



Литературный обзор  
по теме диссертации:

«Изучение многокварковых  
состояний в  
эксперименте CMS»

Аспирант: Сергеев М.А.  
Научный руководитель: Поликарпов С.М.

# План обзора

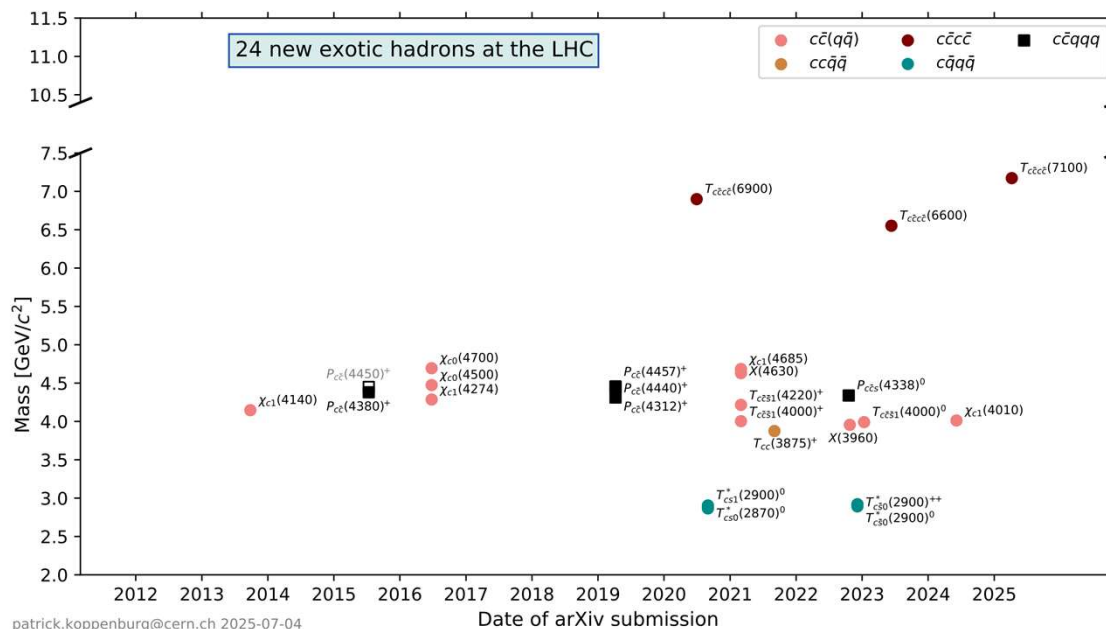
## История



## МОТИВАЦИЯ



Экзотические адроны, открытые на БАКе. Точки различной формы и цвета обозначают отдельные состояния и отражают их кварковый состав. По оси абсцисс показаны даты публикаций, в которых сообщалось об открытии, а по оси ординат — соответствующие массы.



# КХД

**1964** – Гелл-Манн и независимо Цвейг предложили кварковую модель для классификации мезонов и барионов [https://doi.org/10.1016/S0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9163(64)92001-3)

**1964–1965** – была введена идея цветового квантового числа, необходимая для согласования кварковой модели со статистикой и спектроскопией барионов

**1972–1973** – Фрицш, Гелл-Манн и Лейтвилер сформулировали сильное взаимодействие как неабелеву калибровочную теорию цвета; позднее закрепилось название *Quantum Chromodynamics*

**1973** – Гросс, Вильчек и Политцер открыли асимптотическую свободу

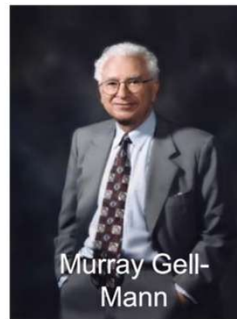
## Историческая справка

### 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  $(q\bar{q})$ ,  $(qq\bar{q}\bar{q})$ , etc. It is assumed that the lowest baryon configuration  $(qqq)$  gives just the representations 1, 8, and 10 that have been observed, while



8419/TH.412  
21 February 1964

AN  $SU_3$  MODEL FOR STRONG INTERACTION SYMMETRY AND ITS BREAKING

II \*)

G. Zweig

CERN---Geneva

\*) Version I is CERN preprint 8182/TH.401, Jan. 17, 1964.

6) In general, we would expect that baryons are built not only from the product of three aces,  $AAA$ , but also from  $\bar{A}AAA$ ,  $A\bar{A}AAAA$ , etc., where  $\bar{A}$  denotes an anti-ace. Similarly, mesons could be formed from  $\bar{A}A$ ,  $A\bar{A}A$  etc. For the low mass mesons and baryons we will assume the simplest possibilities,  $\bar{A}A$  and  $AAA$ , that is, "deuces and treys".



