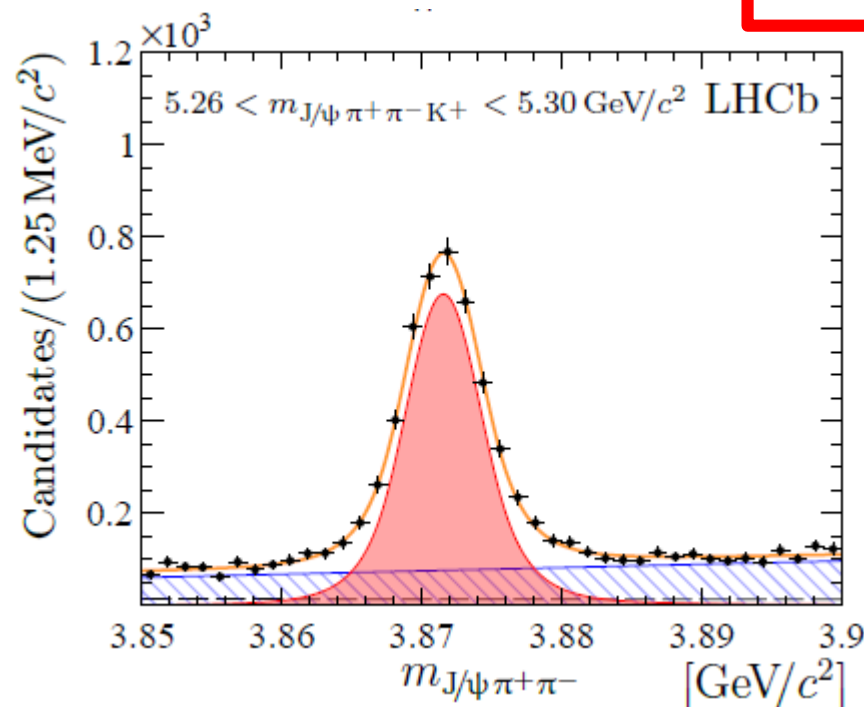
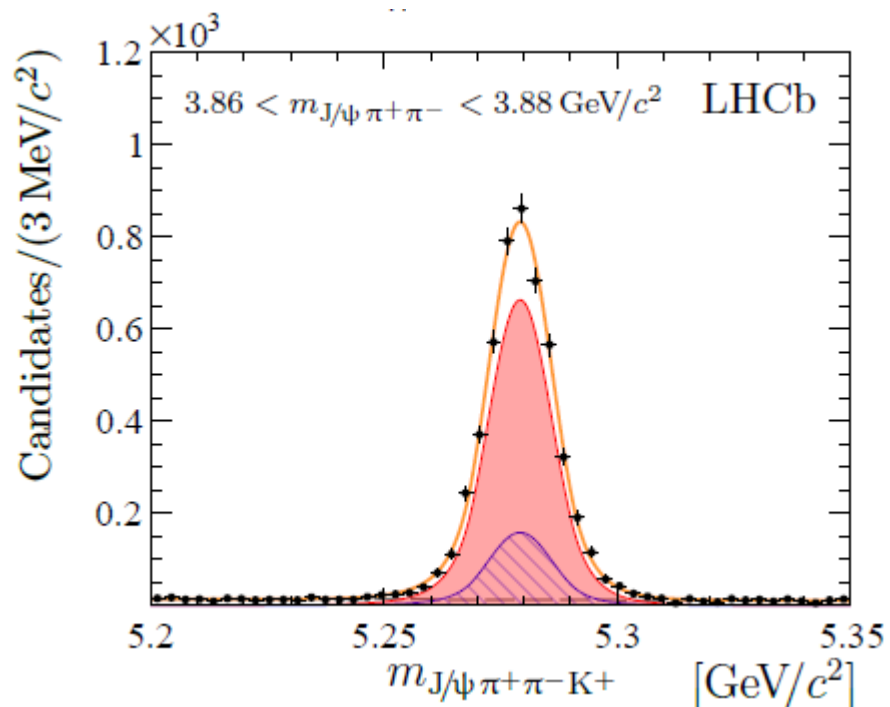
$$\Gamma_{\text{BW}} = 1.39 \pm 0.24 \pm 0.10 \text{ MeV}$$

# $\Gamma_{BW}$ из распадов $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$

- Определение  $\Gamma_{BW}$  из эксклюзивного распада  $B^+$  мезона
- Использована вся статистика LHCb, накопленная в Run I и II (9  $\text{fb}^{-1}$ )
- Отбор с использованием бустинга над решающими деревьями (BDT)
- Валидация с использованием  $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$
- Чувствительность к  $\Gamma_{BW}$  на уровне 200 кэВ

Основная систематика из вариации формы сигнального и фонового распределений

$$\Gamma_{\chi_{c1}(3872)} = 0.96^{+0.19}_{-0.18} \pm 0.21 \text{ MeV}$$



# Распределения Флатте

- Введено для описания распадов  $a_0(980)$  и  $f_0(980)$  мезонов, для которых порог открытия  $K\bar{K}$ -канала распада выше массы резонанса
- Сейчас широко используется релятивистская версия распределения Флатте
- Для случая  $\chi_{c1}(3872)$  нерелятивистская формула, но требуется учет заряженного и нейтрального  $DD^*$ -каналов, а также естественной ширины  $D^*$ , распада на три пиона и других возможных каналов



COUPLED-CHANNEL ANALYSIS OF THE  $\pi\eta$  AND  $K\bar{K}$  SYSTEMS NEAR  $K\bar{K}$  THRESHOLD

S.M. FLATTÉ \*  
CERN, Geneva, Switzerland  
PLB 63 (1976) 224

$$\frac{d\sigma_i}{dm} = C \left| \frac{m_R \sqrt{\Gamma_0 \Gamma_i}}{m_R^2 - m^2 - i m_R (\Gamma_{\pi\eta} + \Gamma_{K\bar{K}})} \right|^2$$

$$\Gamma_{\pi\eta} = g_\eta a_\eta$$

$$\Gamma_{K\bar{K}} = \begin{cases} g_K \sqrt{(1/4)m^2 - m_K^2} & \text{above threshold} \\ i g_K \sqrt{m_K^2 - (1/4)m^2} & \text{below threshold} \end{cases}$$

$J/\psi \rightarrow \phi f_0(980)$   
PLB 605 (2005) 243

$$\frac{dR(J/\psi \pi^+ \pi^-)}{dE} \propto \frac{\Gamma_\rho(E)}{|D(E)|^2},$$

$$\Gamma_\rho(E) = f_\rho \int_{2m_\pi}^{M(E)} \frac{dm'}{2\pi} \frac{q(m', E) \Gamma_\rho}{(m' - m_\rho)^2 + \Gamma_\rho^2/4},$$

$$\Gamma_\omega(E) = f_\omega \int_{3m_\pi}^{M(E)} \frac{dm'}{2\pi} \frac{q(m', E) \Gamma_\omega}{(m' - m_\omega)^2 + \Gamma_\omega^2/4}.$$

$$D(E) = E - E_f + \frac{i}{2} [g(k_1 + k_2) + \Gamma_\rho(E) + \Gamma_\omega(E) + \Gamma_0].$$

$$k_1 = \sqrt{2\mu_1 E}, \quad k_2 = \sqrt{2\mu_2 (E - \delta)} \quad \delta = 8.2 \text{ MeV}$$

Пять свободных параметров

# Распределение Флатте

- Константы двух и трехпионного распада одинаковые, а масса фиксированна
- Три свободных параметра
- Теоретическое значение для ширины  $D^*$



$$\Gamma_{D^*} = 65.5 \pm 15.4 \text{ keV}$$

$$k_1'(E) = \sqrt{-2\mu(E - E_R + i\Gamma_{D^{*0}}/2)},$$

$g$	$f_\rho \times 10^3$	$\Gamma_0$ [MeV]	$m_0$ [MeV]
$0.108 \pm 0.003$	$1.8 \pm 0.6$	$1.4 \pm 0.4$	3864.5 (fixed)

Systematic	$g$		$f_\rho \times 10^3$		$\Gamma_0$ [MeV]	
Model	+ 0.003	-0.004	+ 0.6	-0.5	+ 0.5	-0.4
Momentum scale	+ 0.003	-0.003	+ 0.1	-0.2	+ 0.1	-0.2
Threshold mass	+ 0.003	-0.003	+ 0.2	-0.2	+ 0.2	-0.3
$D^{*0}$ width		-0.001				-0.2
Sum in quadrature	+ 0.005	-0.006	+ 0.7	-0.6	+ 0.6	-0.6

