

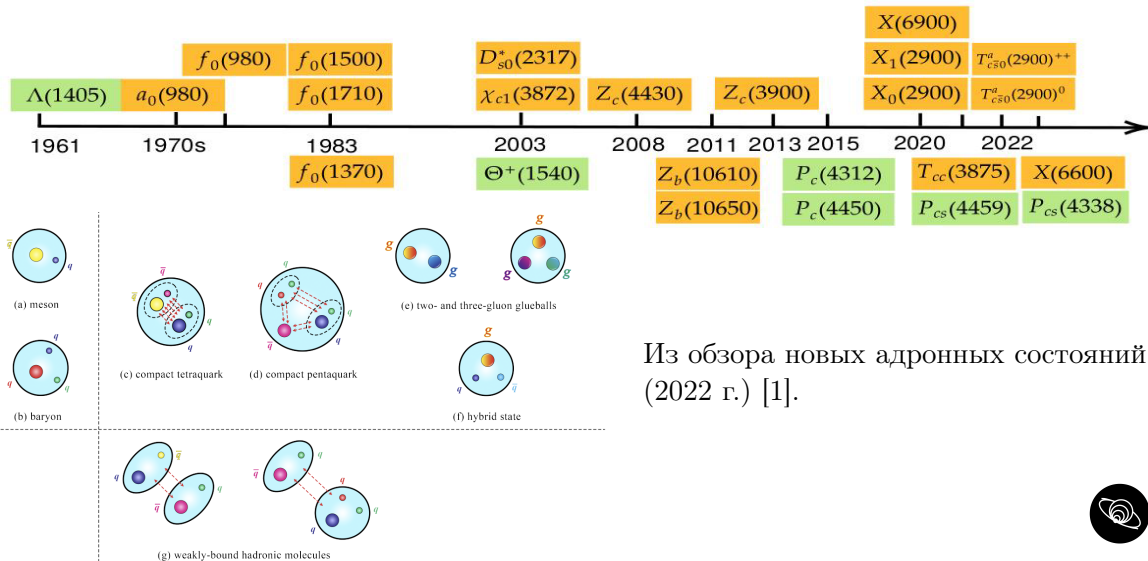
Обзорный доклад на тему «Пentakварки»

Чехонина Алёна Александровна

НИЯУ МИФИ, гр. М24 — 114

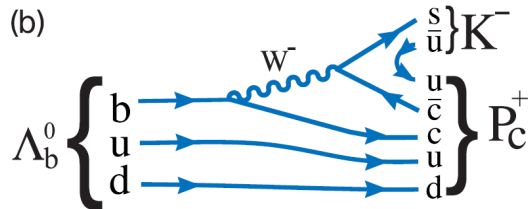
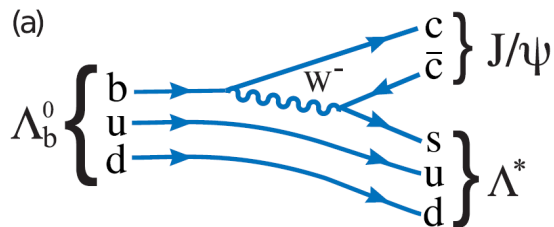
Физический семинар
27.11.2025





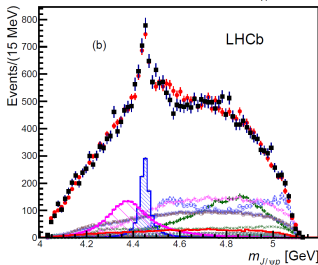
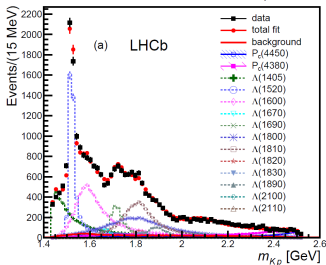
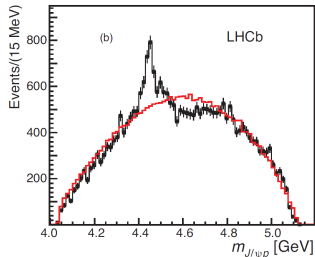
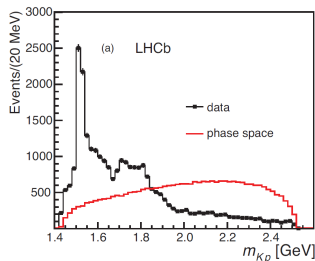
Из обзора новых адронных состояний
(2022 г.) [1].

Наблюдение резонансов $J/\psi p$, согласующихся с состояниями пентаварка в $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ в эксперименте LHCb [2]



pp -столкновения: 1 фб^{-1} при энергии 7 ТэВ и 2 фб^{-1} при 8 ТэВ.