“Экзотические” многокварковые состояния возникли уже при рождении кварковой модели

# КХД

**1964** – Гелл-Манн и независимо Цвейг предложили кварковую модель для классификации мезонов и барионов [https://doi.org/10.1016/S0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9163(64)92001-3)

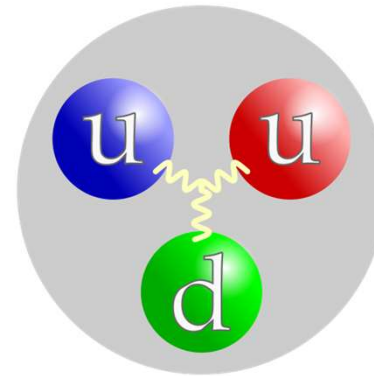
**1964–1965** – была введена идея цветового квантового числа, необходимая для согласования кварковой модели со статистикой и спектроскопией барионов

**1972–1973** – Фрицш, Гелл-Манн и Лейтвилер сформулировали сильное взаимодействие как неабелеву калибровочную теорию цвета; позднее закрепилось название *Quantum Chromodynamics*

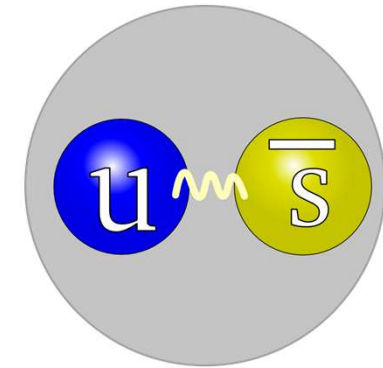
**1973** – Гросс, Вильчек и Политцер открыли асимптотическую свободу

## Историческая справка

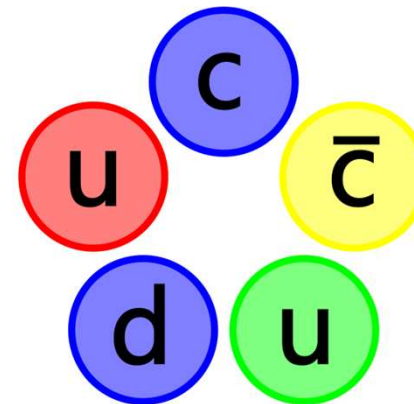
Барион



Мезон



Адрон должен быть цветонейтральной конфигурации кварков



Комбинация  $qqq\bar{q}$  и  $q\bar{q}q\bar{q}$  может быть собрана в цветовой синглет

Пентакварки являются естественным следствием КХД

# Лёгкий кандидат в пентакварк

В **1997** году Д. Дьяконов, В. Петров и М. Поляков в хиральной солитонной модели предсказали экзотический барион с

$$J = \frac{1}{2}, I = 0, S = +1,$$

массой около

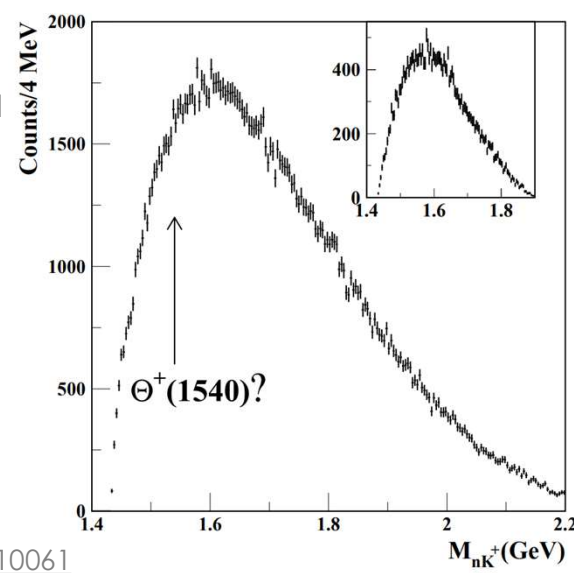
$$M \approx 1530 \text{ MeV}$$

и малой шириной

$$\Gamma < 15 \text{ MeV}.$$

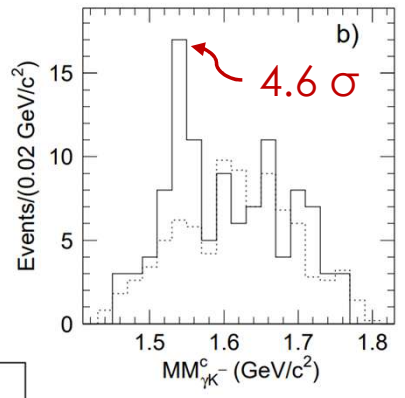
<https://doi.org/10.48550/>

Последующие измерения не подтвердили существование  $\Theta^+$  эксперимент CLAS в **2005** в реакции  $\gamma p \rightarrow \bar{K}^0 K^+ n$  не обнаружил сигнала  $\Theta^+(1540)$



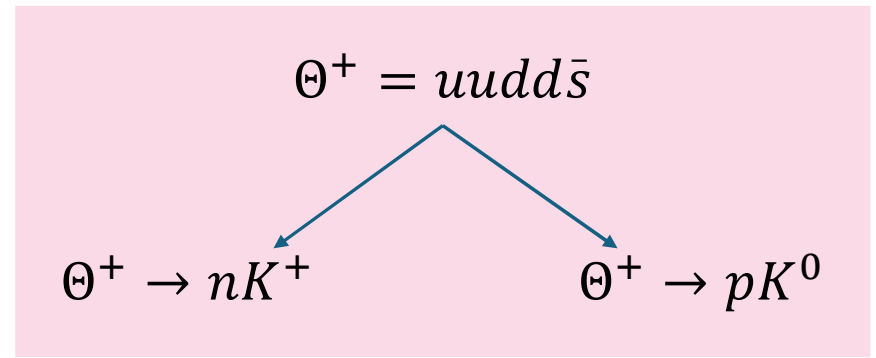
<https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ex/0510061>

В **2003** году коллаборация LEPs сообщила о наблюдении узкого  $S = +1$  резонанса в фотопродукции на нейтроне. Состояние интерпретировалось как возможный  $\Theta^+$



