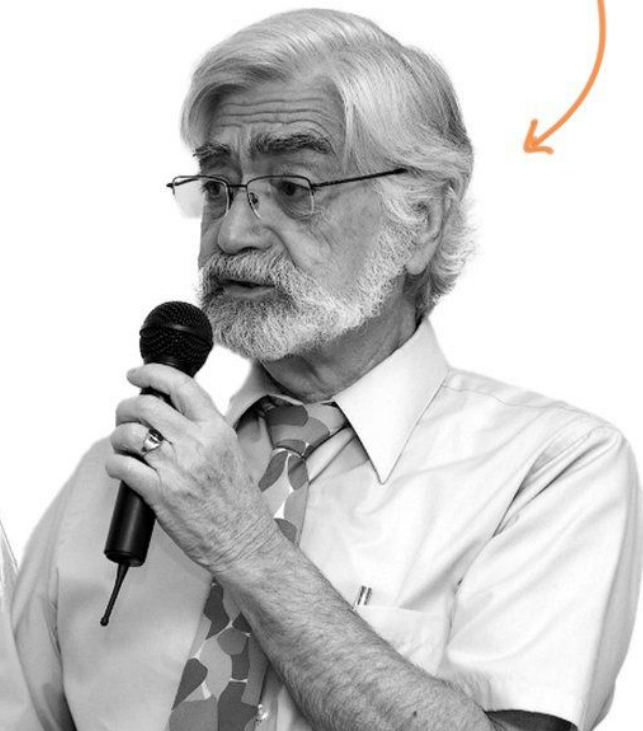


**Открытие
пентакваркового состояния
в распадах B - мезонов**

MURRAY GELL-MANN

GEORGE ZWEIG



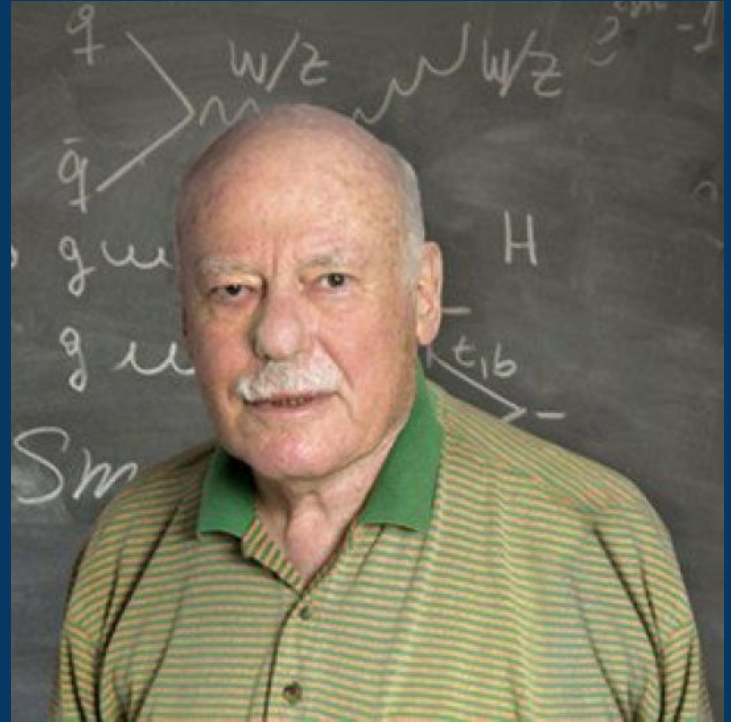
Перспектива
существования

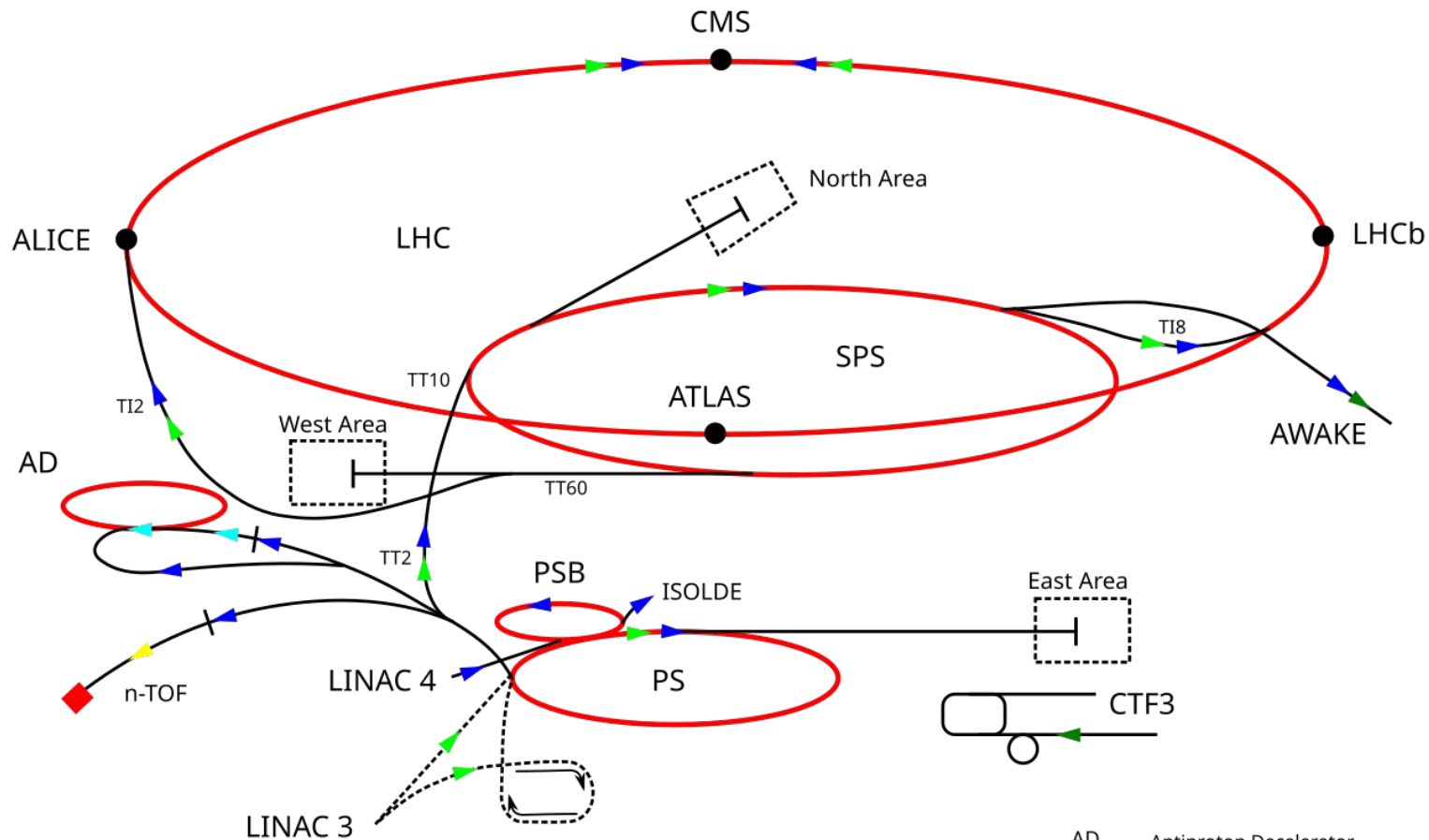