- $m_{P_c^+}$: $4380 \pm 8 \pm 29$ МэВ и $4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$ МэВ
- Γ : $205 \pm 18 \pm 86$ МэВ и $39 \pm 5 \pm 19$ МэВ
- Доли от общей выборки: $(8.4 \pm 0.7 \pm 4.2)\%$ и $(4.1 \pm 0.5 \pm 1.1)\%$
- J^P : наилучший фит у $(3/2^-, 5/2^+)$, но приемлемы и $(3/2^+, 5/2^-)$, $(5/2^+, 3/2^-)$



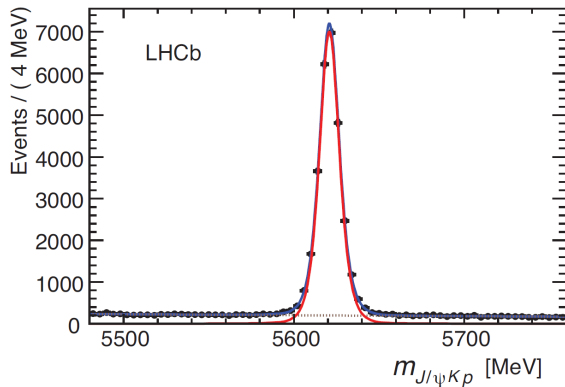
Отборы

- Λ_b^0 : $\chi_5^2 < 50$, flight distance > 1.5 мм
- $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $p_\mu^T > 500$ МэВ, $m_{\mu\mu} = m_{J/\psi} \pm 120$ МэВ, $\chi^2 < 16$
- Отдельные мюоны $p_\mu^T > 550$ МэВ и адроны $p_h^T > 250$ МэВ, $\chi^2 > 9$
- Система $K^- p$: $\chi^2 < 16$

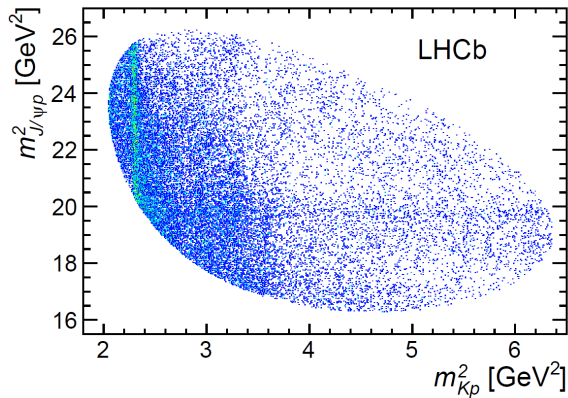
Фоновые процессы

- Разделение сигнала Λ_b^0 и фона производилось с использованием метода машинного обучения из библиотеки TMVA — BDTG (Gradient-Boosted Decision Trees).
- Вето на продукты распадов от \bar{B}_s^0 и \bar{B}^0 , т.е. отбрасывание событий с $J/\psi K^+ K^-$ и $J/\psi \pi^+ K^-$ с инвариантной массой в диапазоне ± 30 МэВ массы мезонов.
- Фоны от распадов Ξ_b не вносят существенного вклада в выборку.
- Итог: 5.4% фона в пределах ± 15 МэВ пика массы $J/\psi K^- p$.





фит — синий,
сигнал — красный,
фон — черный



Вертикальная полоса вблизи 2.3 ГэВ²
соответствует резонансу $\Lambda(1520)$.

Также наблюдается горизонтальная
полоса вблизи 19.5 ГэВ².



Систематические неопределенности [2]

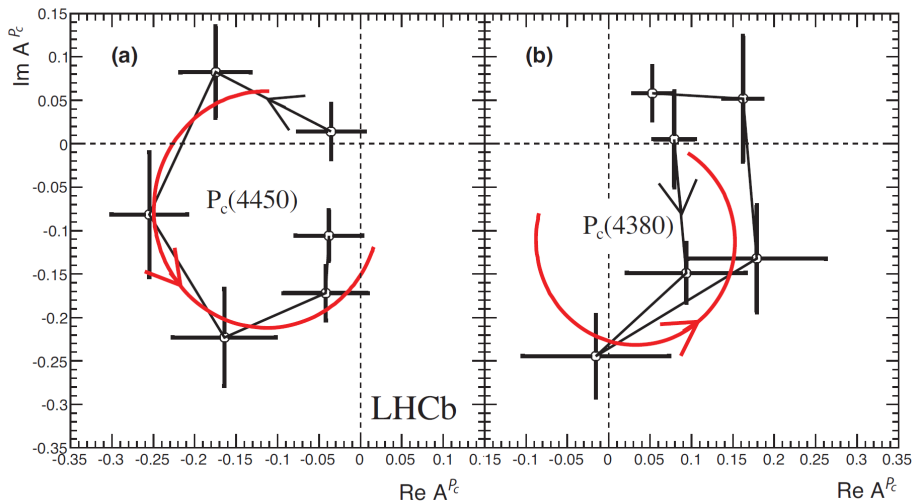
Source	M_0 (MeV)		Γ_0 (MeV)		Fit fractions (%)			
	low	high	low	high	low	high	$\Lambda(1405)$	$\Lambda(1520)$
Extended vs. reduced	21	0.2	54	10	3.14	0.32	1.37	0.15
Λ^* masses & widths	7	0.7	20	4	0.58	0.37	2.49	2.45
Proton ID	2	0.3	1	2	0.27	0.14	0.20	0.05
$10 < p_p < 100$ GeV	0	1.2	1	1	0.09	0.03	0.31	0.01
Nonresonant	3	0.3	34	2	2.35	0.13	3.28	0.39
Separate sidebands	0	0	5	0	0.24	0.14	0.02	0.03
J^P ($3/2^+$, $5/2^-$) or ($5/2^+$, $3/2^-$)	10	1.2	34	10	0.76	0.44		
$d = 1.5 - 4.5$ GeV $^{-1}$	9	0.6	19	3	0.29	0.42	0.36	1.91
$L_{A_b^0}^{P_c} \Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ (\text{low/high}) K^-$	6	0.7	4	8	0.37	0.16		
$L_{P_c} P_c^+ (\text{low/high}) \rightarrow J/\psi p$	4	0.4	31	7	0.63	0.37		
$L_{A_b^0}^{A_n^*} \Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*$	11	0.3	20	2	0.81	0.53	3.34	2.31
Efficiencies	1	0.4	4	0	0.13	0.02	0.26	0.23
Change $\Lambda(1405)$ coupling	0	0	0	0	0	0	1.90	0
Overall	29	2.5	86	19	4.21	1.05	5.82	3.89
sFit/cFit cross check	5	1.0	11	3	0.46	0.01	0.45	0.13



