

Исследование распадов прелестных адронов с чармонием в конечном состоянии

Тулупов Александр

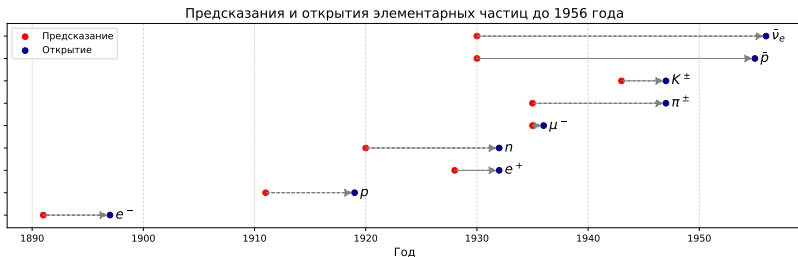
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Май 2025

- 1 Исторический экскурс
- 2 Открытие экзотики
- 3 Квантовые числа $X(3872)$
- 4 Теоритические модели описания тетракварков
- 5 Поиски заряженных тетракварков
- 6 Связь литературного обзора с исследуемыми распадами
- 7 Выводы
- 8 Список литературы

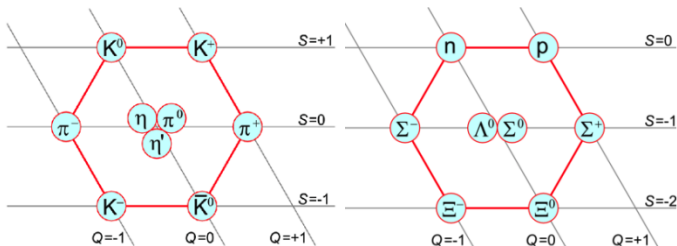
На заре физики частиц

- До XX века: модель вещества Томпсона; известны только фотон и электрон.
- Первая половина XX века: атомарная модель; протоны и нейтроны считались фундаментальными, мезоны — кандидатами на роль переносчиков.



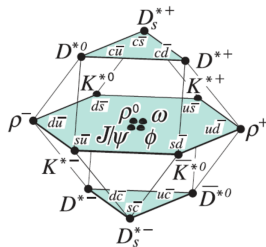
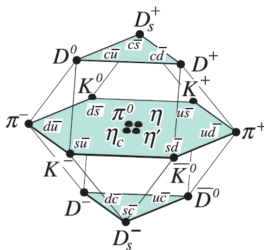
От мезонов к кваркам

- Ускорители с сильной фокусировкой $\Rightarrow$ всплеск открытий новых частиц: π , Λ , K , Σ , Δ , ...
- Гелл-Манн классифицирует "Зоопарк" с помощью теории изоспина, но физическая основа симметрии оставалась неясной



Кварковая модель

- В 1964 году Гелл-Манн и независимо от него Джордж Цвейг предположили, что адроны состоят из более фундаментальных частиц — кварков.
- Существование Δ^{++} из трех одинаковых кварков $\Rightarrow$ новое квантовое число – **цвет**
- В 1968 году теория была подтверждена экспериментом по исследованию внутренней структуры протона на SLAC
- Теория предсказала открытие ряда частиц и впоследствии стала основой Стандартной Модели (СМ) физики элементарных частиц.



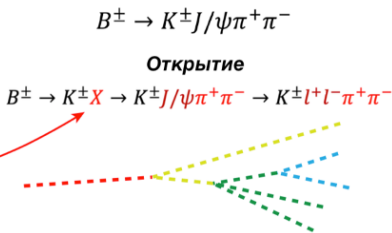
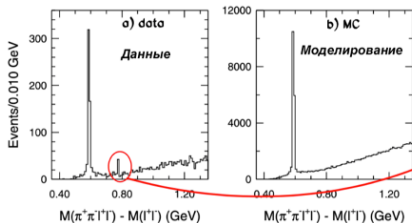
Классификация адронов в Стандартной Модели

До 2003 года не было однозначно зарегистрированных экзотических адронов; спектроскопия ограничивалась каноническими $q\bar{q}$ - и qqq -состояниями, однако не запрещены состояния из более чем трех кварков.