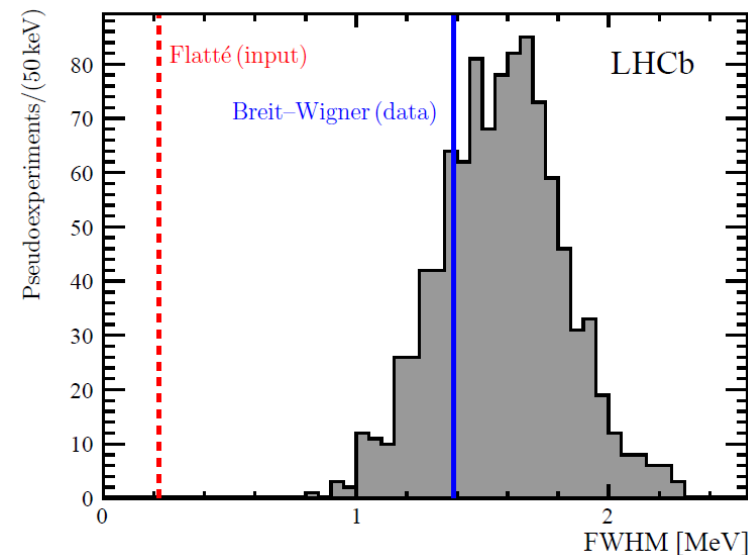
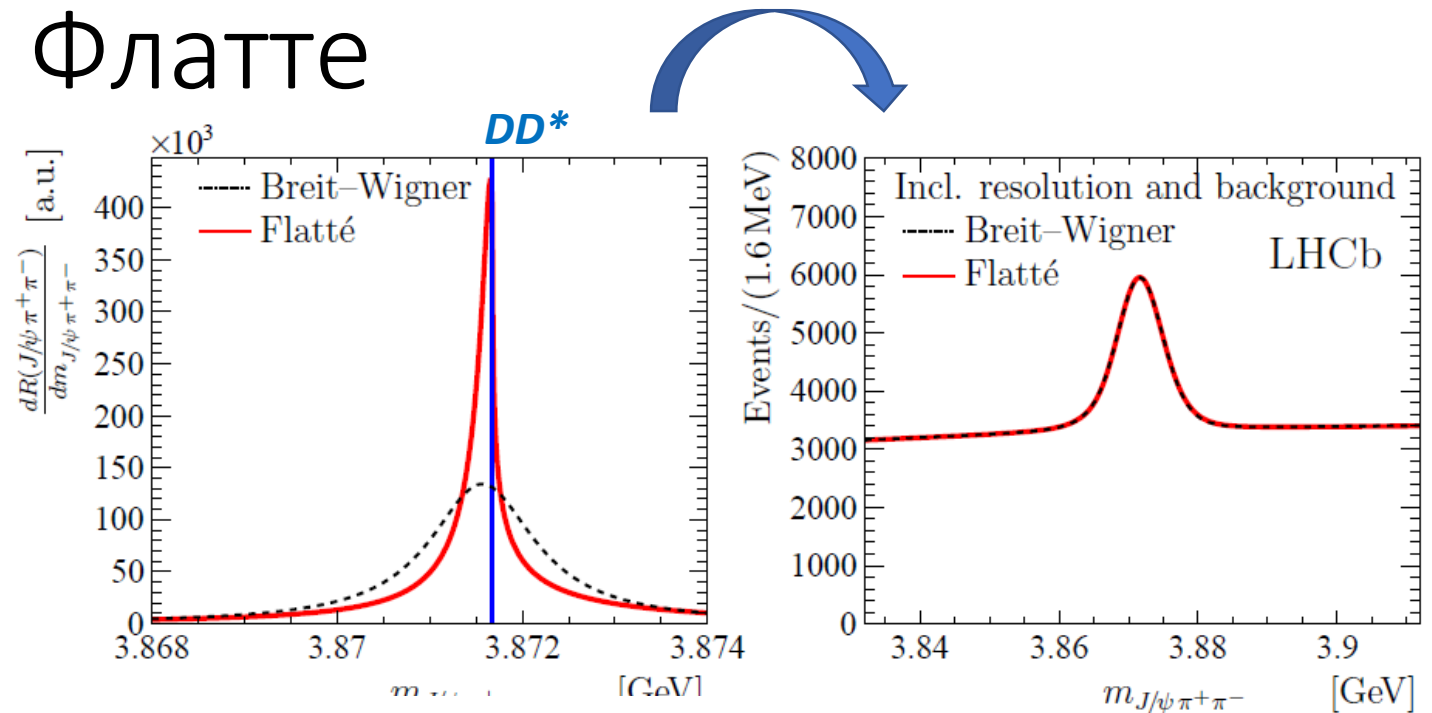
$$g = 0.108 \pm 0.003^{+0.005}_{-0.006},$$

$$f_\rho = (1.8 \pm 0.6^{+0.7}_{-0.6}) \times 10^{-3},$$

$$\Gamma_0 = 1.4 \pm 0.4 \pm 0.6 \text{ MeV},$$

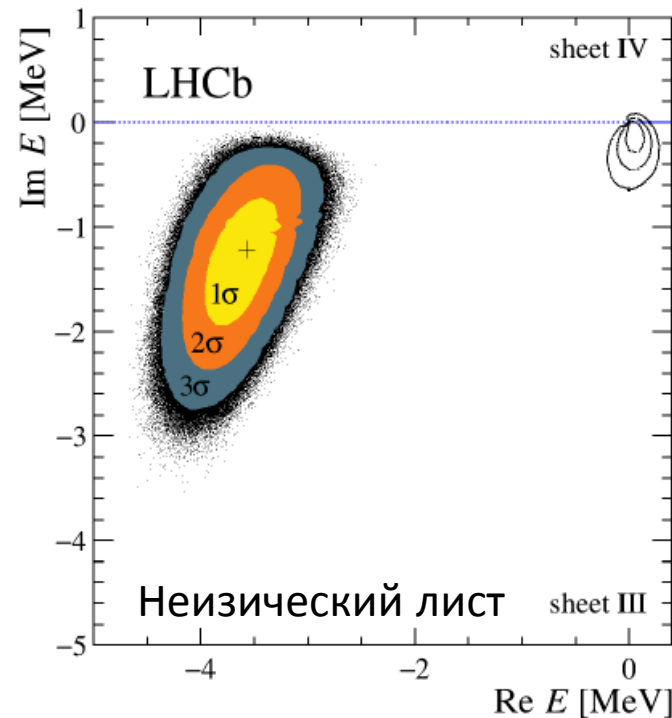
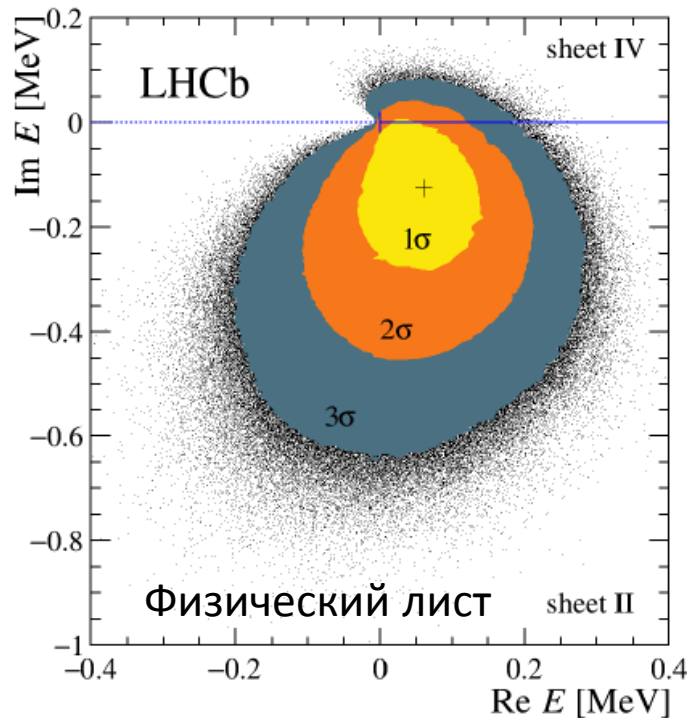
# Сравнение ВВ и Флатте

- После свертки с функцией разрешения результаты неотличимы
- Псевдоэксперименты
- Розыгрыш параметров  $\chi_{c1}(3872)$  → функция разрешения + фоновое распределение → определение параметров распределения Брейта-Вигнера
- **Согласие между подходами**



# Полюса и доля «компактной» компоненты

- Аналитическое продолжение энергии в область комплексных значений
- Полюсы на физических листах идентифицируются как связанные состояния, а на нефизических как адронные резонансы (если нет «порогов», то  $\text{Re}E \rightarrow m$ ,  $\text{Re}E \rightarrow \Gamma$ )
- Параметры распределения Флатте для  $\chi_{c1}(3872)$   $\rightarrow$  два полюса



S. Weinberg, *Elementary particle theory of composite particles*, [Phys. Rev. 130 \(1963\) 776](#).

V. Baru *et al.*, *Evidence that the  $a_0(980)$  and  $f_0(980)$  are not elementary particles*, [Phys. Lett. B586 \(2004\) 53](#).