State	J^P	M_0 (MeV)	Γ_0 (MeV)	# Reduced	# Extended
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	$1405.1^{+1.3}_{-1.0}$	50.5 ± 2.0	3	4
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	1519.5 ± 1.0	15.6 ± 1.0	5	6
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	1600	150	3	4
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	1670	35	3	4
$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	1690	60	5	6
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	1800	300	4	4
$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	1810	150	3	4
$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	1820	80	1	6
$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	1830	95	1	6
$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	1890	100	3	6
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	2100	200	1	6
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	2110	200	1	6
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	2350	150	0	6
$\Lambda(2585)$?	≈ 2585	200	0	6



Диаграмма Арганда

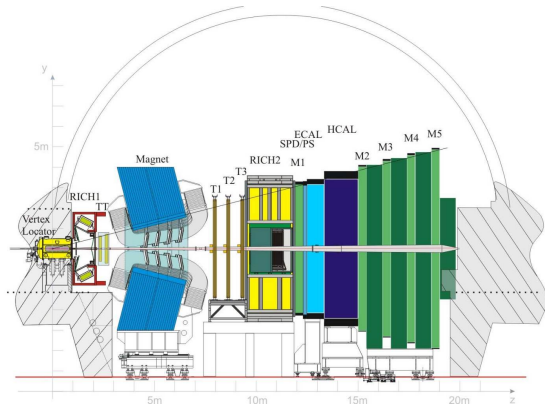


Large Hadron Collider beauty (LHCb) [3]

Основными составляющими LHCb являются: вершинный детектор VELO, черенковские счетчики RICH-1 и RICH-2, магнитная система, трековые детекторы, электромагнитный и адронный калориметры, мюонные камеры.

Общие параметры LHCb:

- вес 5600 тонн;
- длина 21 м;
- высота 10 м;
- ширина 13 м.



Сводная таблица, основанная на данных PDG [4] 2025

Все перечисленные состояния отмечены символом «*», что указывает на недостаточность имеющихся доказательств их существования.

Название	Масса (МэВ)	Ширина (МэВ)	$I(J^P)$	Ссылка	Комментарий
$P_{c\bar{c}}(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$	$1/2(?)^?$	Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 22, 222001	LHCb pp при 7, 8, 13 ТэВ
$P_{c\bar{c}s}(4338)^0$	$4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4$	$7.0 \pm 1.2 \pm 1.3$	$0(1/2^-)$	Phys.Rev.Lett. 131 (2023) 3, 031901	LHCb $B^- \rightarrow J/\psi \Lambda \bar{p}$
$P_{c\bar{c}}(4380)^+$	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$	$1/2(?)^?$	Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 072001	LHCb pp при 7, 8 ТэВ
$P_{c\bar{c}}(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$	$1/2(?)^?$	Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 22, 222001	LHCb pp при 7, 8, 13 ТэВ
$P_{c\bar{c}}(4457)^+$	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$	$1/2(?)^?$	Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 22, 222001	LHCb pp при 7, 8, 13 ТэВ
$P_{c\bar{c}s}(4459)^0$	$4458.8 \pm 2.9^{+4.7}_{-1.1}$	$17.3 \pm 6.5^{+8.0}_{-5.7}$	$0(?)^?$	Sci.Bull. 66 (2021) 1278-1287	LHCb $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$

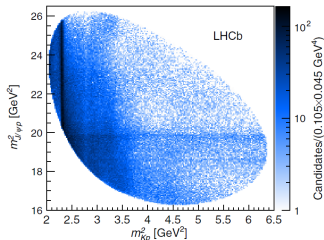


Наблюдение узкого пентакваркового состояния $P_{c\bar{c}}(4312)^+$ и двухпиковой структуры $P_{c\bar{c}}(4450)^+$ [5]

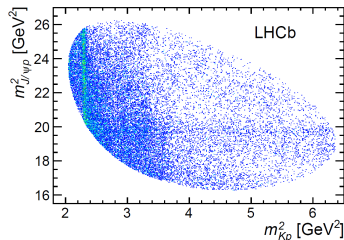
$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ в pp -столкновениях в эксперименте LHCb:

Run I — 7 и 8 ТэВ, 3 фб $^{-1}$, Run II — 13 ТэВ, 6 фб $^{-1}$.

Результат 2019 г.

