

Пентакварки со скрытым очарованием – экспериментальный статус

Алексей Дзюба \ ЛМФКС ОФВЭ ПИЯФ НИЦ КИ

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 *

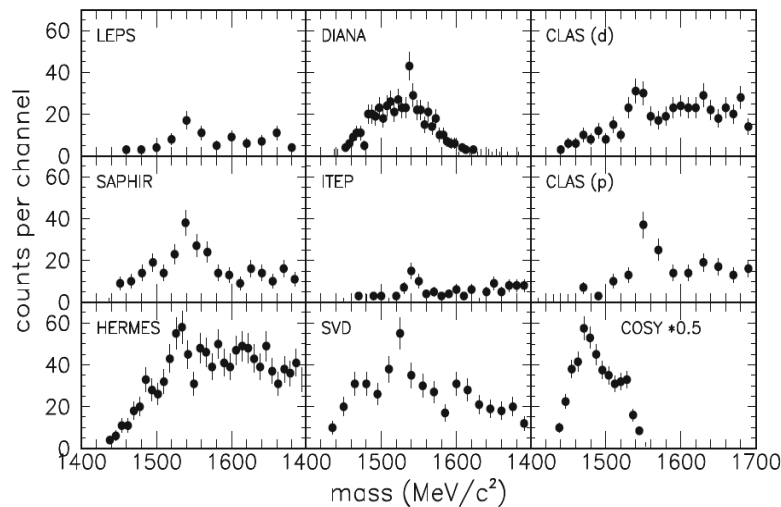
M. GELL-MANN

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

J. Pochodzalla, *Pentaquarks – Facts and Mysteries or Sisyphus at Work (2004)*,
arxiv.org/abs/hep-ex/0406077



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

EPJH 37 (2012) 1

- «Токсичная» тема...

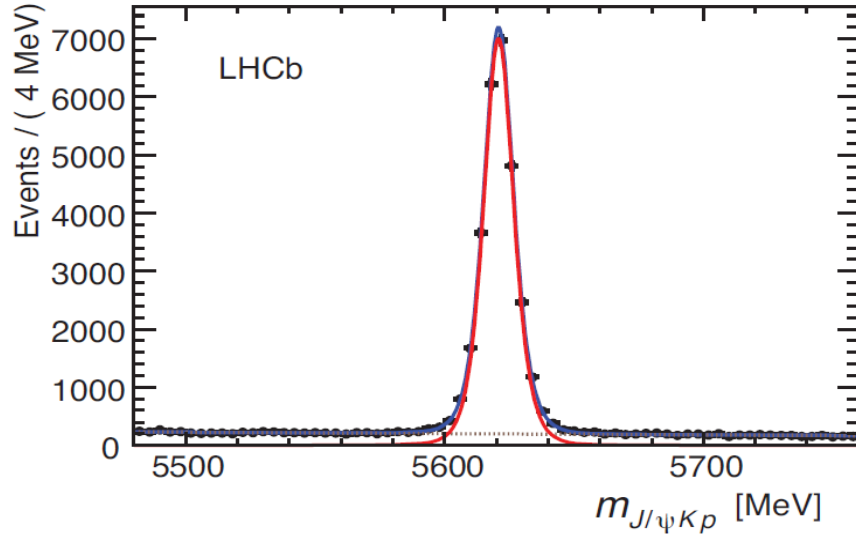


Цель и основные тезисы доклада

Цель: Рассказать, что мы знаем, и что мы не знаем о пентакварках со скрытым очарованием (с экспериментальной точки зрения)

- Экзотика проявляется в распаде: $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ Phys. Rev. Lett. 117
(2016) 082002
- Две пикующиеся структуры в $m_{J/\psi p}$: PAPER-2019-014
arXiv:1904.03947
 - Узкая – $P_c(4312)^+$
 - Широкая, которая расщепляется на $P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$
- Модельнозависимый амплитудный анализ Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001
 - 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 $P_c(4450)^+$.

Открытие пентакварков со скрытым чармом



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

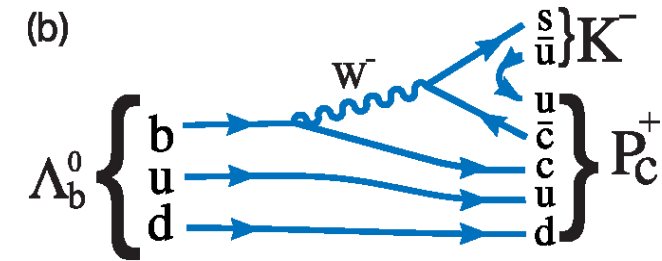
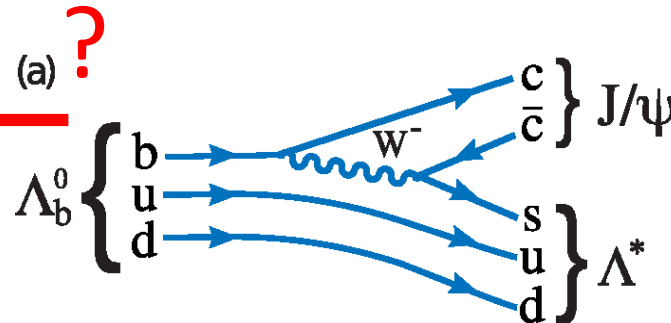
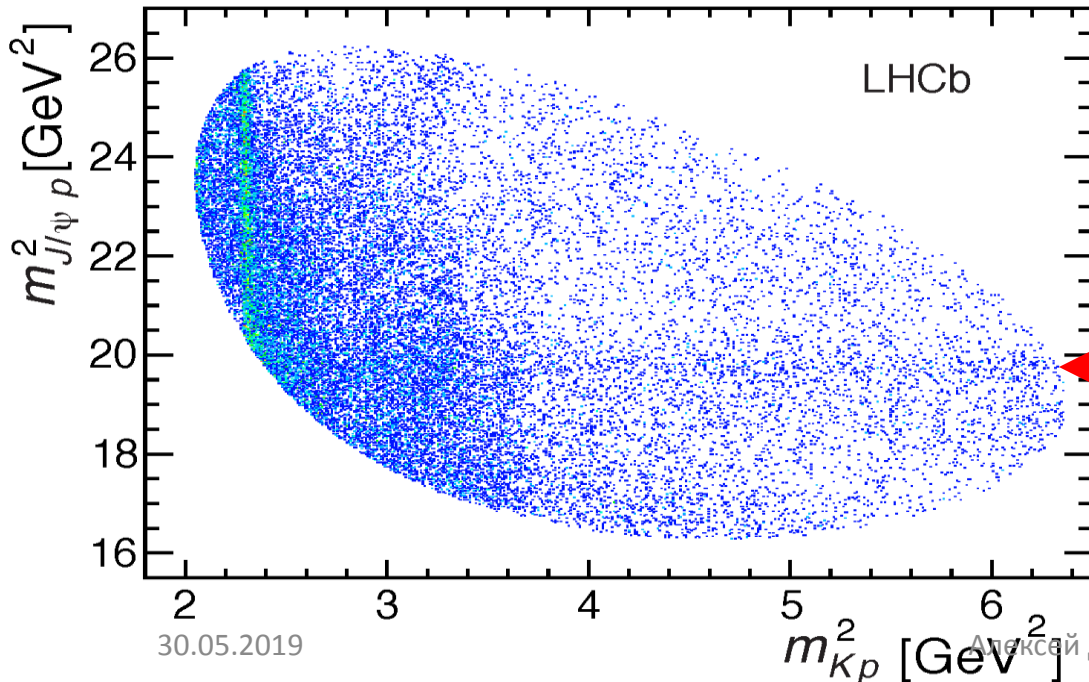
Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