Если подставить положение полюса в выражение для относительных импульсов, то можно вычислить долю «компактной» компоненты ( $Z$ )

$$\frac{|k_2| - |k_1|}{|k_1| + |k_2|} = 1 - Z.$$

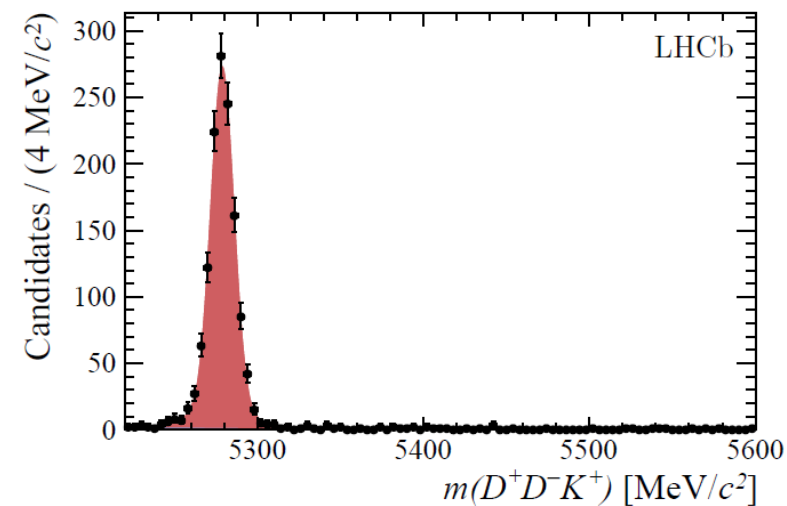
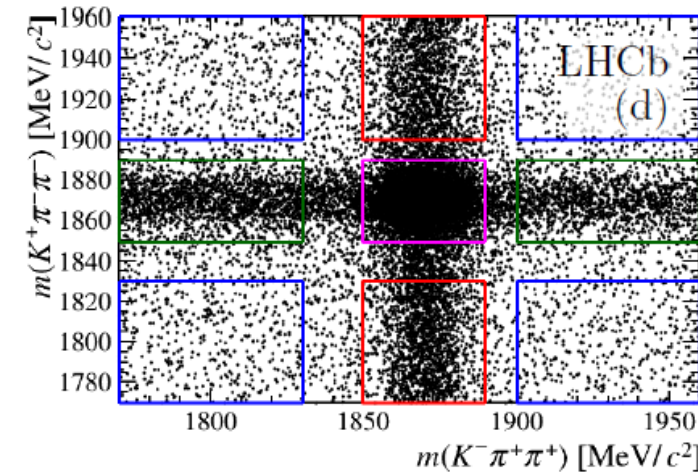
**Результат:  $Z = 15-30\%$**



Тетракварки с открытым очарованием:  
 $X_0(2900)$  и  $X_1(2900)$

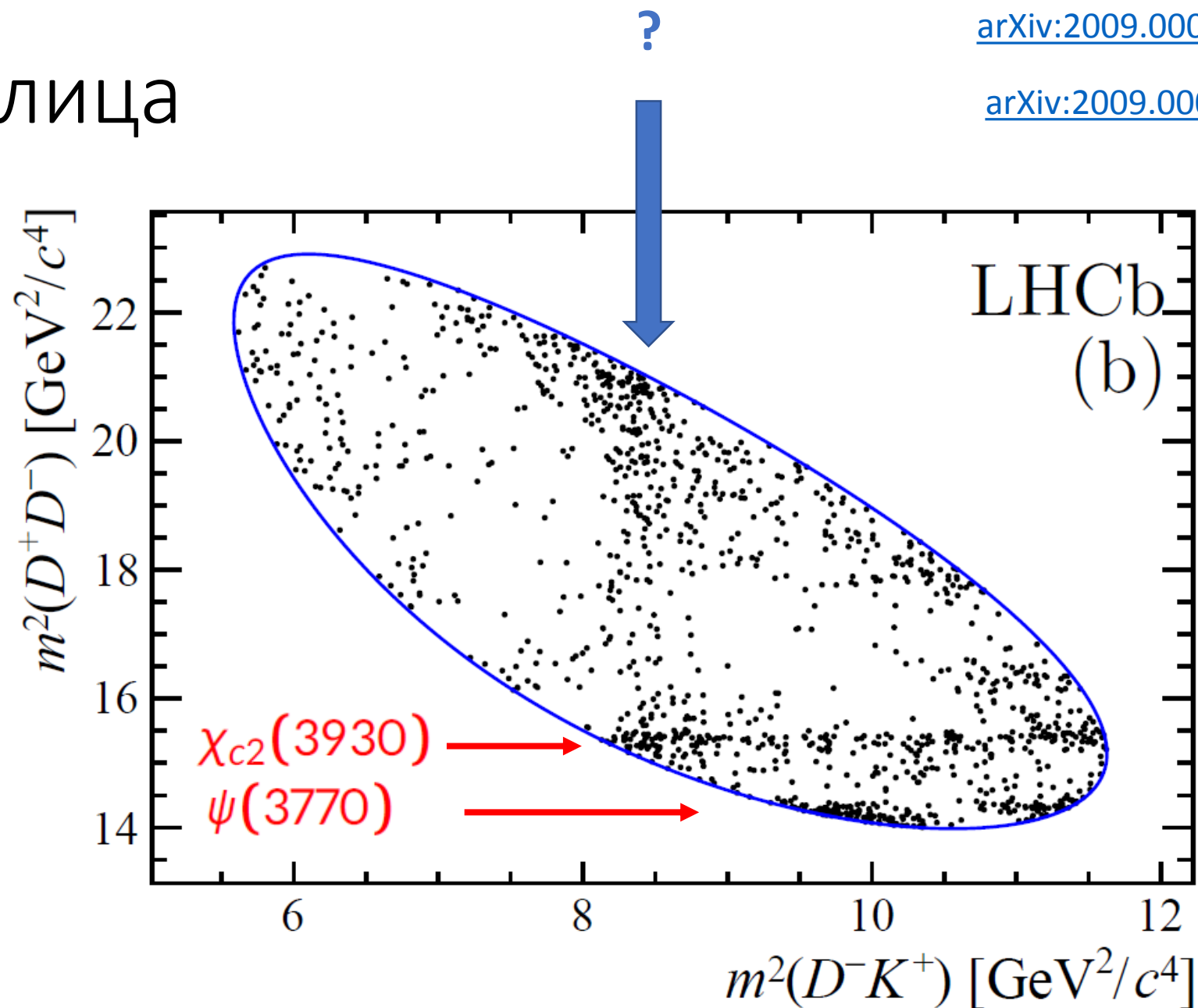
# Исследование распада $B^+ \rightarrow [K^- \pi^+ \pi^+]_{D^+} [K^+ \pi^- \pi^-]_{D^-} K^+$

- Использована вся статистика LHCb, накопленная в Run I и II ( $9 \text{ fb}^{-1}$ )
- 2/3 адронный триггер, 1/3 независимый
- Бустинг над решающими деревьями
  - Топологические переменные
  - Переменные идентификации
- Практически отсутствует комбинаторный фон и фон от частично восстановленных распадов.
- 1374 события кандидата (0,5% фона)



# Диаграмма Далица

- Помимо чармониевых резонансов на диаграмме Далица наблюдается вертикальная полоса
- Тетракварк с открытым очарованием?
- **Два метода:**
  1. Модельно-независимый
  2. Амплитудный анализ



# Модельно-независимое исследование

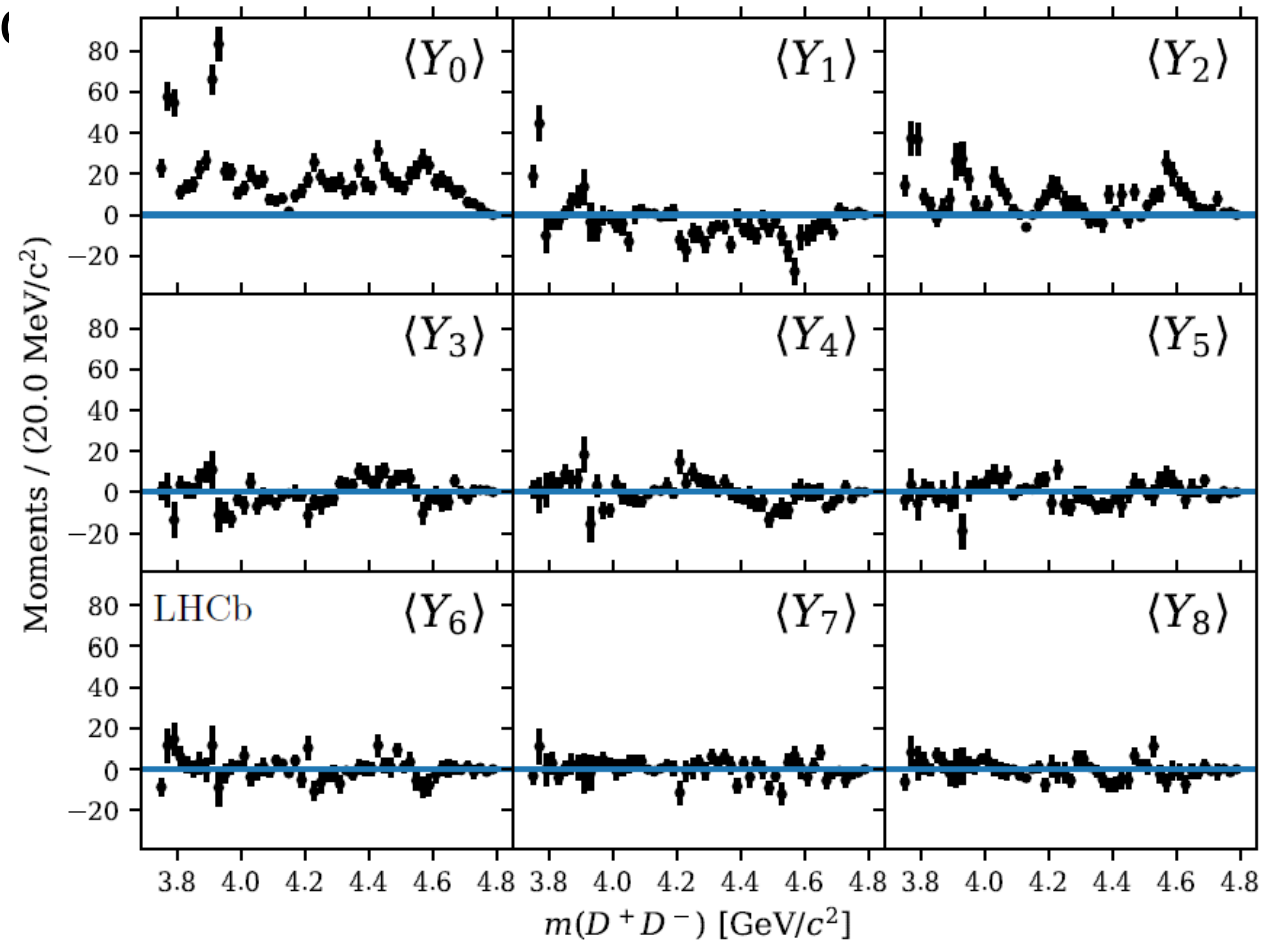
- Можно ли описать спектр используя только разложение по парциальным волнам **DD**-системы? (шаг 20 МэВ/c<sup>2</sup>)
- Разложение по полиномам Лежандра:

$$h(D^+ D^-) = \cos(\theta(D^+ D^-))$$

$$\langle Y_k^{U,j} \rangle = \sum_{l=1} N_j^{\text{Data}} w_l P_k(h_l(D^+ D^-))$$

