

Пентакварки со скрытым очарованием

Алексей Дзюба (НИЦ КИ - ПИЯФ)

Семинар ОФВЭ и ОТФ, 30 мая 2024 г.

Аннотация

- В докладе будет представлен обзор экспериментальных сведений о пентакварках со скрытым очарованием. Такие состояния обнаружены экспериментом LHCb в распадах прелестных частиц. Помимо, измерений LHCb, будут обсуждаться экспериментальные работы, выполненные коллаборациями Belle и GlueX.
- **Мы не видим пентакварков, образовавшихся в процессах прямого рождения, а также в распадах боттомония**

Структура доклада

- Очень краткий исторический обзор (пентакварки до 2015)
- Пентакварки со скрытым очарованием P_c в распадах Λ_b^0 .
 - https://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/events/abstract/2019/Dzyuba_5q.pdf
- Распады прелестных частиц / LHCb
 - $P_{cs}(4338)^0$ ✓, $P_{cs}(4458)^0$?, $P_c(4337)^+$?
- Фоторождение / GlueX – не обнаружено
- Распады $Y(nS)$ / Belle – не обнаружено
- Прямое рождение в pp / LHCb – не обнаружено
- Перспективы

История вопроса

- Четыре кварка + один антикварк (**Gell-Mann, Zweig'64**)
- Название предложено Гарри Липкиным (**Harry Lipkin**)
- Их свойства предсказываются многими КХД моделями
- Модель кирального солитона (**Diakionov, Petrov, Polyakov – ZPA 359, 305**)

Volume 8, number 3

PHYSICS LETTERS

1 February 1964

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

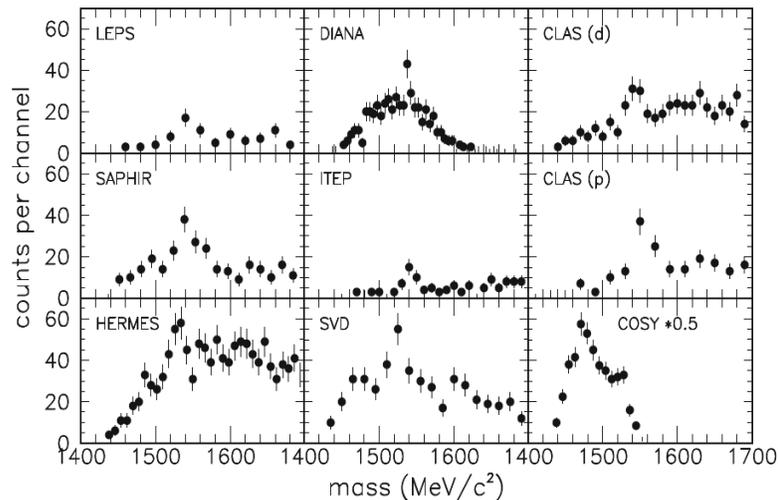
M. GELL-MANN

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 Λ 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

EPJH 37 (2012) 1

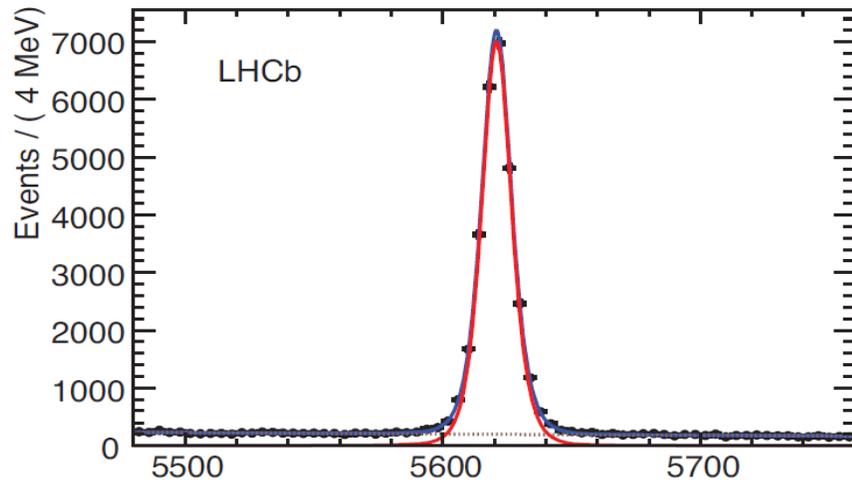


- 2004: 12 статей о $\Theta(1540)$
- 2007: 9 of 12 gave up
- **Не видят:** WA89, CLAS, BaBar, JPARC
- **Видят:** LEPS2, CLAS (pф), SVD2, DIANA



P_c в распадах Λ_b^0

Открытие пентакварков со скрытым чармом



$$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$$

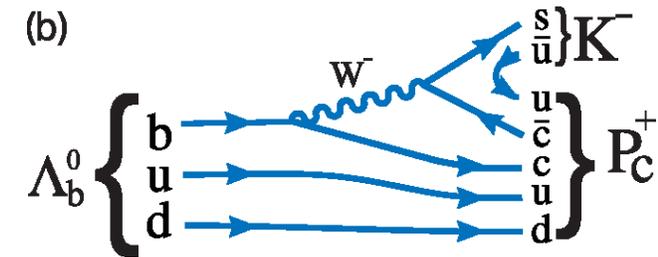
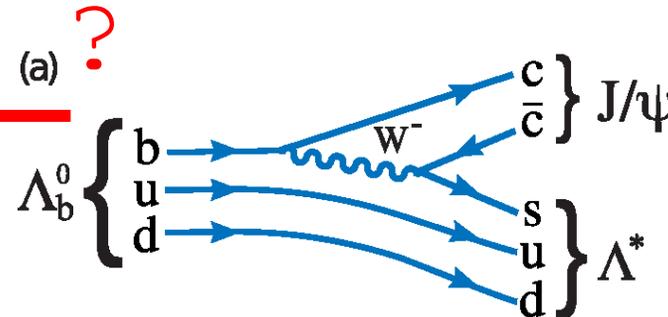
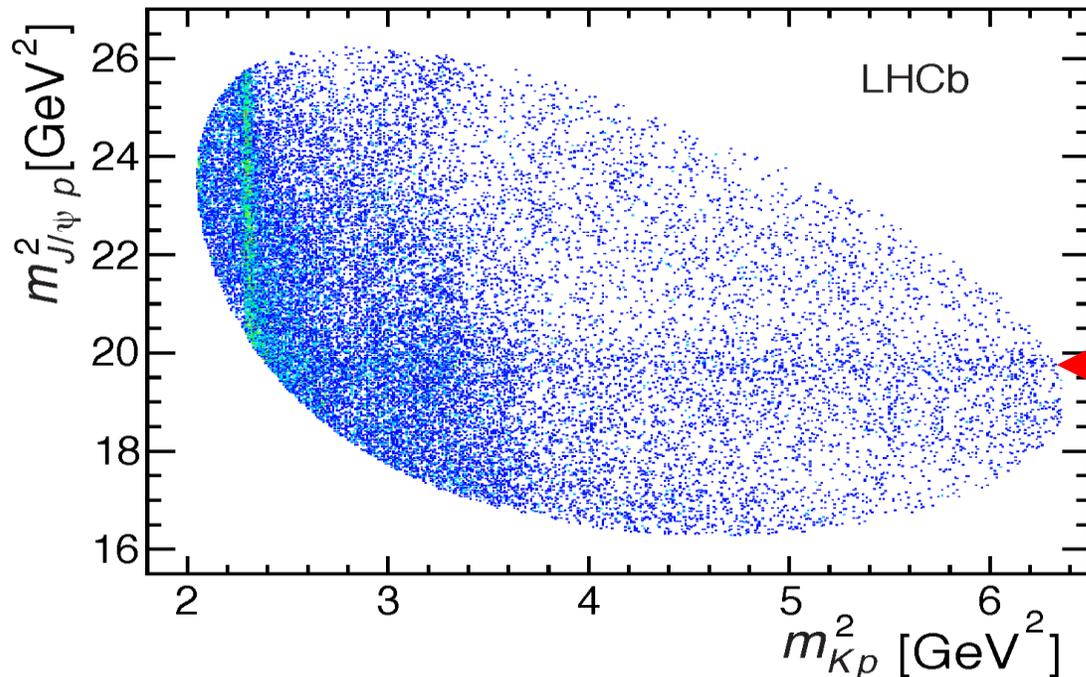
Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

26000 сигнальных событий

Phys. Rev. Lett. 117
(2016) 082002

Пик в распределении $m_{J/\psi p}$

Проверка на клонированные треки,
отражения и многое другое...

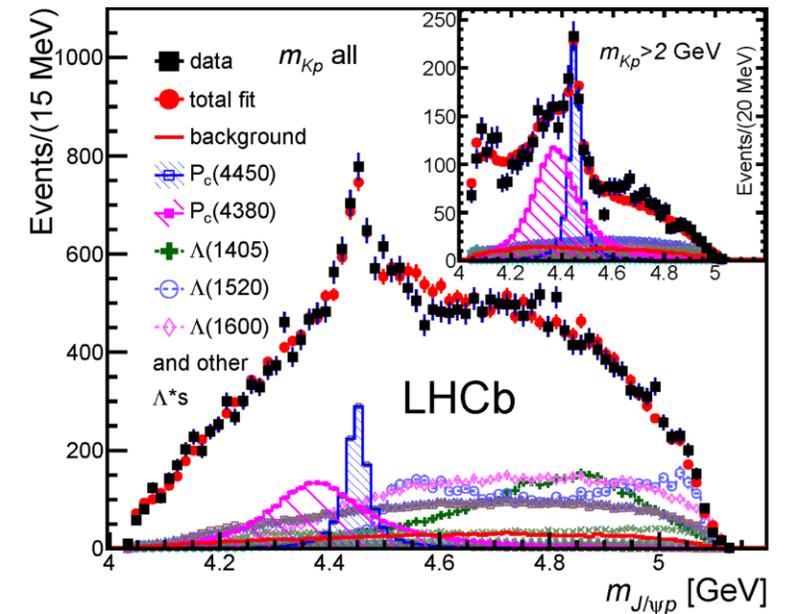
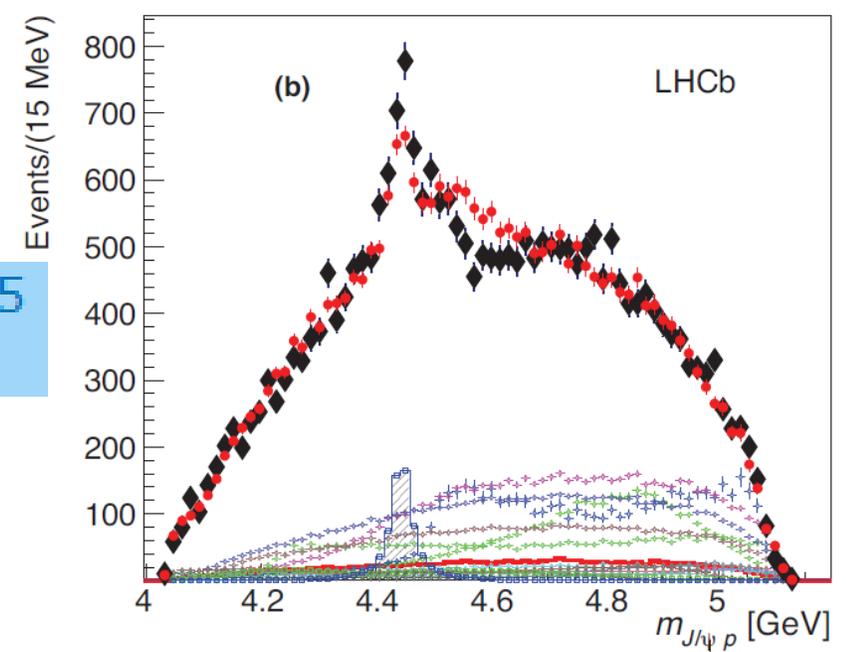


Амплитудный анализ

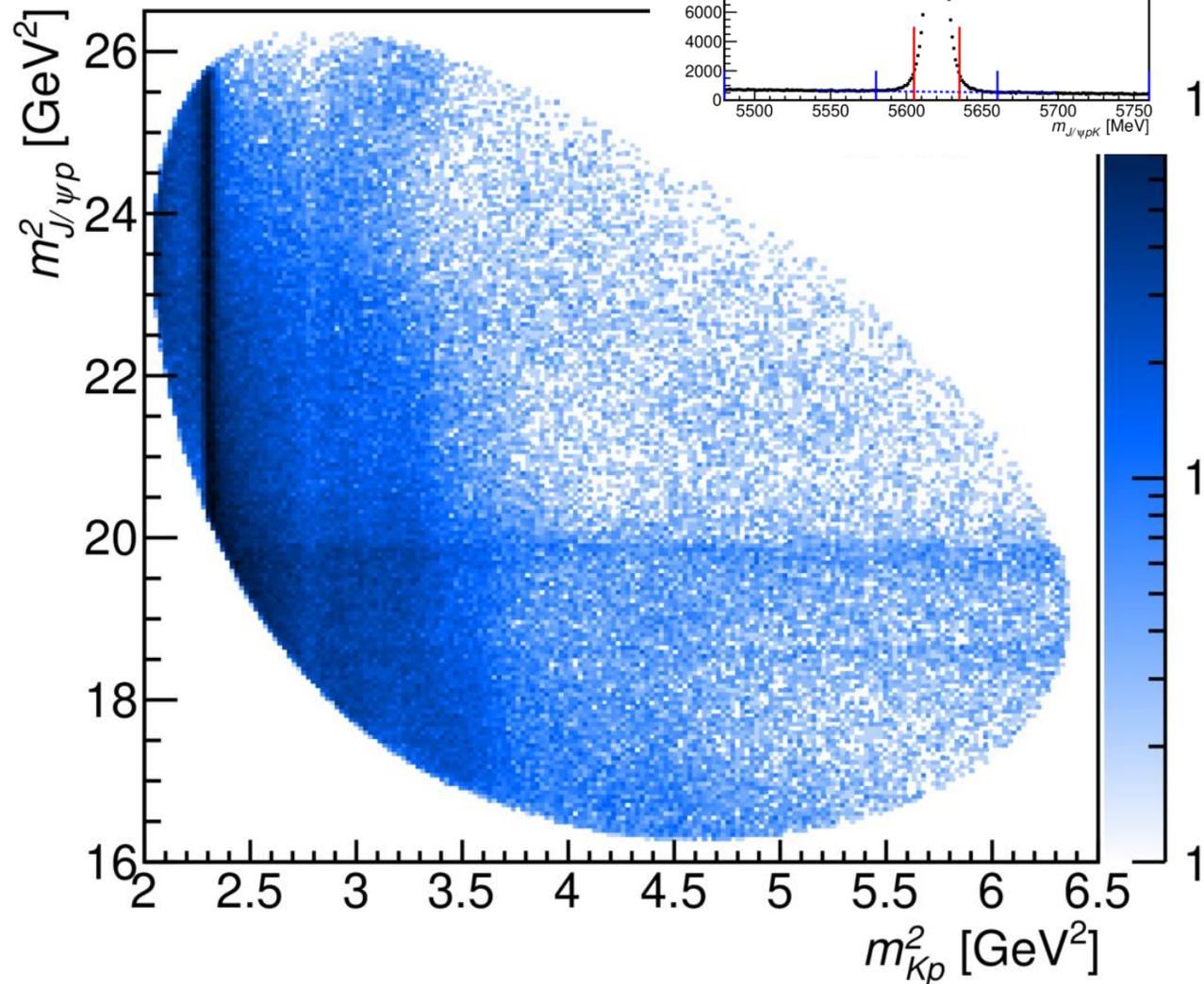
- Шестимерная амплитудная модель
- Две независимые процедуры аппроксимации
- Добавление одного пентакваркового резонанса (лучший фит $5/2^\pm$) не дает удовлетворительного описания
- Необходимо ввести в рассмотрение второй резонанс

Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

State	Mass (MeV)	Width (MeV)	Fit fraction (%)	Significance
$P_c(4380)^+$	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$	$8.4 \pm 0.7 \pm 4.2$	9σ
$P_c(4450)^+$	$4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$	$39 \pm 5 \pm 19$	$4.1 \pm 0.5 \pm 1.1$	12σ



Данные Run-2



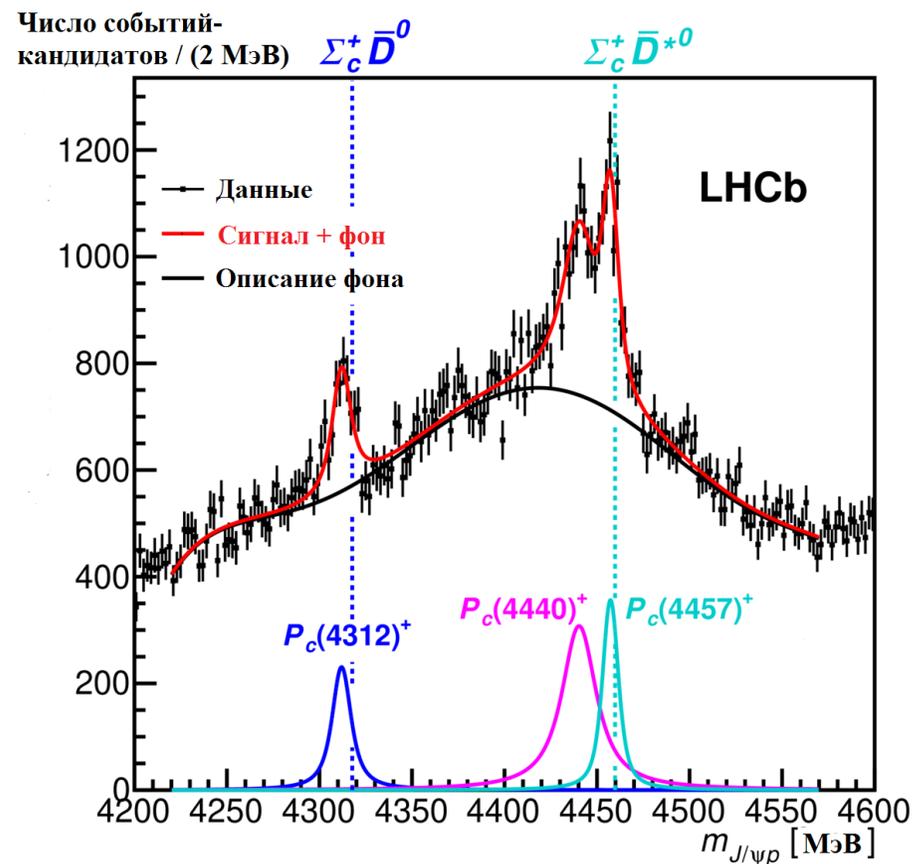
Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 222001

Статистика в Run-2 увеличена в 9 раз (относительно Run-1): Улучшение отбора данных (x2), интегральная светимость (x3) и увеличившееся сечение (x1.5)

246к Λ_b сигнал \ 6.4% фон

Разрешение по массе $J/\psi p$ 2.3-2.7 МэВ (RMS) для диапазона 4.3-4.6 ГэВ

Candidates/(0.105x0.045 GeV⁴)



P_c в распадах Λ_b^0

- Экзотика проявляется в распаде: $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$

Phys. Rev. Lett. 117
(2016) 082002

- Две пикующиеся структуры в $M(J/\psi p)$:
 - Узкая – $P_c(4312)^+$
 - Широкая, которая расщепляется на $P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$

Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 222001

- Модельнозависимый амплитудный анализ
 - Выполнен только на части данных (только Run-1)!
 - Два широких резонанса: $P_c(4380)^+$ и $P_c(4450)^+$.
 - Не включает $P_c(4312)^+$ и расщепление $P_c(4450)^+$.

Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

Распады прелестных частиц / LHCb

Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 062001

Sci. Bull. 66 (2021) 1278

Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 031901

LHCb: Find \ Identify \ Measure

Excellent vertexing allows efficient heavy quark hadrons selection / gives access to decay time distribution / prompt-secondary separation for charm

Protons collision point

Excellent PID allows to suppress background dramatically and explore many decay modes

Excellent tracking

Muon system – nice tagging & great potential to search for rare decays with di-muons

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95\%$$

$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5\%$$

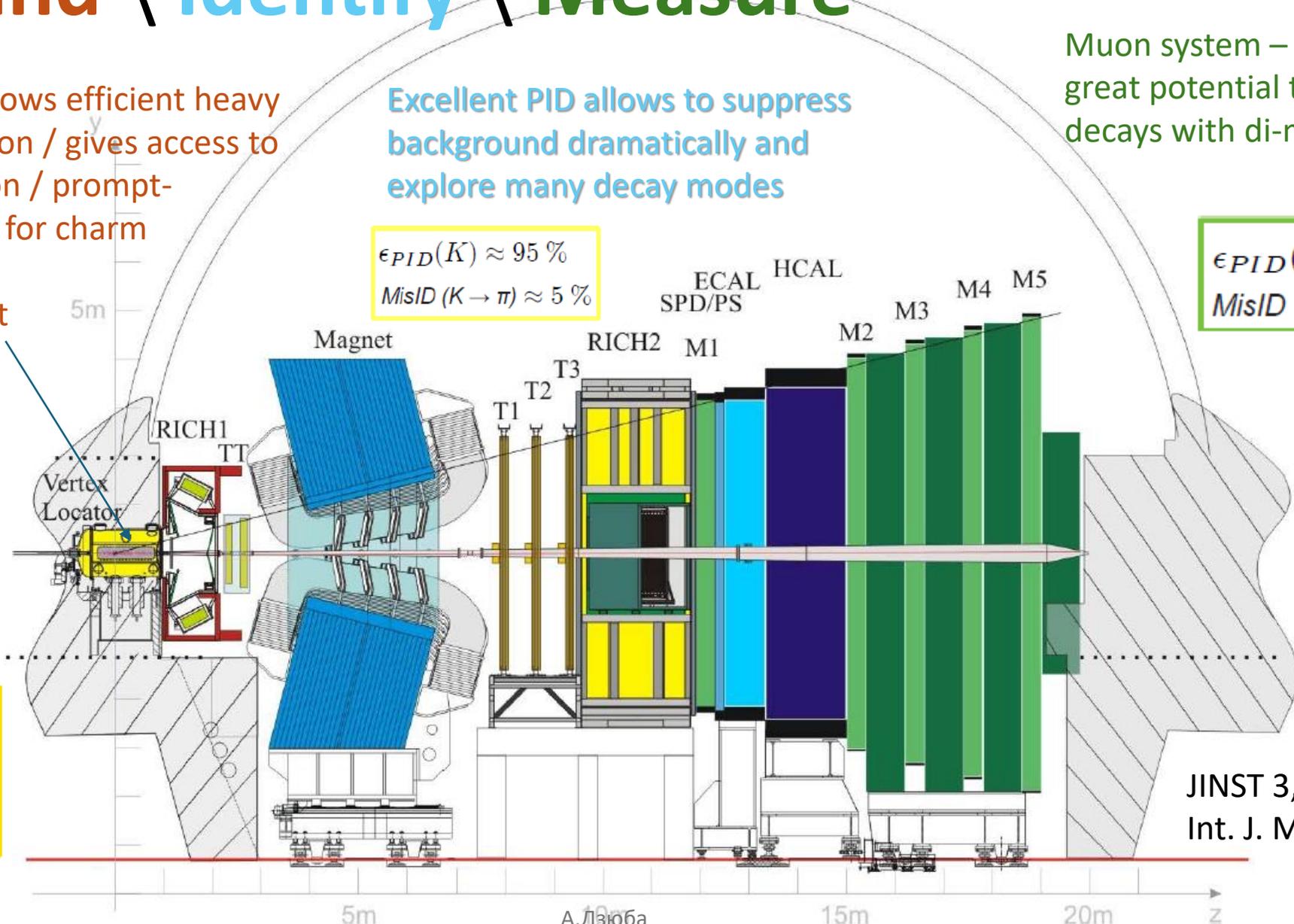
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3\%$$

$$\sigma(IP) \approx 20\mu m$$

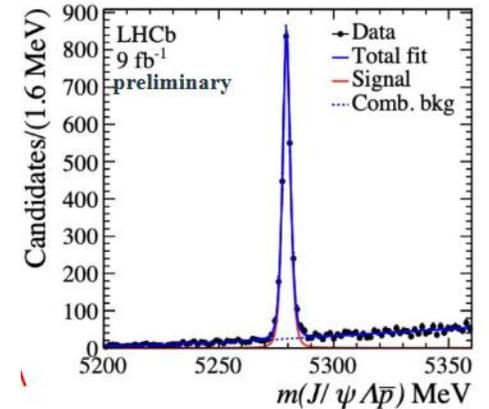
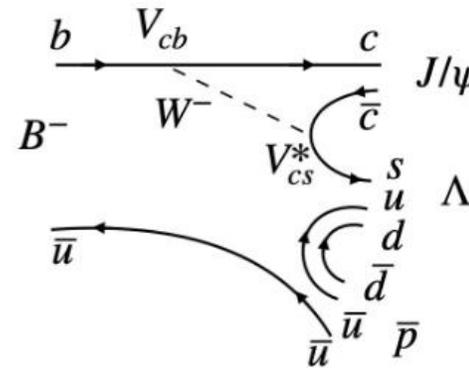
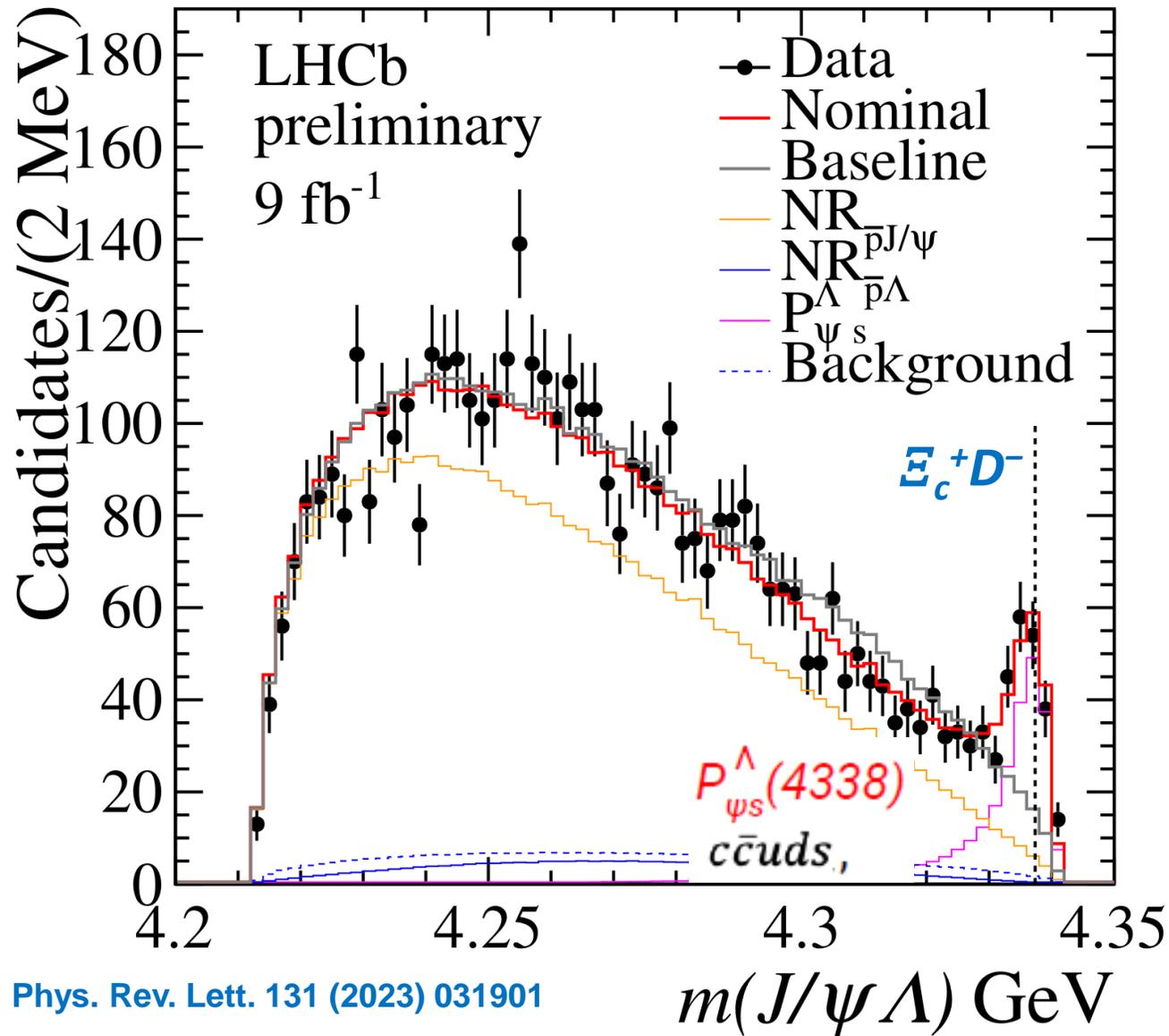
$$\delta p/p = 0.4 - 0.6\%$$

$$\epsilon_{track} > 96\%$$



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

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

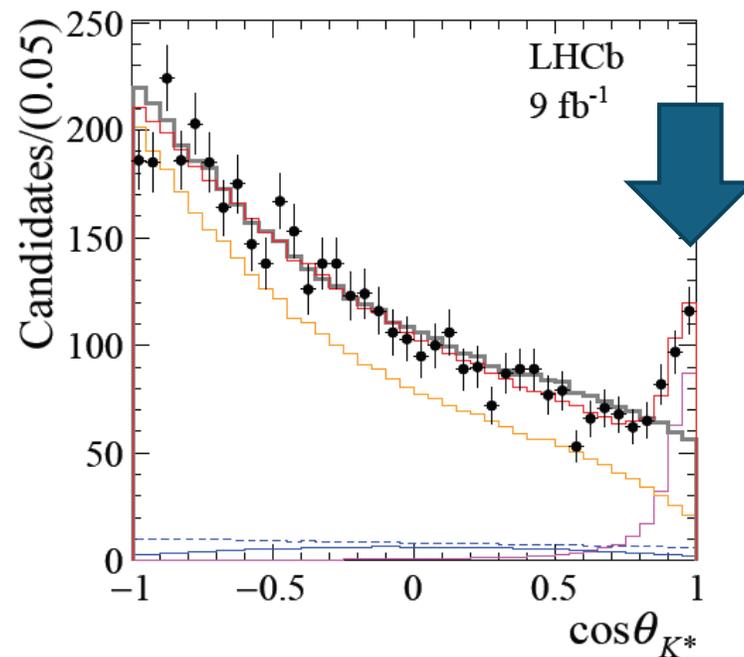
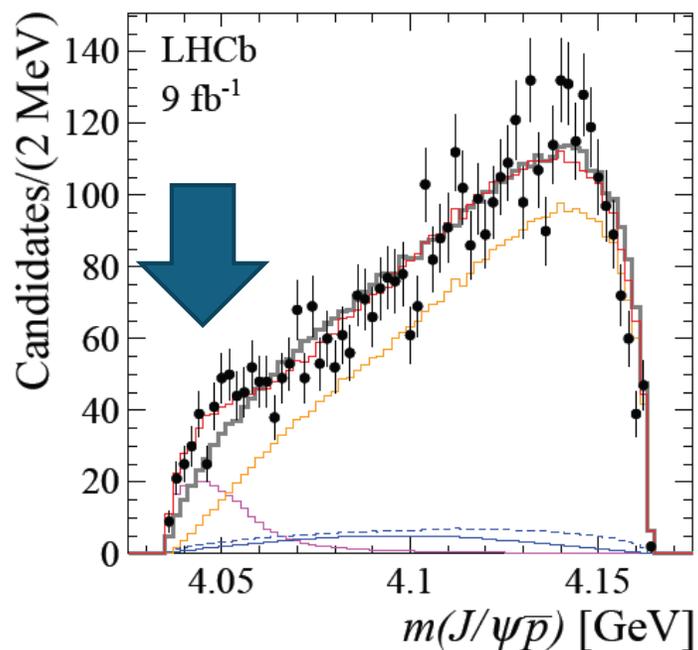
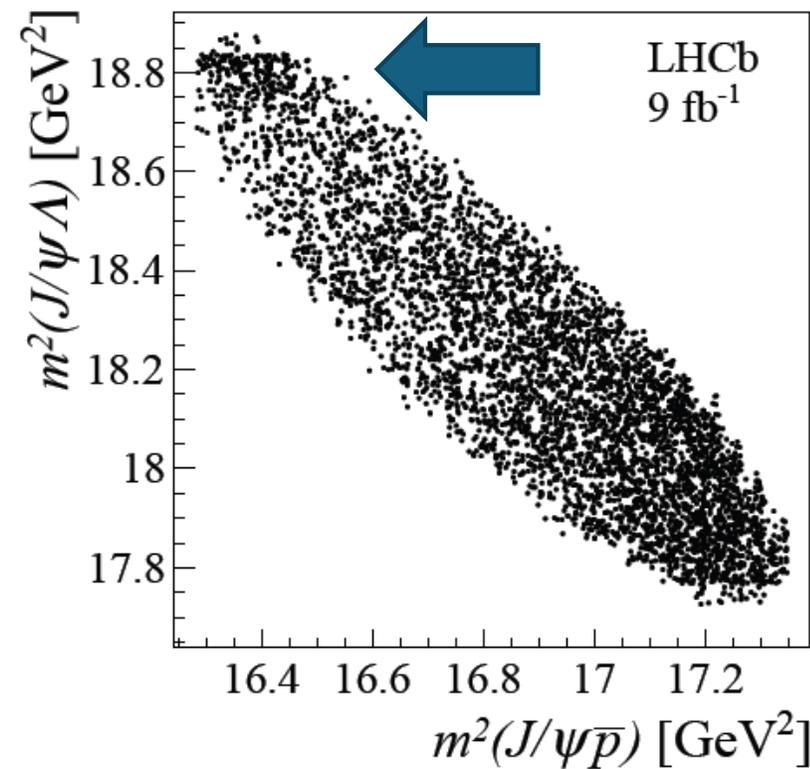
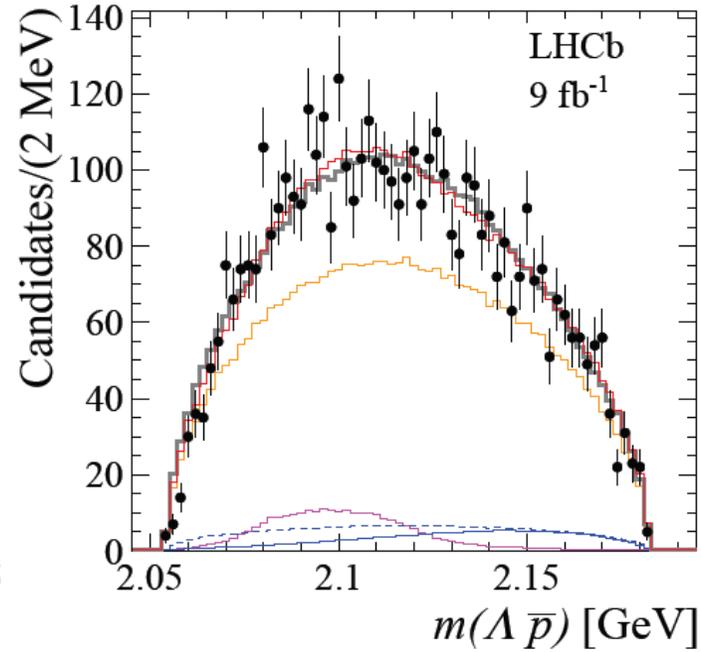
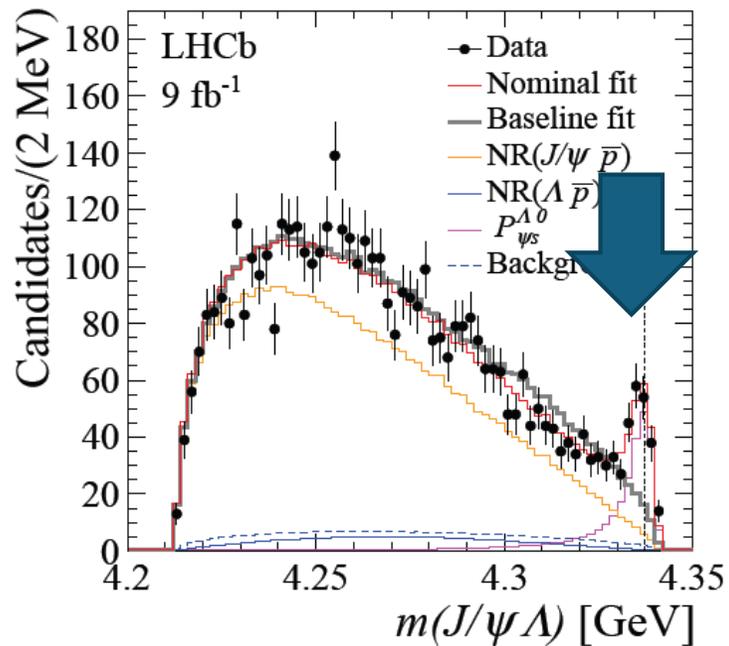