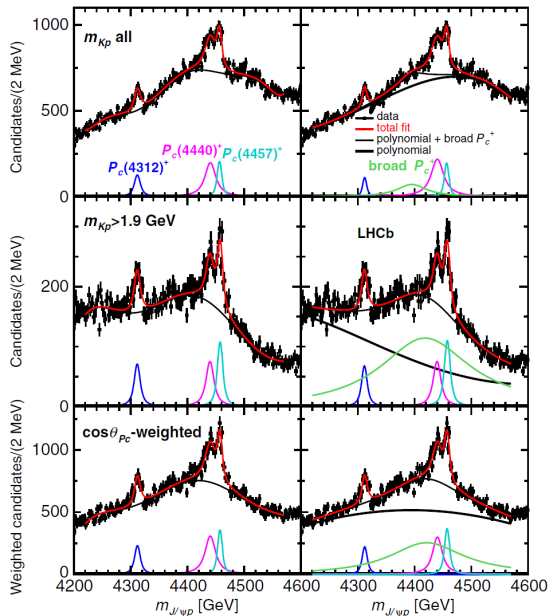


Результат 2015 г.

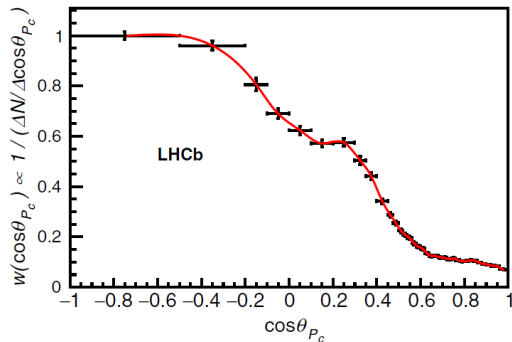


- 6.4% фоновых частиц, не относящихся к Λ_b^0 . Они равномерно распределены по PS.
- Вертикальные полосы — резонансы Λ^* .
- Горизонтальные полосы: $P_{c\bar{c}}(4312)^+$, $P_{c\bar{c}}(4440)^+$, $P_{c\bar{c}}(4457)^+$ при $m_{J/\psi p}^2 = 18.6, 19.7$ и 19.9 ГэВ^2 соответственно.



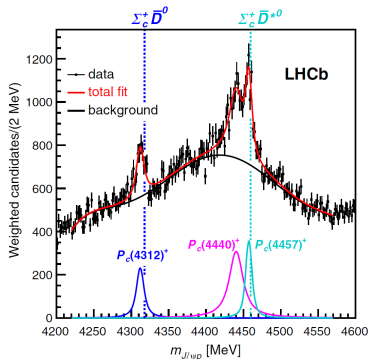


θ_{P_c} угол между K^- и J/ψ в системе покоя
 P_c (угол спиральности)



$m_{Kp} > 1.9$ ГэВ исключает более 80%
 вкладов Λ^*



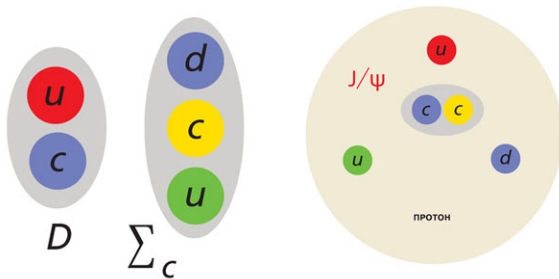


- Значимость состояний оценивалась методом псевдоэкспериментов.
- $P_c(4312)^+$: $7.3\sigma(8.2\sigma)$ при $m_{J/\psi p} > 1.9\text{ГэВ}$ ($\cos\theta_{P_c}$ -weighted).
- Двухпиковая структура в области 4450 МэВ ($P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$) имеет значимость $5.4\sigma(6.2\sigma)$, что отвергает однопиковую интерпретацию.
- На рисунке фит с использованием $\cos\theta_{P_c}$ -weighted, с тремя амплитудами BW и полиномом 6 степени, описывающим фон.

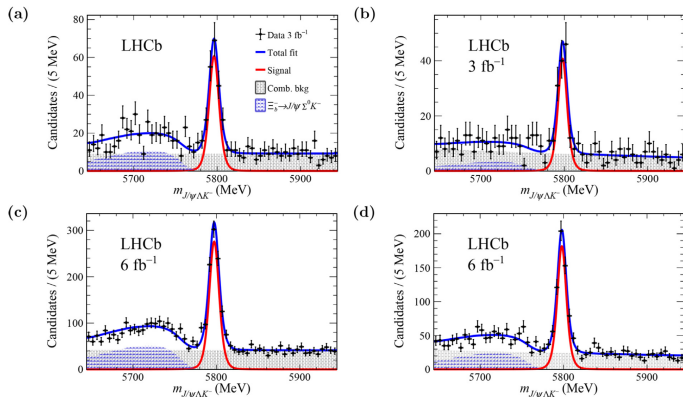
Состояние	Масса (МэВ)	Ширина (МэВ)	(95% CL)	$\mathcal{R}[\%]$
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$	(< 27)	$0.30 \pm 0.07^{+0.34}_{-0.09}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$	(< 49)	$1.11 \pm 0.33^{+0.22}_{-0.10}$
$P_c(4457)^+$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



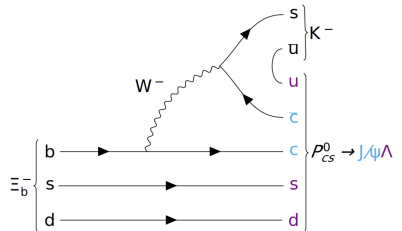
Мотивация для дальнейшего исследования заключается в отсутствии на данный момент модели, способной предсказать свойства тетракварков и пентакварков. Неясно, являются ли они экзотическими компактными состояниями или адронными молекулами.