- Применение к Монте-Карло

$$\eta_i = \frac{2}{N_j^{\text{Sim}}} \times \sum_{k=0}^{k_{\max}} \langle Y_k^{U,j} \rangle P_k(h(D^+ D^-))$$



Усеченное разложение

Если ограничится спин -0, 1 и 2, то  $k_{\max} = 4$

# Модельно-независимое исследование $k_{\max} = 4$

Гипотезы:

$$H_0 - k_{\max} = 4$$

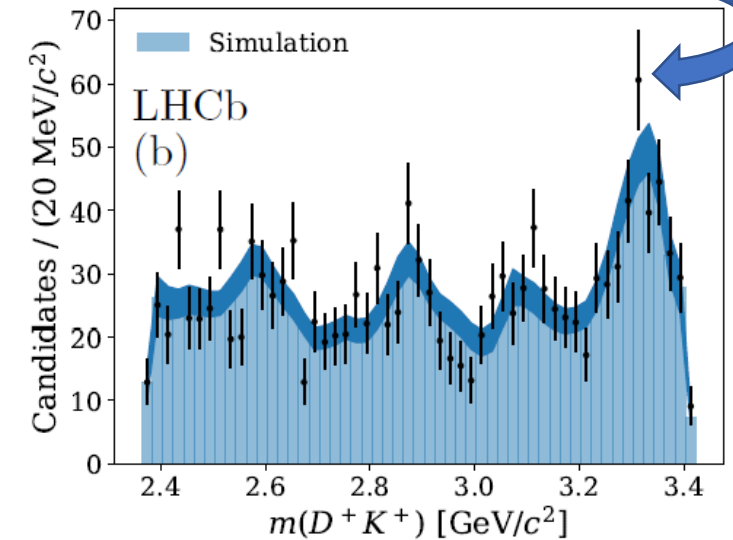
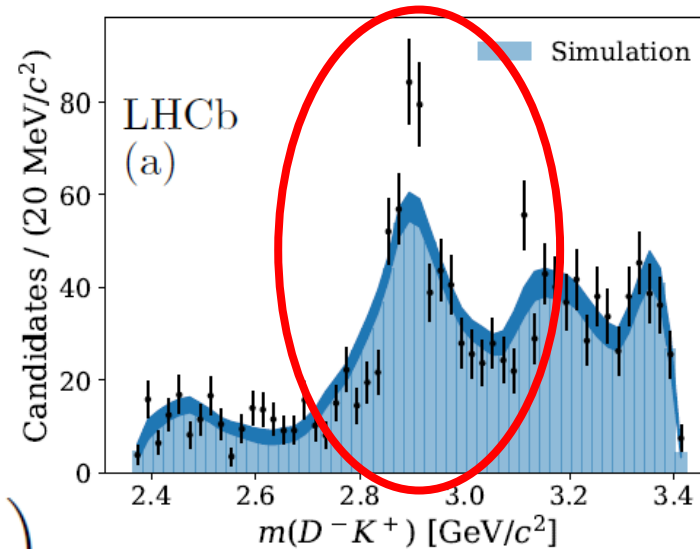
$H_1$  – спин-3 резонансы или экзотика

Статистика отношения правдоподобия:

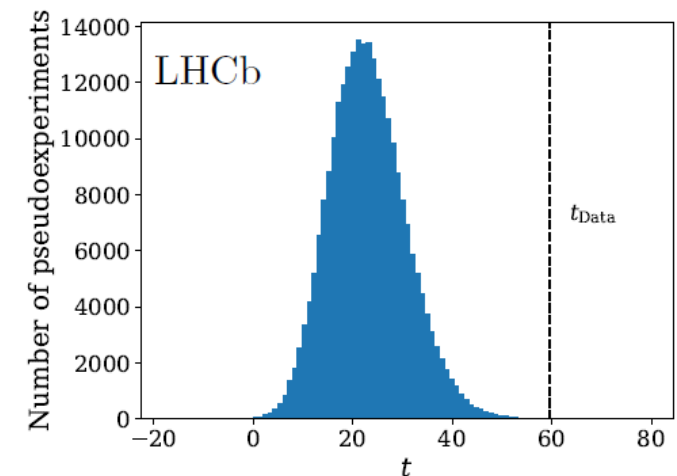
Значение в интервале

Нормировка

$$t = -2 \sum_{l=1}^{N^{\text{Data}}} s_l \log \left( \frac{\mathcal{P}(m_l(D^- K^+) | H_0) / I_{H_0}}{\mathcal{P}(m_l(D^- K^+) | H_1) / I_{H_1}} \right)$$



- Ансамбль псевдоэкспериментов (включающий систематику) базирующихся на моделях с  $k_{\max} = 4$  и 8  
→ распределение тестовой статистики
- Гипотеза  $H_0$  отвергается на уровне значимости 3,9 стандартных отклонения



# Амплитудный анализ

- Аппроксимация диаграммы Далица в рамках изобарной модели
- Программный пакет Laura++  
<https://arxiv.org/abs/1711.09854>

$$\mathcal{L} = \exp \left[ - \sum_c \left( \frac{(p_c - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2} \right) \right] \prod_{j=1}^{N_c} (N_{\text{sig}} \mathcal{P}_{\text{sig}}(\vec{x}_j) + N_{\text{bg}} \mathcal{P}_{\text{bg}}(\vec{x}_j))$$

$$\mathcal{P}_{\text{sig}}(\vec{x}) = \frac{1}{\mathcal{N}} \times \epsilon_{\text{total}}(\vec{x}) \times |\mathcal{A}_{\text{sig}}(\vec{x})|^2$$

$$\mathcal{A}_{\text{sig}}(\vec{x}) = \sum_{j=1}^N c_j F_j(\vec{x})$$

$$F(\vec{x}) = R(m(D^+ D^-)) \times T(\vec{p}, \vec{q}) \times X(|\vec{p}|) \times X(|\vec{q}|)$$

Релятивистское распределение  
Брейта-Вигнера

Угловой фактор (формализм  
тензоров Земаха)

Барьерный фактор (функции  
Блатта-Вайскопфа)

# Амплитудный анализ

- Распределение для сигнала от чармониевых состояний

Partial wave ( $J^{PC}$ )	Resonance	Mass ( MeV/c <sup>2</sup> )	Width ( MeV/c <sup>2</sup> )
S wave ( $0^{++}$ )	$\chi_{c0}(3860)$	$3862 \pm 39$	$201 \pm 139$
	$X(3915)$	$3918.4 \pm 1.9$	$20 \pm 5$
	Possible nonresonant contributions		
P wave ( $1^{--}$ )	$\psi(3770)$	$3778.1 \pm 0.9$	$27.2 \pm 1.0$
	$\psi(4040)$	$4039 \pm 1$	$80 \pm 10$
	$\psi(4160)$	$4191 \pm 5$	$70 \pm 10$
	$\psi(4260)$	$4230 \pm 8$	$55 \pm 19$
	$\psi(4415)$	$4421 \pm 4$	$62 \pm 20$
D wave ( $2^{++}$ )	$\chi_{c2}(3930)$	$3921.9 \pm 0.6$	$36.6 \pm 2.1$
F wave ( $3^{--}$ )	$X(3842)$	$3842.71 \pm 0.16 \pm 0.12$	$2.79 \pm 0.51 \pm 0.35$