26000 сигнальных событий

Phys. Rev. Lett. 117
(2016) 082002

Пик в распределении $m_{J/\psi p}$

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



Модельнонезависимый подход

Разложение по многочленам Лежандра

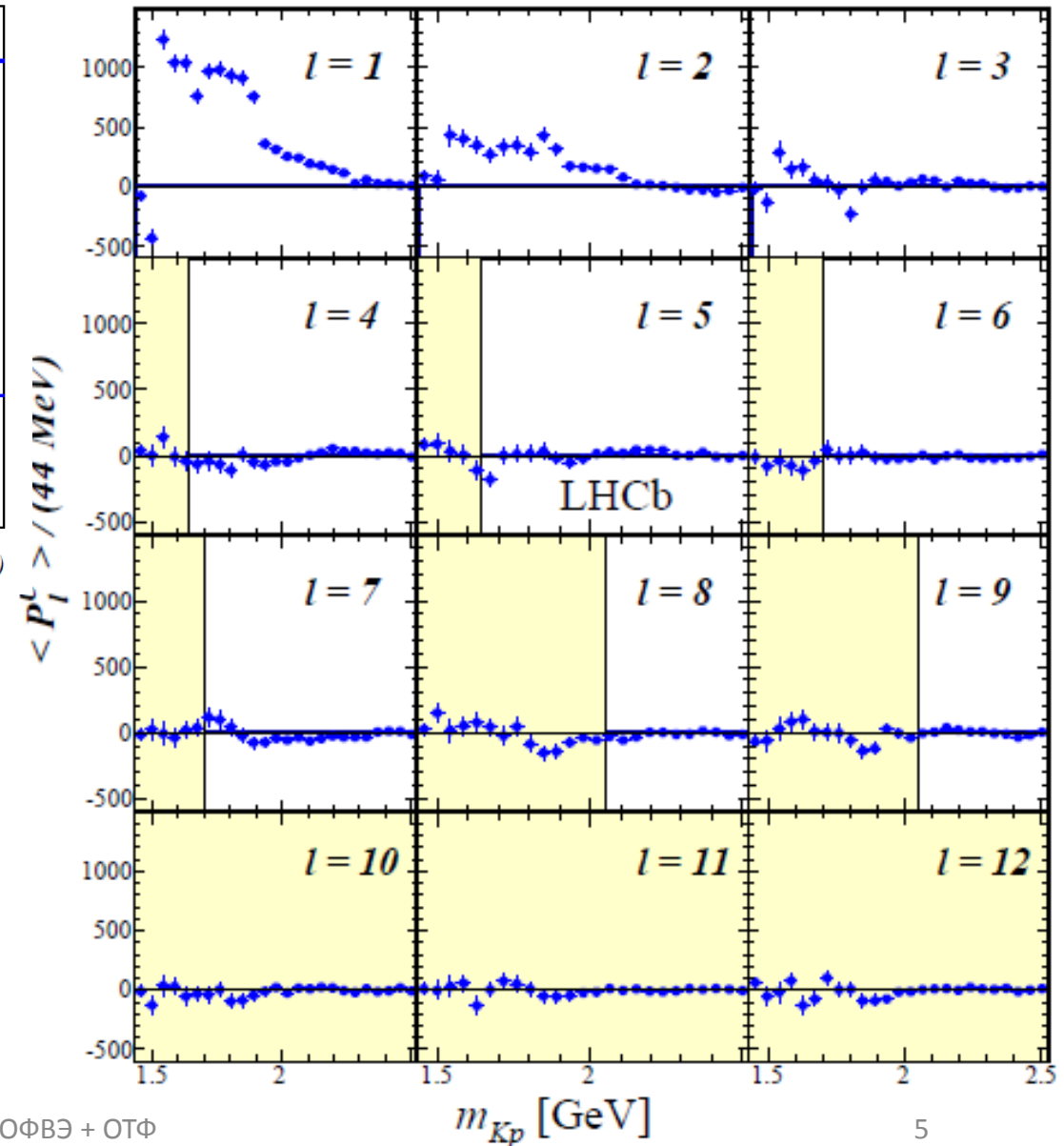
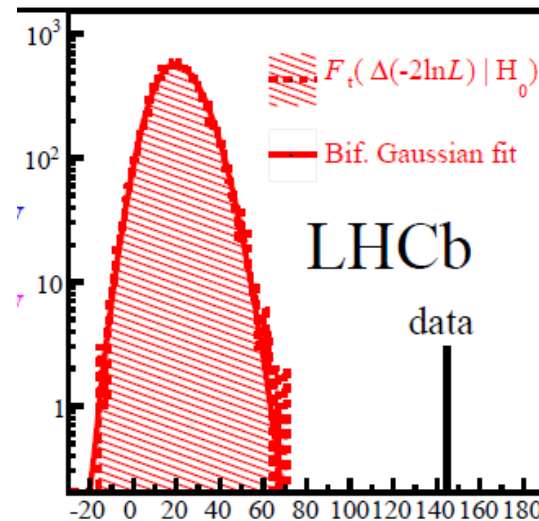
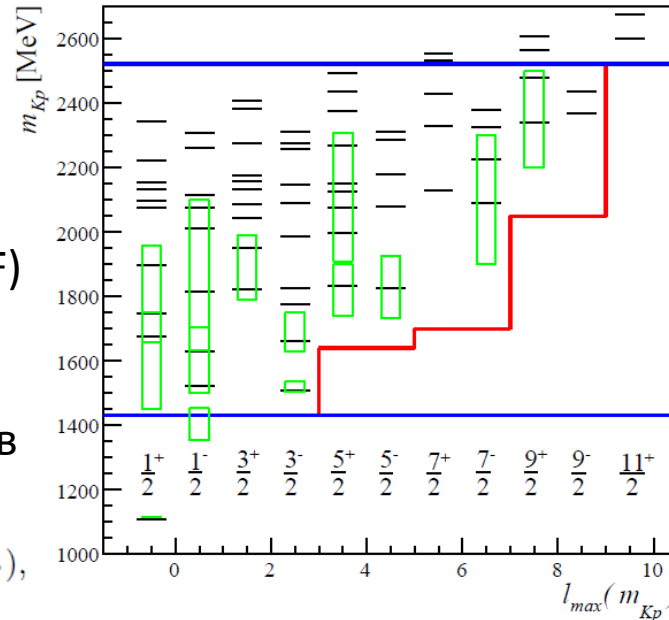
Модель (плотность распределения вероятности, PDF) определяется непосредственно из данных, но только из тех, где ожидается вклад от Λ резонансов

$$\mathcal{F}(\cos\theta_{\Lambda^*} | H_0, m_{Kp}^k) = \sum_{l=0}^{l_{\max}(m_{Kp}^k)} \langle P_l^N \rangle^k P_l(\cos\theta_{\Lambda^*}),$$

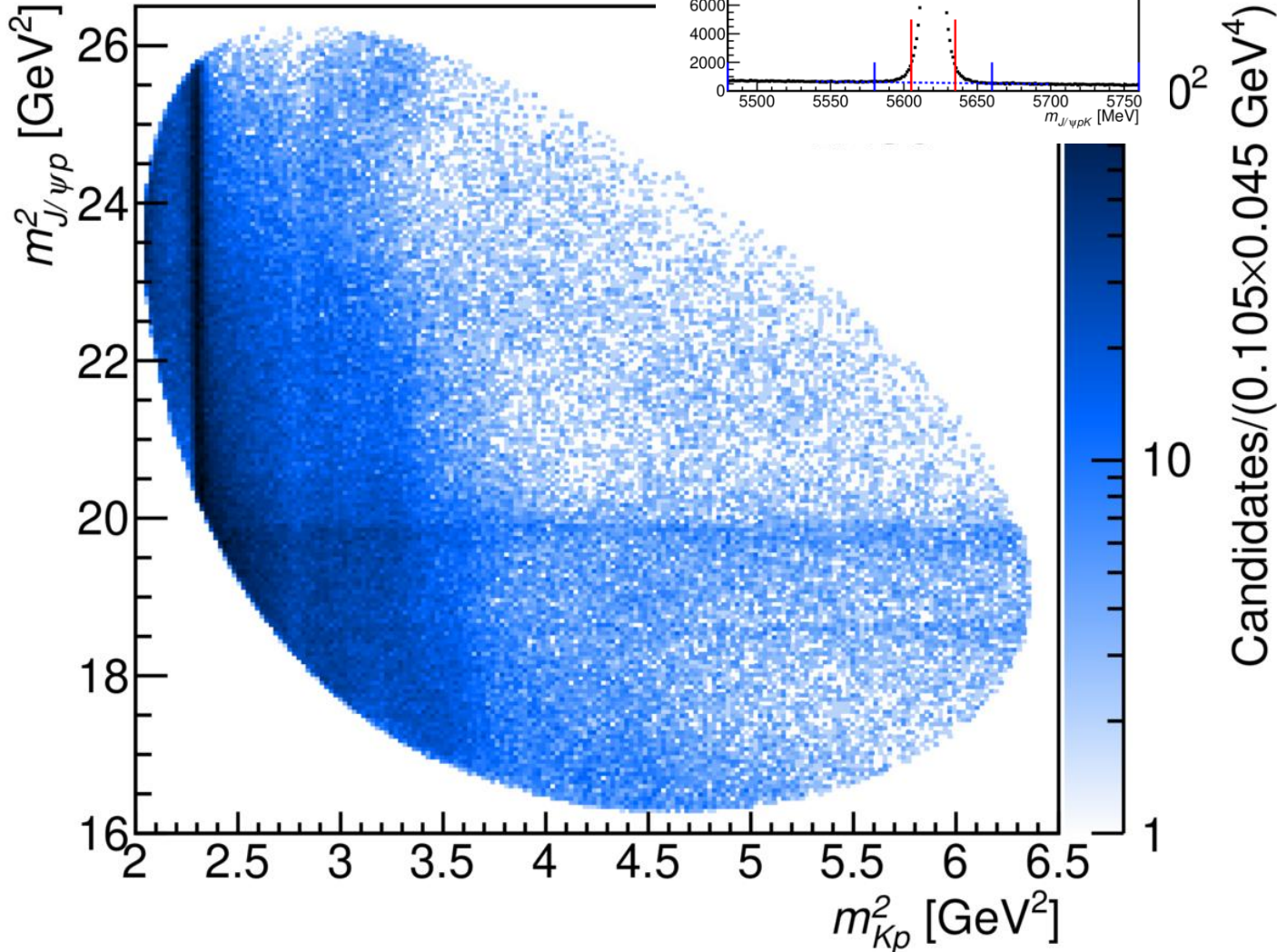
Псевдоэксперименты на базе построенной модели.

Распределения функции правдоподобия несовместно с данными

Требуется вклад экзотики!