Доказательство структуры $J/\psi\Lambda$ и наблюдение возбужденных состояний Ξ^- в распаде $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Lambda K^-$ [6]

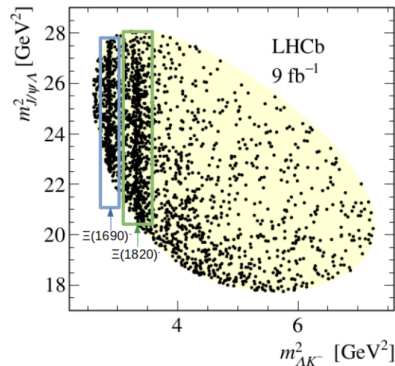


LHCb Run I и Run II.

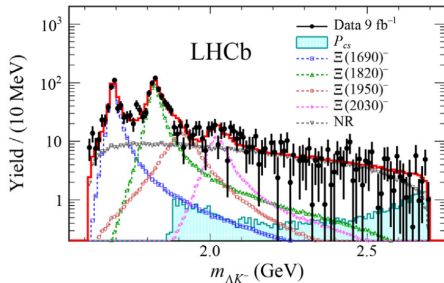


Сигнал: $\Xi_b^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) \Lambda (\rightarrow p \pi^-) K^-$
 Фон: $\Xi_b^0 \rightarrow J/\psi \Sigma^0 (\rightarrow \Lambda \gamma) K^-$ и состояния из
 таблицы

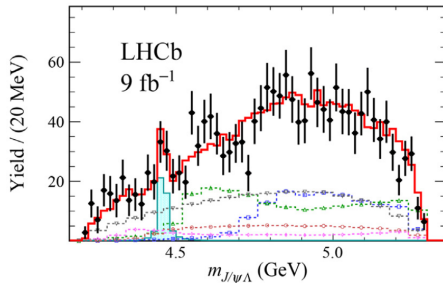
State	M_0 (MeV)	Γ_0 (MeV)	LS couplings	J^P examined
$\Xi(1690)^-$	1690 ± 10	< 30	4 (6)	$(1/2, 3/2)^\pm$
$\Xi(1820)^-$	1823 ± 5	24_{-10}^{+15}	3 (6)	$3/2^-$
$\Xi(1950)^-$	1950 ± 15	60 ± 20	3 (6)	$(1/2, 3/2, 5/2)^\pm$
$\Xi(2030)^-$	2025 ± 5	20_{-5}^{+15}	3 (6)	$5/2^\pm$
NR ΛK^-	-	-	4 (4)	$1/2^-$



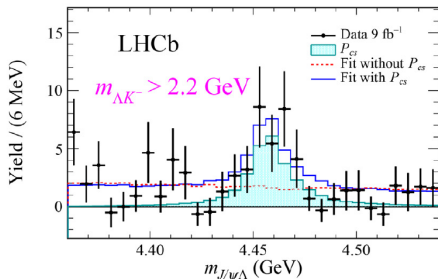
(a)



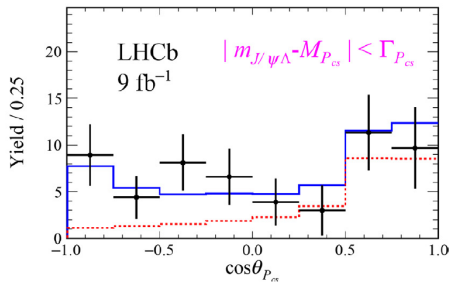
(b)

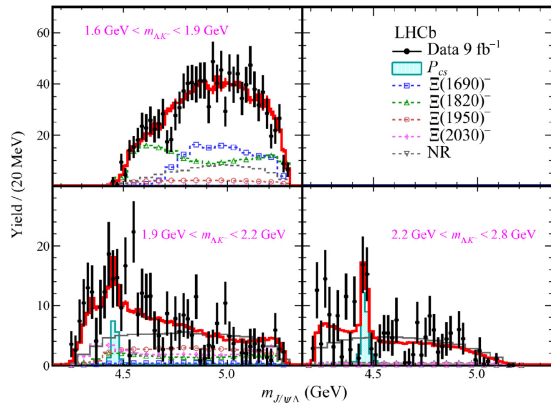


(a)



(b)