- 4600 событий-кандидатов
- Пик в распределении $J/\psi \Lambda$
- Значимость $>10\sigma$
- Нельзя объяснить $K^{*}_{2,3,4}$

$$M_{P_{cs}} = 4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4 \text{ MeV}$$

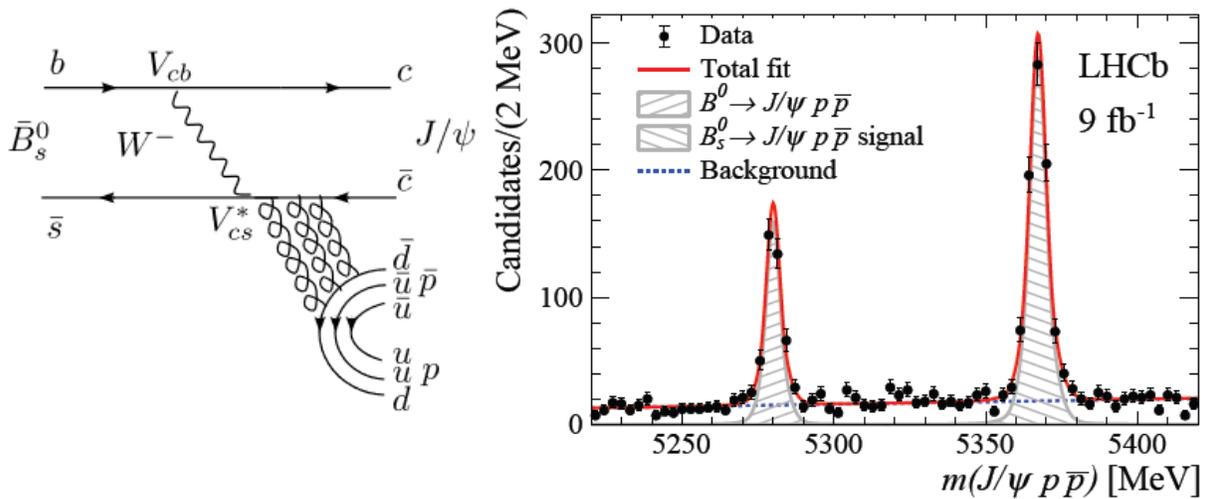
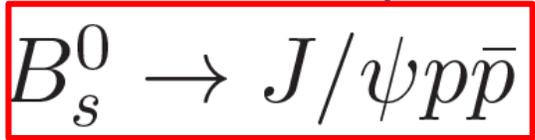
$$\Gamma_{P_{cs}} = 7.0 \pm 1.2 \pm 1.3 \text{ MeV}$$

$$J^P = 1/2^-$$



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

Указание на $P_\psi(4337)^+$

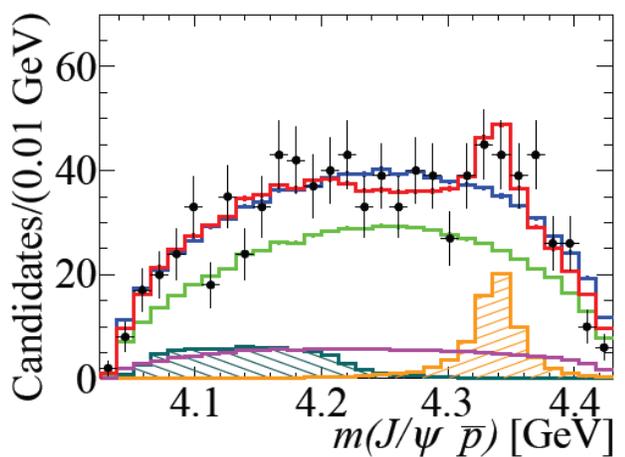
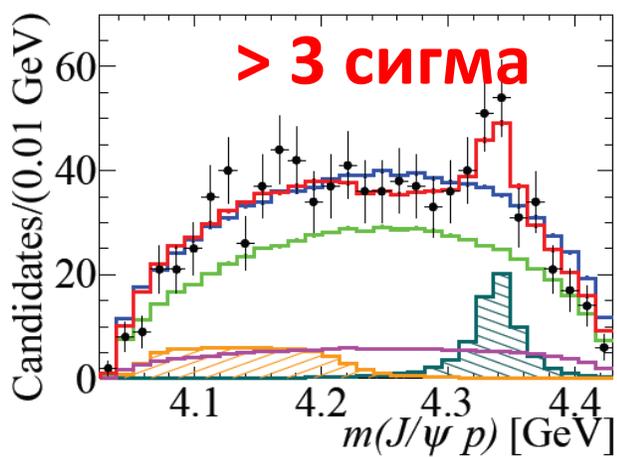
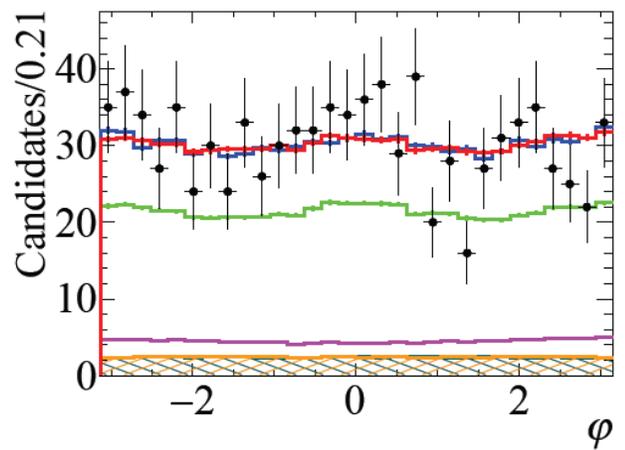
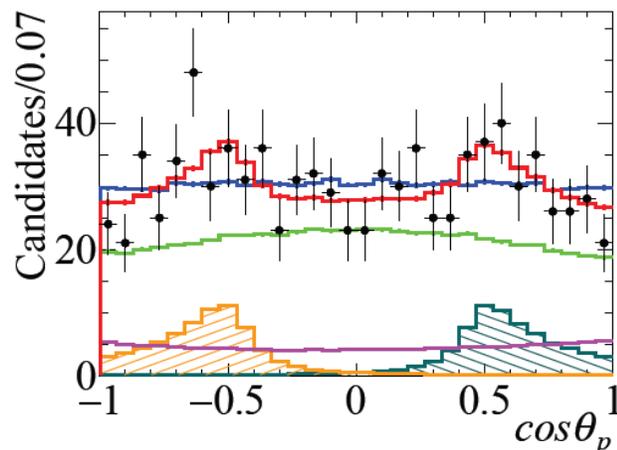
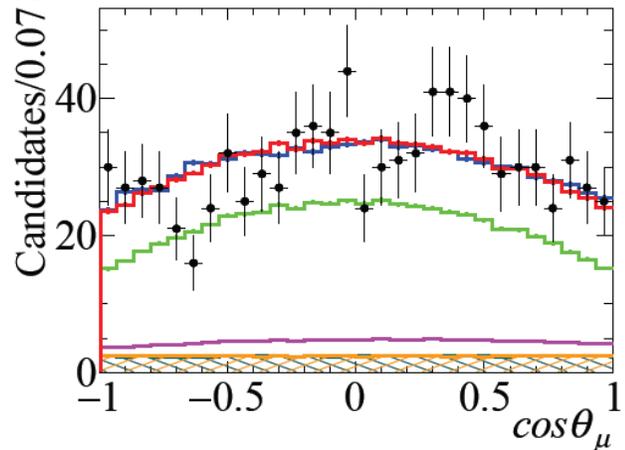
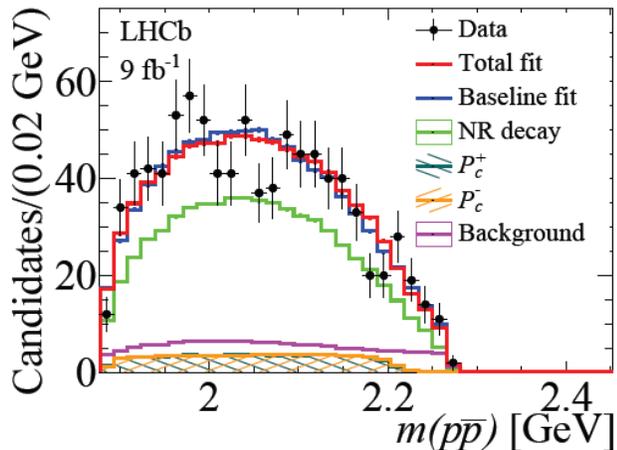


Масса: $4337^{+7}_{-4} \ ^{+2}_{-2}$ MeV

Ширина $29^{+26}_{-12} \ ^{+14}_{-14}$ MeV

J^P не определена

$J^P = 1/2^\pm$ and $J^P = 3/2^\pm$.

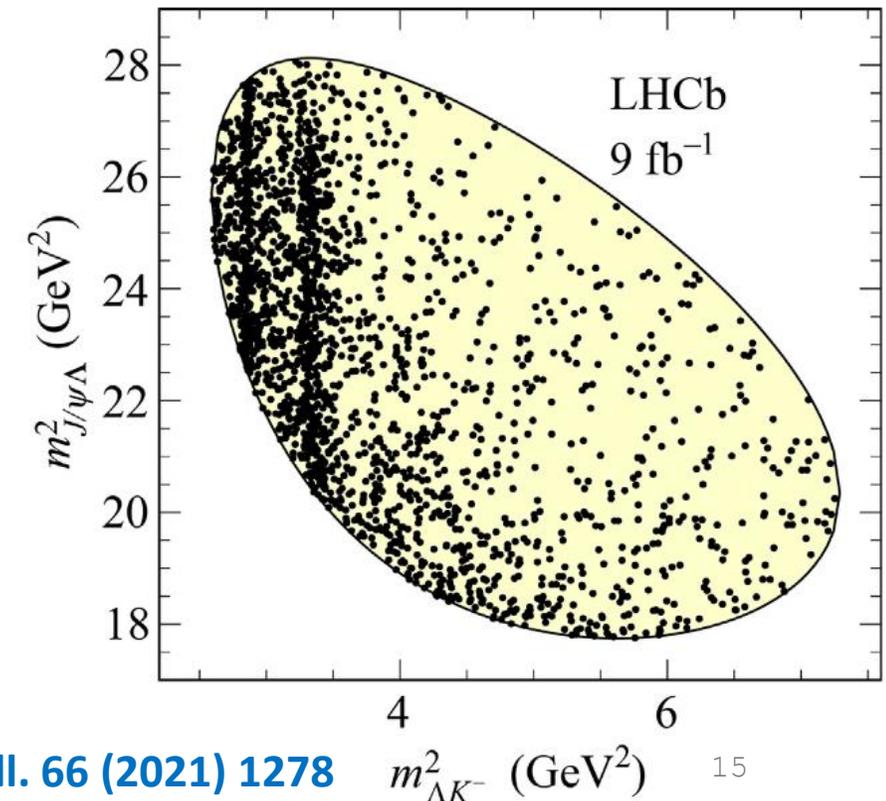
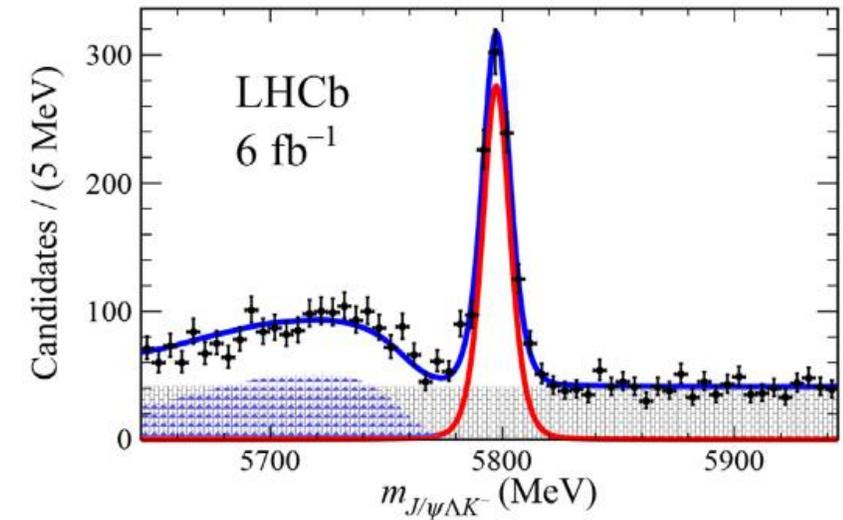


Указание на $P_{\psi_s}^{\Lambda} (4459)^0$

$$\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$$

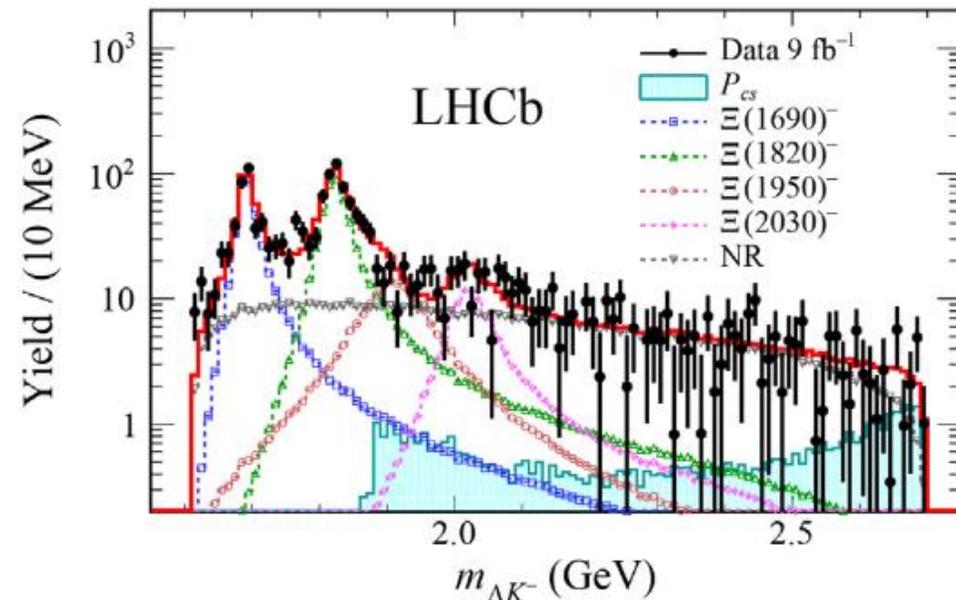
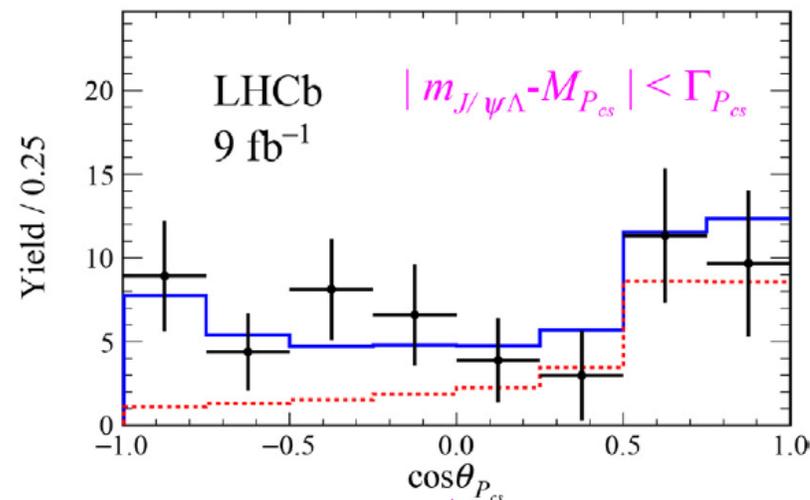
- Весь набор данных LHCb (9 fb^{-1})
- 1750 ± 50 событий-кандидатов
- На диаграмме Далица не заметных кандидатов на пентакварковое состояние
- Выделение сигнала методом sPlot
- Амплитудный анализ