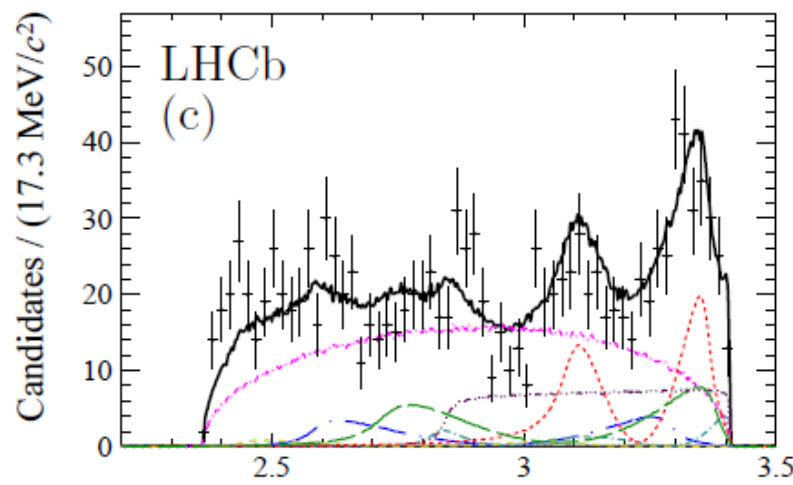
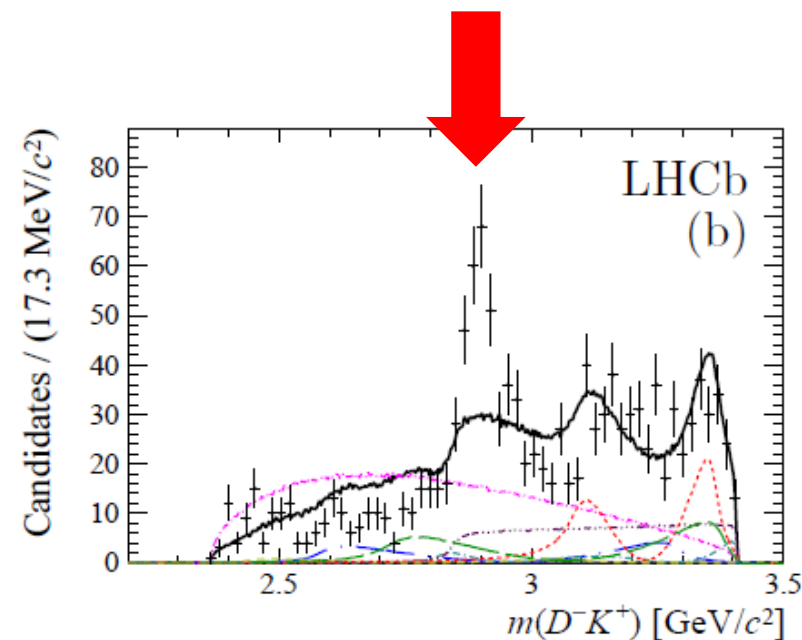
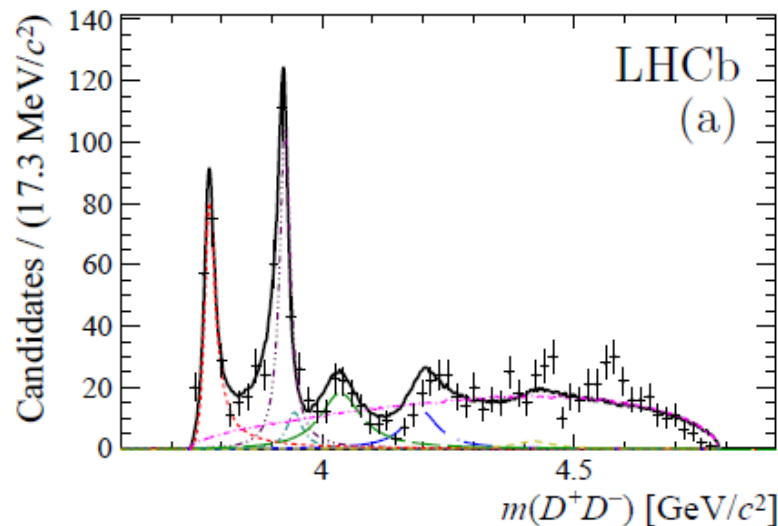
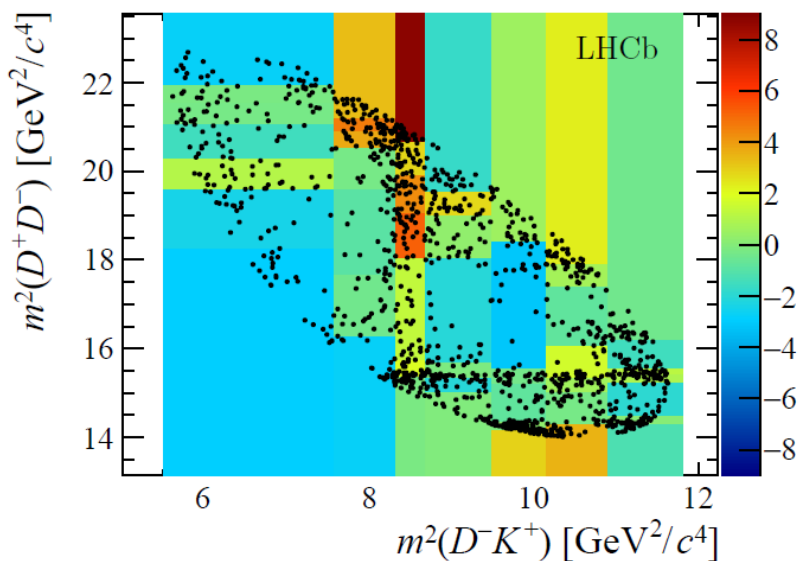
Модельно-  
независимый  
анализ не  
учитывал этот  
резонанс



Малая экспериментально измеренная ширина

# Только $DD$ -резонансы

- Нельзя удовлетворительно описать спектр масс  $D^-K^+$
- «Качество фита» для регионов диаграммы Далица



- $\psi(3770) \rightarrow D^+ D^-$
- $\chi_{c0}(3930) \rightarrow D^+ D^-$
- $\chi_{c2}(3930) \rightarrow D^+ D^-$
- $\psi(4040) \rightarrow D^+ D^-$
- $\psi(4160) \rightarrow D^+ D^-$
- $\psi(4415) \rightarrow D^+ D^-$
- Nonresonant



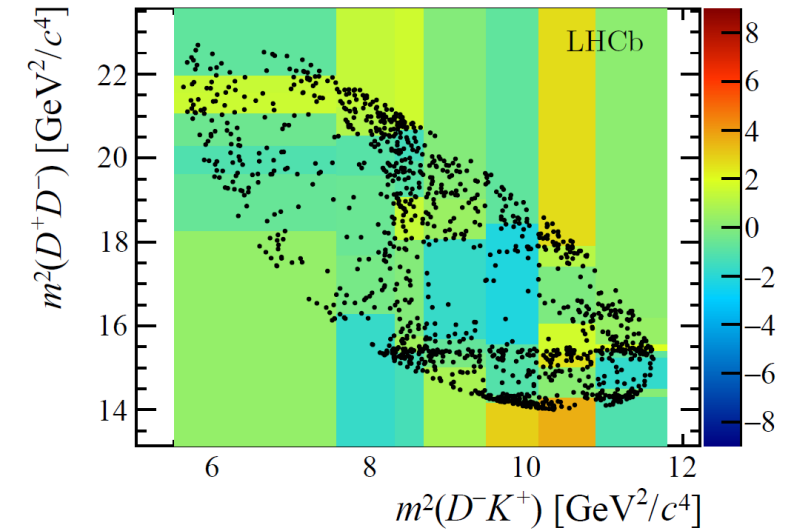
# Дополнительные резонансы

- Два резонанса:

- Спин-0
- Спин-1

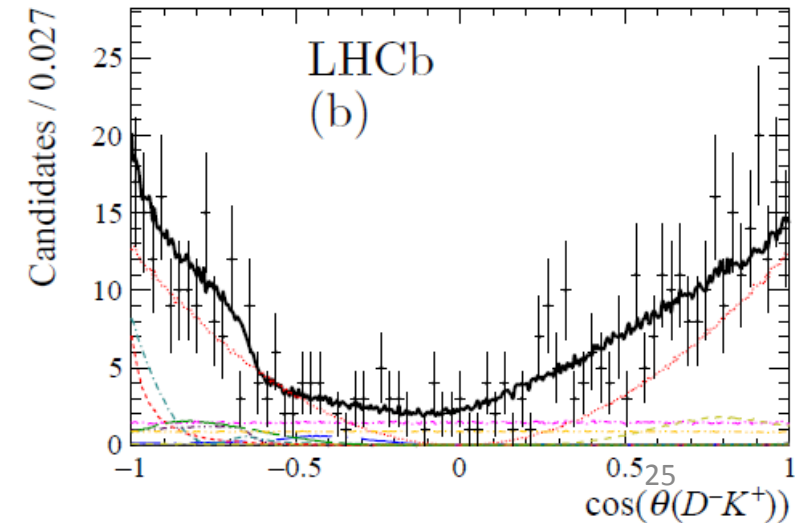
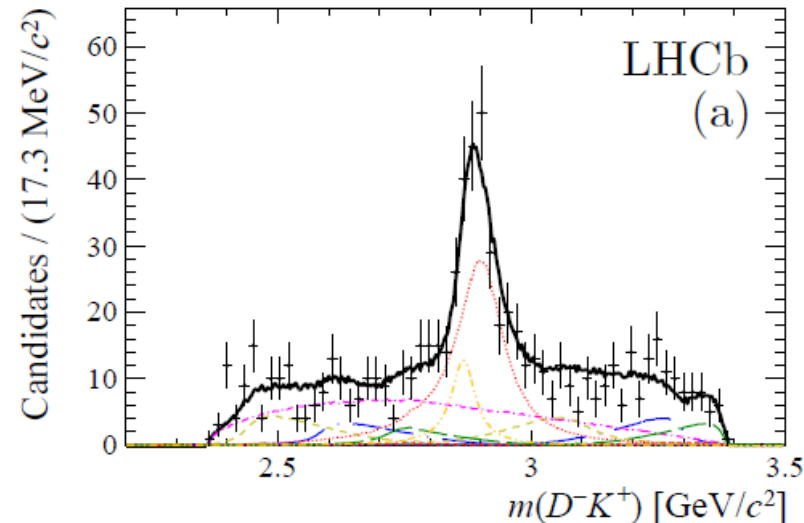
- Необходимы для удовлетворительного описания угловых распределений