Данные Run-2

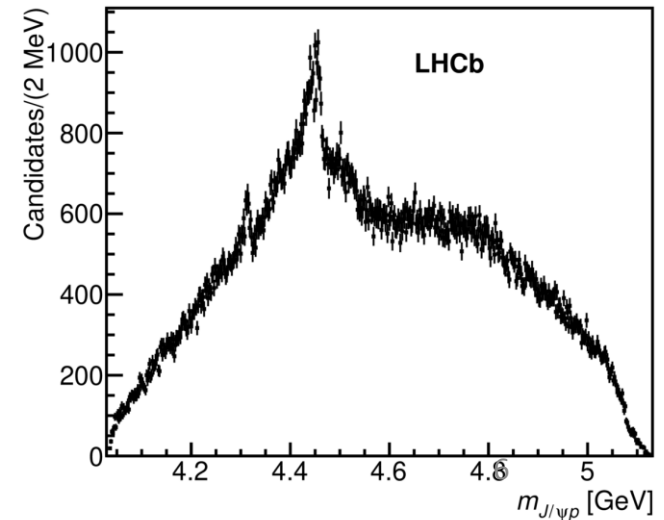


Статистика в Run-2 увеличена в 9 раз (относительно Run-1):

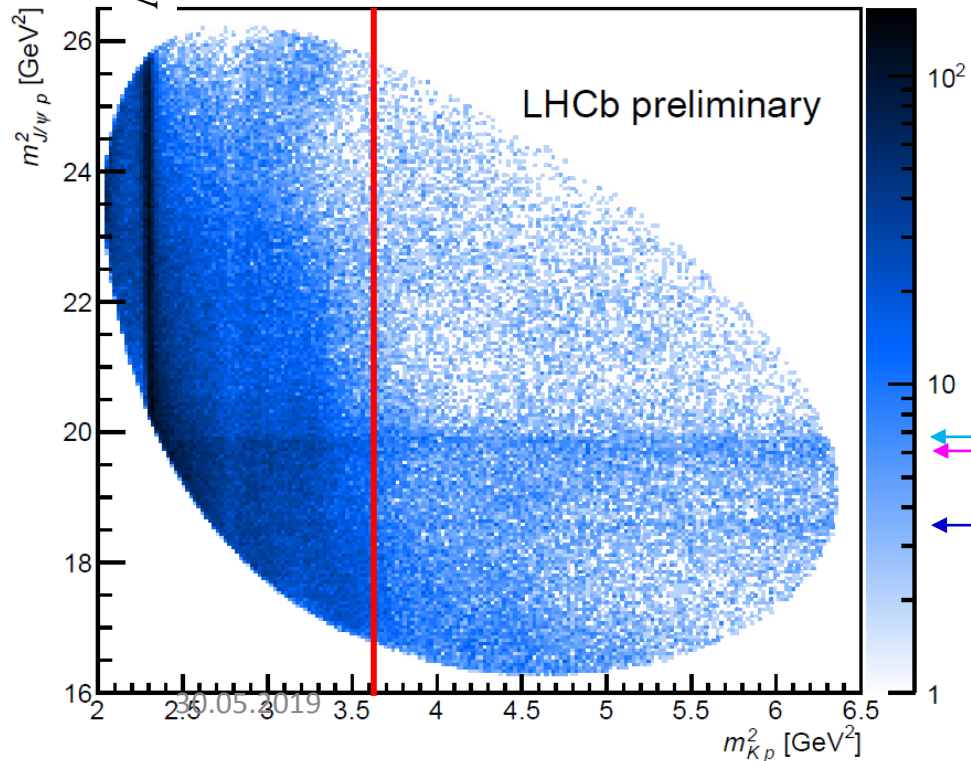
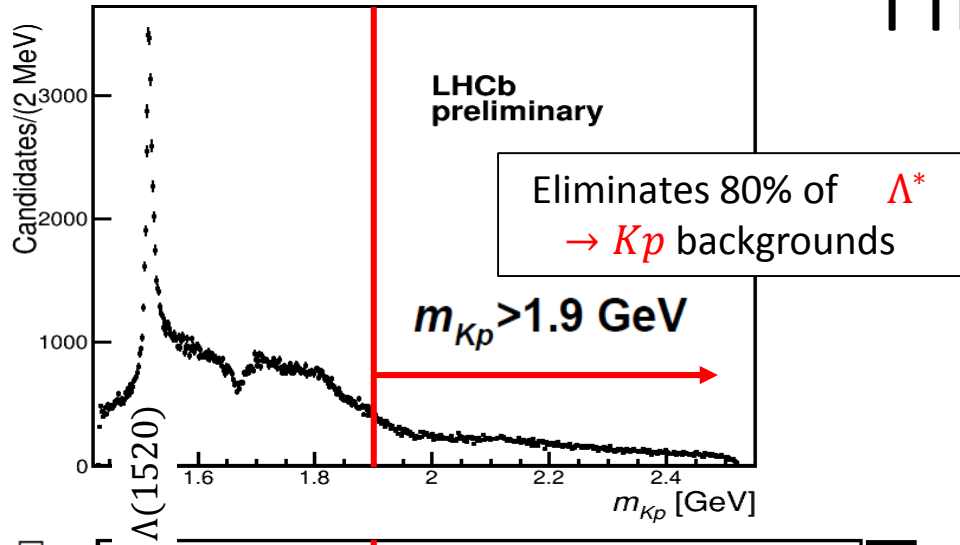
Улучшение отбора данных (x2),
интегральная светимость (x3) и
увеличившееся сечение (x1.5)

246к Λ_b сигнал \ 6.4% фон

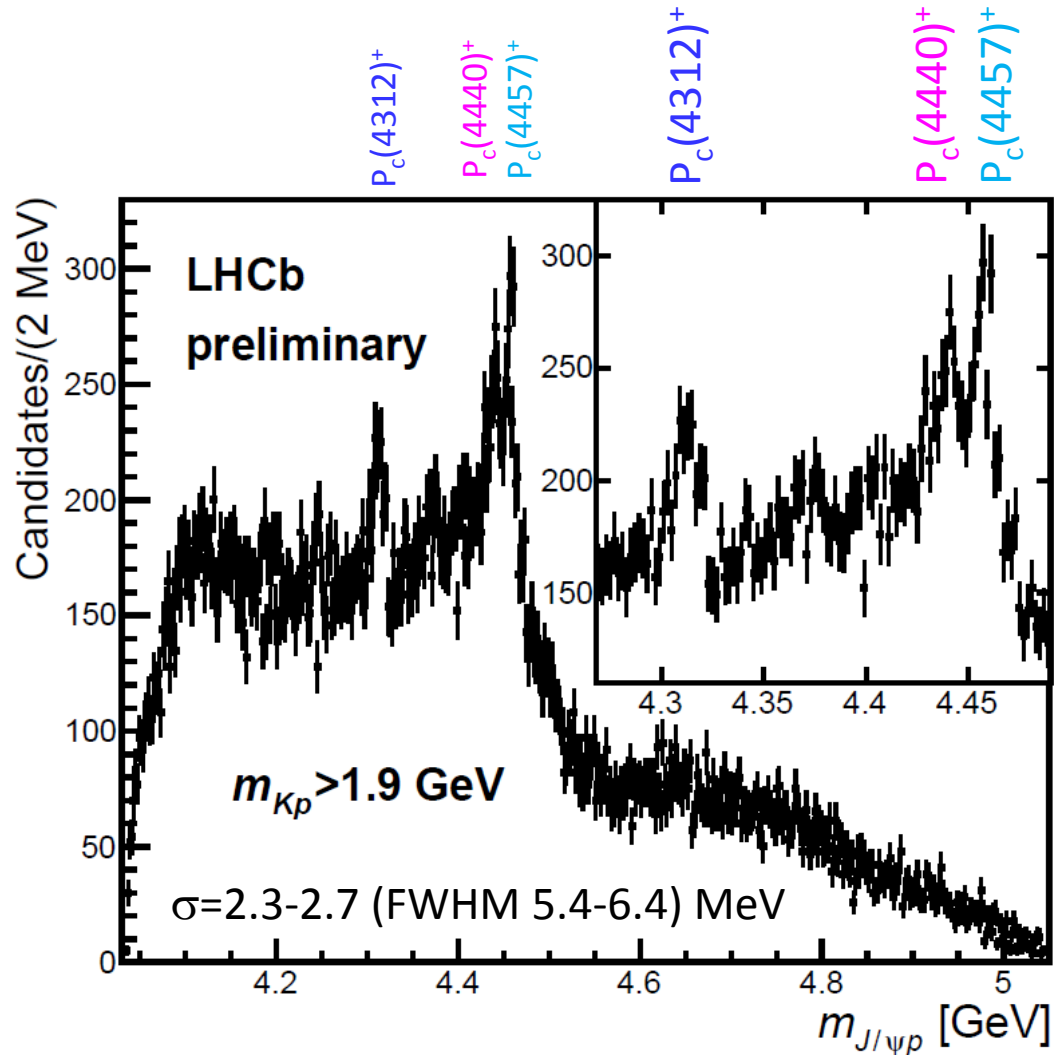
Разрешение по массе $J/\psi p$ 2.3-
2.7 MeV (RMS) для диапазона 4.3-
4.6 GeV



Пикующие структуры



$P_c(4457)^+$
 $P_c(4440)^+$
 $P_c(4312)^+$

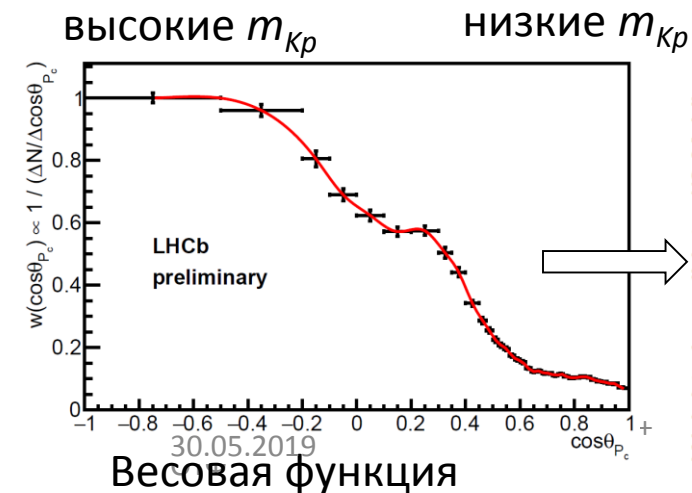


Три резонанса (Брейт-Вигнер) +

Если структуры достаточно узкие, то не нужен полный амплитудный анализ, чтобы доказать что $J/\psi p$ пики не являются отражением от Λ^*