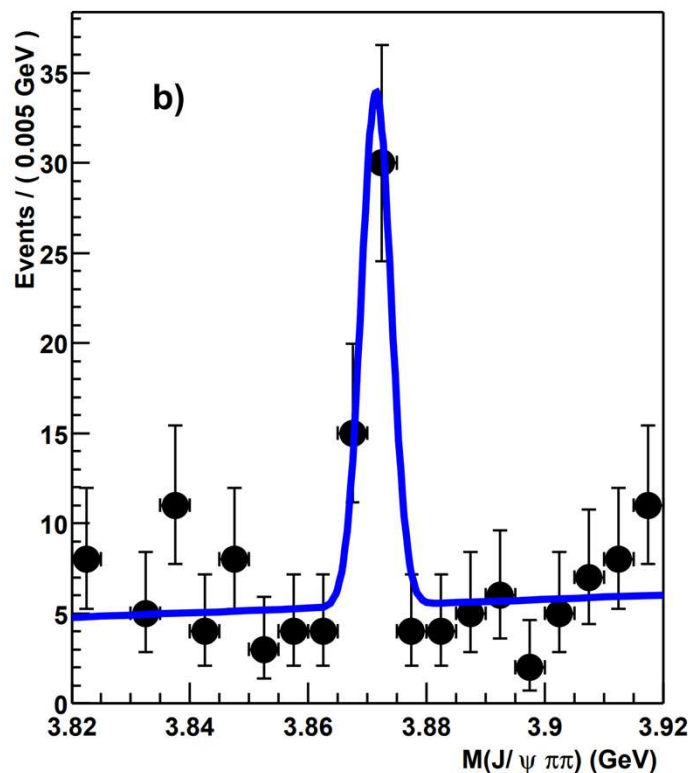
*"It can be interpreted as a molecular meson-baryon resonance or alternatively as an exotic 5-quark state ( $uudd\bar{s}$ ) that decays into a  $K^+$  and a neutron. The resonance is consistent with the lowest member of an anti-decuplet of baryons predicted by the chiral soliton model."*

<https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ex/0301020>



# Чармониевый тетракварк

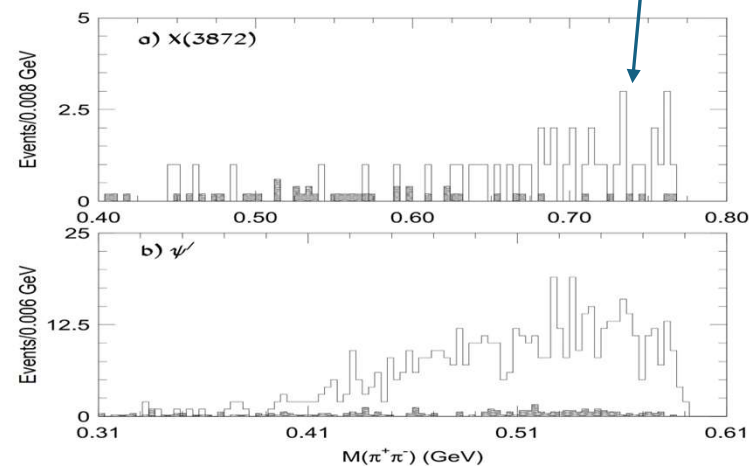
В **2003** году коллаборация **Belle** обнаружила узкое чармониеподобное состояние  $X(3872)$  в распаде  $B^+ \rightarrow K^+ X(3872), X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ .



$$M(D^0 \bar{D}^{*0}) = 3871.1 \pm 1.0 \text{ MeV}$$

$$M(X) = 3872.0 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.5_{\text{syst}} \text{ MeV}$$

- масса частицы в пределах ошибок совпала с суммой масс  $D^0$  и  $D^{*0}$ -мезонов.
- $X(3872)$  обладала крайне малой натуральной шириной и не распадалась на  $DD$ , хотя её масса превышала этот порог на 142 МэВ.
- распределение инвариантной массы системы  $\pi^+ \pi^-$  концентрировалось вблизи кинематического предела на  $\pm 0.78$  ГэВ, что соответствовало распаду через  $\rho^0$



# Чармониевый тетракварк - интерпретация

## $D^0\bar{D}^{*0}$ -молекула

$$X(3872) \sim D^0\bar{D}^{*0} + \bar{D}^0D^{*0}.$$

масса  $X(3872)$  расположена  $\rightarrow$  непосредственно вблизи порога  $D^0\bar{D}^{*0}$  - слабосвязанное состояние двух очарованных мезонов.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ph/0406080> (2004)

## Тетракварковая интерпретация

Альтернативный подход рассматривает  $X(3872)$  как компактное четырёхкварковое состояние:

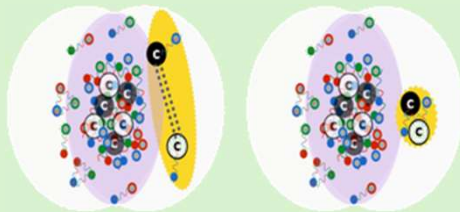
$$X(3872) \sim [\bar{c}q][c\bar{q}] / [\bar{c}\bar{q}][cq]$$

В простейших тетракварковых моделях ожидаются заряженные партнёры  $X^\pm$  - **не найдены**

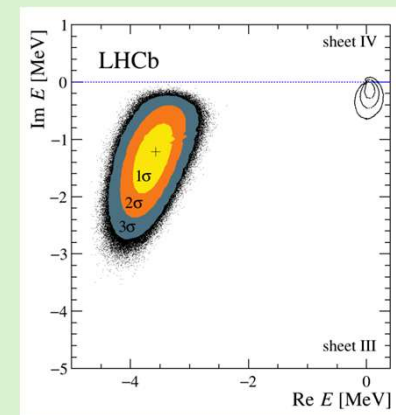
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.031501> (2005)

## Смешанная молекулярная модель

$X(3872)$  представляет собой смесь  $D^0\bar{D}^{*0}$ -молекулы и обычного чармония  $\chi_{c1}(2P)$ .