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)	$1/2^-$



Указание на $P_{\psi\Lambda}^{\Lambda}(4459)^0$

> 3 сигма



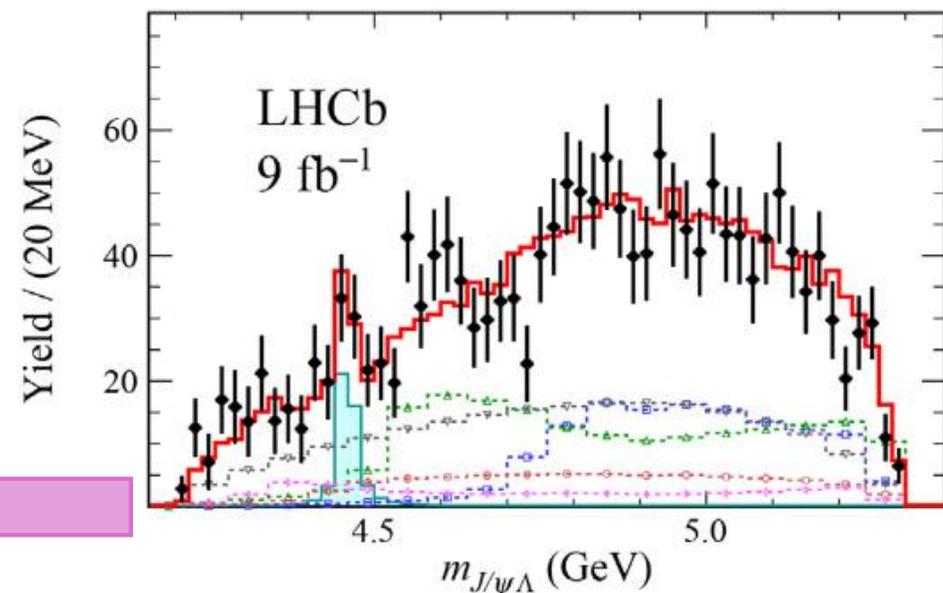
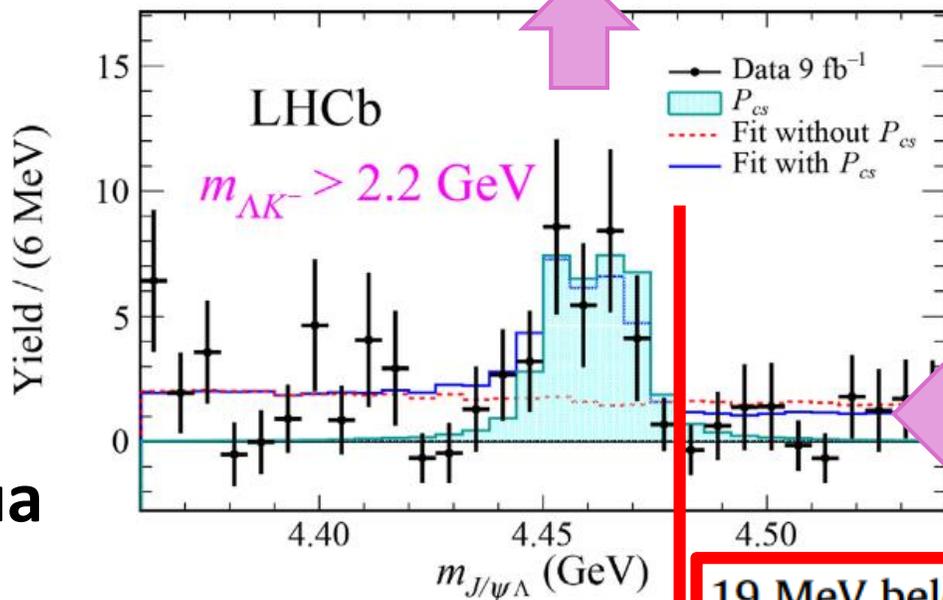
Масса

$$4458.8 \pm 2.9^{+4.7}_{-1.1} \text{ MeV}$$

Ширина

$$17.3 \pm 6.5^{+8.0}_{-5.7} \text{ MeV,}$$

J^P не определена



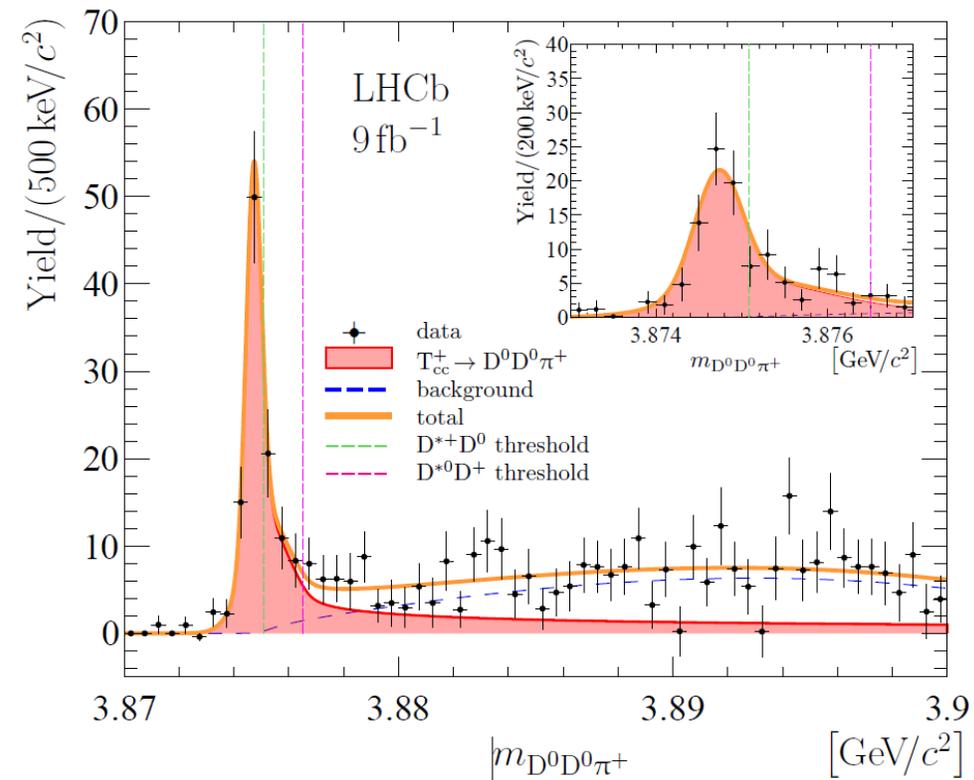
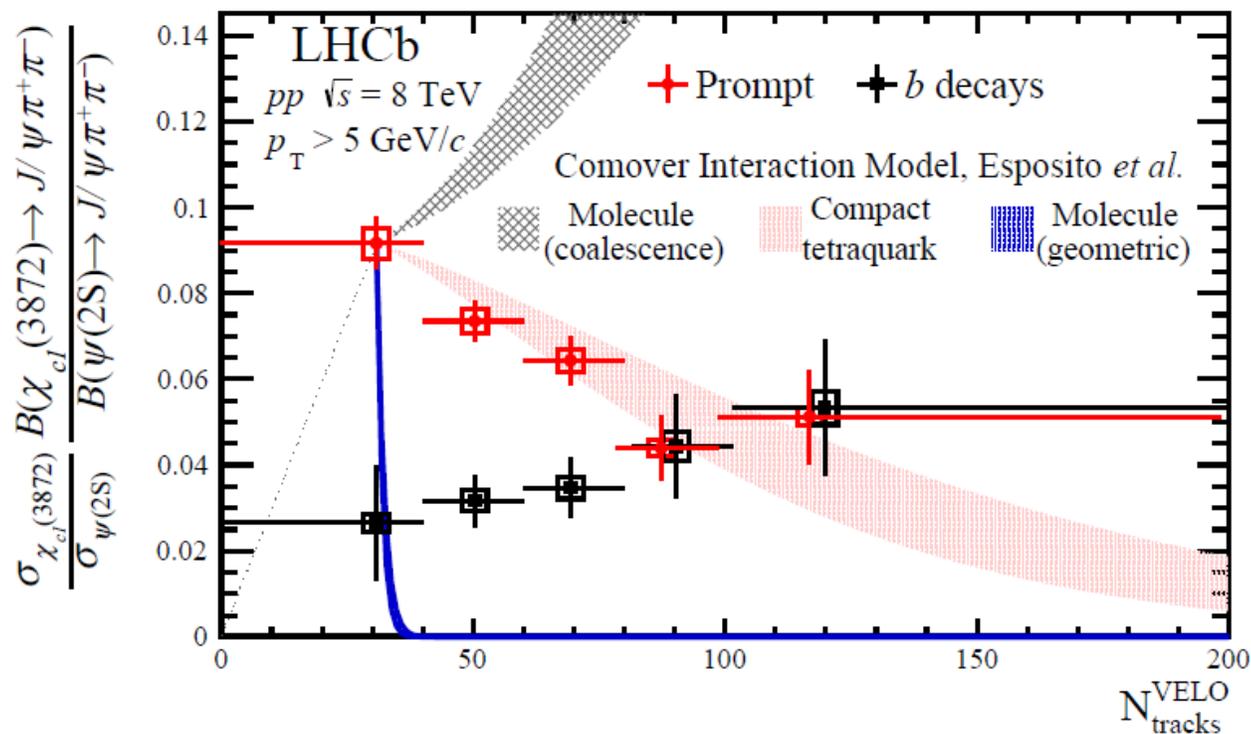
19 MeV below the $\Xi_c^0 \bar{D}^{+0}$

Прямое рождение в *pp* / LHCb

Рождение экзотики $\chi(3872)$ и T_c в pp

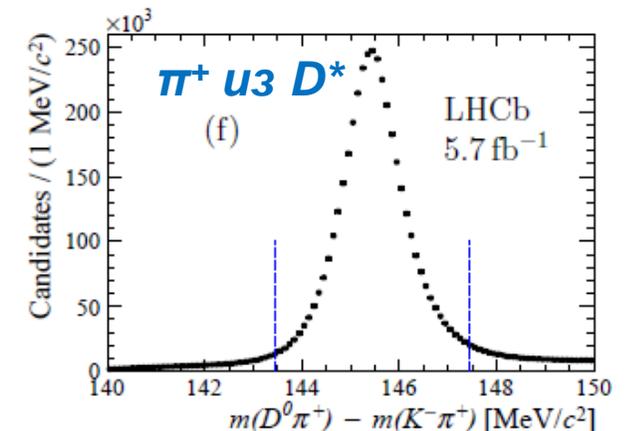
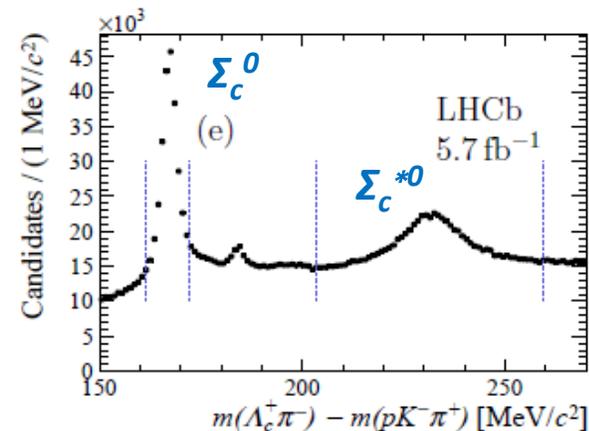
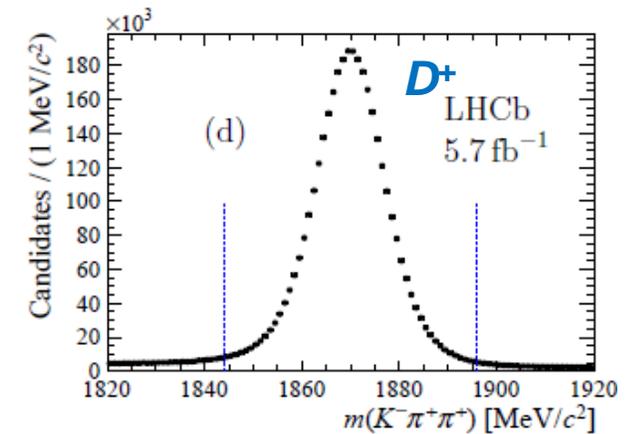
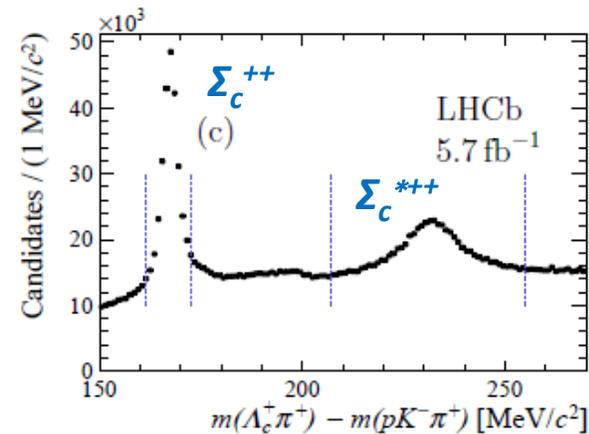
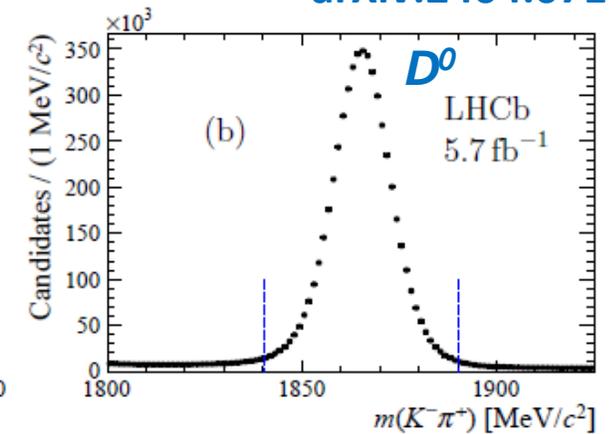
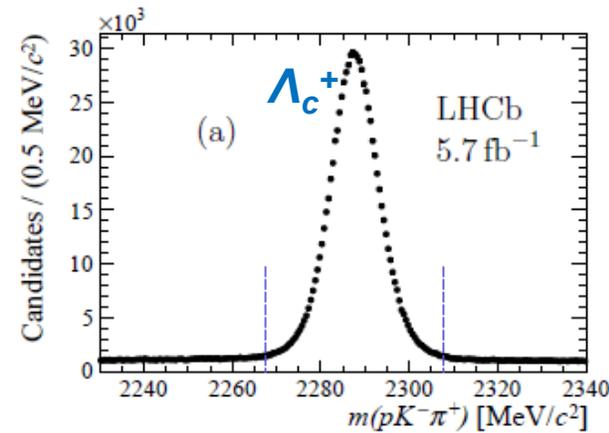
Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 9 092001

Nature Phys. 18 (2022) 751



Прямое рождение очарованных частиц (LHCb)

- Данные Run-2 (13 ТэВ)
- $789\,200 \pm 1\,300$ событий-кандидатов Λ_c^+
- Функция Фойта (Voigtian) для возможного описания сигнала
 - Тест 4 возможные естественных ширины (0, 5, 10 и 15 МэВ)
- Поиск пентакварков со скрытым очарованием и с двойным очарованием



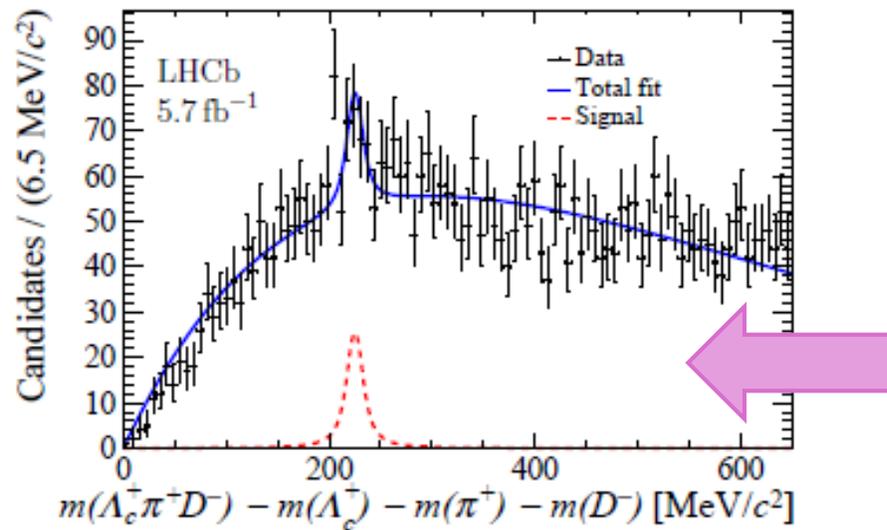
Результат поиска известных состояний

Decay Mode	Pentaquark Hypothesis	p -value	Significance (σ)	Signal Yield	Upper Limit ($\times 10^{-3}$)	
					(90% CL)	(95% CL)
$\Lambda_c^+ \bar{D}^0$	$P_c(4312)^+$	0.32	0.48	19.78 ± 22.27	1.17	1.29
	$P_c(4440)^+$	0.44	0.15	26.91 ± 28.17	1.41	1.53
	$P_c(4457)^+$	0.53	0.00	6.20 ± 13.60	1.27	1.43
$\Lambda_c^+ \pi^+ D^{*-}$	$P_c(4440)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 0.96	0.72	0.91
	$P_c(4457)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 1.73	0.77	0.97
$\Lambda_c^+ \pi^- D^{*-}$	$P_c(4440)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 0.80	0.63	0.80
	$P_c(4457)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 0.74	0.59	0.74
$\Lambda_c^+ \pi^+ D^-$	$P_c(4312)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 1.56	0.69	0.88
	$P_c(4440)^+$	0.65	0.00	4.43 ± 11.67	3.71	4.24
	$P_c(4457)^+$	0.65	0.00	5.94 ± 12.68	3.13	3.61
$\Lambda_c^+ \pi^- D^-$	$P_c(4312)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 1.42	0.67	0.86
	$P_c(4440)^+$	0.53	0.00	12.52 ± 15.89	3.91	4.37
	$P_c(4457)^+$	0.53	0.00	8.60 ± 12.22	3.10	3.51
$\Sigma_c^0 D^-$	$P_c(4440)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 2.47	0.82	1.03
	$P_c(4457)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 1.05	0.63	0.81
$\Sigma_c^{++} D^-$	$P_c(4440)^+$	0.80	0.00	0.61 ± 4.52	1.13	1.37
	$P_c(4457)^+$	0.59	0.00	0.66 ± 1.79	0.80	0.99
$\Sigma_c^{*0} D^-$	$P_c(4440)^+$	0.31	0.49	3.23 ± 3.53	1.89	2.24
	$P_c(4457)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 3.09	0.91	1.13
$\Sigma_c^{*++} D^-$	$P_c(4440)^+$	0.75	0.00	1.20 ± 3.81	1.38	1.67
	$P_c(4457)^+$	1.00	0.00	0.00 ± 5.74	0.87	1.08