Тип адрона	Состав	Примеры
Обычные адроны	Мезоны ($q\bar{q}$)	π^+ , K^0 , η_c
	Барионы (qqq)	p , n , Ω^-
Экзотические адроны	Тетракварки ($qq\bar{q}\bar{q}$)	Не наблюдались до 2003 года
	Пентакварки ($qqqq\bar{q}$)	
	Глюболы (только глюоны)	
	Гибриды ($q\bar{q} + g$)	

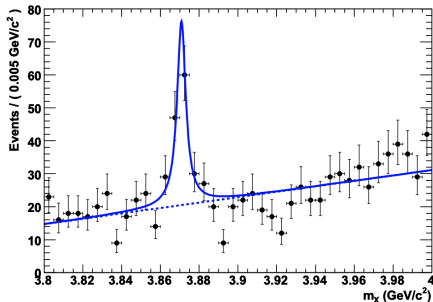
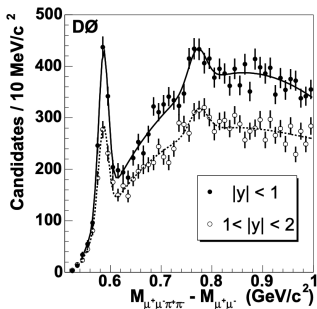
Открытие X(3872) (Belle, 2003)

- Коллаборация Belle наблюдала распад $B^\pm \rightarrow K^\pm J/\psi \pi^+ \pi^-$ (200 млн $B\bar{B}$ пар) [12].
- Выявлен узкий пик при $M(\pi^+ \pi^- J/\psi) = 3872.0 \pm 0.6$ MeV, с $> 10\sigma$ значимостью.
- Значение массы практически совпало с порогом $M(D^0) + M(D^{*0}) \approx 3871.8$ MeV, что породило предположения о молекулярной структуре.
- Ширина: $\Gamma < 2.3$ МэВ



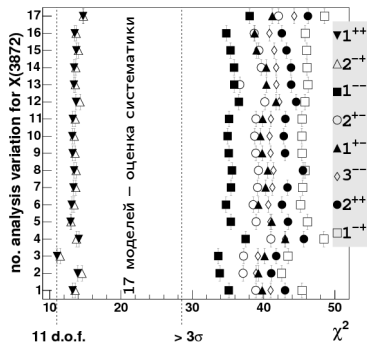
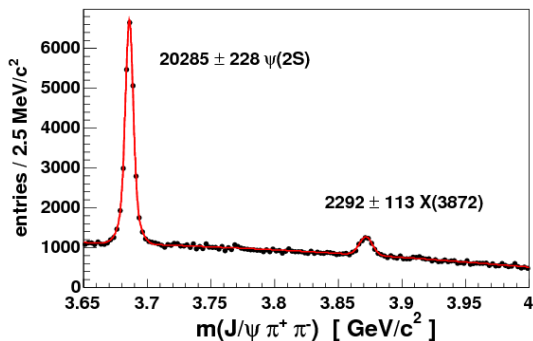
Подтверждение $X(3872)$ — CDF, D0, BaBar (2004)

- Независимо подтверждена коллаборациями CDF [6], D0 (протоны Tevatron) [7] и BaBar (SLAC) вскоре после открытия [9].
- Все эксперименты наблюдали резонанс $X(3872)$ в каналах $J/\psi \pi^+ \pi^-$, измерив близкие значения массы и узкую ширину



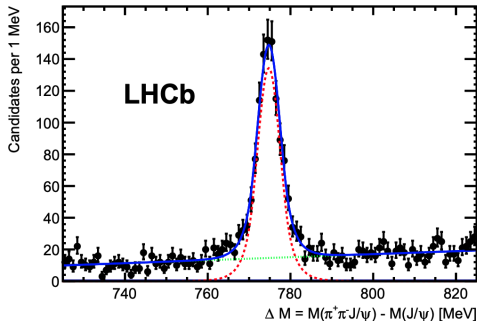
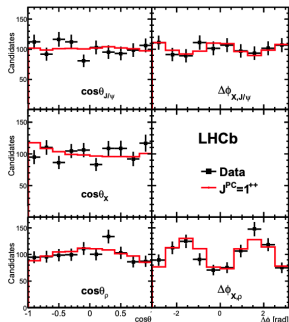
Квантовые числа $X(3872)$ — CDF (2007)