- Тетракварки (*udsc*)



$$X_0(2900) : M = 2.866 \pm 0.007 \pm 0.002 \text{ GeV}/c^2, \quad \Gamma = 57 \pm 12 \pm 4 \text{ MeV},$$

$$X_1(2900) : M = 2.904 \pm 0.005 \pm 0.001 \text{ GeV}/c^2, \quad \Gamma = 110 \pm 11 \pm 4 \text{ MeV},$$



# Реакция теоретиков

Amplitude analysis of the $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ decay	PAPER-2020-025 arXiv:2009.00026 [PDF]	PRD	31 Aug 2020	9 [plot]
A model-independent study of resonant structure in $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ decays	PAPER-2020-024 arXiv:2009.00025 [PDF]	PRL	31 Aug 2020	8 [plot]

## Discriminating among interpretations for the $X(2900)$ states

T. J. Burns E. S. Swanson [arXiv:2009.05352](https://arxiv.org/abs/2009.05352)

Intriguingly, we find that for the neutral  $X(2900)$  states, the channel with the largest fit fraction is the discovery mode  $B^+ \rightarrow D^+ X, X \rightarrow D^- K^+$ . This is because the  $X(2900)$  signal can arise through a colour-favoured process, mediated by triangle diagrams or resonances, whereas the experimental background is colour-suppressed.

Another mode which is large for the same reason is  $B^0 \rightarrow D^0 X, X \rightarrow \bar{D}^0 K^0$ . We predict a significant fit fraction of around 23%, regardless of the nature of the  $X(2900)$  states. Confronting this prediction with experiment would be a useful test of the central idea in our approach, which is that production is dominated by colour-favoured processes.

Among the remaining modes, we have shown that there are characteristic patterns in production and decay which discriminate unambiguously between competing models.

**Доступно на LHCb  
(6 треков)**

Указание на *X(6900)*

# Cross sections for $\sqrt{s}_{pp} = 13$ TeV for LHCb

Неупругое сечение :

$62.2 \pm 0.2 \pm 2.5$  mb

JHEP 06 (2018) 100

Очарованные кварки

$c\bar{c}$

$2369 \pm 3 \pm 152 \pm 118$   $\mu$ b

JHEP 05 (2017) 074

$D^+$

$834 \pm 32 \pm 78$   $\mu$ b

$J/\psi$

$15.03 \pm 0.03 \pm 0.94$   $\mu$ b

JHEP 10 (2016) 172

Прелестные кварки

$b\bar{b}$

$144 \pm 1 \pm 21$   $\mu$ b

PRL 118 (2017) 052002

$B^+$

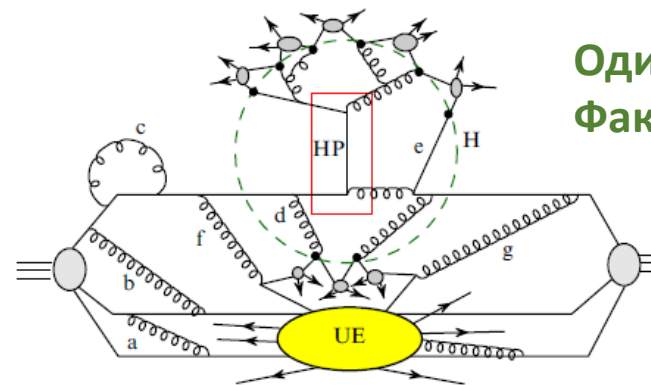
$86.6 \pm 0.5 \pm 5.4 \pm 3.4$   $\mu$ b

JHEP 12 (2017) 026

$\Upsilon(1S)$

$4.68 \pm 0.01 \pm 0.29$  nb

JHEP 07 (2018) 134



Один жесткий процесс  
Факторизация работает

$$\frac{d\sigma}{dX} = \sum_{j,k} \int_{\hat{X}} f_j(x_1, Q) f_k(x_2, Q) \frac{d\hat{\sigma}_{jk}(Q)}{d\hat{X}} F(\hat{X} \rightarrow X; Q),$$

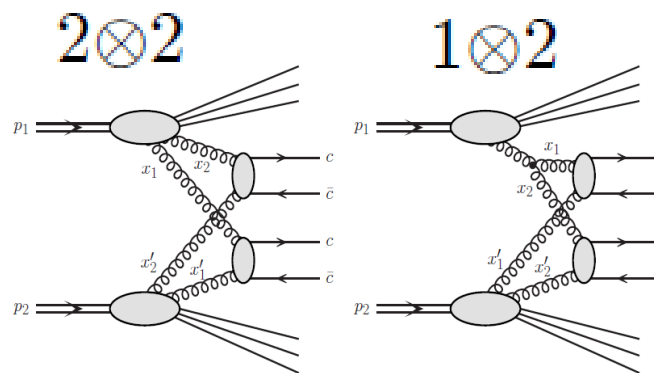
Теория более-менее согласуется с экспериментальными данными

## Два жестких процесса в одном взаимодействии? $\rightarrow$ Парное рождение $J/\psi$

Фактор симметрии  $s = \{1,2\}$  Индивидуальные сечения жестких процессов (A и B)

$$\sigma_{\text{DPS}} = \frac{1}{s} \frac{\sigma_A \sigma_B}{\sigma_{\text{eff}}},$$


Эффективное сечение DPS должно слабо зависеть от конкретных процессов

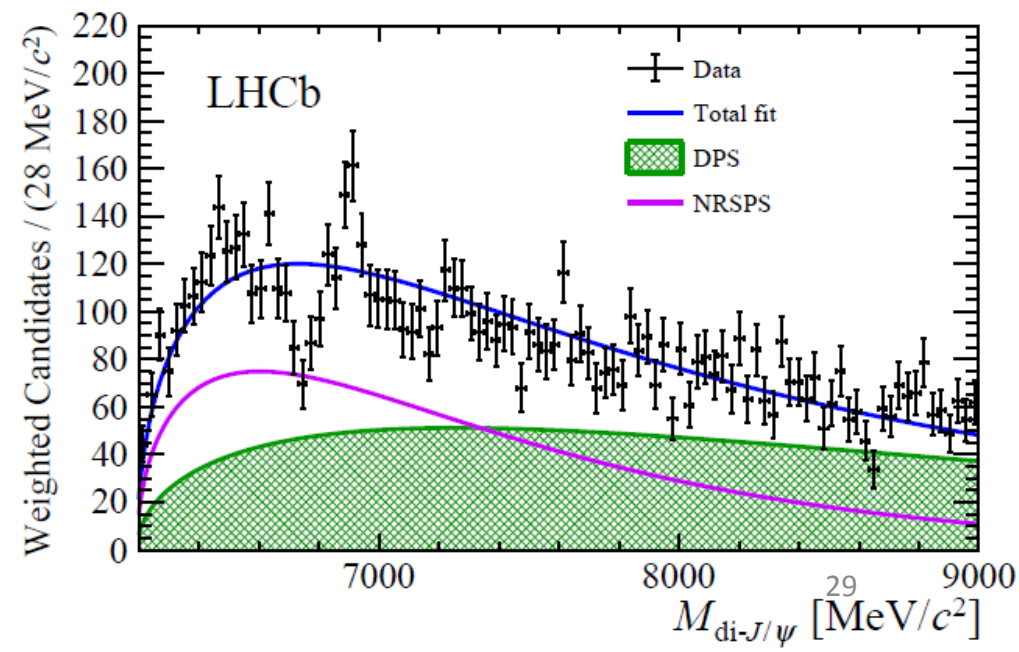
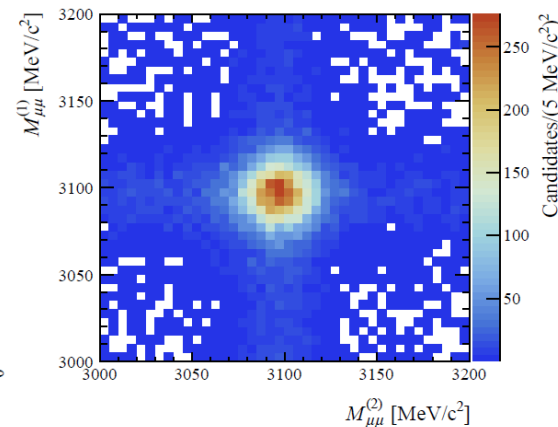
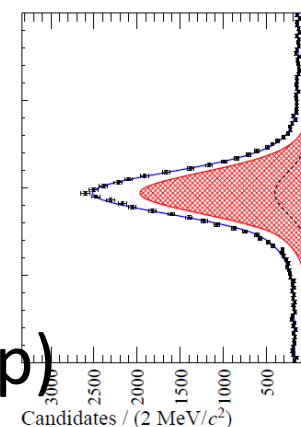
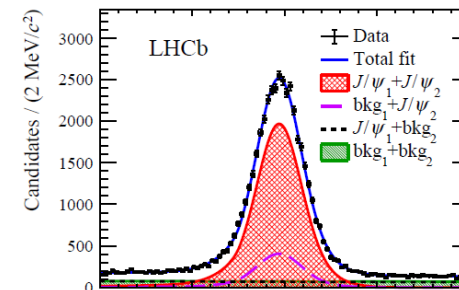


Необходимо учесть (отделить) вклад одиночного парного рождения (SPS)

Разное поведение сечений вблизи порога двойного рождения  $J/\psi$  !