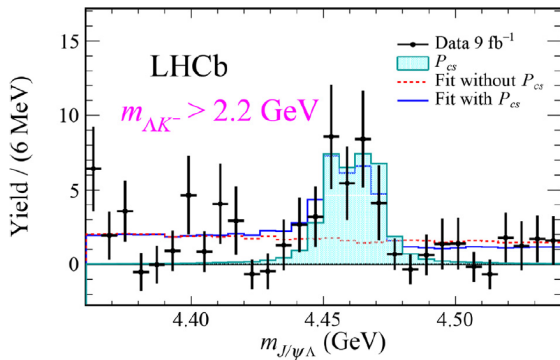


State	M_0 (MeV)	Γ_0 (MeV)	FF (%)
$P_{cs}(4459)^0$	$4458.8 \pm 2.9^{+4.7}_{-1.1}$	$17.3 \pm 6.5^{+8.0}_{-5.7}$	$2.7^{+1.9+0.7}_{-0.6-1.3}$
$\Xi(1690)^-$	$1692.0 \pm 1.3^{+1.2}_{-0.4}$	$25.9 \pm 9.5^{+14.0}_{-13.5}$	$22.1^{+6.2+6.7}_{-2.6-8.9}$
$\Xi(1820)^-$	$1822.7 \pm 1.5^{+1.0}_{-0.6}$	$36.0 \pm 4.4^{+7.8}_{-8.2}$	$32.9^{+3.2+6.9}_{-6.2-4.1}$
$\Xi(1950)^-$	1910.6 ± 18.4	105.7 ± 23.2	$11.5^{+5.8+49.9}_{-3.5-9.4}$
$\Xi(2030)^-$	2022.8 ± 4.7	68.2 ± 8.5	$7.3^{+1.8+3.8}_{-1.8-4.1}$
NR	—	—	$35.8^{+4.6+10.3}_{-6.4-11.2}$

Значимость $P_{cs}(4459)^0$ — 3.1σ



Состояние $P_{cs}(4459)^0$ имеет массу на 19 МэВ меньше $\Xi_c^0 \bar{D}^{*0}$.



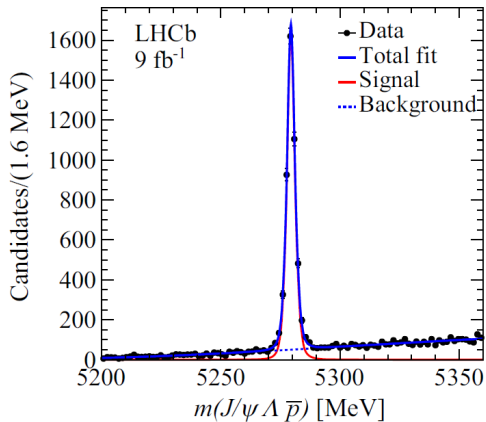
Систематические неопределенности [6]

Summary of absolute systematic uncertainties for the fit parameters. The units for masses (M_0) and widths (Γ_0) are MeV. The fit fraction in percent is denoted FF.

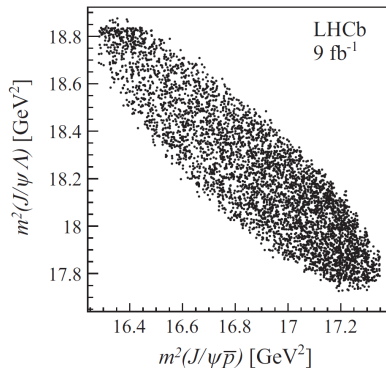
Source	$P_{cs}(4459)^0$			$\Xi(1690)^-$			$\Xi(1820)^-$			$\Xi(1950)^-$	$\Xi(2030)^-$	NR
	M_0	Γ_0	FF	M_0	Γ_0	FF	M_0	Γ_0	FF	FF	FF	FF
J^P	+4.7 -0.3	+0.0 -5.7	+0.1 -1.3	+1.2 -0.1	+14.0 -0.9	+6.7 -0.3	+0.8 -0.2	+1.4 -0.5	+4.2 -0.3	+0.2 -9.4	+0.0 -4.1	+0.9 -11.2
Model	+0.7 -1.1	+8.0 -2.0	+0.7 -0.5	+0.5 -0.4	+1.8 -13.5	+1.9 -8.9	+1.0 -0.6	+7.8 -8.2	+6.9 -4.1	+49.9 -5.4	+3.8 -1.6	+10.3 -6.4
Λ decay	+0.0 -0.7	+0.0 -4.7	+0.0 -0.3	+0.0 -0.4	+0.2 -0.0	+0.0 -0.8	+0.0 -0.5	+0.0 -7.2	+0.0 -4.1	+2.4 -0.0	+0.0 -1.3	+3.9 -0.0
sWeights	+0.0 -0.2	+0.3 -0.0	+0.1 -0.0	+0.1 -0.1	+3.1 -0.2	+1.4 -0.0	+0.2 -0.2	+2.2 -1.5	+1.6 -0.5	+0.7 -1.6	+0.0 -0.2	+0.0 -2.7
Efficiency	+0.1 -0.1	+0.0 -0.5	+0.0 -0.1	+0.1 -0.2	+2.1 -1.5	+0.8 -1.3	+0.1 -0.2	+1.1 -0.3	+0.5 -0.7	+2.3 -1.0	+0.3 -0.2	+1.1 -0.9
Final	+4.7 -1.1	+8.0 -5.7	+0.7 -1.3	+1.2 -0.4	+14.0 -13.5	+6.7 -8.9	+1.0 -0.6	+7.8 -8.2	+6.9 -4.1	+49.9 -9.4	+3.8 -4.1	+10.3 -11.2

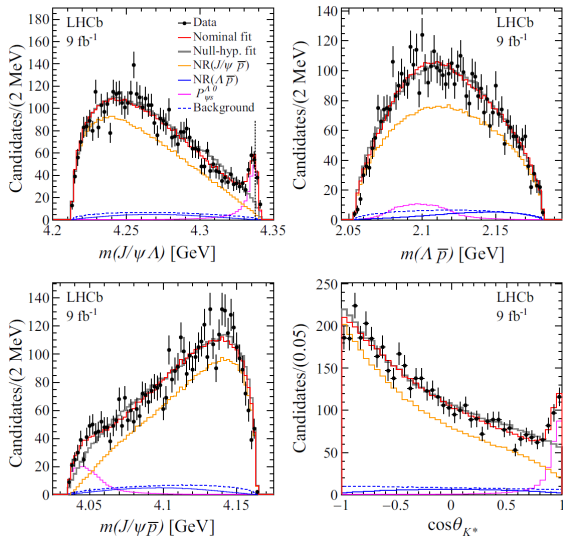


Наблюдение резонанса $J/\psi\Lambda$, согласующегося со странным пентакварком в распадах $B^- \rightarrow J/\psi\Lambda\bar{p}$ [7]



LHCb Run I и Run II.