<https://doi.org/10.48550/arXiv.1212.0648> (2013)

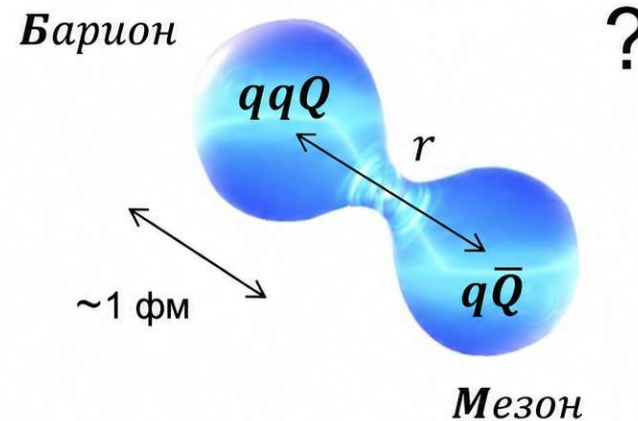
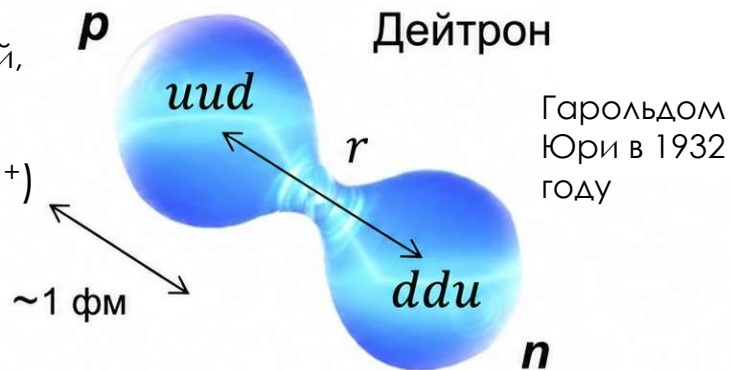


*“Since the asymmetry of the poles with respect to the threshold contains information on the potential molecular nature of the state”*

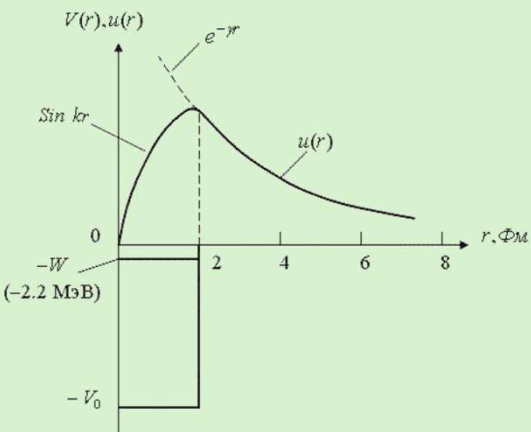
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.13419> (2020)

# Молекулярная модель

Никаких возбуждений,  
только основное  
состояние  
( $n=1, L=0, S=1, J^P=1^+$ )



Феноменологически оно моделируется обменом лёгкими мезонами:  $\pi, \rho, \pi\pi, \omega, \eta, \dots$ . По смыслу это аналогично тому, как в ядрах взаимодействие между атомами



Прямоугольная потенциальная яма дейтрона и его радиальная волновая функция

- Массы состояний находятся на пороге или немного ниже порога распада на исходные адроны:

$$M = m_B + m_{\bar{M}} - \Delta E, \Delta E \sim O(10) \text{ MeV.}$$

- Спин-чётность ограничена квантовыми числами составляющих адронов:

$$J = S_B + S_M, P = P_B P_M, \text{ при } L=0.$$

- Если составляющие адроны сами являются узкими, то и молекулярные состояния могут быть узкими.

Распады в канал

$$(Q\bar{Q}) + (qqq)$$

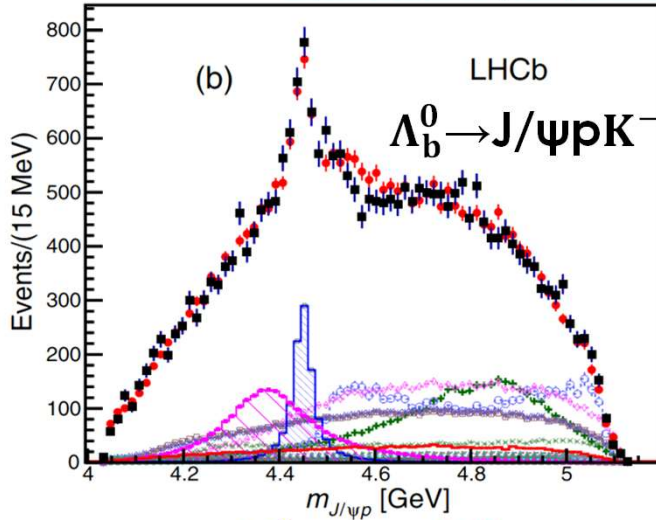
$Q\bar{Q}$  подавлены т.к. далеко

LHCb 2015

# Пентакварки на БАК

**2157** цитирований!

[Phys.Rev.Lett. 115 \(2015\) 072001](#)