1964 год



Robert Jaffe

Harry Lipkin

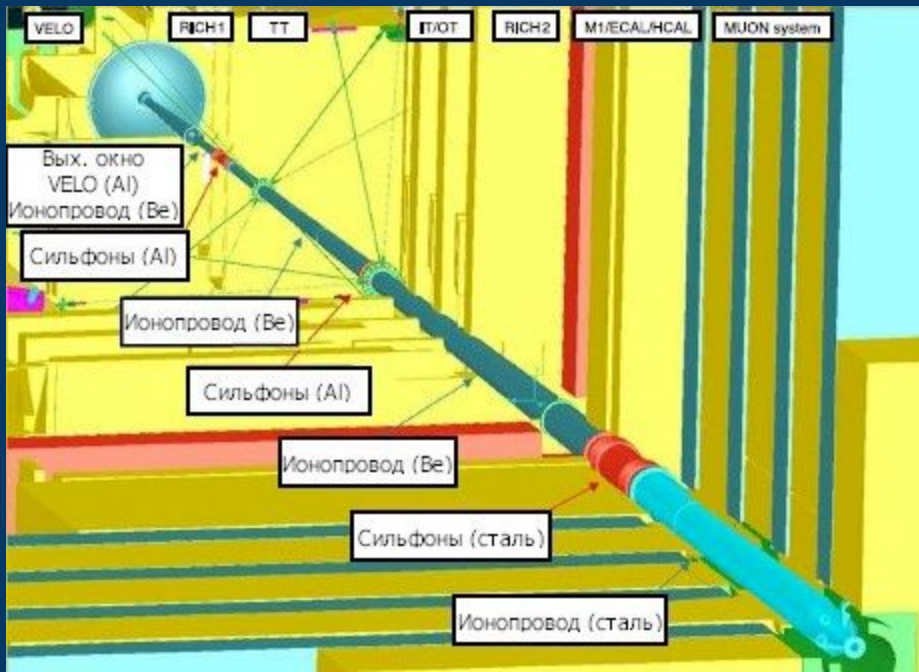




- ▶ protons
- ▶ ions
- ▶ neutrons
- ▶ antiprotons
- ▶ electrons
- ▶ neutrinos

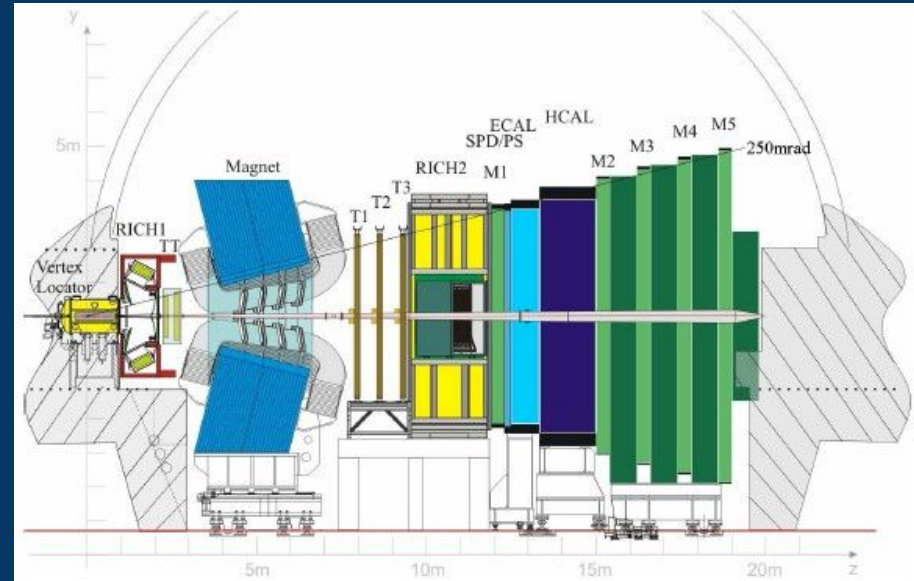