arXiv:2404.07131

Поиск резонансов

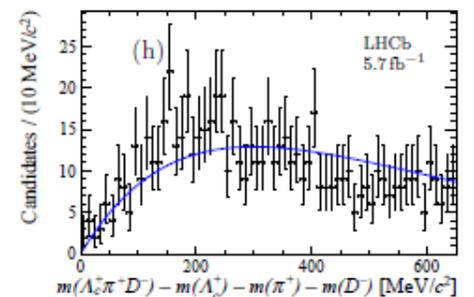
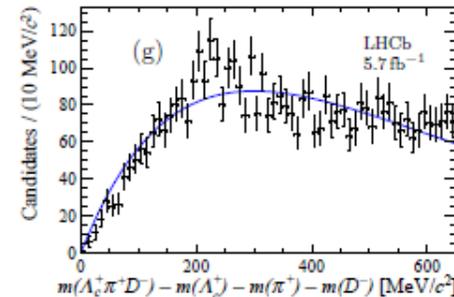
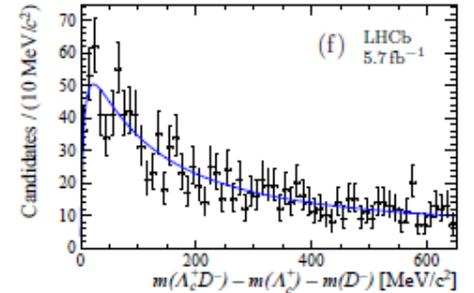
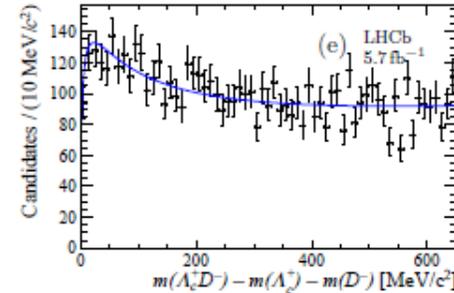
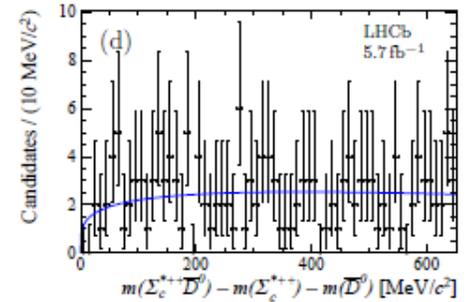
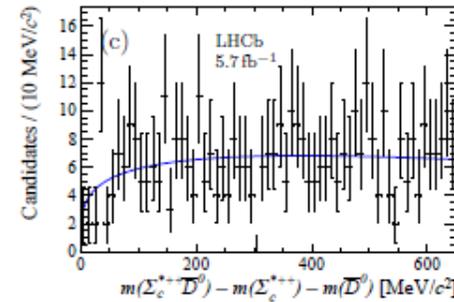
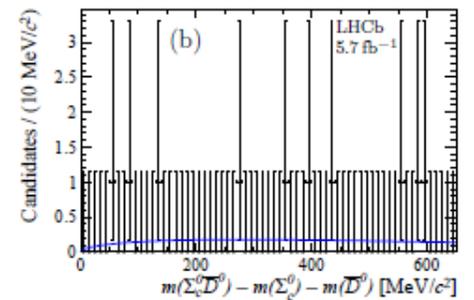
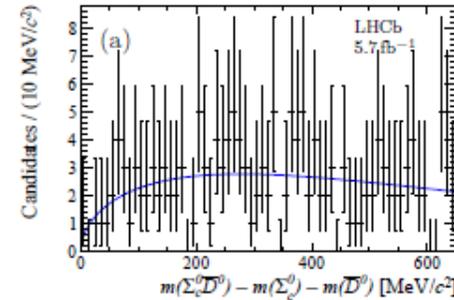
- Исследовано **33** возможных канала рождения пентакварков с двойным очарованием и со скрытым очарованием
- Сигнал с наибольшей значимостью (скорректированная значимость 3.6сигма) зафиксирован для корреляций $\Lambda_c^+ \pi^+ D^-$
 - При помощи методов псевдоэкспериментов, используя фоновую гипотезу, было показано, что экспериментальный спектр согласуется с фоновой гипотезой.



arXiv:2404.07131

Signal region

Sidebands



Объем работы (не весь)

Decay Mode	Width (MeV)	Lowest p -value		Significance (σ)		Q -value (MeV/ c^2)	Signal Yield	UL ($\times 10^{-3}$)	
		Local	Corrected	Local	Corrected			90% CL	95% CL
$A_c^+ \pi^- D^-$	0	3.9×10^{-4}	0.03	3.36	1.90	257	38.1 ± 12.4	4.28	4.56
	5	5.71×10^{-5}	3.33×10^{-3}	3.86	2.71	253	62.1 ± 17.1	4.62	4.83
	10	1.45×10^{-5}	6.92×10^{-4}	4.18	3.20	249	83.7 ± 21.2	4.72	4.88
	15	4.59×10^{-6}	1.83×10^{-4}	4.44	3.56	249	103.5 ± 24.6	4.77	4.92
$A_c^+ \pi^- D^{*-}$	0	4.4×10^{-3}	0.31	2.62	0.48	197	12.0 ± 5.3	3.11	3.45
	5	7.1×10^{-3}	0.31	2.45	0.51	197	16.8 ± 7.3	4.08	4.53
	10	8.6×10^{-3}	0.27	2.38	0.61	197	21.2 ± 9.1	4.69	5.15
	15	8.9×10^{-3}	0.22	2.37	0.78	197	25.5 ± 10.8	5.11	5.56
$\Sigma_c^{*++} \bar{D}^0$	0	1×10^{-2}	0.75	2.32	0.00	37	5.0 ± 2.8	0.96	1.09
	5	1.2×10^{-2}	0.62	2.24	0.00	37	7.8 ± 4.0	1.32	1.49
	10	2.7×10^{-2}	0.92	1.92	0.00	205	7.0 ± 20.6	1.57	1.78
	15	2.7×10^{-2}	0.73	1.92	0.00	485	12.5 ± 6.7	2.23	2.49
$\Sigma_c^{*++} D^-$	0	1.2×10^{-3}	0.11	3.03	1.21	537	6.5 ± 3.3	1.63	1.82
	5	1.6×10^{-3}	0.10	2.95	1.30	497	11.8 ± 5.0	2.52	2.79
	10	2.5×10^{-3}	0.11	2.81	1.24	497	13.0 ± 5.7	2.82	3.12
	15	4.3×10^{-3}	0.14	2.63	1.07	497	13.9 ± 6.3	3.02	3.37
$\Sigma_c^{*++} D^{*-}$	0	2.3×10^{-2}	1.40	2.00	0.00	193	2.5 ± 1.8	1.08	1.23
	5	3.5×10^{-2}	1.44	1.81	0.00	449	2.9 ± 2.1	1.26	1.45
	10	3.5×10^{-2}	1.08	1.81	0.00	453	3.2 ± 2.3	1.36	1.57
	15	4.1×10^{-2}	0.99	1.74	0.00	453	3.3 ± 2.4	1.45	1.66
$\Sigma_c^{*0} \bar{D}^0$	0	3.4×10^{-3}	0.27	2.71	0.63	341	11.4 ± 5.0	1.64	1.83
	5	2.6×10^{-3}	0.14	2.80	1.07	341	16.8 ± 6.8	2.29	2.56
	10	2.2×10^{-3}	0.09	2.84	1.31	341	21.3 ± 8.3	2.73	3.00
	15	1.8×10^{-3}	0.06	2.90	1.52	337	26.0 ± 9.6	3.02	3.27
$\Sigma_c^{*0} D^-$	0	7.2×10^{-3}	0.53	2.45	0.00	113	6.2 ± 3.2	1.44	1.62
	5	1.4×10^{-3}	0.08	2.99	1.40	537	11.5 ± 4.8	2.60	2.85
	10	1.1×10^{-3}	0.05	3.06	1.66	537	13.6 ± 5.4	2.99	3.27
	15	1.2×10^{-3}	0.04	3.02	1.70	537	15.1 ± 6.0	3.23	3.54
$\Sigma_c^{*0} D^{*-}$	0	9.9×10^{-3}	0.51	2.33	0.00	109	2.6 ± 1.7	0.96	1.11
	5	3.2×10^{-3}	0.16	2.73	0.99	17	2.8 ± 1.9	1.07	1.22
	10	4.1×10^{-3}	0.16	2.64	1.01	17	2.9 ± 2.1	1.13	1.30
	15	6.1×10^{-3}	0.17	2.51	0.94	17	3.0 ± 2.4	1.18	1.34

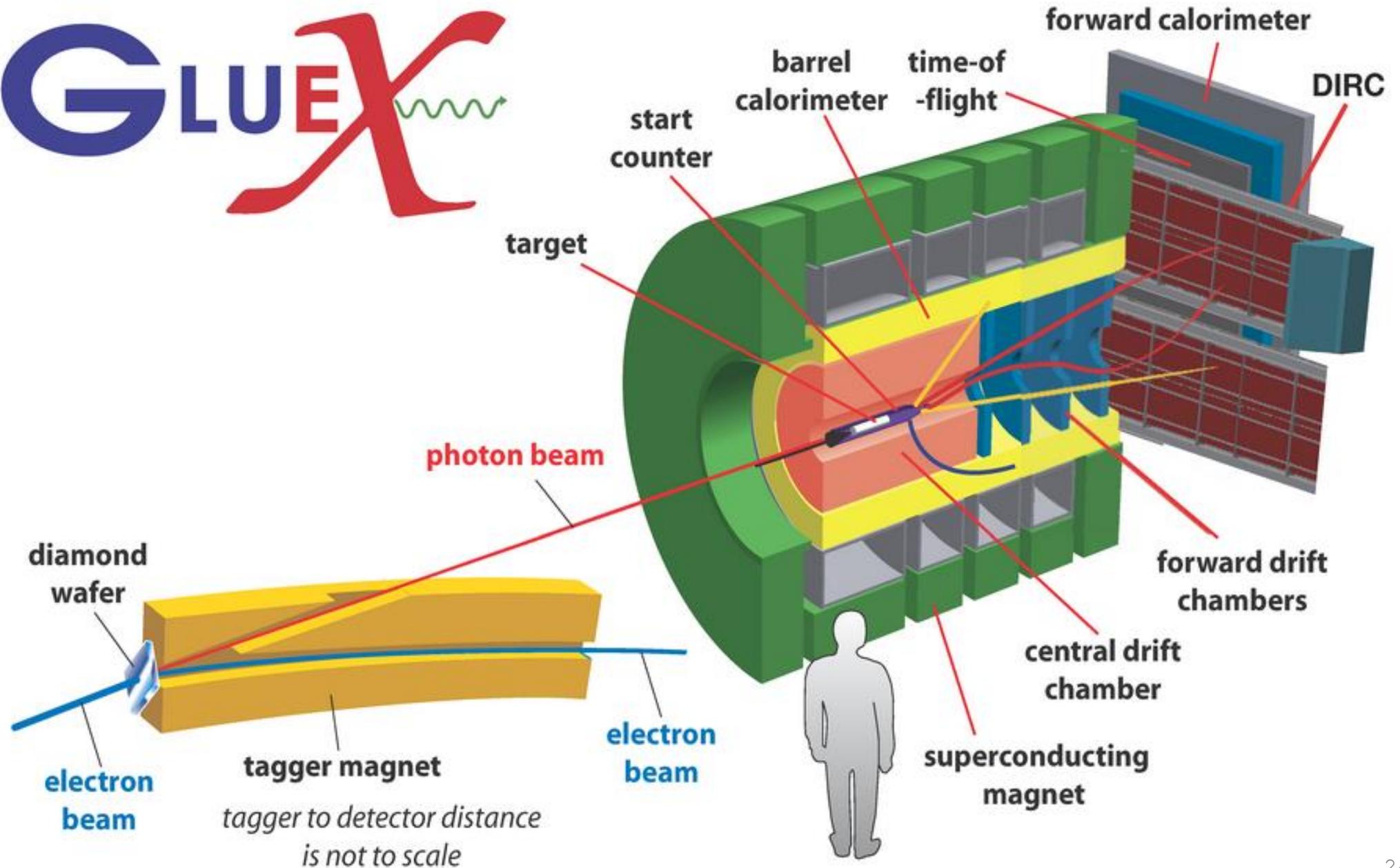
Decay Mode	Width (MeV/ c^2)	Lowest p -value		Significance (σ)		Q -value (MeV/ c^2)	Signal Yield	UL ($\times 10^{-3}$)	
		Local	Corrected	Local	Corrected			90% CL	95% CL
$A_c^+ \bar{D}^0$	0	4.7×10^{-3}	0.36	2.60	0.36	353	22.7 ± 30.6	1.41	1.54
	5	3.4×10^{-3}	0.20	2.71	0.86	353	31.4 ± 12.8	1.53	1.64
	10	2.7×10^{-3}	0.13	2.78	1.15	349	39.4 ± 34.8	1.54	1.65
	15	2.2×10^{-3}	0.09	2.85	1.36	349	46.8 ± 91.0	1.57	1.67
$A_c^+ D^-$	0	4.7×10^{-3}	0.38	2.60	0.31	501	24.0 ± 12.9	2.05	2.25
	5	3.7×10^{-3}	0.22	2.67	0.77	497	26.7 ± 22.2	2.09	2.27
	10	2.7×10^{-3}	0.13	2.78	1.15	497	33.1 ± 23.0	2.17	2.35
	15	3×10^{-3}	0.11	2.75	1.21	497	38.0 ± 25.5	2.23	2.39
$A_c^+ D^{*-}$	0	1.4×10^{-3}	0.12	2.99	1.17	417	17.5 ± 6.9	2.48	2.72
	5	2.2×10^{-3}	0.13	2.85	1.13	417	20.8 ± 9.3	2.74	2.94
	10	3×10^{-3}	0.13	2.75	1.11	421	23.8 ± 9.6	2.80	2.96
	15	4.7×10^{-3}	0.16	2.60	0.99	421	26.3 ± 10.8	2.85	3.00
$\Sigma_c^{*++} \bar{D}^0$	0	1.2×10^{-3}	0.10	3.04	1.27	301	7.0 ± 3.2	1.10	1.22
	5	4.3×10^{-3}	0.23	2.63	0.73	301	7.7 ± 3.6	1.23	1.37
	10	1.4×10^{-2}	0.48	2.21	0.04	301	7.9 ± 4.1	1.32	1.49
	15	3.2×10^{-2}	0.81	1.85	0.00	301	7.9 ± 4.5	1.40	1.59
$A_c^+ \pi^+ \bar{D}^0$	0	7.4×10^{-4}	0.06	3.18	1.58	245	41.9 ± 13.7	2.87	3.06
	5	9.69×10^{-5}	5.76×10^{-3}	3.73	2.53	245	67.6 ± 19.2	3.22	3.35
	10	2.46×10^{-5}	1.12×10^{-3}	4.06	3.06	245	91.6 ± 24.1	3.29	3.39
	15	8.61×10^{-6}	3.11×10^{-4}	4.30	3.42	245	115.0 ± 28.5	3.30	3.40
$\Sigma_c^{*++} D^-$	0	5.2×10^{-3}	0.41	2.56	0.24	181	3.9 ± 2.3	1.07	1.21
	5	4.1×10^{-3}	0.22	2.65	0.76	177	6.8 ± 3.3	1.46	1.63
	10	3.7×10^{-3}	0.15	2.68	1.02	177	7.9 ± 3.7	1.64	1.84
	15	4.7×10^{-3}	0.15	2.60	1.03	177	8.4 ± 4.0	1.76	1.98
$A_c^+ \pi^+ D^-$	0	1.6×10^{-4}	0.01	3.59	2.21	225	41.6 ± 12.6	3.95	4.19
	5	3.03×10^{-5}	1.96×10^{-3}	4.01	2.89	225	64.7 ± 17.4	4.43	4.69
	10	8.61×10^{-6}	4.44×10^{-4}	4.30	3.32	225	87.1 ± 21.6	4.64	4.85
	15	3.36×10^{-6}	1.45×10^{-4}	4.50	3.62	225	108.2 ± 25.3	4.72	4.90
$A_c^+ \pi^+ D^{*-}$	0	2.7×10^{-3}	0.20	2.78	0.86	213	12.8 ± 5.3	3.42	3.75
	5	4.5×10^{-4}	0.02	3.32	1.96	213	22.3 ± 7.8	4.52	4.76
	10	1.45×10^{-4}	6.29×10^{-3}	3.62	2.50	213	30.4 ± 9.7	4.75	4.93
	15	7.42×10^{-5}	2.60×10^{-3}	3.79	2.79	209	37.7 ± 11.4	4.85	5.02
$\Sigma_c^0 \bar{D}^0$	0	1.3×10^{-2}	0.95	2.22	0.00	65	2.9 ± 2.0	0.68	0.78
	5	1.7×10^{-2}	0.79	2.13	0.00	65	3.7 ± 68.8	0.90	1.03
	10	2.2×10^{-2}	0.74	2.02	0.00	65	4.4 ± 4.3	1.02	1.18
	15	2.8×10^{-2}	0.74	1.90	0.00	65	4.8 ± 4.2	1.13	1.29
$A_c^+ \pi^- \bar{D}^0$	0	4.8×10^{-4}	0.04	3.30	1.72	597	54.0 ± 17.2	2.79	2.98
	5	9.65×10^{-5}	7.11×10^{-3}	3.73	2.45	597	78.8 ± 21.9	3.02	3.20
	10	2.71×10^{-5}	1.63×10^{-3}	4.04	2.94	597	104.0 ± 26.3	3.15	3.30
	15	9.50×10^{-6}	4.83×10^{-4}	4.28	3.30	597	128.5 ± 30.4	3.20	3.33
$\Sigma_c^0 D^-$	0	2.3×10^{-3}	0.19	2.84	0.88	261	4.4 ± 2.7	1.24	1.39
	5	3.4×10^{-3}	0.18	2.71	0.90	261	5.7 ± 3.0	1.50	1.69
	10	6×10^{-3}	0.23	2.51	0.74	261	6.4 ± 3.4	1.66	1.87
	15	1×10^{-2}	0.30	2.32	0.53	261	7.0 ± 3.8	1.78	2.03