Масса и ширина: $4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4$ МэВ и $7.0 \pm 1.2 \pm 1.3$ МэВ. Значимость — 15σ .

Таблица со систематическими
неопределенностями.

Source	$M_{P_{\psi s}^{\Lambda}}$	$\Gamma_{P_{\psi s}^{\Lambda}}$	$f_{P_{\psi s}^{\Lambda}}$	$f_{\text{NR}(J/\psi \bar{p})}$	$f_{\text{NR}(\Lambda \bar{p})}$
Hadron radius	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2
LS values	0.3	0.1	0.8	0.7	0.6
Breit-Wigner \bar{P}_{ψ}^N	0.1	0.9	0.8
$J^P(P_{\psi s}^{\Lambda 0})$ assignment	0.1	0.9	1.2	0.4	0.9
Fitting procedure	0.1	0.2	0.1	1.0	1.1
Efficiency	0.02	0.19	0.02	0.3	0.2
Λ decay parameters	0.02	0.04	0.01	0.3	0.2
Background	0.01	0.05	0.96	0.4	0.7
Mass resolution	0.01	0.03	0.01	0.1	0.1
Total	0.4	1.3	1.9	1.4	1.7



Back-Up



Сводная таблица, основанная на данных PDG [4] 2025

Название	Моды распада
$P_{c\bar{c}}(4312)^+$	$J/\psi p$ $\Lambda_c^+ \bar{D}^0$ $\Lambda_c^+ \pi^+ D^-$ $\bar{\Lambda}_c^- \pi^+ D^+$
$P_{c\bar{c}s}(4338)^0$	$J/\psi \Lambda$
$P_{c\bar{c}}(4380)^+$	$J/\psi p$
$P_{c\bar{c}}(4440)^+$	$J/\psi p$ $\Lambda_c^+ \bar{D}^0$ $\Lambda_c^+ \pi^+ D^-$ $\Sigma_c(2455)^{++} D^-$ $\Sigma_c(2520)^{++} D^-$ $\bar{\Lambda}_c^- \pi^+ D^+$ $\bar{\Sigma}_c(2455)^0 D^+$ $\bar{\Sigma}_c(2520)^0 D^+$ $\Lambda_c^+ \pi^+ D^{*-}$ $\bar{\Lambda}_c^- \pi^+ D^{*+}$
$P_{c\bar{c}}(4457)^+$	$J/\psi p$ $\Lambda_c^+ \bar{D}^0$ $\Lambda_c^+ \pi^+ D^-$ $\Sigma_c(2455)^{++} D^-$ $\Sigma_c(2520)^{++} D^-$ $\bar{\Lambda}_c^- \pi^+ \bar{D}^+$ $\bar{\Sigma}_c(2455)^0 D^+$ $\bar{\Sigma}_c(2520)^0 D^+$ $\Lambda_c^+ \pi^+ D^{*-}$ $\bar{\Lambda}_c^- \pi^+ D^{*+}$



$$\mathcal{H}_{\lambda_B, \lambda_C}^{A \rightarrow BC} = \sum_L \sum_S \sqrt{\frac{2L+1}{2J_A+1}} B_{L,S} \left(\begin{array}{cc|c} J_B & J_C & S \\ \lambda_B & -\lambda_C & \lambda_B - \lambda_C \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{cc|c} L & S & J_A \\ 0 & \lambda_B - \lambda_C & \lambda_B - \lambda_C \end{array} \right)$$

$$\mathcal{M}_{\lambda_{\Lambda_b^0}, \lambda_p, \Delta\lambda_\mu}^{\Lambda^*} \equiv \sum_n \sum_{\lambda_{\Lambda^*}} \sum_{\lambda_\psi} \mathcal{H}_{\lambda_{\Lambda^*}, \lambda_\psi}^{\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_n^* \psi} D_{\lambda_{\Lambda_b^0}, \lambda_{\Lambda^*} - \lambda_\psi}^{\frac{1}{2}}(0, \theta_{\Lambda_b^0}, 0)^* \\ \mathcal{H}_{\lambda_p, 0}^{\Lambda_n^* \rightarrow Kp} D_{\lambda_{\Lambda^*}, \lambda_p}^{J_{\Lambda_n^*}}(\phi_K, \theta_{\Lambda^*}, 0)^* R_{\Lambda_n^*}(m_{Kp}) D_{\lambda_\psi, \Delta\lambda_\mu}^1(\phi_\mu, \theta_\psi, 0)^*,$$