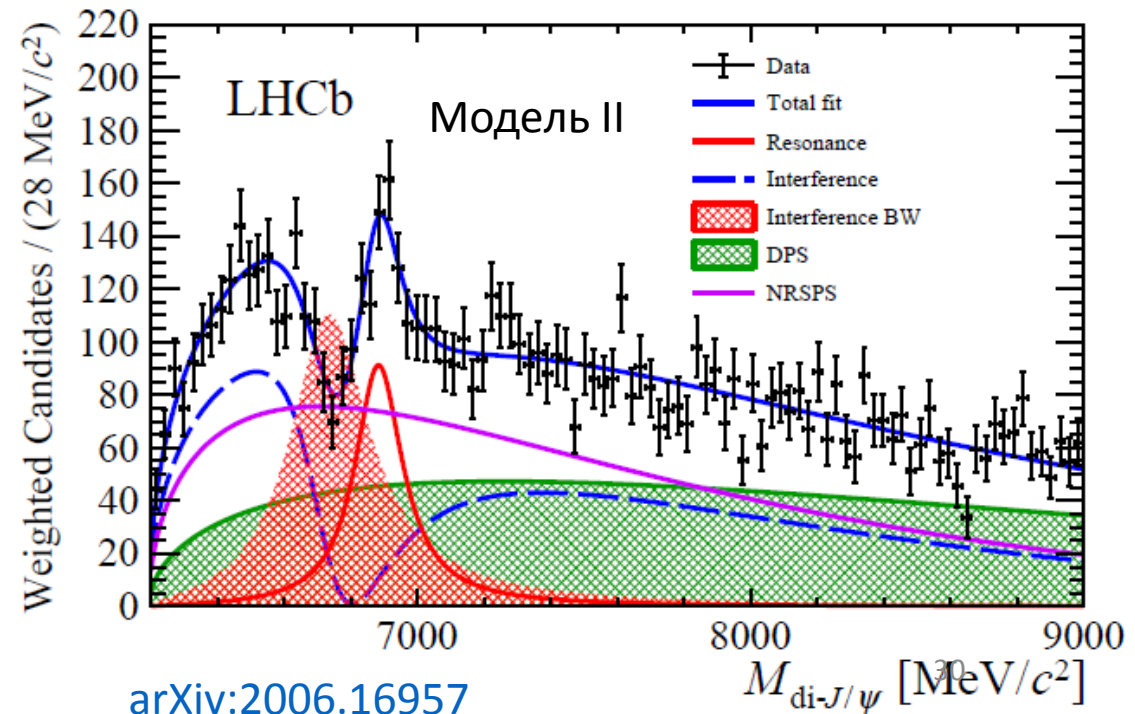
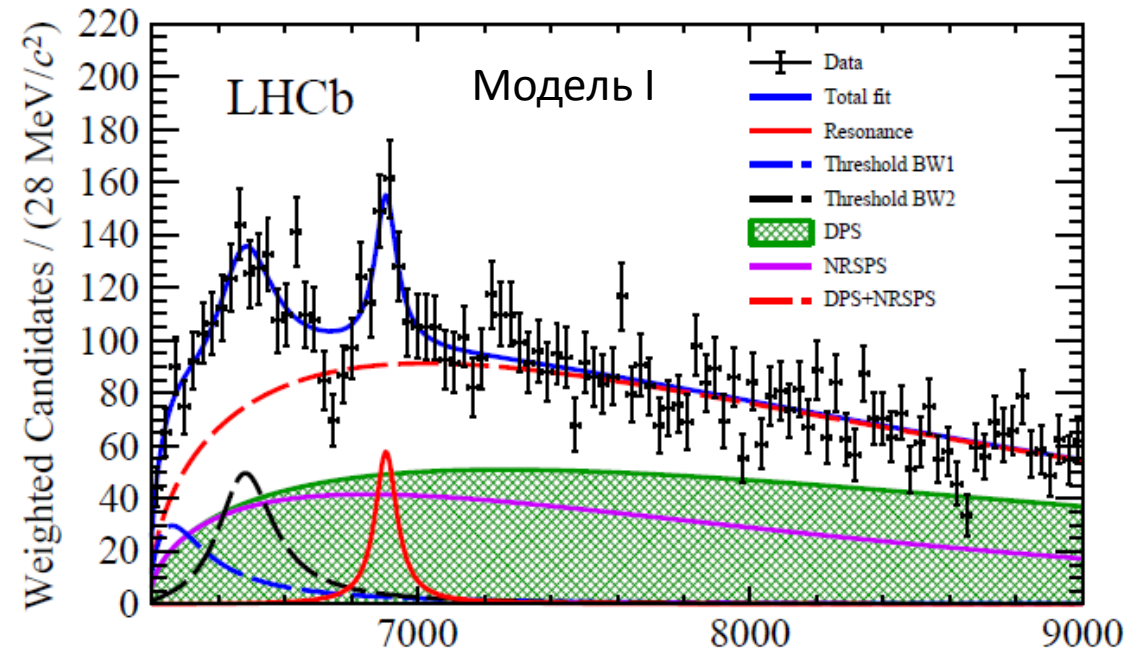
# Двойное рождение $J/\psi$

- [arXiv:2006.16957](https://arxiv.org/abs/2006.16957) / Science Bulletin
- Мюоны с  $p_T > 0,6$  ГэВ/с и  $p > 6$  ГэВ/с
- Только из первичной вершины!
- В 0,8% случаев три кандидата (случайный выбор)
- 33570 +/- 230 событий отобрано
- Ожидалось, что SPS доминирует в области больших  $p_T$  для пары  $J/\psi$
- Ожидалось, что DPS и SPS спектры разные в области малых масс ди- $J/\psi$
- **Нерегулярность в спектре масс!** 



# Возможные сценарии

- Статистическая значимость отклонения от плавного распределения (DPS+NRSPS)  $>5\sigma$ 
  - $T_{4c} \rightarrow 2 J/\psi$
  - $T_{4c} \rightarrow J/\psi \chi_c (\rightarrow \gamma J/\psi)$  feeddown
  - Перерасеяние на пороге:
    - 6829,4 МэВ –  $\chi_{c0} \chi_{c0}$
    - 6925,4 МэВ –  $\chi_{c0} \chi_{c1}$
  - Интерференция  $T_{4c}$  и NRSPS (если одинаковые квантовые числа)
- Две референсные модели:
  - **Модель I:** три резонанса
  - **Модель II:** интерференция вклада NRSPS и резонанса



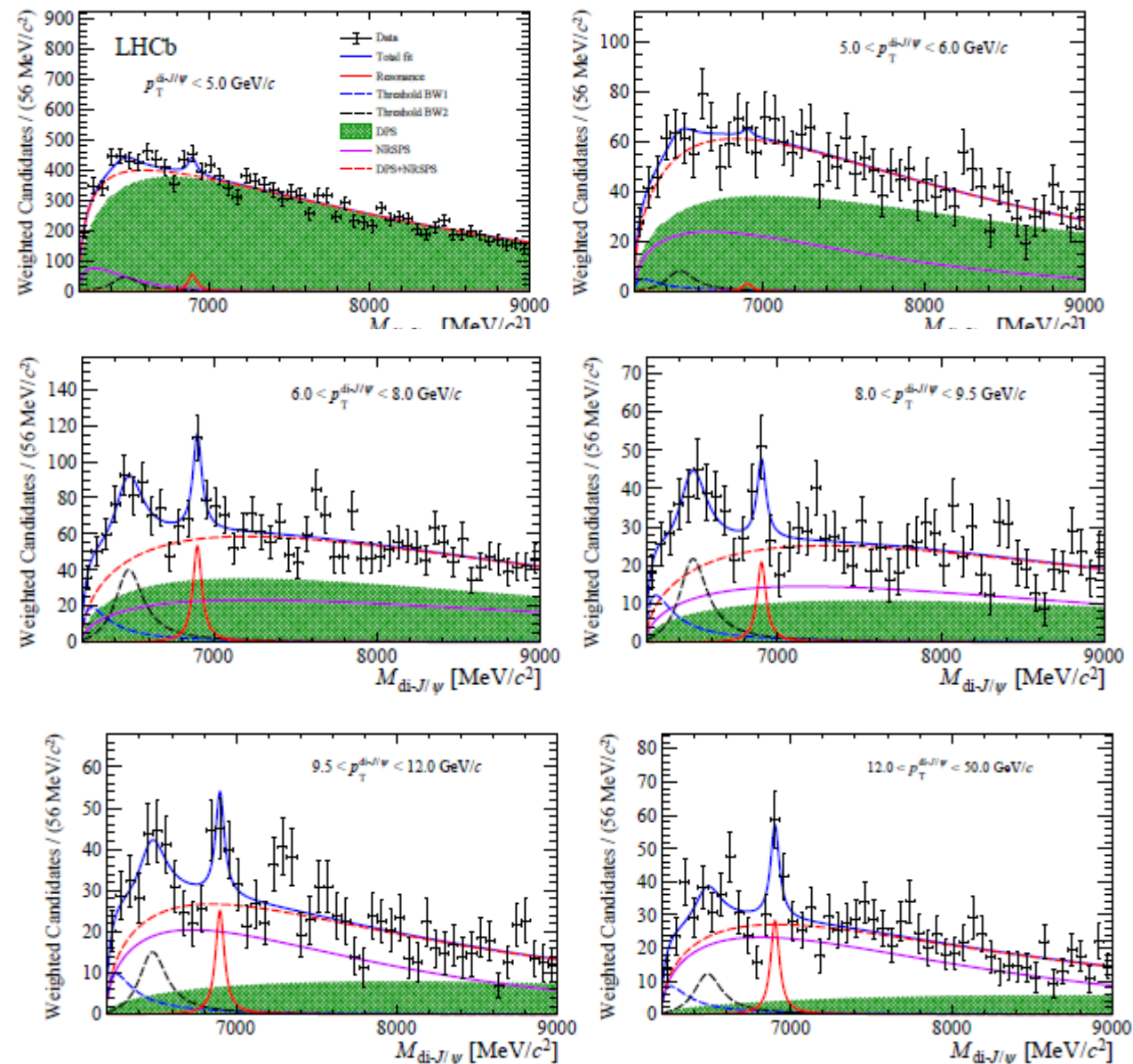
# $p_T$ -зависимость

- Модель I заметный вклад для  $p_T$  выше 6 ГэВ/с
- В рамках этой модели сложно описать провал в спектре масс
- Требуется привлечение вклада вблизи порога рождения пары  $J/\psi$
- Для  $T_{cccc}$

$$N_{\text{sig}} = 252 \pm 63,$$

$$m[X(6900)] = 6905 \pm 11 \pm 7 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma[X(6900)] = 80 \pm 19 \pm 33 \text{ MeV}$$