- Коллаборация CDF проанализировала угловые корреляции в распадах $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ (данные $\bar{p}p$, $\sqrt{s} = 1.96$ ТэВ) [8]
- Выявлено, что возможны только варианты $J^{PC} = 1^{++}$ или 2^{-+} (остальные гипотезы исключены данными)

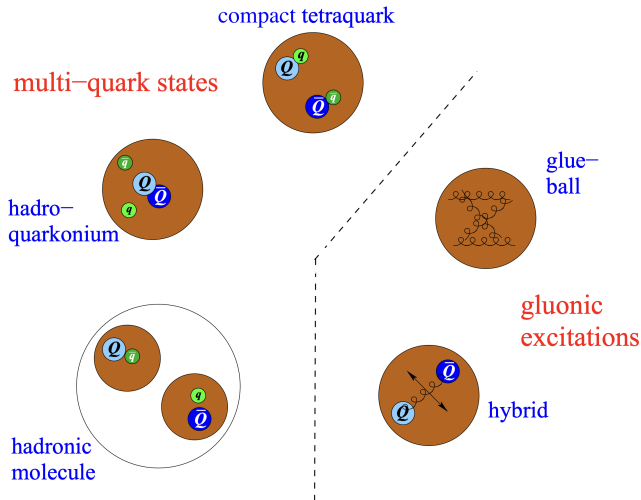


Квантовые числа $X(3872)$ — LHCb (2015)

- Коллаборация LHCb, используя распады $B^+ \rightarrow X(3872)K^+$ ($X(3872) \rightarrow \rho^0 J/\psi$), впервые без дополнительных допущений установила $J^{PC} = 1^{++}$

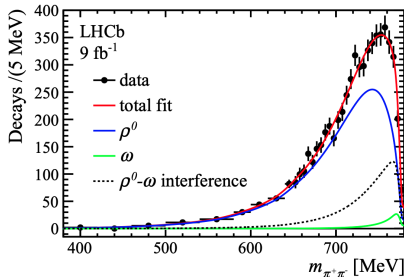
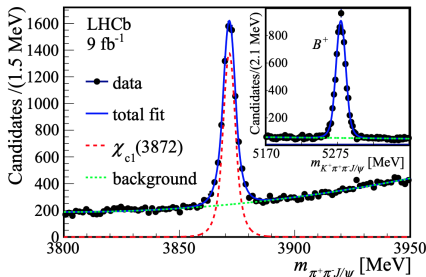


Теоретические модели



Исследование структуры $X(3872)$ — LHCb (2023)

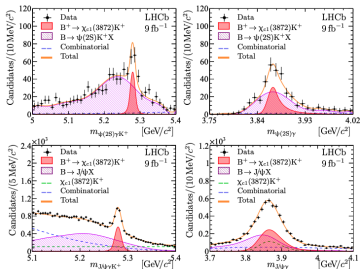
- Коллаборация LHCb изучила дипионный спектр в $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ (данные $9fb^{-1}$) [3]
- Обнаружен значительный вклад канала $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \omega J/\psi$ (около 21% всех распадов) со значимостью более 7σ
- Амплитуда изоспин-нарушающего распада через ρ^0 оказалась в 6 раз больше ожидаемого для чистого чармония, что говорит о нечармониевой природе $X(3872)$.



Радиационные распады $X(3872)$ — LHCb (2024)

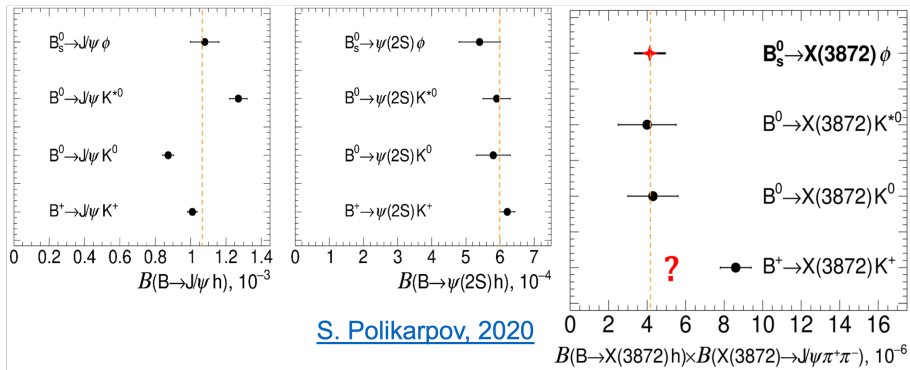
- LHCb впервые зарегистрировал $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ в распадах $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$ [5].
- Измерено отношение ширин $\Gamma(X \rightarrow \psi(2S)\gamma)/\Gamma(X \rightarrow J/\psi\gamma) \approx 1.67 \pm 0.24$
- Такое большое отношение не согласуется с чисто молекулярной моделью и требует компактной чармониевой или тетракварковой компоненты в структуре частицы