$$\mathcal{M}_{\lambda_{\Lambda_b^0}, \lambda_p^{P_c}, \Delta\lambda_\mu^{P_c}}^{P_c} \equiv \sum_j \sum_{\lambda_{P_c}} \sum_{\lambda_\psi^{P_c}} \mathcal{H}_{\lambda_{P_c}, 0}^{\Lambda_b^0 \rightarrow P_{cj} K} D_{\lambda_{\Lambda_b^0}, \lambda_{P_c}}^{\frac{1}{2}}(\phi_{P_c}, \theta_{\Lambda_b^0}^{P_c}, 0)^* \\ \mathcal{H}_{\lambda_\psi^{P_c}, \lambda_p^{P_c}}^{P_{cj} \rightarrow \psi p} D_{\lambda_{P_c}, \lambda_\psi^{P_c} - \lambda_p^{P_c}}^{J_{P_{cj}}}(\phi_\psi, \theta_{P_c}, 0)^* R_{P_{cj}}(m_{\psi p}) D_{\lambda_\psi^{P_c}, \Delta\lambda_\mu^{P_c}}^1(\phi_\mu^{P_c}, \theta_\psi^{P_c}, 0)^*,$$

$$R_X(m) = B'_{L_{\Lambda_b^0}^X}(p, p_0, d) \left(\frac{p}{M_{\Lambda_b^0}} \right)^{L_{\Lambda_b^0}^X} \text{BW}(m|M_{0X}, \Gamma_{0X}) B'_{L_X}(q, q_0, d) \left(\frac{q}{M_{0X}} \right)^{L_X}$$



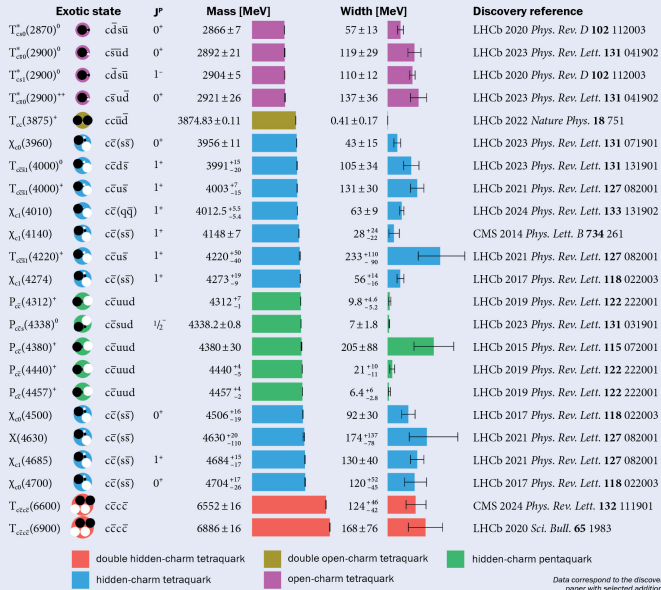
$$\text{BW}(m|M_{0X}, \Gamma_{0X}) = \frac{1}{M_{0X}^2 - m^2 - iM_{0X}\Gamma(m)},$$

$$\Gamma(m) = \Gamma_{0X} \left(\frac{q}{q_0} \right)^{2L_X+1} \frac{M_{0X}}{m} B'_{L_X}(q, q_0, d)^2,$$



The 23 exotic hadrons discovered at the LHC

Ordered by mass

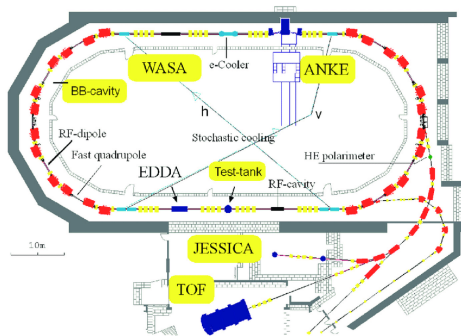
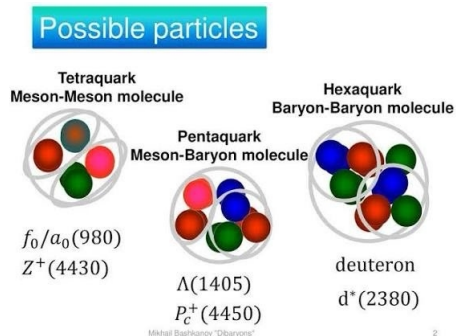


Data correspond to the discovery paper with selected additions



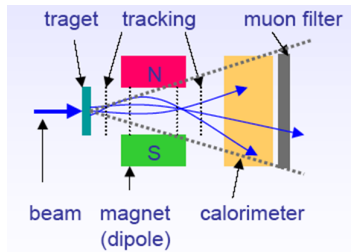
А что насчет гексакварков?

WASA-at-COSY Collaboration и SAID Data Analysis Center (2014 г.) [8]



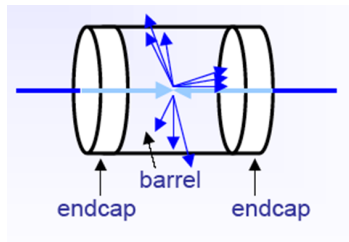
К вопросу о форме детекторов

Геометрия детектора с фиксированной мишенью



- ограниченный телесный угол
- легкий доступ для обслуживания

Геометрия коллайдерного детектора



- покрывает «полный» телесный угол
- ограниченный доступ к детекторам



Немного об идентификации частиц