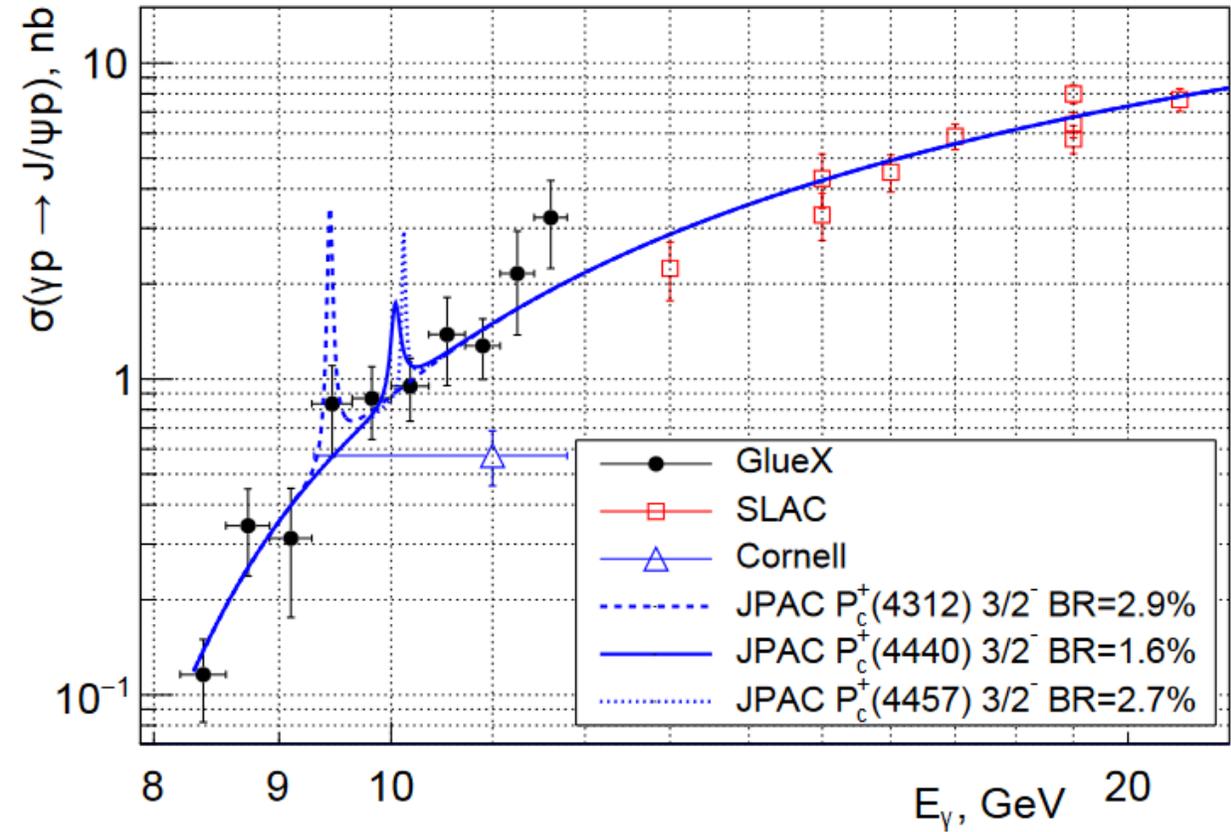
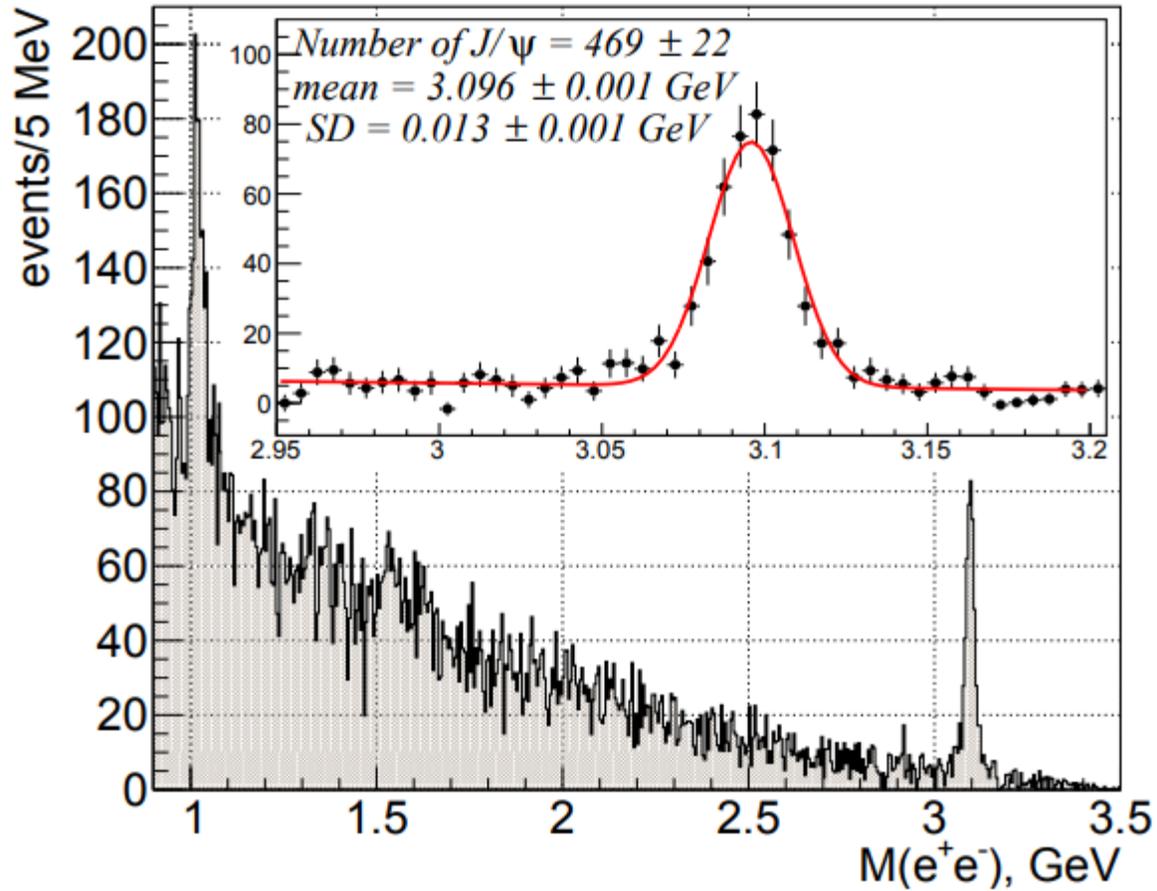
Фоторождение / GlueX

Phys. Rev. Lett. 123 (7) (2019) 072001

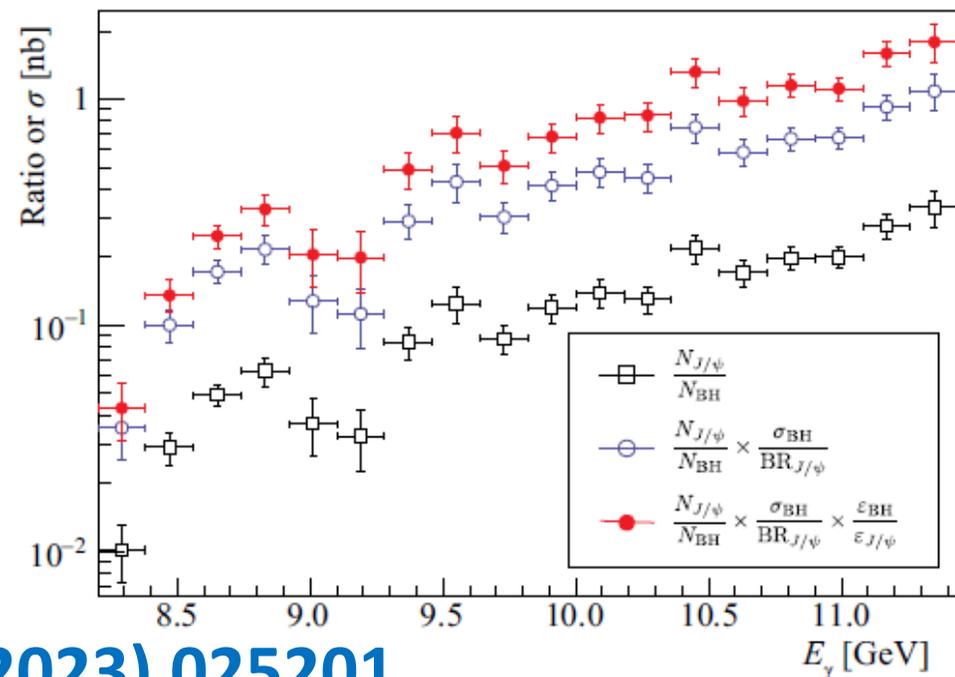
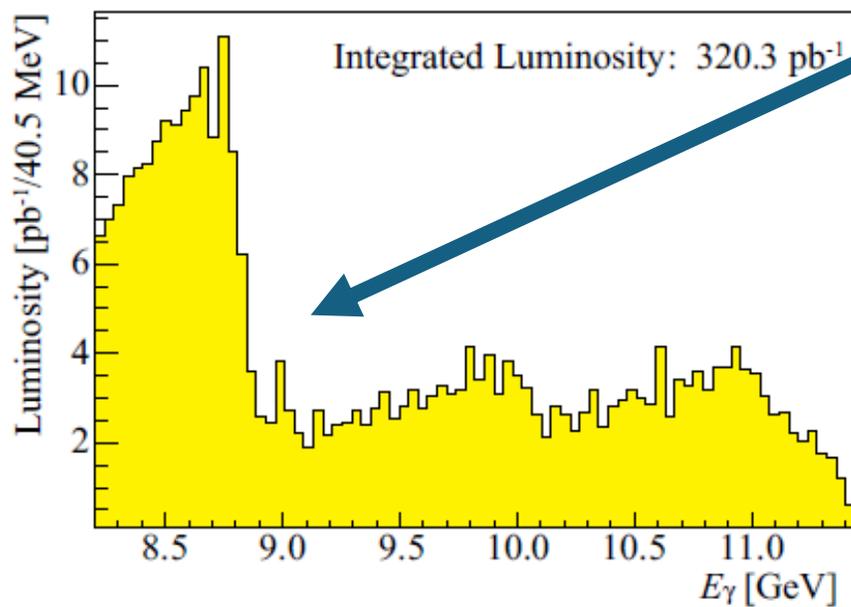
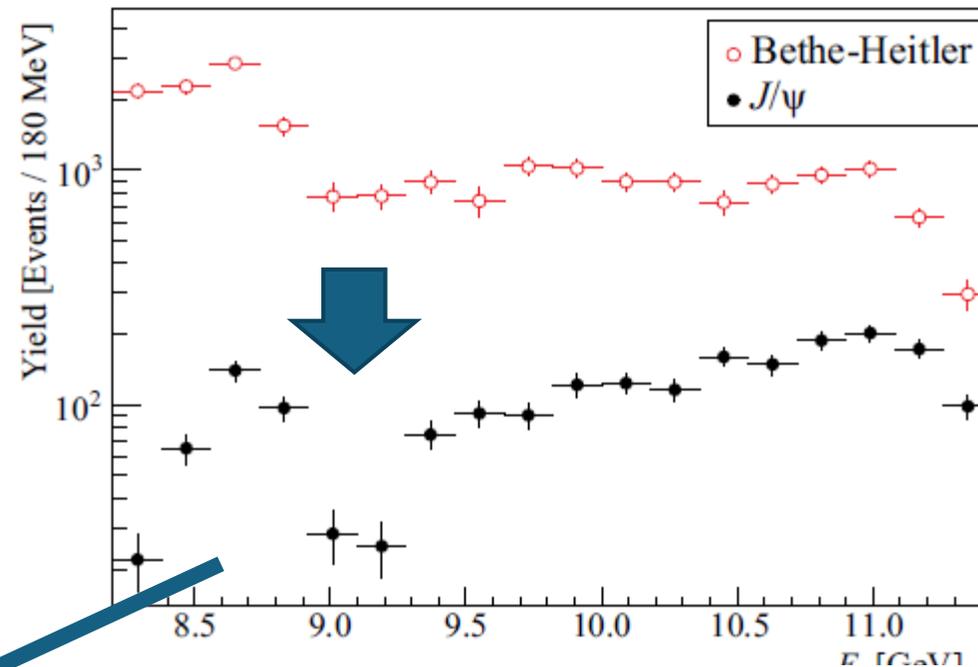
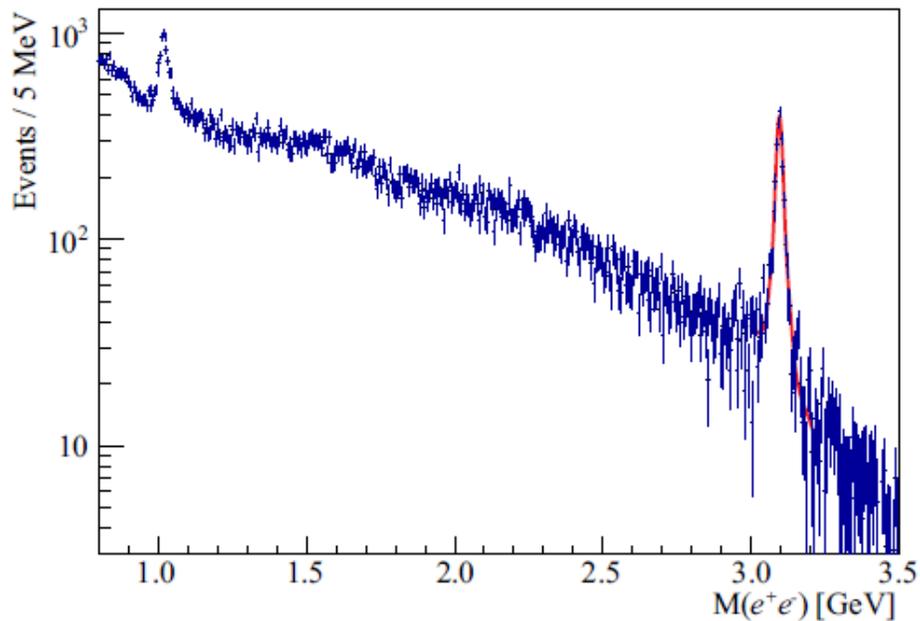
Phys. Rev. C 108 (2) (2023) 025201

GLUEX



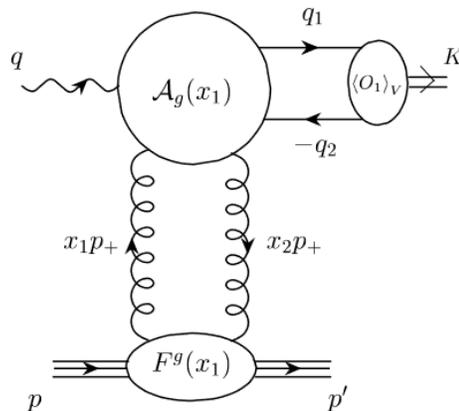


- Фоторождение J/ψ в области возможных пентакварковых резонансов / Hall D в Jefferson Lab: $E_\gamma = 9.4\text{--}10.1$ GeV ([Phys. Rev. Lett. 123 \(7\) \(2019\) 072001](#))
- Необходимо увеличение экспериментальной статистики, а также понимание природы континуума

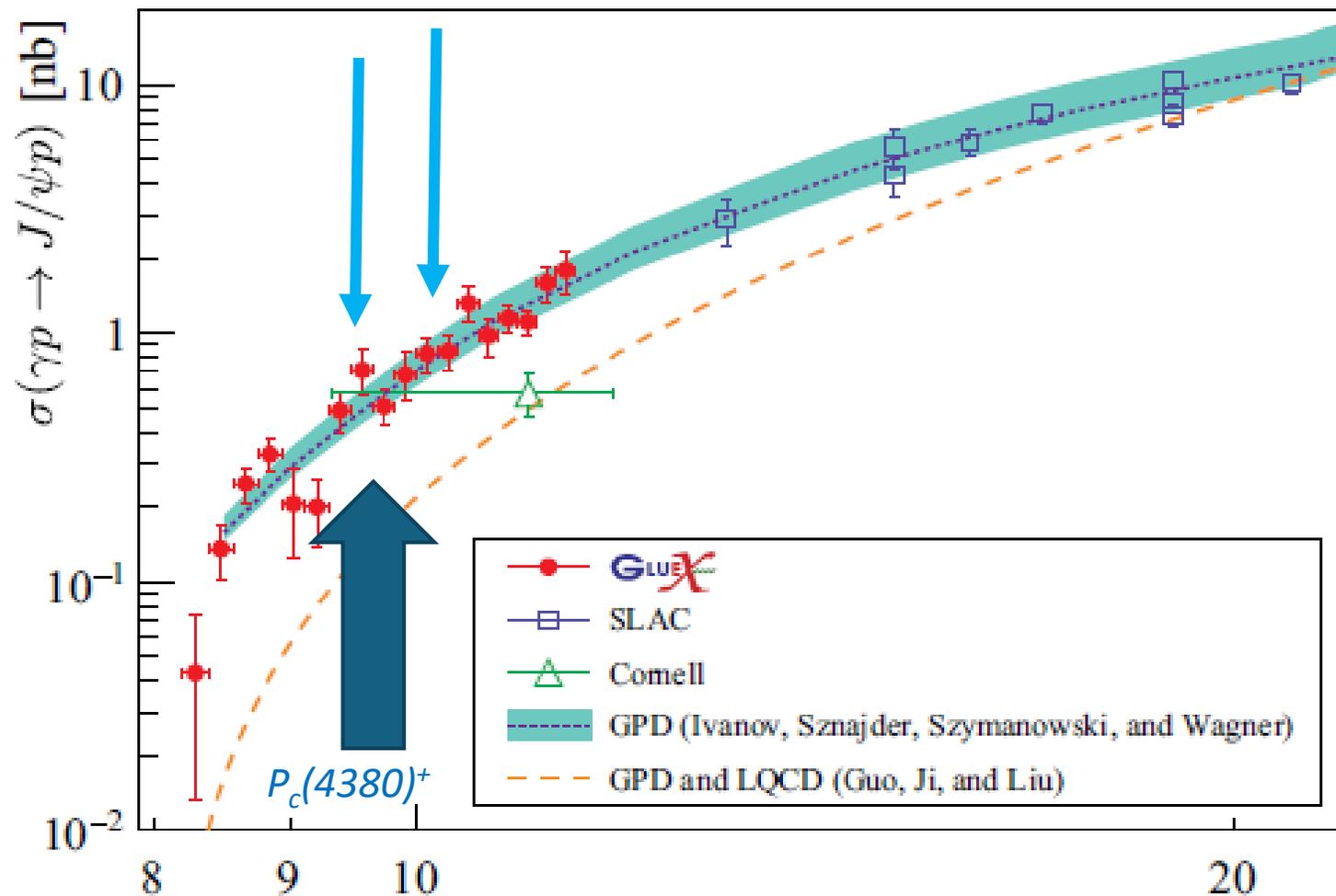


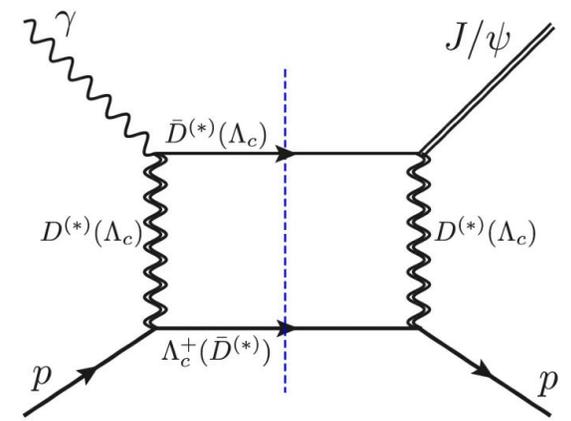
Сечение реакции

- «Провал» в районе 9 ГэВ сохранился
 - Он находится в области резкого уменьшения потока фотонов
- Пентакварковые состояния, обнаруженные LHCb должны давать вклад существенно выше 9 ГэВ
- Факторизационный подход основанный на однопетлевых амплитудах в приближении тяжелых кварков дает **хорошее описание сечения**