Reference		$\mathcal{B}_{\psi\gamma}$	
T. Barnes and S. Godfrey	[67]	5.8	c $\bar{c}$
T. Barnes, S. Godfrey and S. Swanson	[69]	2.6	c $\bar{c}$
F. De Fazio	[84]	(1.64 ± 0.25)	c $\bar{c}$
B.-Q. Li and K. T. Chao	[85]	1.3	c $\bar{c}$
Y. Dong <i>et al.</i>	[86]	$1.3 - 5.8$	c $\bar{c}$
A. M. Badalian <i>et al.</i>	[87]	(0.8 ± 0.2)	c $\bar{c}$
J. Ferretti, G. Galata and E. Santopinto	[88]	6.4	c $\bar{c}$
A. M. Badalian, Yu. A. Simonov and B. L. G. Bakker	[89]	2.4	c $\bar{c}$
W. J. Deng <i>et al.</i>	[90]	1.3	c $\bar{c}$
F. Giacosa, M. Piotrowska and S. Goito	[71]	5.4	c $\bar{c}$ /v $\bar{c}$
E. S. Swanson	[81]	0.38%	D $\bar{D}^*$
Y. Dong <i>et al.</i>	[86]	0.33%	D $\bar{D}^*$
D. P. Rathaud and A. K. Rai	[91]	0.25	D $\bar{D}^*$
R. F. Lebed and S. R. Martinez	[92]	0.33%	D $\bar{D}^*$
B. Grinstein, L. Maiani and A. D. Polosa	[93]	3.6%	D $\bar{D}^*$
F.-K. Guo <i>et al.</i>	[82]	$0.21(g_2^2/g_2)^2$	D $\bar{D}^*$
D. A.-S. Molnar, R. F. Luiz and R. Higa	[83]	$2 - 10$	D $\bar{D}^*$
E. Cinciglu <i>et al.</i>	[94]	< 4	D $\bar{D}^*$
S. Takeuchi, M. Takizawa and K. Shimizu	[95]	$1.1 - 3.4$	D $\bar{D}^*$
B. Grinstein, L. Maiani and A. D. Polosa	[93]	$> (0.95^{+0.01}_{-0.07})$	c $\bar{c}q\bar{q}$



Аномальный $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X(3872)K^+)$

- В 2020 году CMS показала аномально большой выход $B^+ \rightarrow X(3872)K^+$ [13]
- Позже, расхождение было объяснено в рамках дикварк-дикваркового описания $X(3872)$

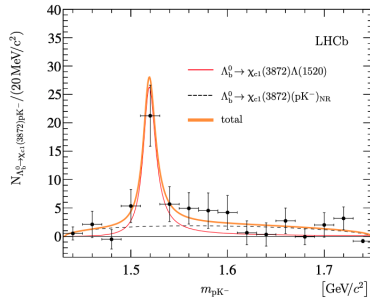
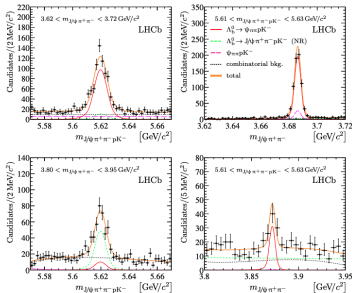


Первое наблюдение $X(3872)$ в распаде Λ_b

- Первое наблюдение $\Lambda_b \rightarrow X(3872)pK^-$, $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ (LHCb, 2019) [4]
- Измерено отношение бренчингов:

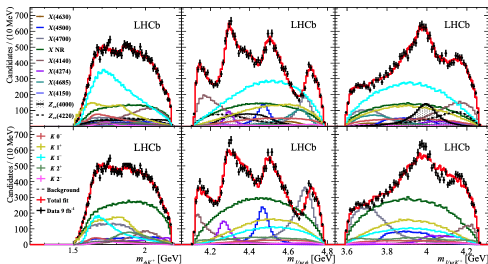
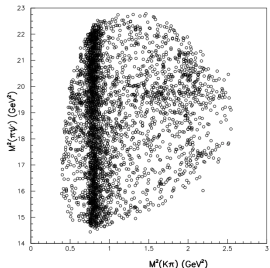
$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b \rightarrow XpK^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b \rightarrow \psi'pK^-)} \times \frac{\mathcal{B}(X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)}{\mathcal{B}(\psi' \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)} = (5.2 \pm 1.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$$

- Вклад $\Lambda(1520)$ составляет $(58 \pm 15)\%$



Заряженные тетракварки

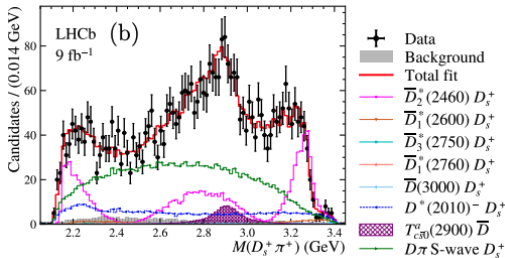
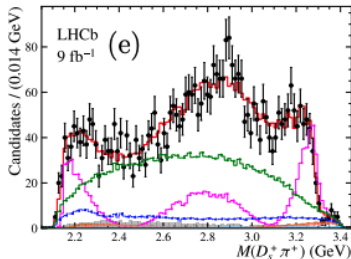
- $Z_c(4430)^\pm$ (Belle, 2008) [11]:
 - Первое наблюдение ($> 6\sigma$) в $B \rightarrow K\pi^\pm\psi(2S)$
 - Адро-кваркониевая модель: чармоний + легкие кварки
- $Z_c(4200)^+$ (Belle, 2014) [10]:
 - $M = 4196^{+31+17}_{-29-14}$ МэВ
 - Также $J^P = 1^+$
- $Z_{cs}(4000)^+$ (LHCb, 2021) [2]:
 - $M = 4003 \pm 6^{+4}_{-14}$ МэВ
 - $J^P = 1^+$



Заряженные тетракварки

$T_{c\bar{s}0}^a(2900)^{0/++}$ (LHCb, 2022) в распадах $B \rightarrow \bar{D} D_s \pi$ (LHCb, 2022) [1]:

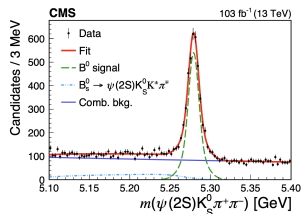
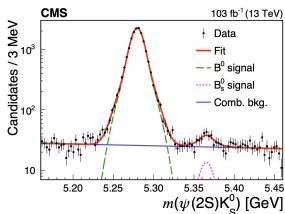
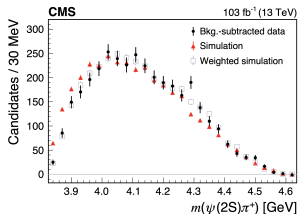
- Первый тетракварк с кварками 4 разных ароматов
- $M = 2.935 \pm 0.021 \pm 0.013$ ГэВ
- $\Gamma = 143 \pm 38 \pm 25$ МэВ
- Первые достоверные состояния с кварками разных поколений



Связь литературного обзора с исследуемыми распадами

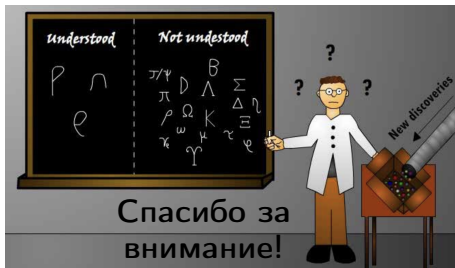
В данной диссертации представлены результаты двух работ:

- 1 Обнаружение распадов $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0$ и $B^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0\pi^+\pi^-$, $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$. В продуктах четырехчастичного распада был произведен поиск экзотических частиц [14].
- 2 Поиск распада $\Lambda_b \rightarrow X(3872)\Lambda$ – содержащего экзотическое чармониеподобное состояние $X(3872)$. При этом, X распадается по стандартному каналу: $X(3872)^0 \rightarrow (J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)\pi^+\pi^-$