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider

- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- AWAKE Advanced Wakefield Experiment
- CTF3 CLIC Test Facility 3

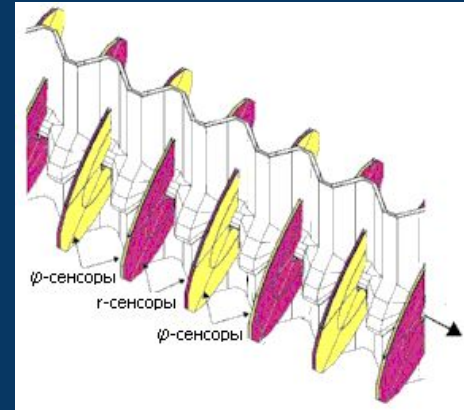
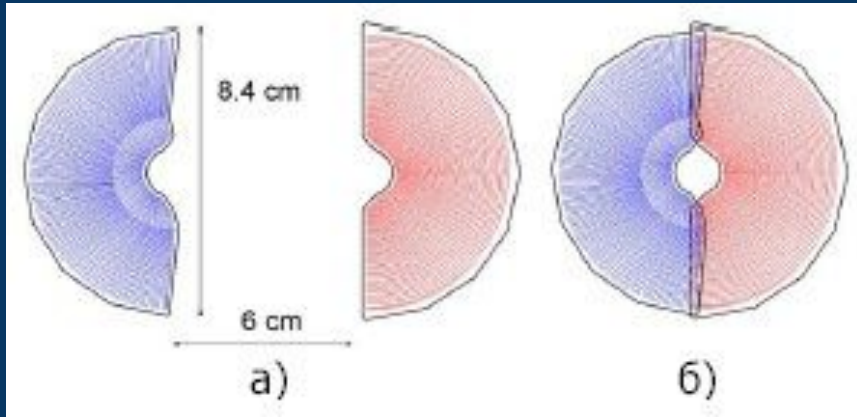