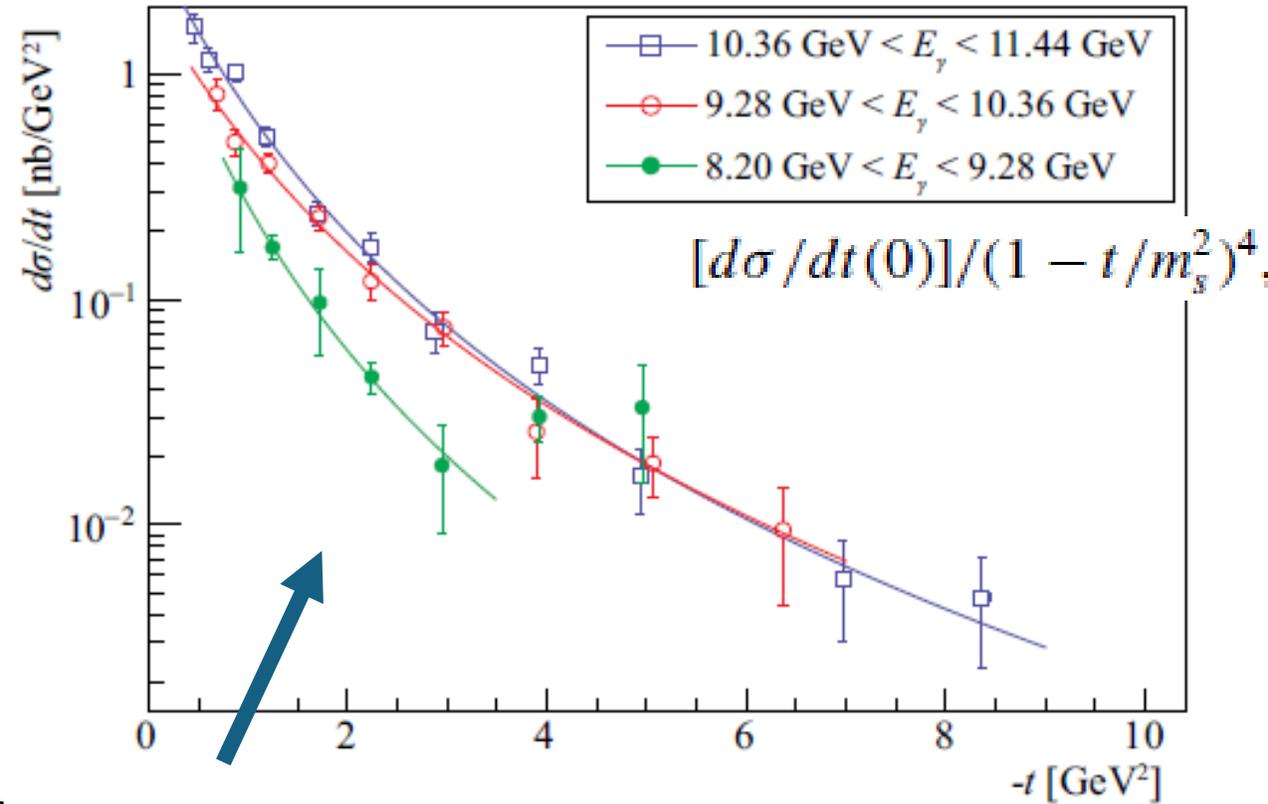
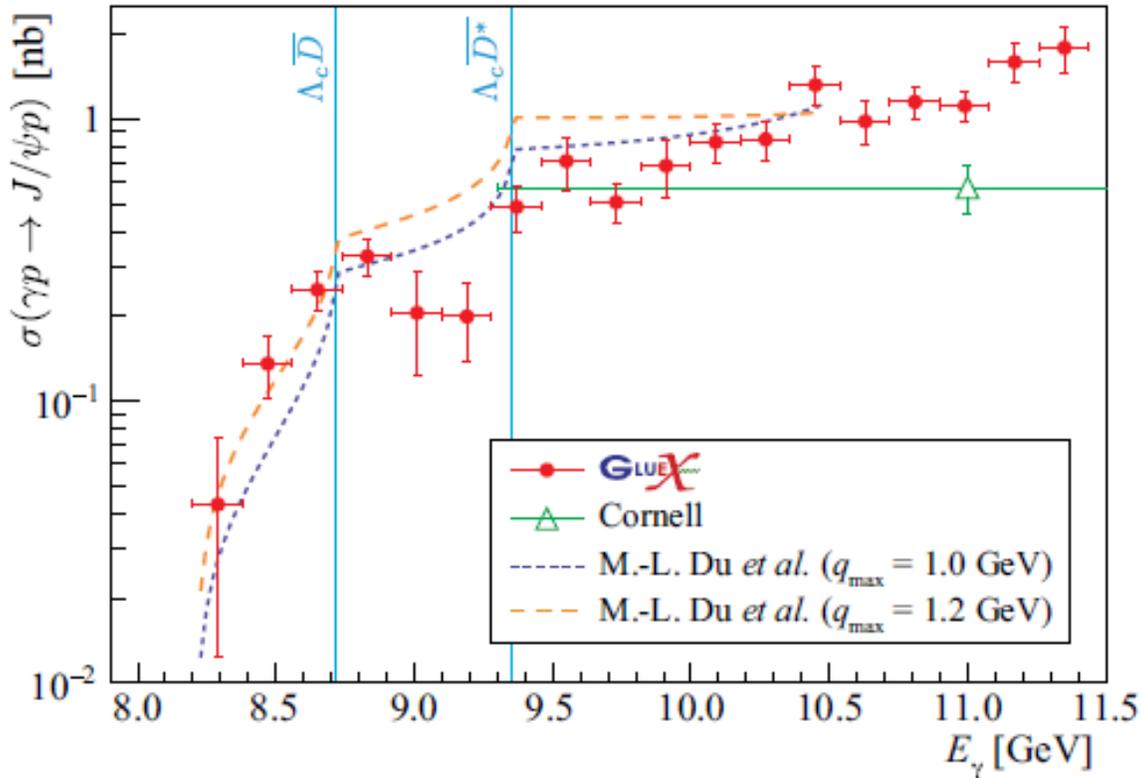
Ожидаемое положение для узких пентакварков





Альтернативный подход

Phys. Rev. C **108** (2023) 025201



Однако обмен тяжелыми адронами в этой модели предполагает очень плавную зависимость дифференциальных сечений.

Померонный обмен

- Обмен помероном (с хорошо подобранными параметрами) позволяет описать сечение фоторождения чармония в широком диапазоне энергий реакции

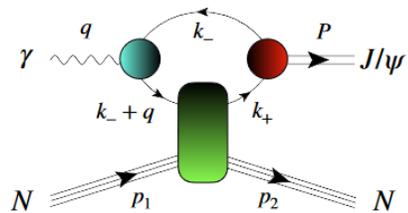
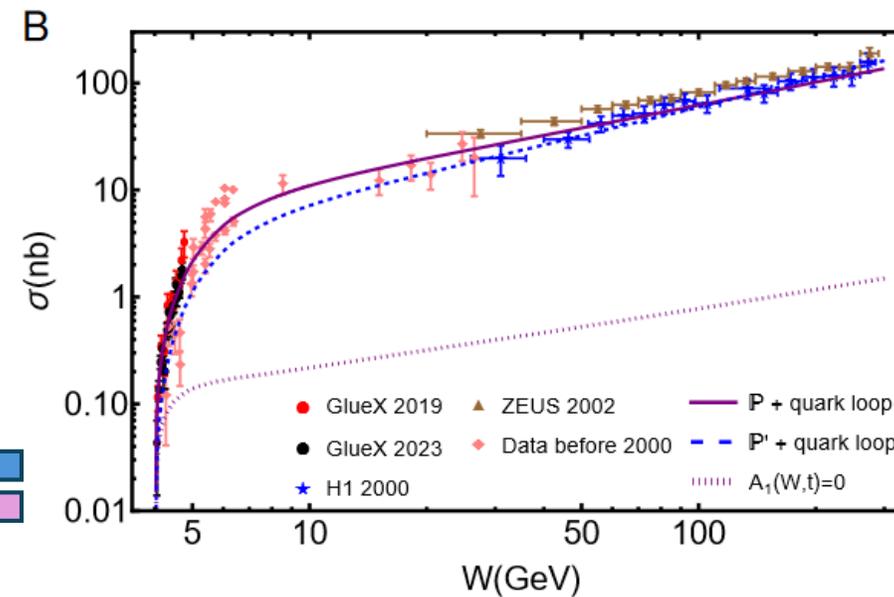
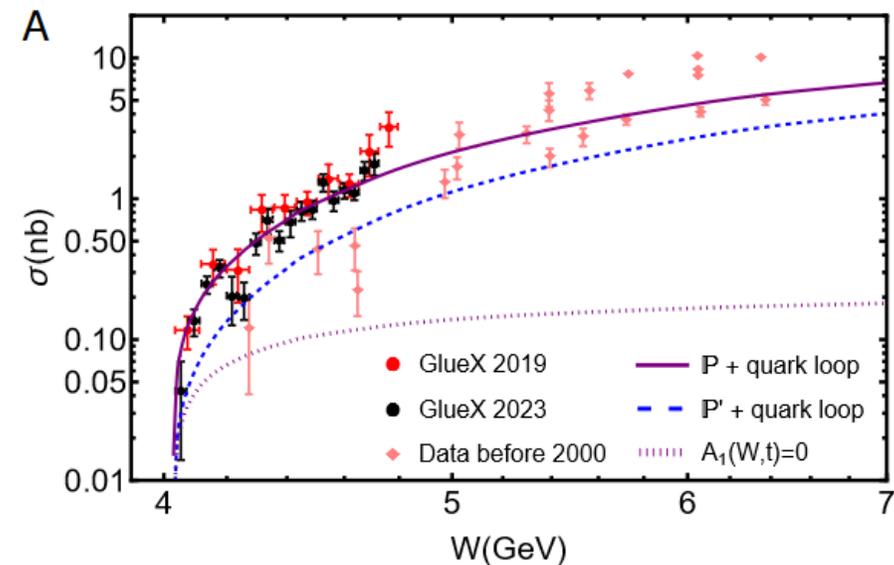
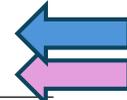


Figure 1: Reaction model for $\gamma + p \rightarrow J/\psi + p$. The $c\bar{c}$ component of the dressed-photon is probed by Pomeron exchange with the proton, producing an on-shell J/ψ meson. Referring to Eq.(2): the green rectangle describes Pomeron exchange, Γ^P , including its couplings to the proton and quark – see Sect.3; the solid black curve is S_c , the dressed c quark propagator; the shaded blue circle is Γ_{μ}^{γ} , the dressed- $\gamma c\bar{c}$ vertex; and the shaded red circle is Γ_{ν} , J/ψ -meson Bethe-Salpeter amplitude – see Sect.4. Kinematics: $s = W^2 = -(p_2^2 + P^2)$; $t = -(p_2 - p_1)^2$. (Image courtesy of D. Binosi.)

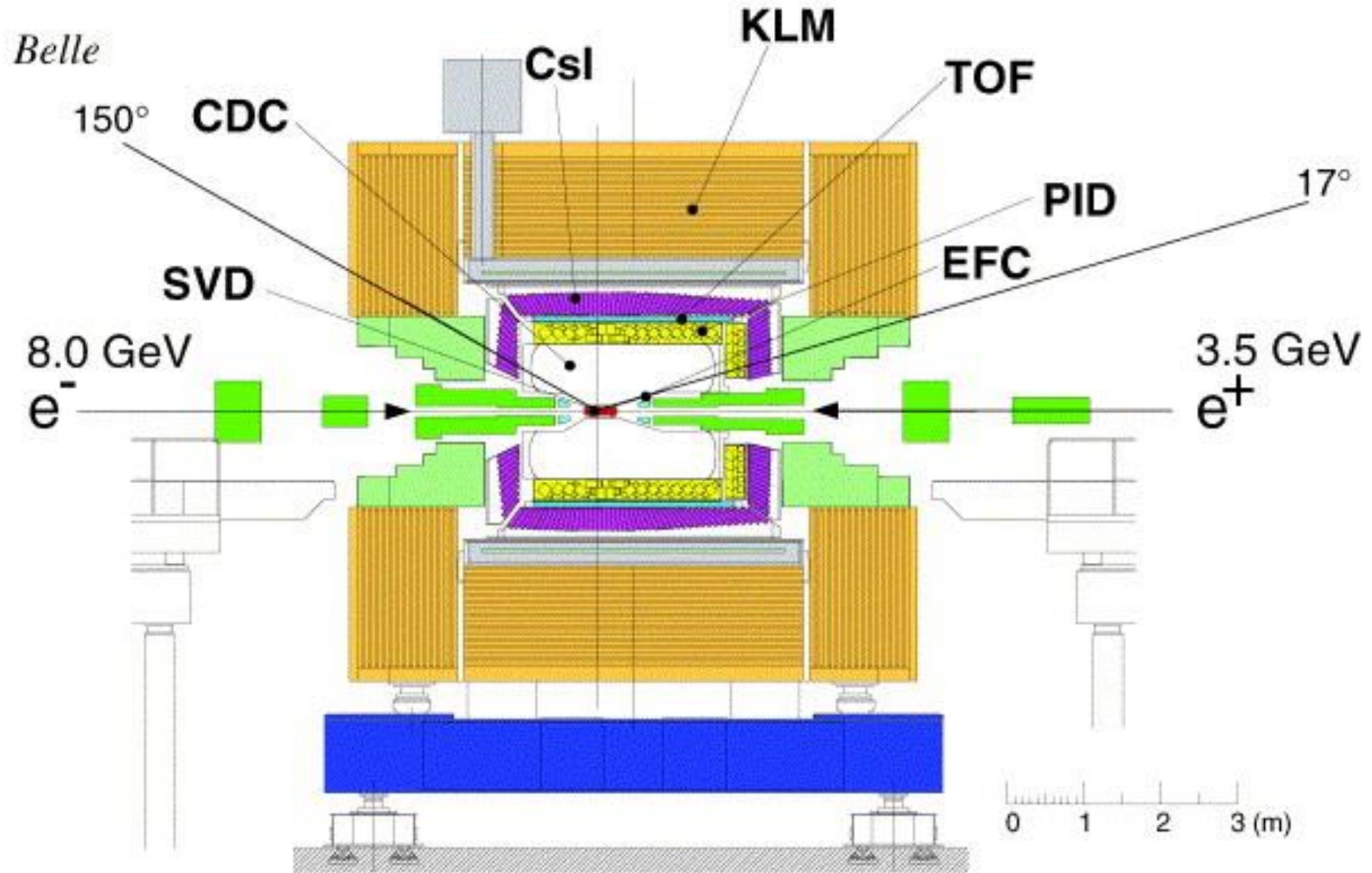
Table 2: Parameters characterising the Pomeron exchange interaction in Fig. 1, drawn from analyses in Refs.[2, 31, 32, 34, 49]. The values of β_{ℓ} , β_c were determined as described in the text.

	f	α_0	α_1 [GeV $^{-2}$]	β [GeV $^{-1}$]
ρ [32, 49]	ℓ	1.1	0.33	2.80
J/ψ [2, 34]	c	1.25	0.25	0.076
J/ψ [31]	c	1.2 ± 0.009	0.115 ± 0.0118	0.11



Распады $Y(nS)$ / Belle

[arXiv:2403.04340](https://arxiv.org/abs/2403.04340)



Поиск пентакварков на Belle

- Многокварковые системы могут рождаться в распадах боттомония

- ВаBar, Phys. Rev. D 89, 111102 (рождение антидейтронов, которые можно рассматривать как устойчивую адронную молекулу)

- Три набора данных

- $\Upsilon(1S)$: $5,8 \text{ фб}^{-1}$, $(102 \pm 2) \times 10^6 \Upsilon(1S)$
- $\Upsilon(2S)$: $24,7 \text{ фб}^{-1}$, $(158 \pm 4) \times 10^6 \Upsilon(2S)$
- Континуум (10,52 ГэВ): $89,5 \text{ фб}^{-1}$,

- Два набора MC

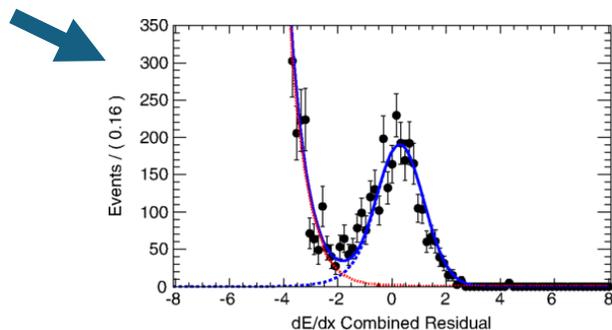
- MC1 $\Upsilon(1, 2S) \rightarrow P_c^+ + \bar{p} + q\bar{q}$