Распады  $b$ -адронов с чармонием и барионом в конечном состоянии позволяют искать пентакварки в системе  $\psi$  + барион через анализ промежуточных резонансных структур

LHCb, **2015**: Изучено распределение инвариантной массы  $J/\psi\rho$  из распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\rho K^-$

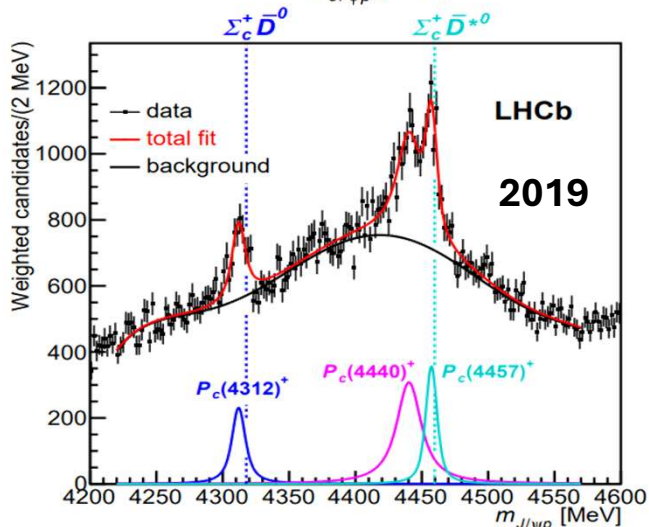
(полный шестимерный угловой анализ с учётом интерференции между резонансами)

**Observation**  $P_c(4450)^+$  и  $P_c(4380)^+$

**кандидатов в пентакварки**

Результат был подтверждён с использованием [модельно-независимого анализа \(2016\)](#)

[Также обнаружен](#) в Кабиббо-подавленном распаде  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\rho\pi^-$  (**2016**)



[Phys.Rev.Lett. 122 \(2019\) 22, 222001](#)

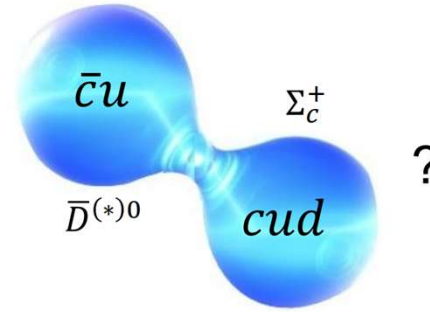
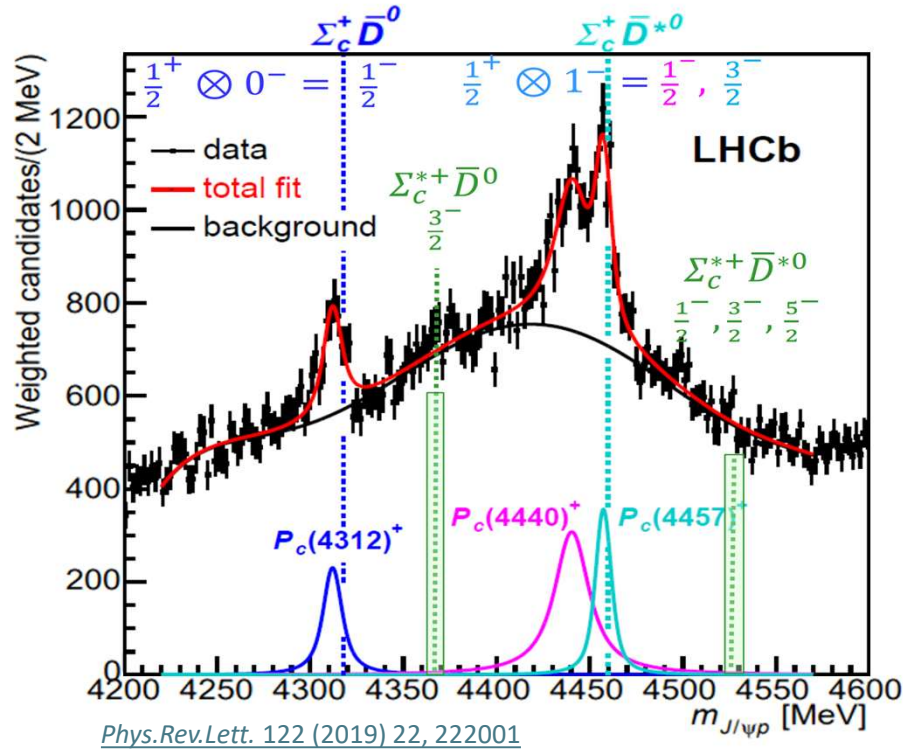
**2019**: добавлены данные Run 2, **9x  $\Lambda_b^0$  событий**. [Из 1D фита  \$J/\psi\rho\$](#)

[массовое распределение](#), пик 4450 разделен на два;

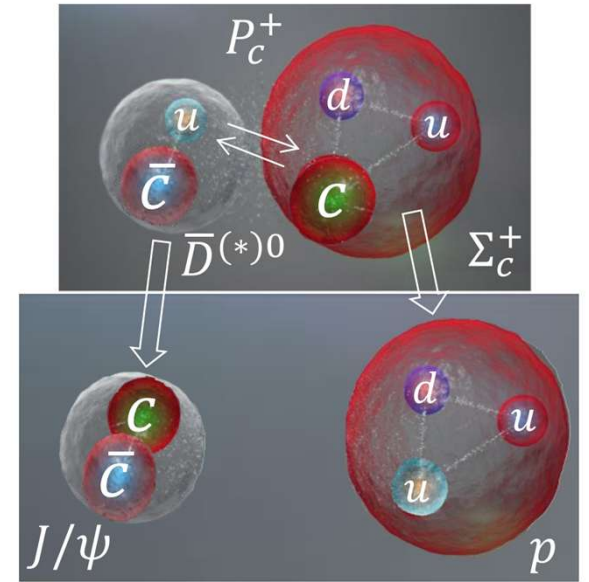
**+ наблюден** новый резонанс -  $P_c(4312)^+$