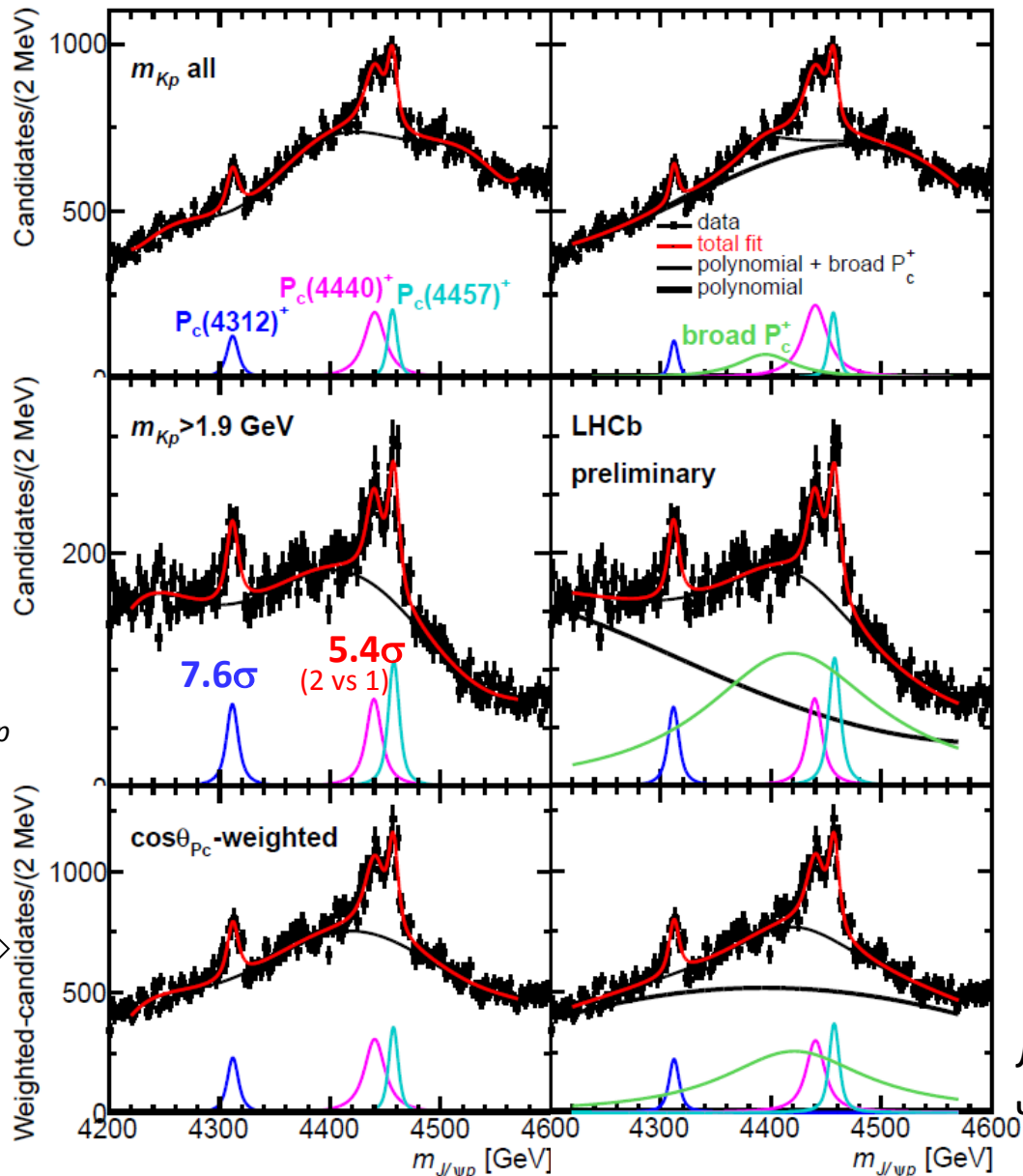
Одномерная аппроксимация $m_{J/\psi p}$ для определения характеристик узких пиков.

Такой анализ не обладает чувствительностью к широким $J/\psi p$ резонансам (таким как $P_c(4380)^+$).



Полиномиальная подложка

Полином + широкий P_c^+ как фон.



Изменение степени полинома для оценки систематики

Отдельная аппроксимация для $P_c(4312)^+$.

Также распределение по $m_{J/\psi p}$ было построено для альтернативного отбора события без использования мультивариантных методов. Такое же количество Λ_b , но большая фоновая компонента.

Разный состав по Λ^* .
Тестирование систематических неопределенностей.

Статистическая значимость расщепления составляет 5.4 σ

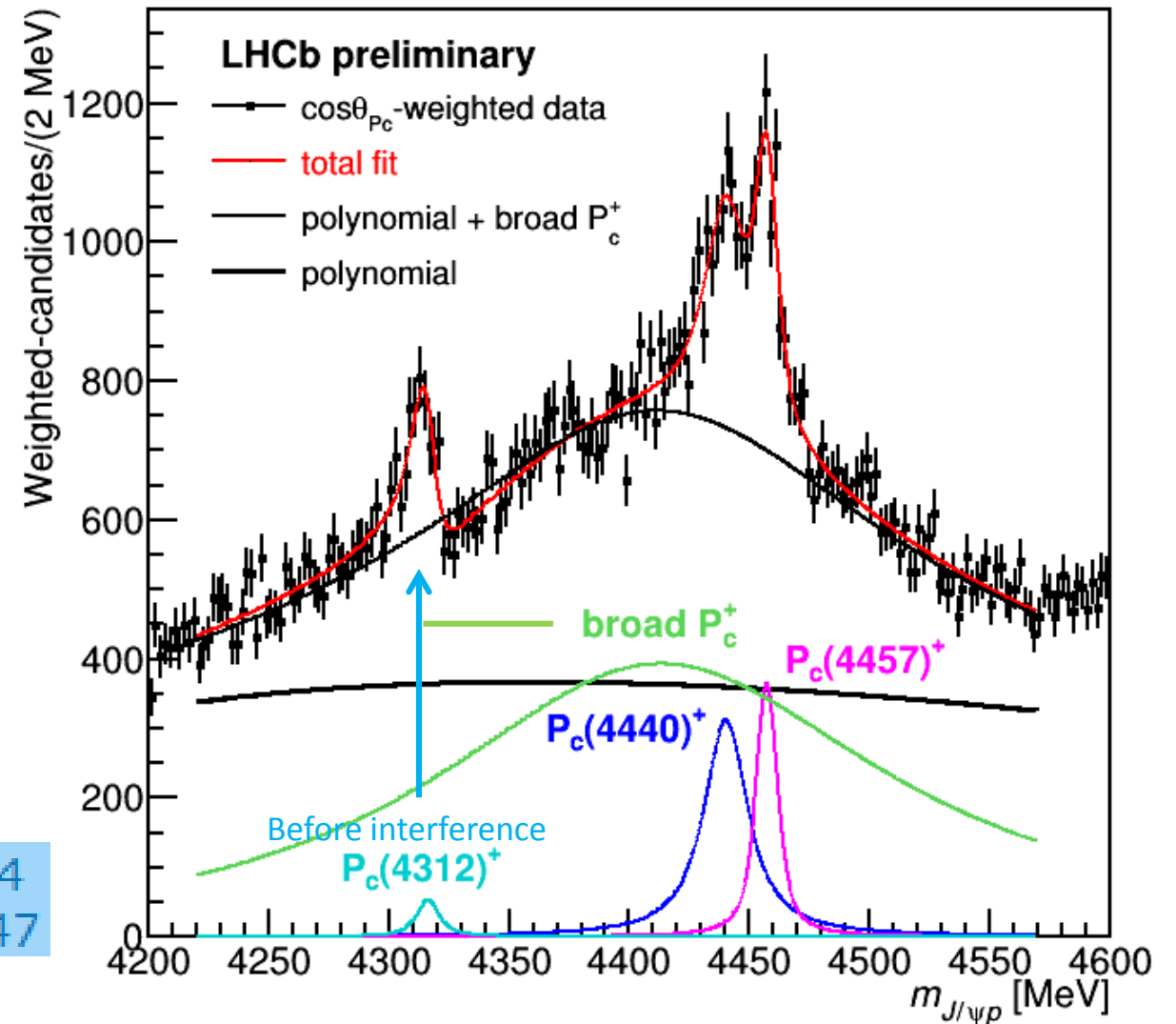
Лучшая стат. чувствительность

Учет интерференции

- Номинальный фит – некогерентная сумма распределений Брейта-Вигнера
- Учет интерференции с **возможной резонансной P_c^+ подложкой** (в предположении, что спин-четность такая же).
- Указаний на значительные интерференционные эффекты нет, но возможность такой интерференции является главным источником систематической погрешности

PAPER-2019-014
arXiv:1904.03947

Пример фита с учетом интерференции между $P_c(4312)^+$ и **широким фоновым P_c^+**