- MC2 $\Upsilon(1, 2S) \rightarrow J/\psi + p + \bar{p} + q\bar{q}$

- Оценка фона из событий, лежащих вне пика чармония

$$M_{\text{recoil}}^2(pJ/\psi) > 10 \text{ GeV}^2/c^4.$$

- Разумное согласие экспериментального спектра и MC1

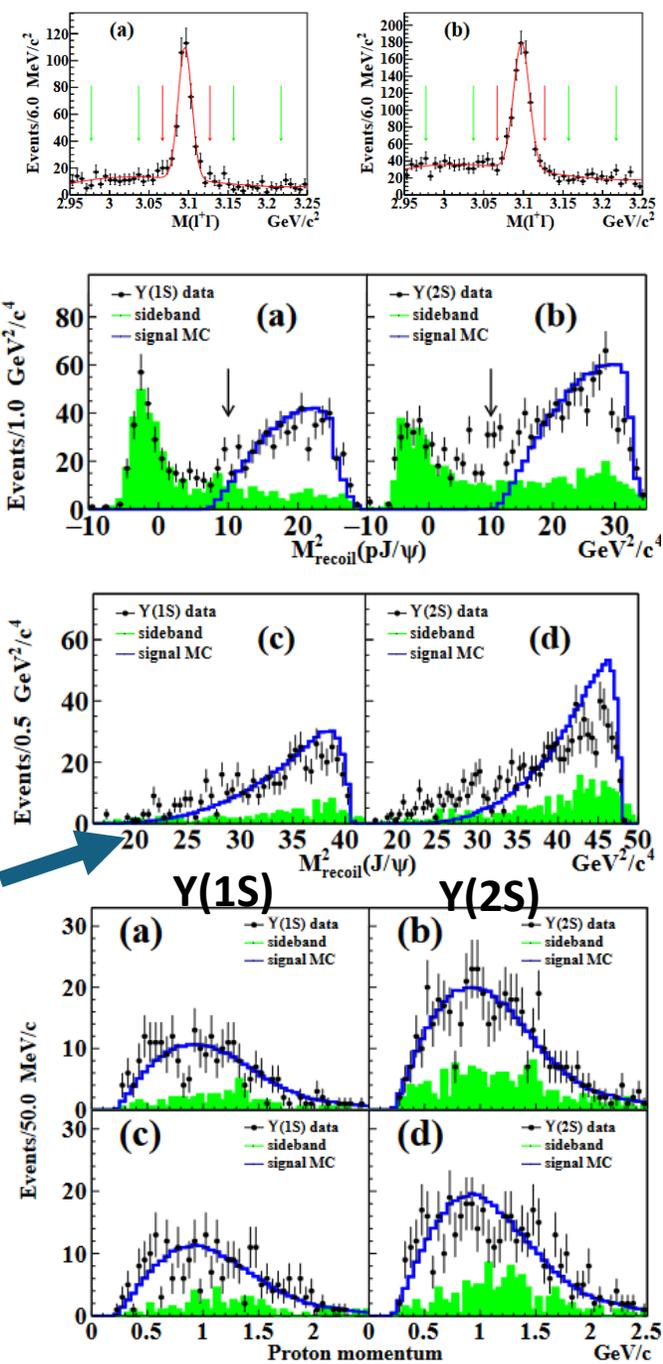


$$M_{\text{recoil}}^2(J/\psi) \equiv (P_{e^+e^-} - P_{J/\psi})^2$$

протоны

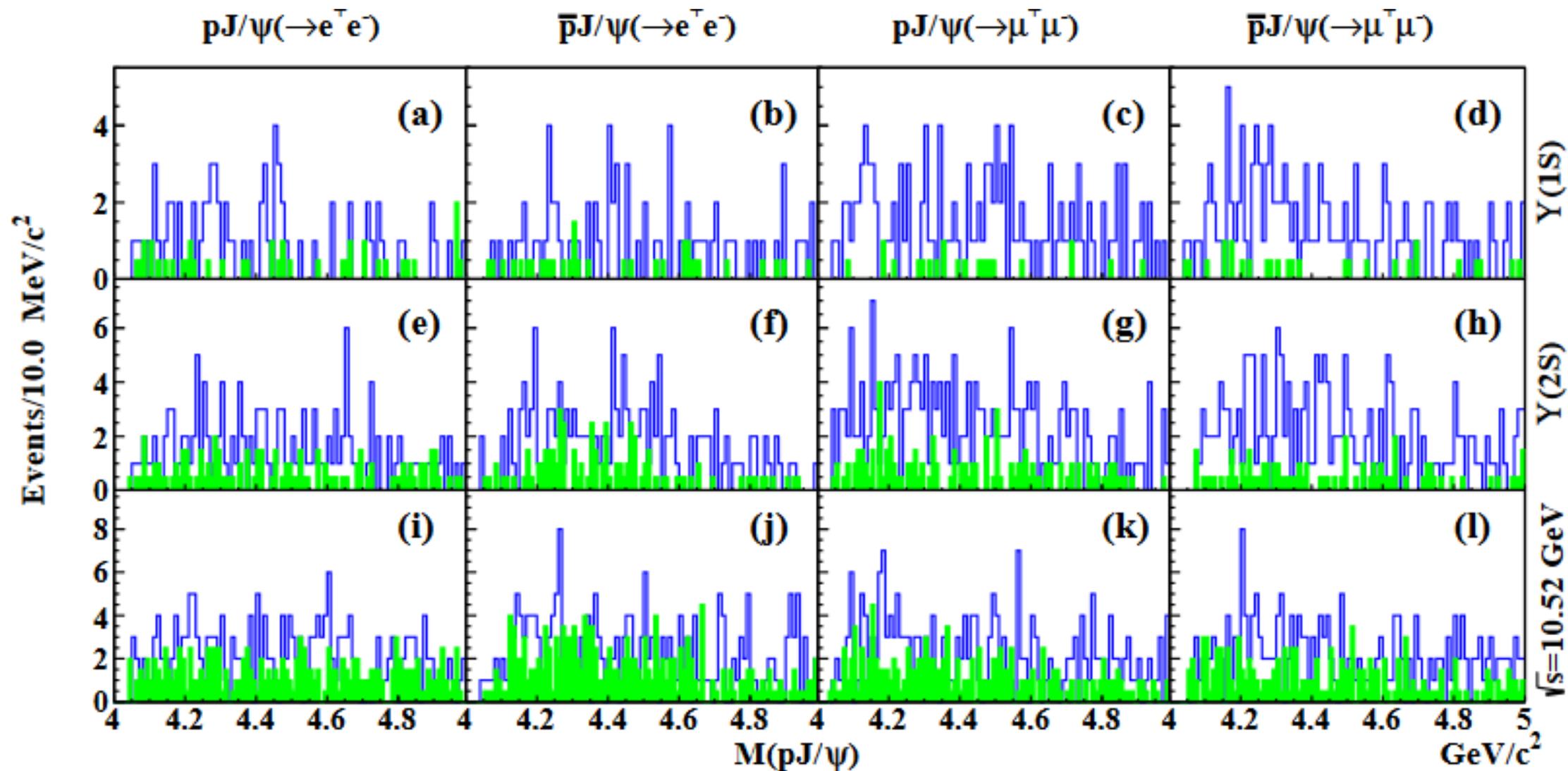
антипротоны

arXiv:2403.04340



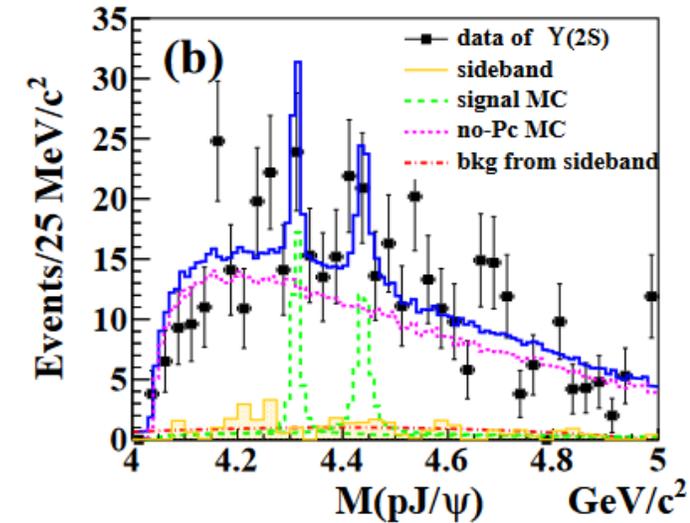
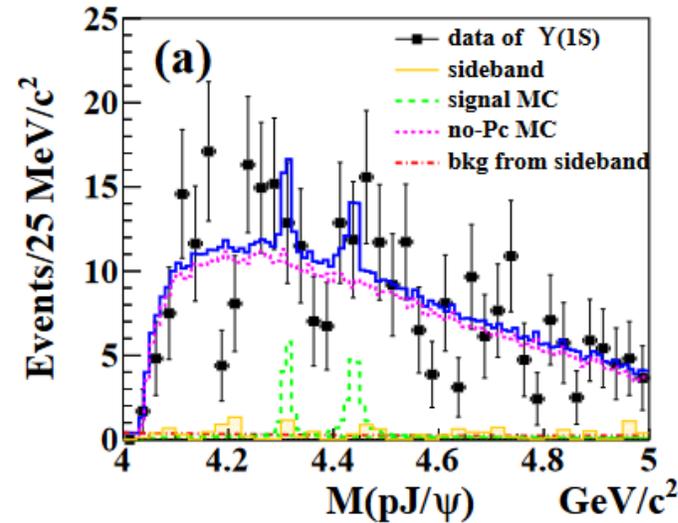
Нет узких структур!

arXiv:2403.04340



Поиск пентакварков

- Объединение спектров (электроны+мюоны и протоны+антипротоны)
 - Побиновое (?) вычитание фона оцененного из данных при энергии 10,52ГэВ
- Вклад фона под пиком чармония мал
- Разумное описание спектра при помощи MC2, учитывая простоту заложенной модели
- Нет никаких теоретических предсказаний соотношения сигнал-фон
- Сравнение LHCb и Belle на примере прямого рождения Ω_c^{*0} -резонансов (см. следующий слайд)



$$\mathcal{B}[\Upsilon(1,2S) \rightarrow P_c^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}(P_c^+ \rightarrow pJ/\psi) < \frac{N_{\text{sig}}^{\text{UL}}(P_c^+)}{N_{\Upsilon(1,2S)} \cdot \epsilon_{\text{allcmb}}^{\text{MC}} \cdot \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-)(1 - \delta_{\text{sys}})},$$

$$\mathcal{B}[\Upsilon(1S) \rightarrow P_c(4312)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4312)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 4.5 \times 10^{-6},$$

$$\mathcal{B}[\Upsilon(1S) \rightarrow P_c(4440)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4440)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 6.8 \times 10^{-6},$$

$$\mathcal{B}[\Upsilon(1S) \rightarrow P_c(4457)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4457)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 4.9 \times 10^{-6},$$

$$\mathcal{B}[\Upsilon(2S) \rightarrow P_c(4312)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4312)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 5.3 \times 10^{-6},$$

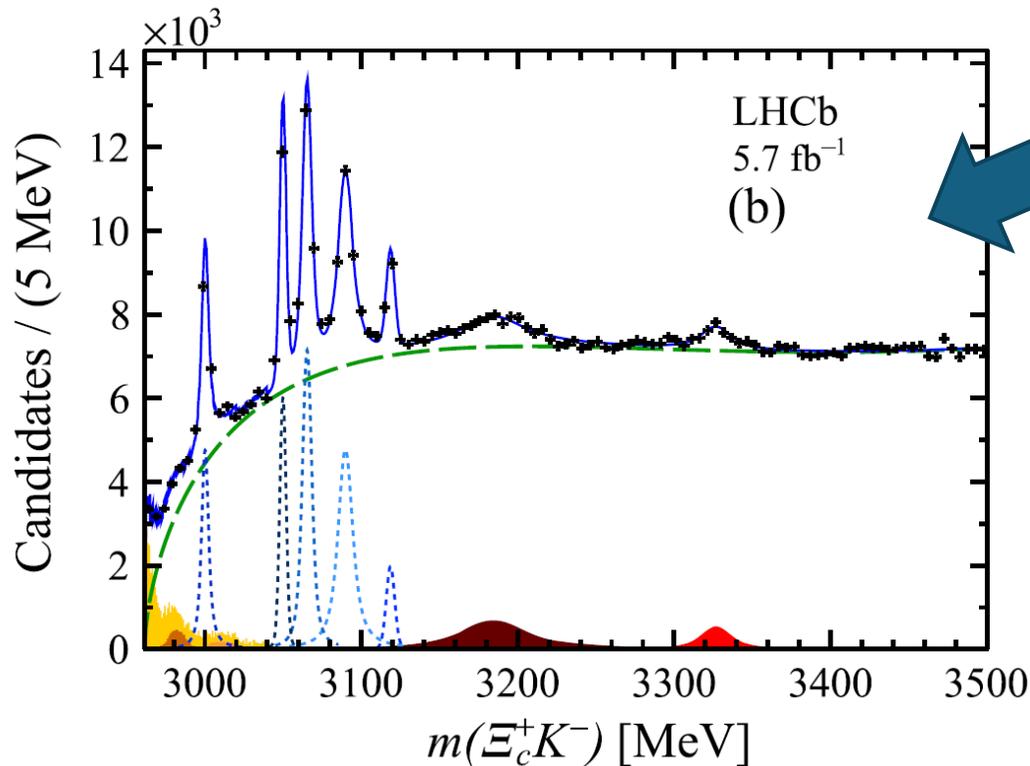
$$\mathcal{B}[\Upsilon(2S) \rightarrow P_c(4440)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4440)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 7.2 \times 10^{-6},$$

$$\mathcal{B}[\Upsilon(2S) \rightarrow P_c(4457)^+ + \text{anything}] \cdot \mathcal{B}[P_c(4457)^+ \rightarrow pJ/\psi] < 2.4 \times 10^{-6},$$

pp vs. e^+e^-

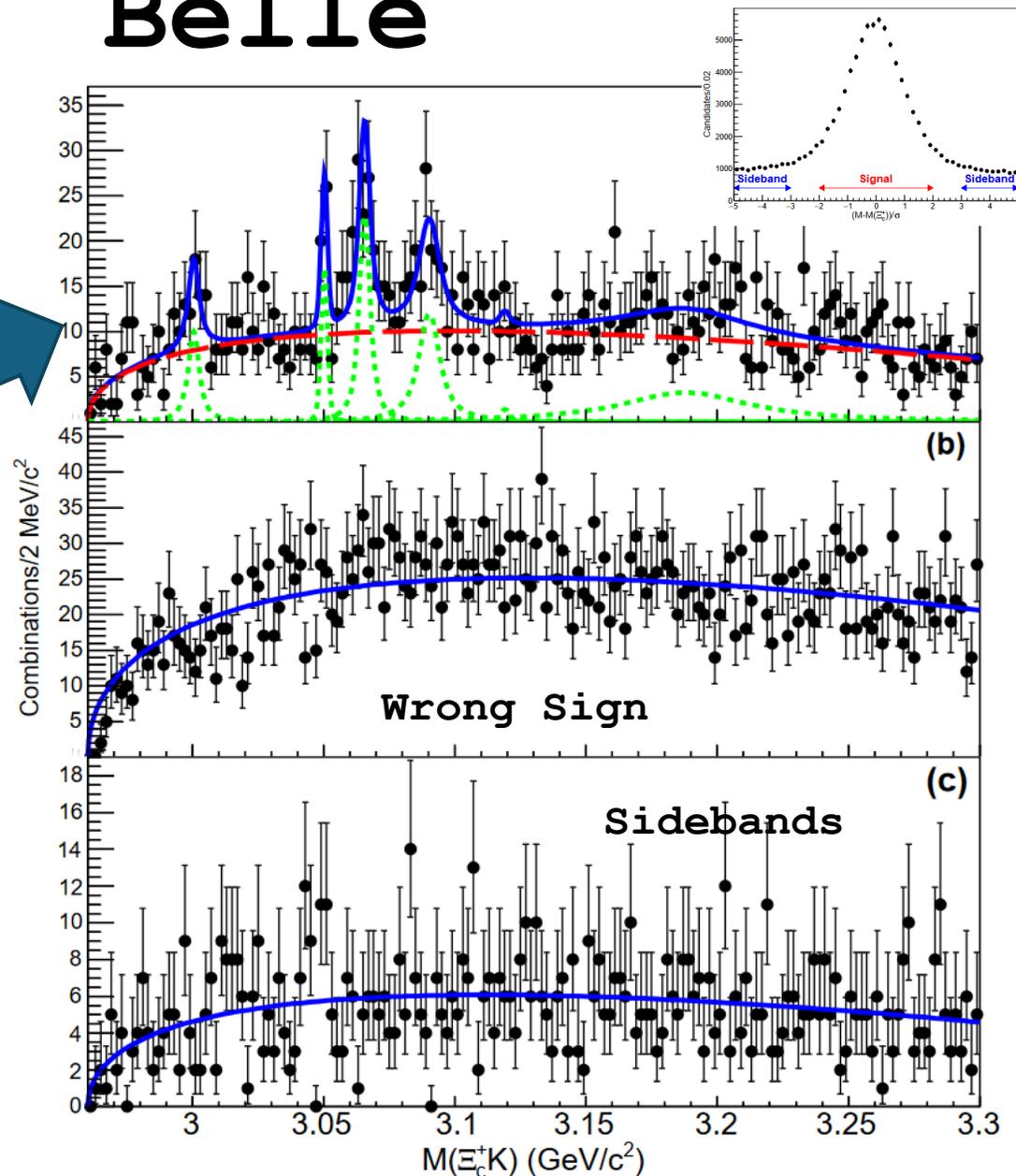
Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 131902

LHCb



- | | | |
|--|--|--------------------------|
| $\Omega_c(3065)^0 \rightarrow \Xi_c^+(\rightarrow \Xi_c^+ \gamma) K^-$ | $\Omega_c(3000)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | Data |
| $\Omega_c(3090)^0 \rightarrow \Xi_c^+(\rightarrow \Xi_c^+ \gamma) K^-$ | $\Omega_c(3050)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | Combinatorial background |
| $\Omega_c(3119)^0 \rightarrow \Xi_c^+(\rightarrow \Xi_c^+ \gamma) K^-$ | $\Omega_c(3065)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | Total fit |
| $\Omega_c(3185)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | $\Omega_c(3090)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | |
| $\Omega_c(3327)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | $\Omega_c(3119)^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ | |

Belle



980 fb^{-1} , Phys. Rev. D 97, 051102 (2018)

Заключение

- Существование пентакварков со скрытым очарованием надежно установлено (LHCb)
 - Четыре узкие структуры
 - Несколько указаний на уровне 3 стандартных отклонения
- Рождение адронных молекул в pp-взаимодействиях при 13 ТэВ не зафиксировано.
- Фоторождение J/ψ на протоне (GlueX) хорошо описывается моделями без привлечения пентакварковых состояний
 - «Провал» в сечении в районе 9 ГэВ лежит ниже диапазона, в котором возможен вклад пентакварков, обнаруженных LHCb
- Поиск пентакварков в распадах боттомония (Belle) результатов не дал.
 - Возможно существенное увеличение статистики (Belle-II)