“Too much data” для полного 6D углового анализа резонансов

# Пентакварки на БАК



Три узких околопороговых состояния  $\Gamma \sim 10$  МэВ



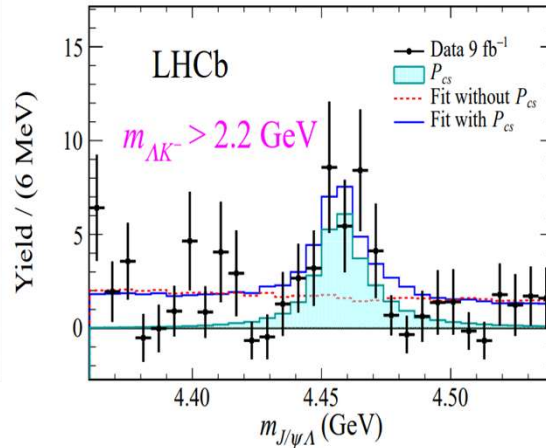
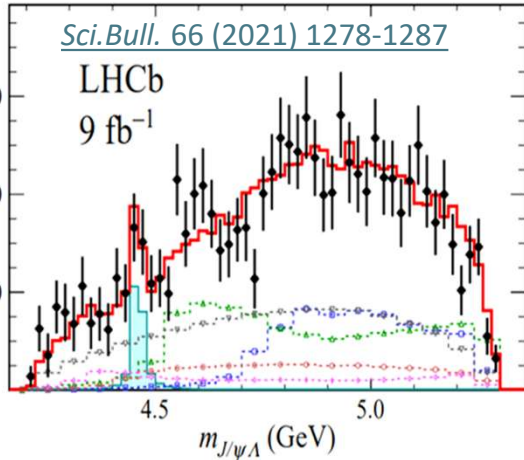
State	$M$ [MeV]	$\Gamma$ [MeV]	(95% CL)	$\mathcal{R}$ [%]
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$	(< 27)	$0.30 \pm 0.07^{+0.34}_{-0.09}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$	(< 49)	$1.11 \pm 0.33^{+0.22}_{-0.10}$
$P_c(4457)^+$	$4457.3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

Однако для подтверждения барионно-антимезонной молекулярной гипотезы необходимо измерить  $J^P$ , найти другие ожидаемые моды распада и найти  $\Sigma_c^{*+} D^{(*)0}$  состояний.

# Пентакварки на БАК

LHCb 2020:  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$

Помимо системы  $J/\psi$ , также была исследована система  $J/\psi \Lambda$ .



2020: 6D полный угловой анализ LHCb распада  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$  получено **evidence** странного пентакварка со скрытым очарованием  $P_{cs}(4459)^0$

CMS-BPH-18-005, *JHEP* 12 (2019) 100: на данных Run 1, CMS исследовала распад  $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda p^-$ , распределения инвариантных масс систем  $J/\psi \Lambda$  или  $J/\psi p$  оказались совместимы с гипотезой **отсутствия** пентакварковых состояний

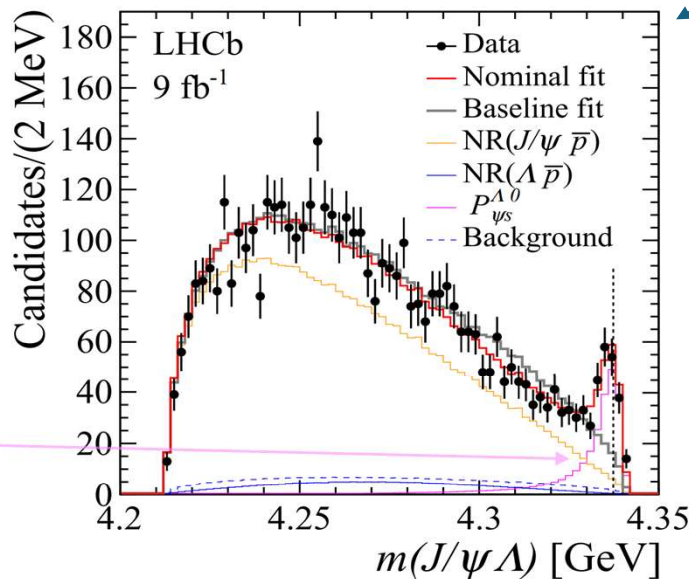
LHCb 2022: 6D амплитудный анализ  $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda p^-$  распада, **observation** нового странного пентакварка  $P_{cs}(4338)^0 \rightarrow J/\psi \Lambda$

нет значимых состояний распадающихся в  $J/\psi p$

[arXiv:2210.10346](https://arxiv.org/abs/2210.10346)