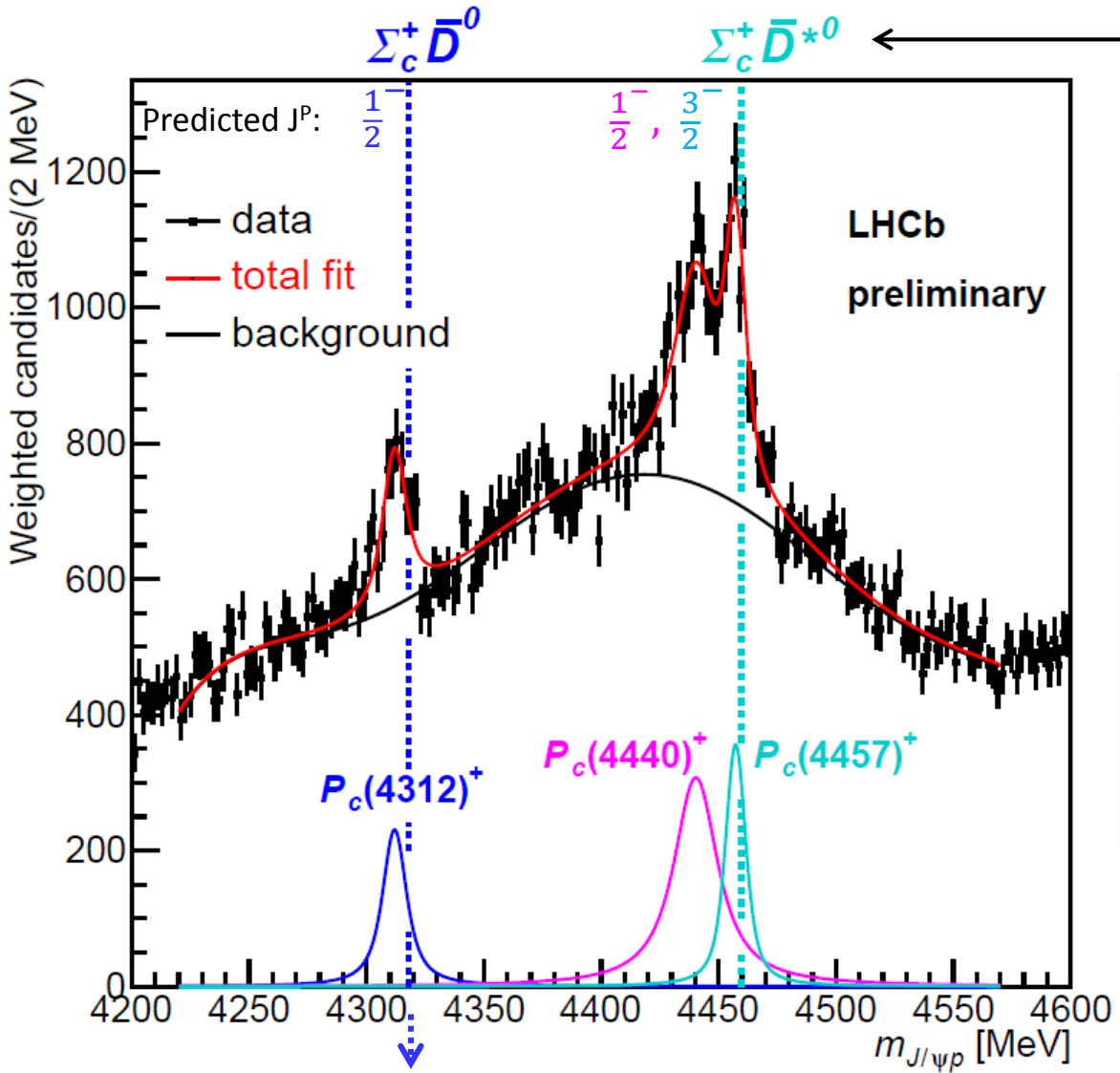
Результаты одномерного фитирования

Для определения вклада от P_c^+ использовалась одномерная аппроксимация распределения $m_{J/\psi p}$, взвешенная по $1/\varepsilon$, где ε – шестимерная параметризация эффективности распада Λ_b^0 .

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-) \mathcal{B}(P_c^+ \rightarrow J/\psi p)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)}$$

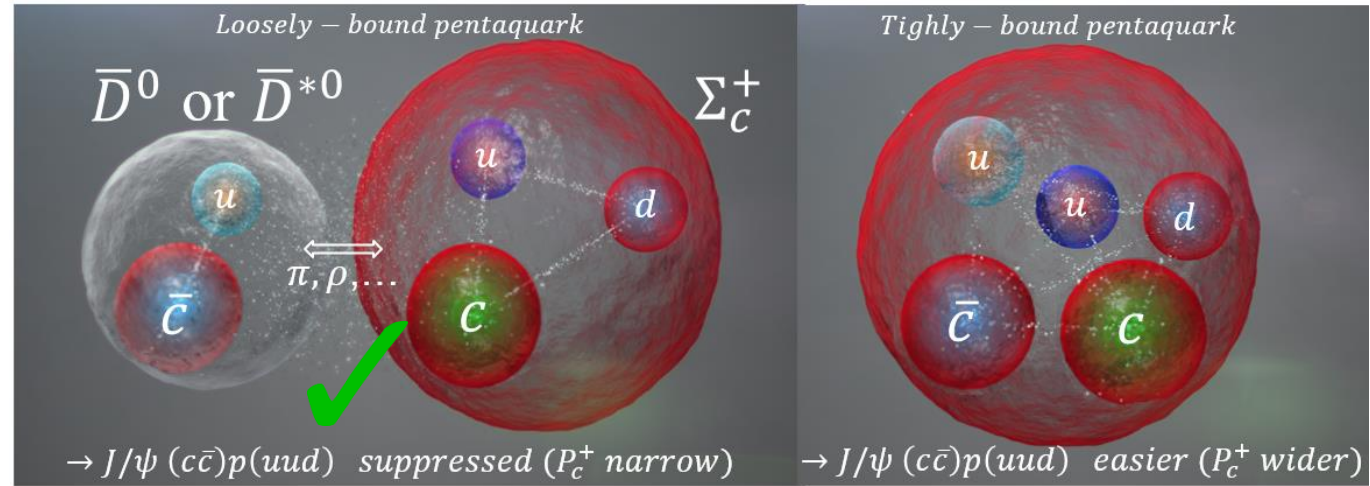
Полученные результаты не зависят от J^P

State	M [MeV]	Γ [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)	$0.53 \pm 0.16^{+0.15}_{-0.13}$



Пики и пороги открытия
«сопряженных» каналов распада

Две конкурирующие модели для объяснения пентакварков



Необходимо измерение спинов и четностей открытых состояний!

Амплитудный (модельнозависимый) анализ

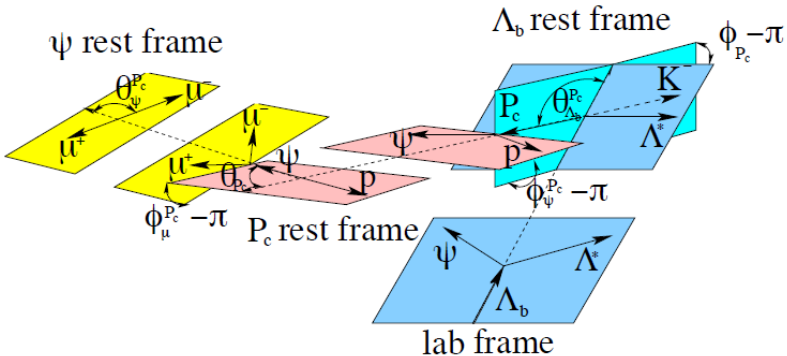
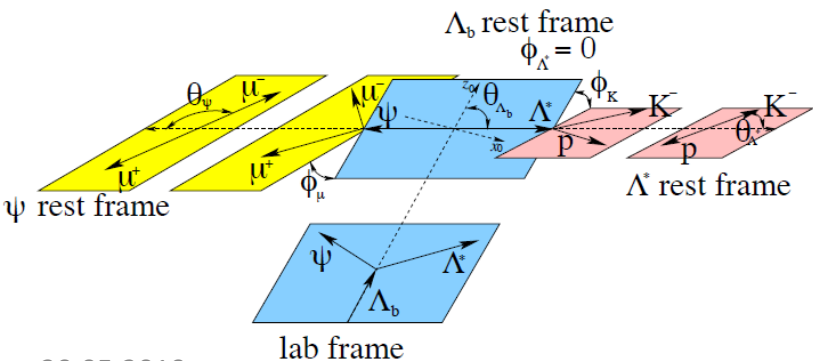
State	J^P	M_0 (MeV)	Γ_0 (MeV)	# Reduced	# Extended
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	$1405.1^{+1.3}_{-1.0}$	50.5 ± 2.0	3	4
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	1519.5 ± 1.0	15.6 ± 1.0	5	6
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	1600	150	3	4
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	1670	35	3	4
$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	1690	60	5	6
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	1800	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

– Flatte для $\Lambda(1405)$, релятивистский BW для остальных. (+форм-фактор Блатта-Вайскопфа)

– Две модели для Λ -канала

– Добавление дополнительных Λ^* (с плавающей массой и шириной)

– Включение в фит до четырех вкладов от нерезонансного канала распада с J^P до $3/2^\pm$