Заключение

- Физика экзотических адронов – относительно новое развивающееся направление физики элементарных частиц
- $X(3872)$ – яркий представитель нового типа материи, природа которого до конца не ясна
- Исследование новых распадов очарованных адронов с чармонием в конечном состоянии способствует как открытию новых, так и исследованию уже открытых экзотических состояний



- [1] R. Aaij и др. “First Observation of a Doubly Charged Tetraquark and Its Neutral Partner”. В: *Phys. Rev. Lett.* 131.4 (2023), с. 041902. DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.041902. arXiv: 2212.02716 [hep-ex].
- [2] Roel Aaij и др. “Observation of New Resonances Decaying to $J/\psi K^+ +$ and $J/\psi \phi$ ”. В: *Phys. Rev. Lett.* 127.8 (2021), с. 082001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.082001. arXiv: 2103.01803 [hep-ex].
- [3] Roel Aaij и др. “Observation of sizeable ω contribution to $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \pi + \pi - J/\psi$ decays”. В: *Phys. Rev. D* 108.1 (2023), с. L011103. DOI: 10.1103/PhysRevD.108.L011103. arXiv: 2204.12597 [hep-ex].

- [4] Roel Aaij и др. “Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)pK^-$ decay”. В: *JHEP* 09 (2019), с. 028. DOI: 10.1007/JHEP09(2019)028. arXiv: 1907.00954 [hep-ex].
- [5] Roel Aaij и др. “Probing the nature of the $\chi_{c1}(3872)$ state using radiative decays”. В: *JHEP* 11 (2024), с. 121. DOI: 10.1007/JHEP11(2024)121. arXiv: 2406.17006 [hep-ex].
- [6] T. Aaltonen и др. “Analysis of the quantum numbers J^{PC} of the X(3872) particle”. В: *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009), с. 152001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.152001. arXiv: 0906.5218.
- [7] V.M. Abazov и др. “Observation and properties of the X(3872) decaying to $J/\psi\pi^+\pi^-$ in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV”. В: *Phys. Rev. Lett.* 93 (2004), с. 162002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.162002. arXiv: hep-ex/0405004.

- [8] A. Abulencia и др. “Analysis of the quantum numbers J^{PC} of the $X(3872)$ ”. В: *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007), с. 132002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.132002. arXiv: hep-ex/0612053.
- [9] B. Aubert и др. “Study of the decay $B^- \rightarrow J/\psi K^- \pi^+ \pi^-$ and measurement of the $B^- \rightarrow X(3872) K^-$ branching fraction”. В: *Phys. Rev. D* 71 (2005), с. 071103. DOI: 10.1103/PhysRevD.71.071103. arXiv: hep-ex/0406022.
- [10] K. Chilikin и др. “Observation of a new charged charmoniumlike state in $B^0 \rightarrow J/\psi K^- \pi^+$ decays”. В: *Phys. Rev. D* 90.11 (2014), с. 112009. DOI: 10.1103/PhysRevD.90.112009. arXiv: 1408.6457 [hep-ex].
- [11] S. K. Choi и др. “Observation of a resonance-like structure in the $\pi^\pm \psi'$ mass distribution in exclusive $B \rightarrow K \pi^\pm \psi'$ decays”. В: *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008), с. 142001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.142001. arXiv: 0708.1790 [hep-ex].

- [12] S.K. Choi и др. “Observation of a narrow charmoniumlike state in exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays”. В: *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003), с. 262001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.262001. arXiv: hep-ex/0309032.
- [13] A. M. Sirunyan и др. “Observation of the $B_s^0 \rightarrow X(3872)\phi$ decay”. В: *Phys. Rev. Lett.* 125.15 (2020), с. 152001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.152001. arXiv: 2005.04764 [hep-ex].
- [14] Armen Tumasyan и др. “Observation of $B^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0 \pi^+ \pi^-$ and $B_S^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0$ decays”. В: *Eur. Phys. J. C* 82 (2022), с. 499. DOI: 10.1140/epjc/s10052-022-10315-y. arXiv: 2201.09131 [hep-ex].