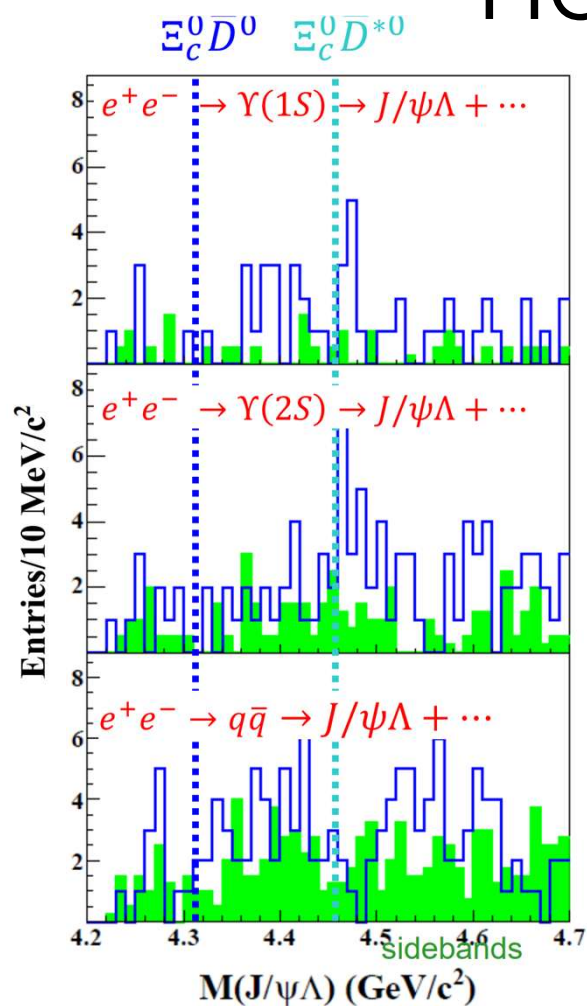
LHCb 2022:  
 $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda p^-$

$P_{\psi s}^\Lambda(4338)^0$

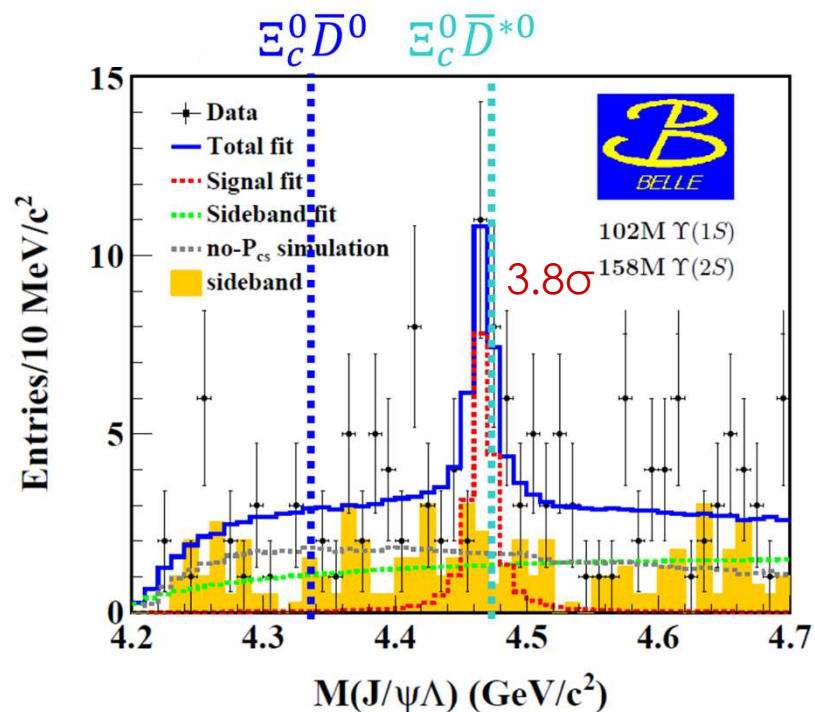


Интересно отметить, что пентакварки, наблюдаемые в системе  $J/\psi \Lambda$  в целом оказываются **уже**, чем состояния, наблюдаемые в системе  $J/\psi p$  (7-17 vs ~10-200 MeV). Для дважды странных пентакварков  $P_{css}$  ожидается еще более малые ширины (<10 MeV). Такие  $P_{css}$  могут распадаться, например, в канал  $J/\psi \Xi^-$

# Пентакварки – Belle



Нет сигнала  $P_{\psi_s}^\Lambda(4338)^0$  вблизи порога  
 Нет сигнала  $P_c^+ \rightarrow J/\psi p$  в распадах  $\Upsilon(1,2S)$