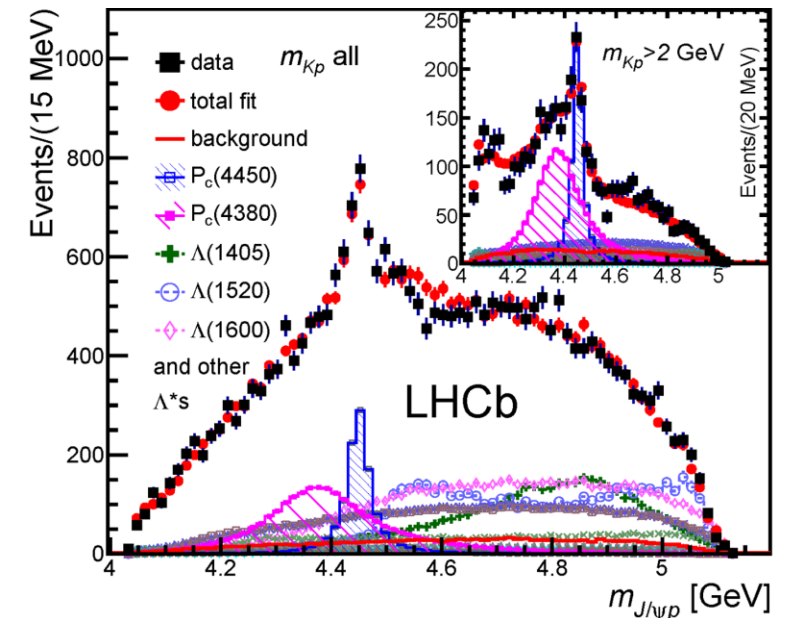
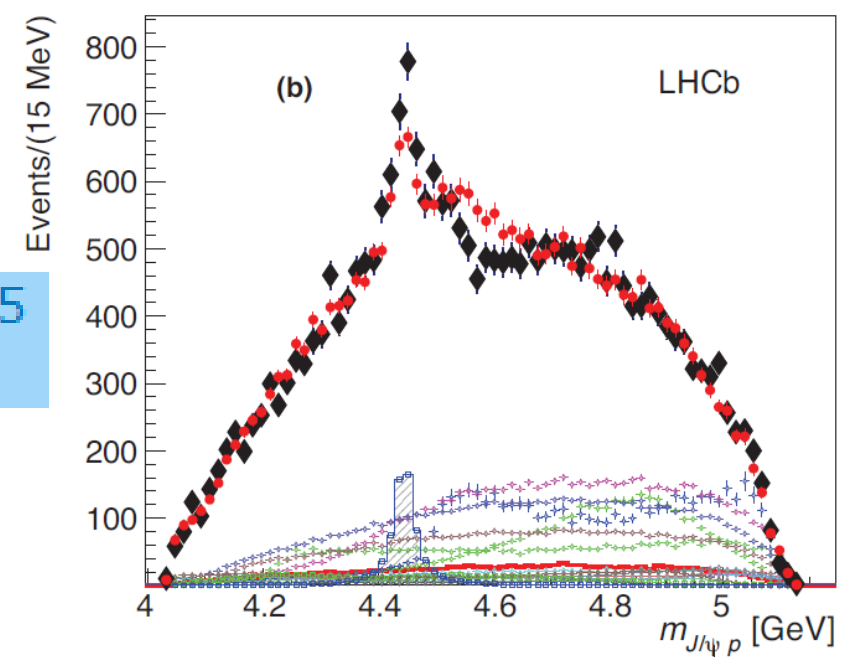
Выполнен только на данных Run-1

Амплитудный анализ

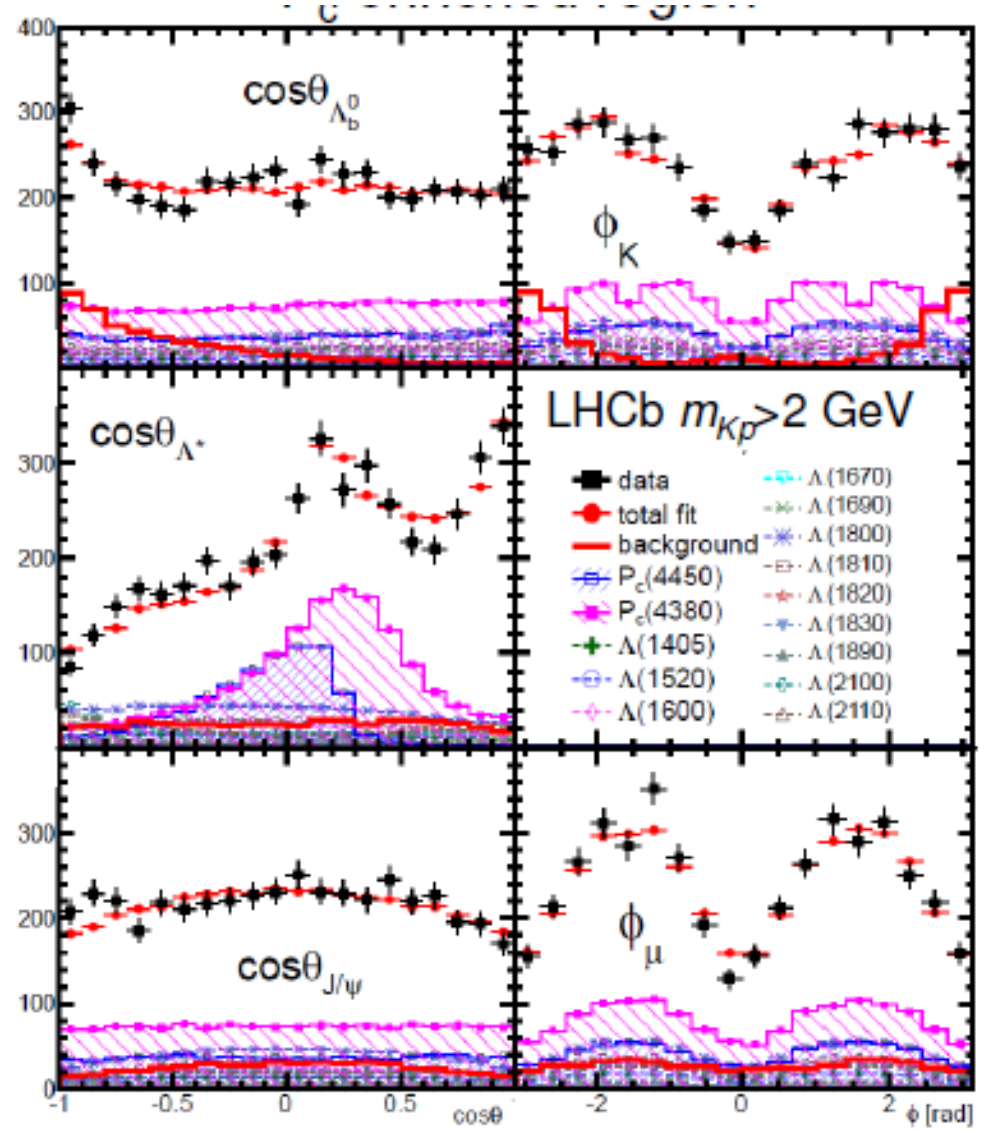
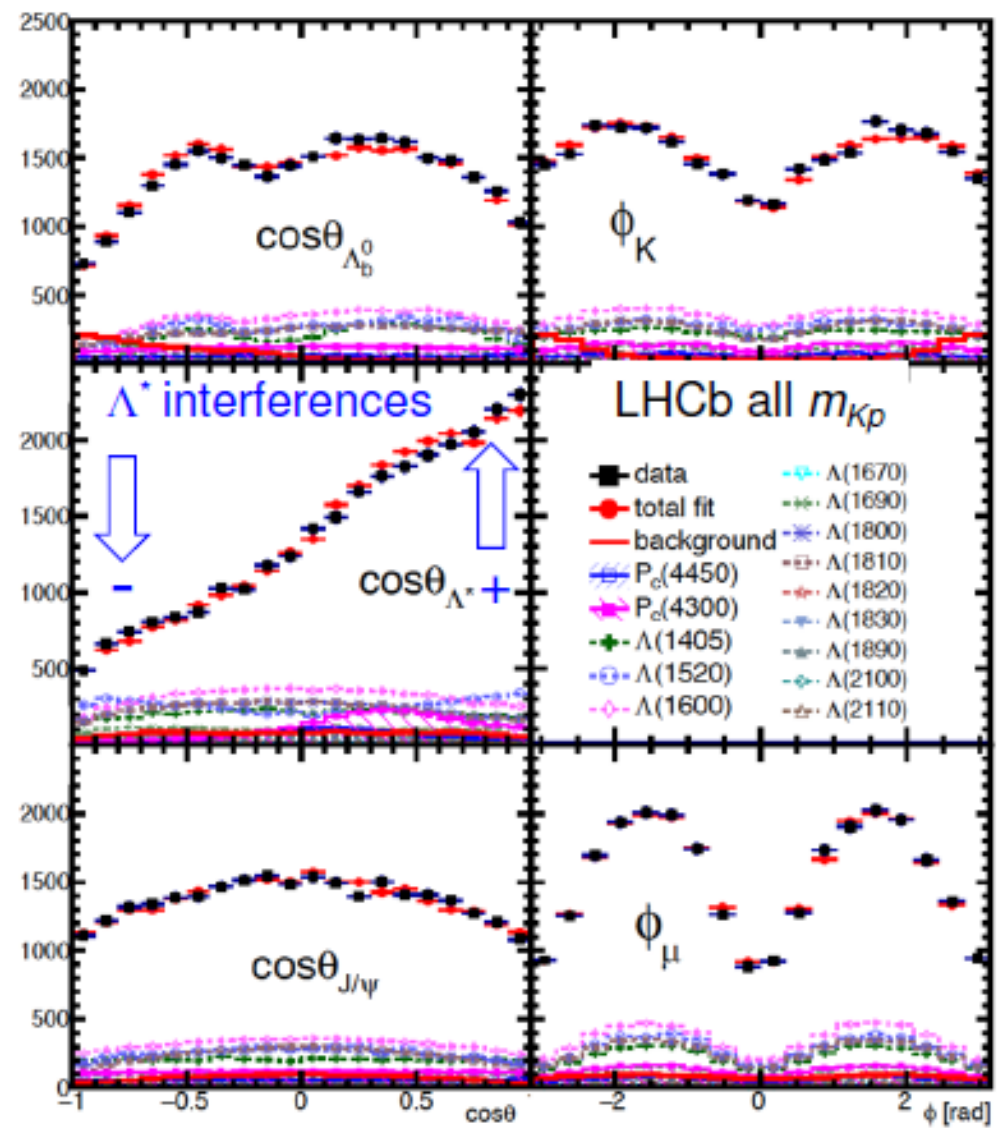
- Шестимерная амплитудная модель
- Два независимые процедуры аппроксимации
- Добавление одного пентакваркового резонанса (лучший фит $5/2^\pm$) не дает удовлетворительного описания
- Необходимо ввести в рассмотрение второй резонанс