# Модель II

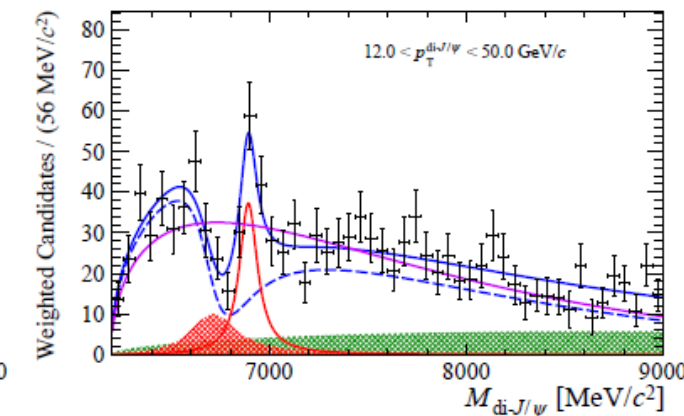
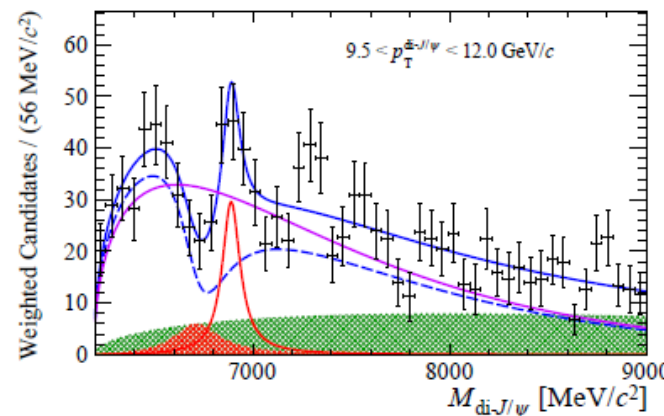
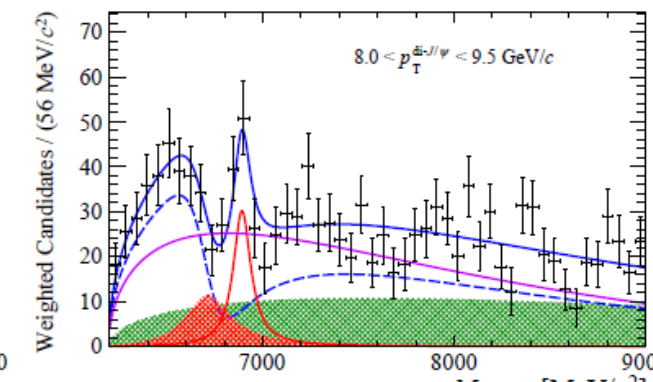
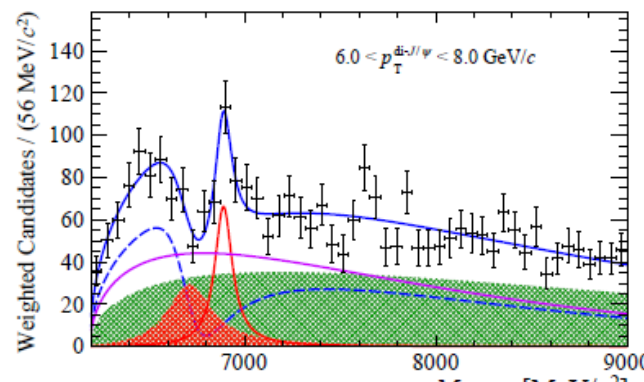
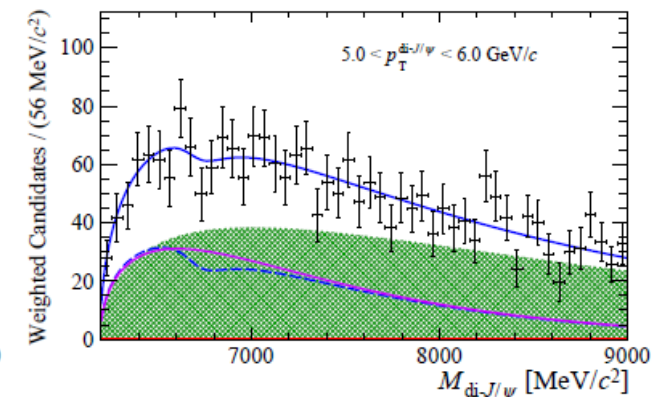
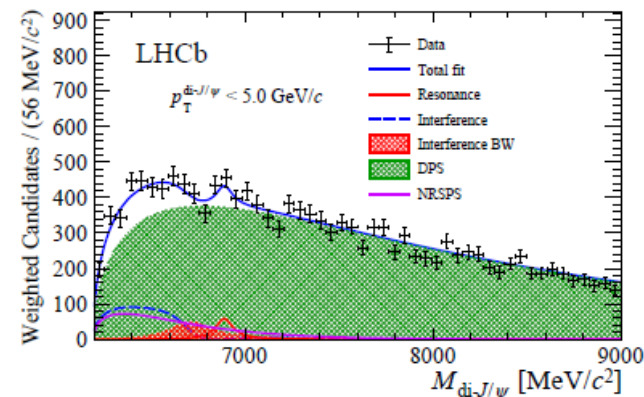
$$\left| Ae^{i\phi} \sqrt{f_{\text{nr}}(M_{\text{di-}J/\psi}) + \text{BW}(M_{\text{di-}J/\psi})} \right|^2$$

- Такая модель описывает провал в спектре масс
- Ширина состояния оказывается выше чем для Модели I

$$N_{\text{sig}} = 784 \pm 148.$$

$$m[X(6900)] = 6886 \pm 11 \pm 11 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma[X(6900)] = 168 \pm 33 \pm 69 \text{ MeV}.$$





# Что говорит теория?

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

Observation of structure in the  $J/\psi$ -pair mass spectrum

PAPER-2020-011  
arXiv:2006.16957  
[PDF]

Science Bulletin

30 Jun 2020

26  
[plot]

## INTERPRETATION OF STRUCTURE IN THE DI- $J/\psi$ SPECTRUM

Marek Karliner<sup>a</sup> and Jonathan L. Rosner<sup>b</sup>

### ABSTRACT

Structure in the di- $J/\psi$  mass spectrum observed by the LHCb experiment around 6.9 and 7.2 GeV is interpreted in terms of  $J^{PC} = 0^{++}$  resonances between a  $cc$  diquark and a  $\bar{c}\bar{c}$  antidiquark, using a recently confirmed string-junction picture to calculate tetraquark masses. The main peak around 6.9 GeV is likely dominated by the  $0^{++}(2S)$  state, a radial excitation of the  $cc\bar{c}\bar{c}$  tetraquark, which we predict at  $6.871 \pm 0.025$  GeV. The dip around 6.75 GeV is ascribed to the opening of the  $S$ -wave di- $\chi_{c0}$  channel, while the dip around 7.2 GeV could be correlated with the opening of the di- $\eta_c(2S)$  channel. Description of the low-mass part of the di- $J/\psi$  structure appears to require a low-mass broad resonance consistent with a predicted  $0^{++}(1S)$  state with invariant mass  $M_{\text{inv}} = 6191.5 \pm 25$  MeV. Implications for  $bb\bar{b}\bar{b}$  tetraquarks are discussed.

# Выводы

- LHCb – фабрика экзотических адронов
- Впервые измерена естественная ширина  $\chi_{c1}(3872)$ 
  - $\Gamma_{BW}$  из эксклюзивного канала распада  $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$
  - Инклюзивные измерения:  $\Gamma_{BW}$ , параметры распределения Флаттэ, исследование полюсов
  - Доля «компактной» компоненты 15-30%
- Модельно независимые указания на экзотику в распадах  $B^+ \rightarrow D^+D^-K^+$
- Амплитудный анализ распада  $B^+ \rightarrow D^+D^-K^+$ :
  - $X_0(2900)$  и  $X_1(2900)$  – тетракварки и открытым очарованием
- Структура в спектре парного рождения  $J/\psi$ 
  - Тетракварковая интерпретация  $qqqq$