$$m_{P_{cs}^0} = 4471.7 \pm 4.8 \pm 0.6 \text{ MeV}$$

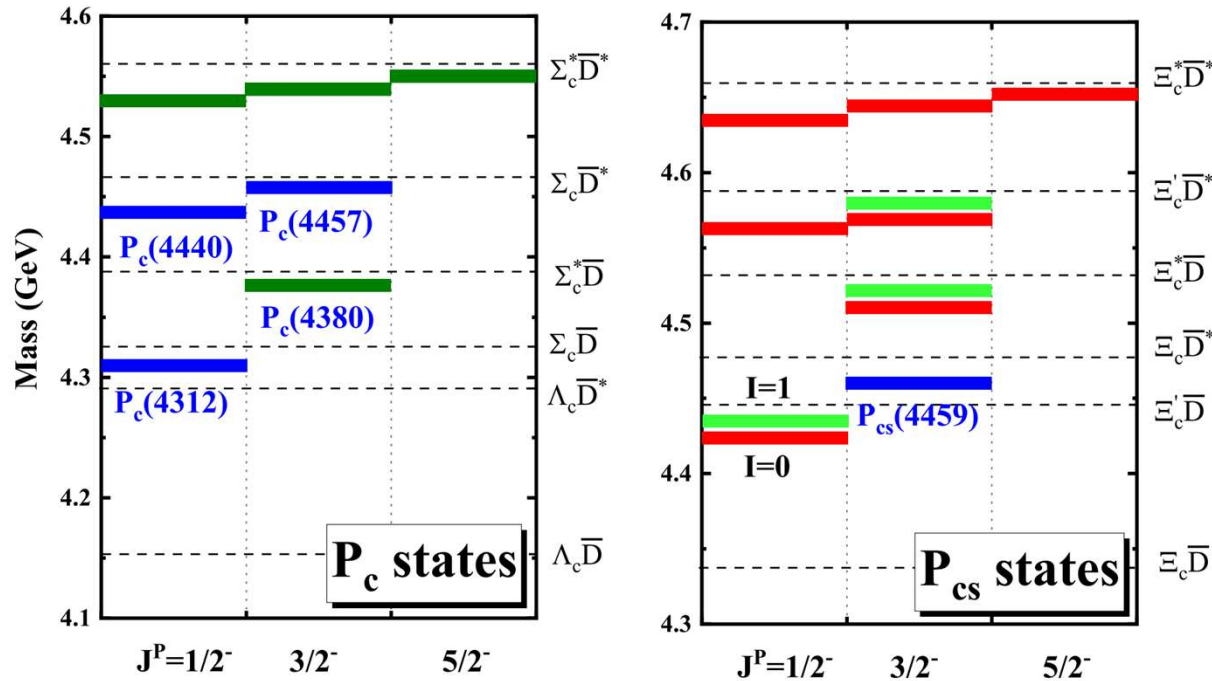
$$\Gamma_{P_{cs}^0} = 22 \pm 13 \pm 3 \text{ MeV}$$

Отличие от массы  
 $P_{cs}(4459)^0$  LHCb на  $1.8\sigma$

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.09951>

Если это подтвердится  
**НОВЫЙ МЕХАНИЗМ РОЖДЕНИЯ**

# Современный спектр $P_c$ -состояний



Близость этих состояний к барион-мезонным порогам указывает, что пороговая динамика играет существенную роль в их формировании.

Молекулярная модель ?

Состояние	Год / эксперимент	Канал наблюдения	Масса, (MeV)	Ширина, (MeV)	Ближайший порог
$(P_c(4380)^+)$	2015, LHCb	$(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)$	$(4380 \pm 8 \pm 29)$	$(205 \pm 18 \pm 86)$	$(\Sigma_c^* \bar{D})$ , ( $\sim 4385$ MeV)
$(P_c(4450)^+)$	2015, LHCb	$(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)$	$(4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5)$	$(39 \pm 5 \pm 19)$	$(\Sigma_c \bar{D}^*)$ , ( $\sim 4460$ MeV)
$(P_c(4312)^+)$	2019, LHCb	$(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)$	$(4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6})$	$(9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.6})$	$(\Sigma_c \bar{D})$ , ( $\sim 4318$ MeV)
$(P_c(4440)^+)$	2019, LHCb	$(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)$	$(4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7})$	$(20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1})$	$(\Sigma_c \bar{D}^*)$ , ( $\sim 4460$ MeV)
$(P_c(4457)^+)$	2019, LHCb	$(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)$	$(4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7})$	$(6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9})$	$(\Sigma_c \bar{D}^*)$ , ( $\sim 4460$ MeV)
$(P_c(4337)^+)$	2022, LHCb	$(B_s^0 \rightarrow J/\psi p \bar{p})$	$(4337^{+7}_{-4} \pm 2)$	$(^{29+26}_{-14} - 12^{+14})$	$(\chi_{c0} p)$ , ( $\sim 4353$ MeV); $(\Sigma_c \bar{D})$
$(P_{cs}(4459)^0)$	2020/2021, LHCb	$(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-)$	$(4458.8 \pm 2.9^{+4.7}_{-1.1})$	$(17.3 \pm 6.5^{+8.0}_{-5.7})$	$(\Xi_c' \bar{D})$ , ( $\sim 4446$ MeV); $(\Xi_c \bar{D}^*)$ , ( $\sim 4478$ MeV)
$(P_{\psi_s}^A(4338)^0)$	2022/2023, LHCb	$(B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p})$	$(4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4)$	$(7.0 \pm 1.2 \pm 1.3)$	$(\Xi_c \bar{D})$ , ( $\sim 4336$ - $4338$ MeV)

пентакварки подозрительно любят пороги

# Заключение

## **Литературный обзор показывает:**

1. КХД допускает многокварковые цветовые синглеты, поэтому пентакварковые конфигурации являются естественным расширением обычной схемы  $q\bar{q}$  и  $qqq$ .
2. История  $\Theta^+$  показала, что для экзотических адронов недостаточно наблюдения пика: необходимы высокая статистика, контроль фоновых отражений и амплитудный анализ.
3. Наблюдения LHCb сформировали современный спектр  $P_c$  - и  $P_{cs}$ -кандидатов, причём многие из них расположены вблизи барион-мезонных порогов.
4. Основной нерешённый вопрос: являются ли эти состояния адронными молекулами, компактными пентакварками или проявлением пороговой динамики.

## **Вывод для дальнейшей работы:**

Поиск новых состояний, в частности странных и дважды-странных пентакварков в каналах с  $J/\psi\Lambda$  и  $J/\psi\Xi^-$ , является прямым продолжением изучения многокварковых адронов.