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

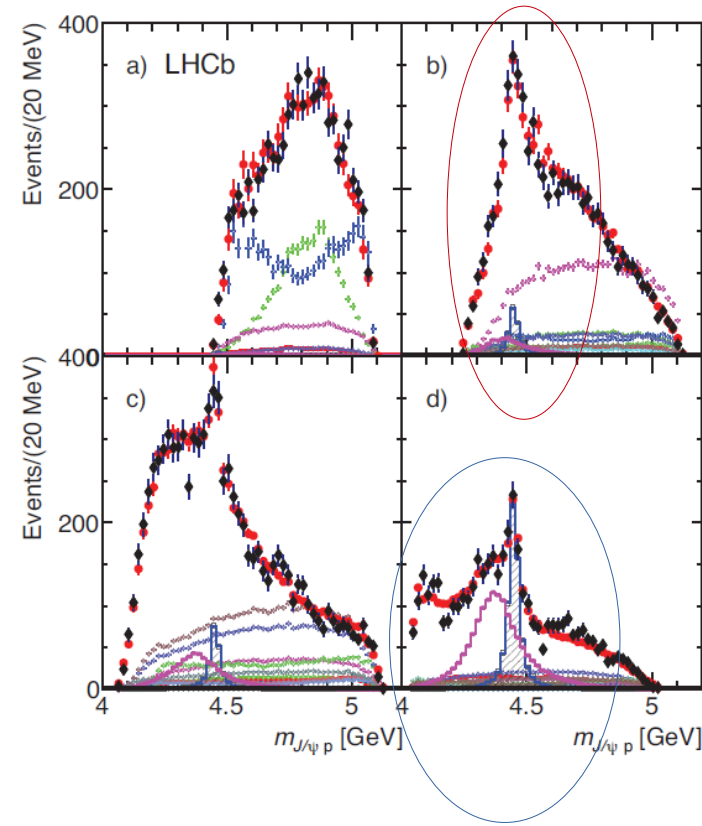
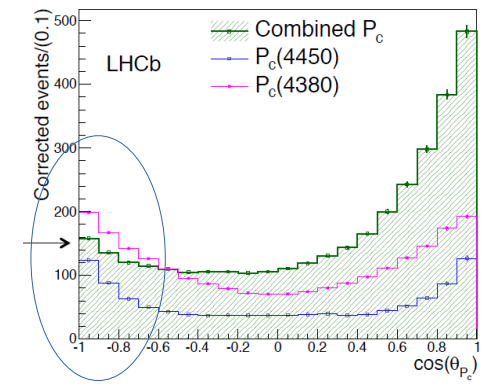
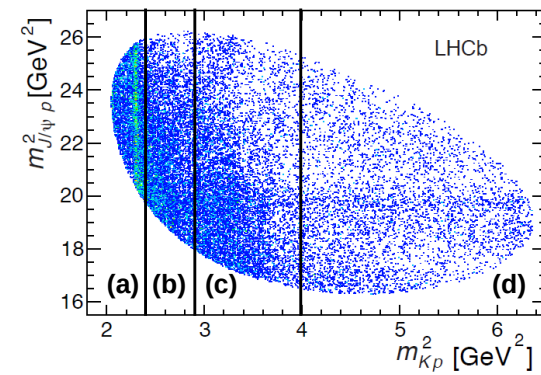


Амплитудный анализ



Амплитудный анализ

- Два состояния должны иметь противоположную четность, чтобы обеспечить **конструктивную интерференцию** в области малых масс $K\rho$ и **деструктивную** в области больших масс.
- Тестировались различные комбинации спин-четности для двух резонансных состояний.
- При определении статистической значимости сигналов учитывалась разница между референсной и расширенной моделями для Λ -канала.

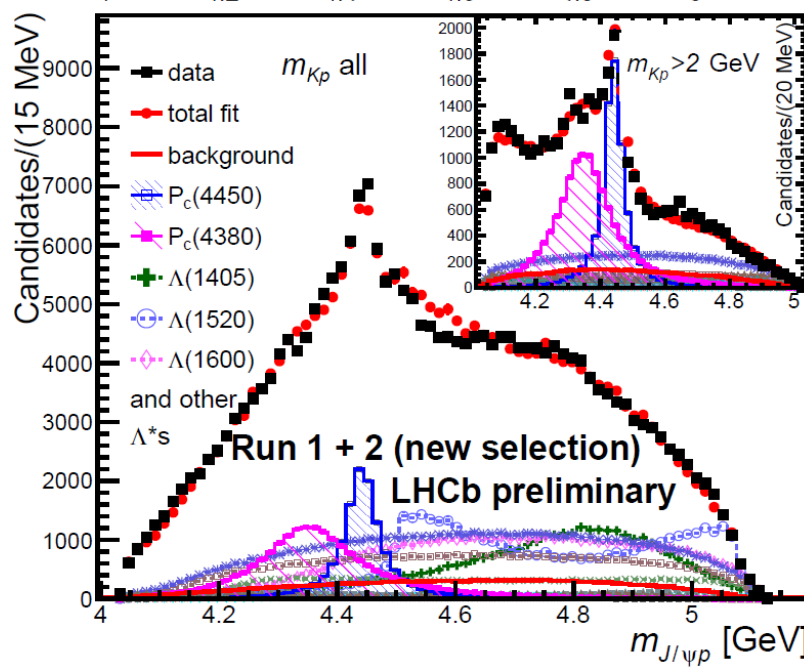
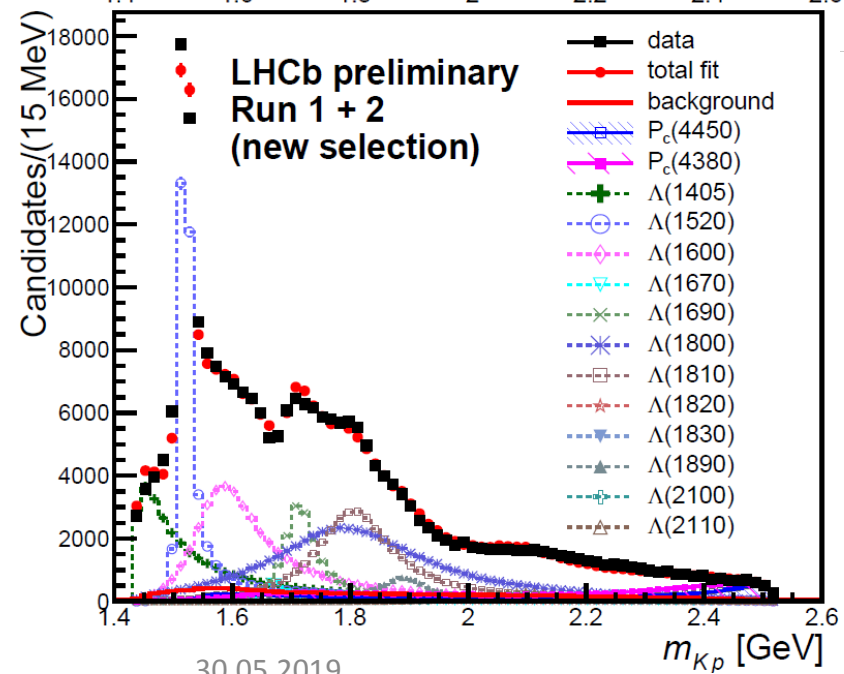
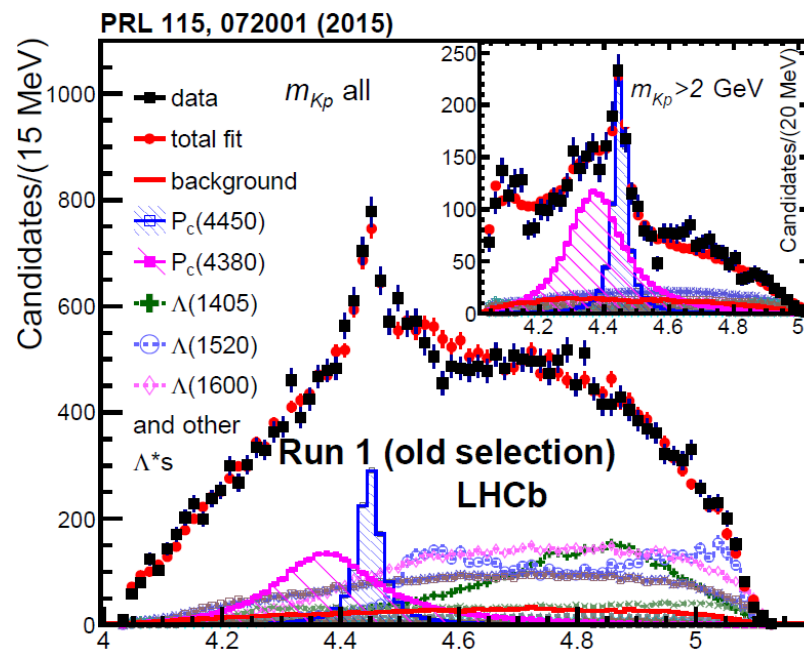
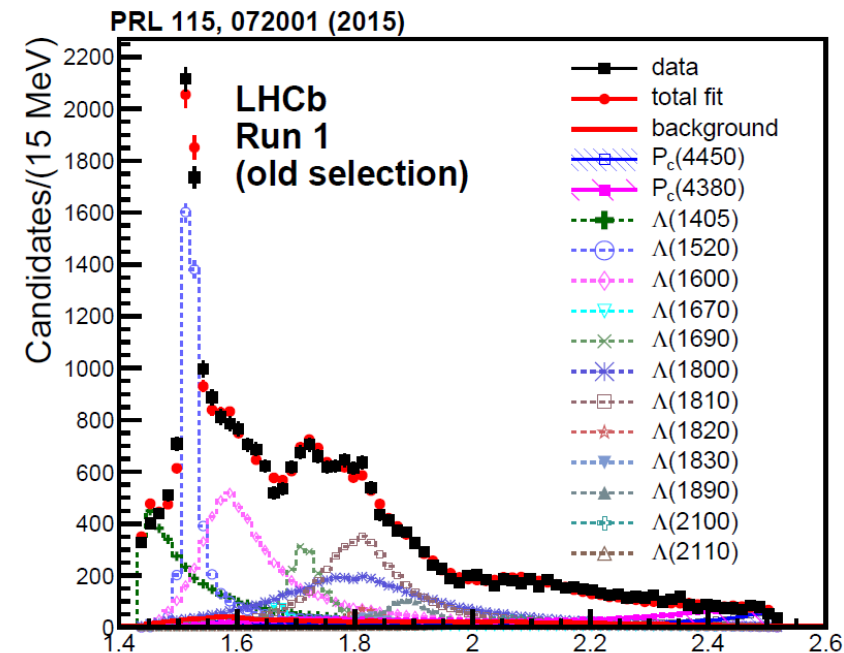


Fit	$\Delta(-2 \ln \mathcal{L})$
+	0
+	0.9 ²
+	2.3 ²
+	5.9 ²
-	5.9 ²
-	6.3 ²
-	6.3 ²
+	6.4 ²
-	6.8 ²
-	6.8 ²
+	7.2 ²
-	7.3 ²
+	7.4 ²
+	7.6 ²
-	7.7 ²
-	8.0 ²

Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

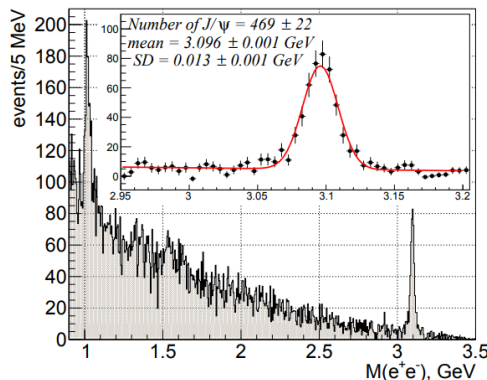
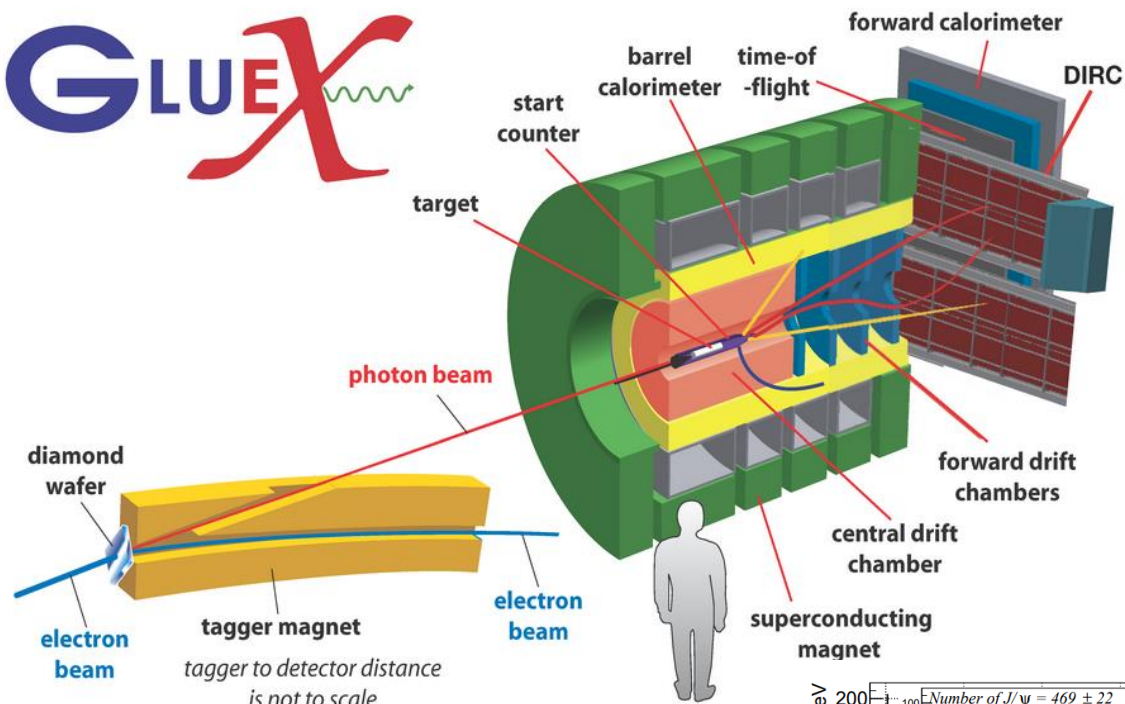
Амплитудный анализ и Run-2

Амплитудная модель, разработанная для данных Run-1 дает на данных Run-2 такие же параметры для $P_c(4450)^+$ и $P_c(4380)^+$ как на данных Run-1.



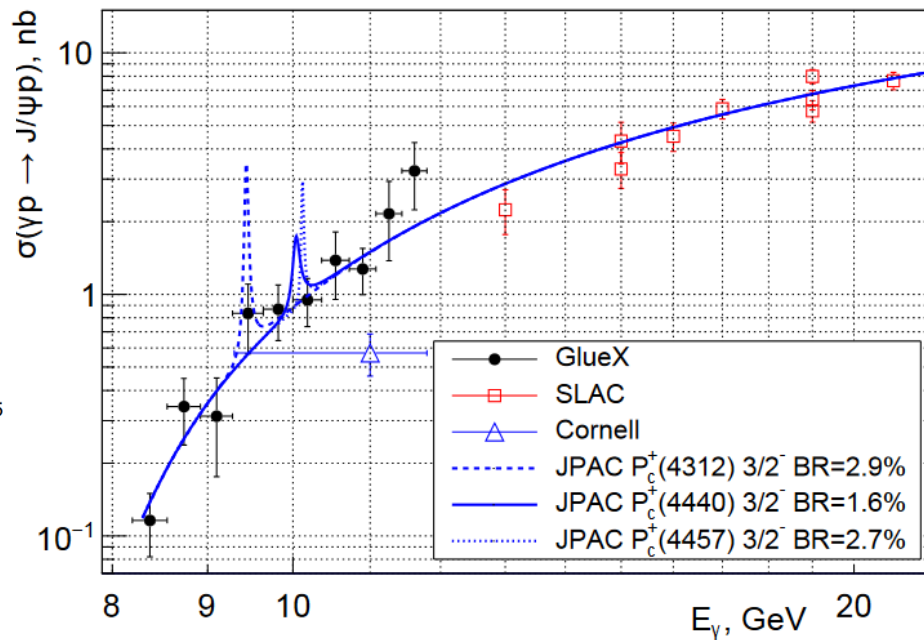
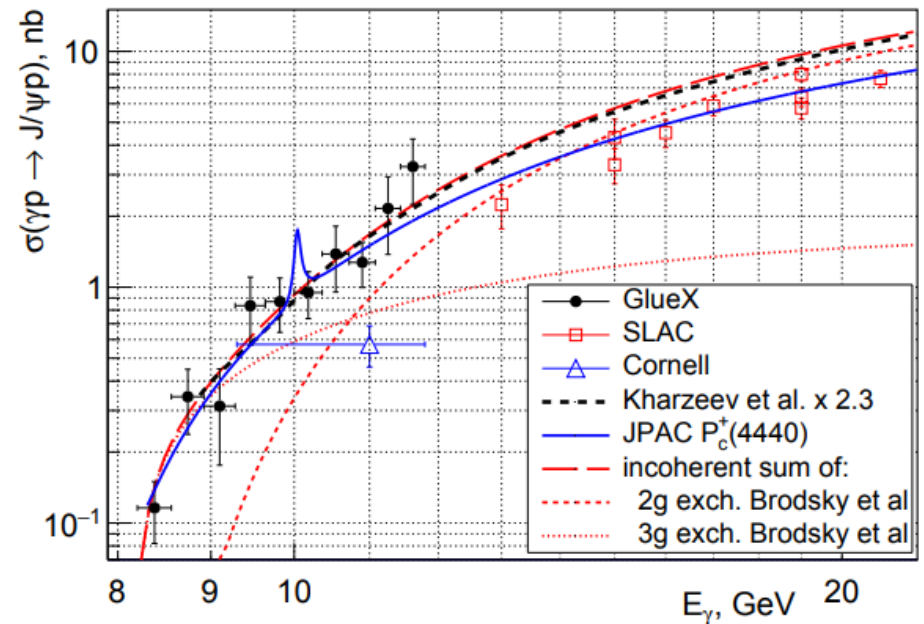
Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 072001

PAPER-2019-014
arXiv:1904.03947



- Фоторождение J/ψ в области возможных пентакварковых резонансов / Hall D в Jefferson Lab:
 $E_\gamma = 9.4\text{--}10.1 \text{ GeV}$ ([arxiv:1905.10811](https://arxiv.org/abs/1905.10811))

- Необходимо увеличение экспериментальной статистики, а также понимание природы континуума



Выводы

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

Phys. Rev. Lett. 117
(2016) 082002

- Две пикующиеся структуры в $M(J/\psi p)$:

PAPER-2019-014
arXiv:1904.03947

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

- Модельнозависимый амплитудный анализ

Phys. Rev. Lett. 115
(2015) 072001

- 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 $P_c(4450)^+$.