LHCb

Детекторный комплекс



Вершинный детектор VELO



Секции полупроводниковых пиксельных детекторов

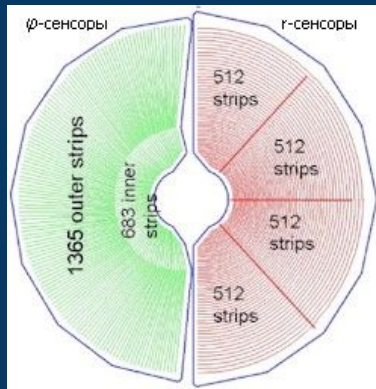
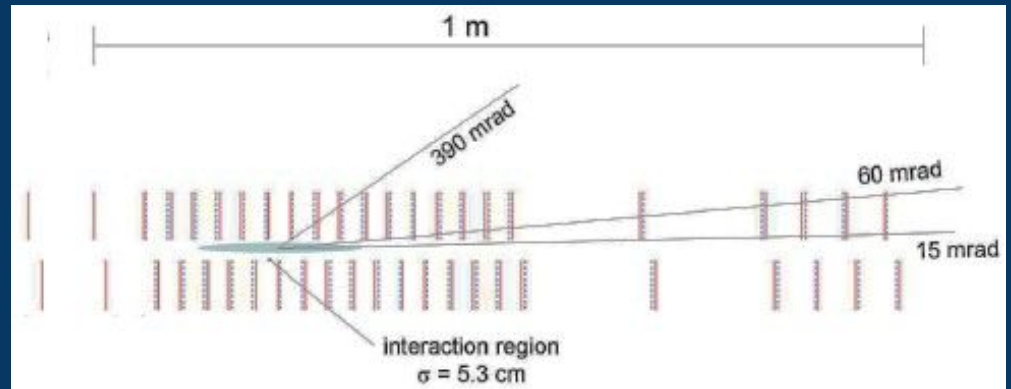
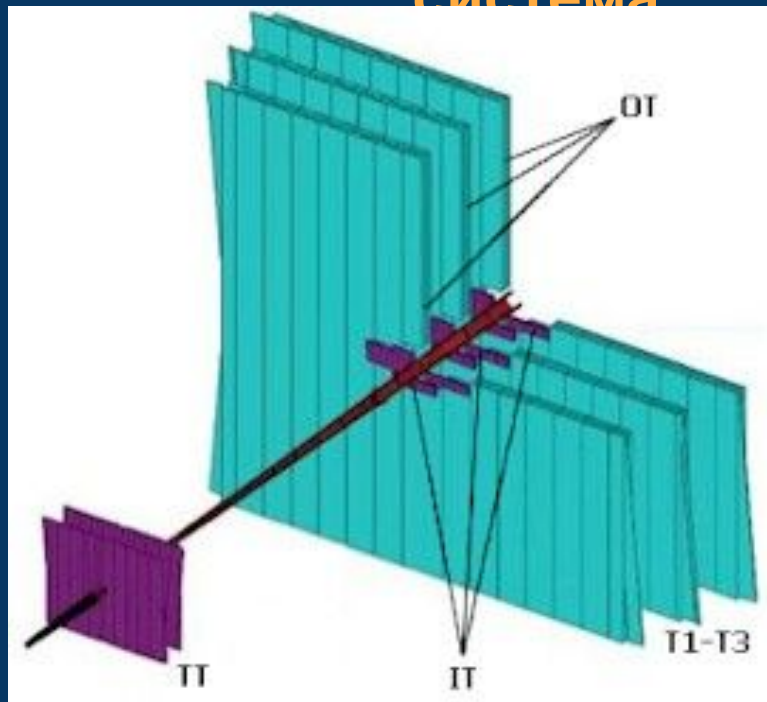


Схема детектора



Основная трекинговая система



В ближней к пучку области секций **П1-П3** – внутреннем трекере (**ПТ**) и в цюрихском трекере (**ПТ**) – используются микроstriповые сенсоры. Во внешней области секций **П1-П3** – внутреннем трекере (**ОТ**) – используются дрейфовые трубки.

$$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*, \quad \Lambda^* \rightarrow K^- p$$

$$\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-, \quad P_c^+ \rightarrow J/\psi p$$

with $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in both cases.

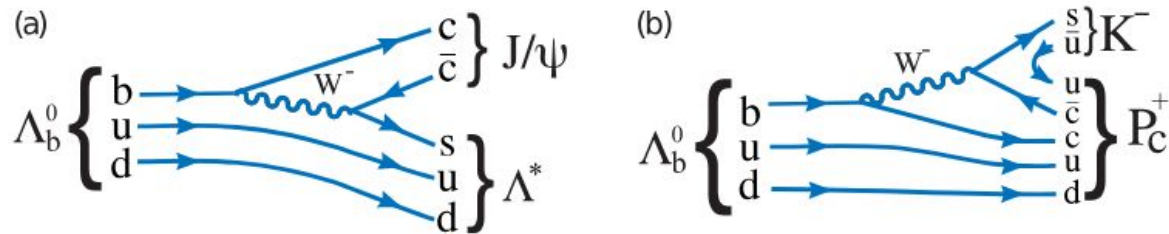


Figure 1: Feynman diagrams for (a) $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*$ and (b) $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-$ decay.

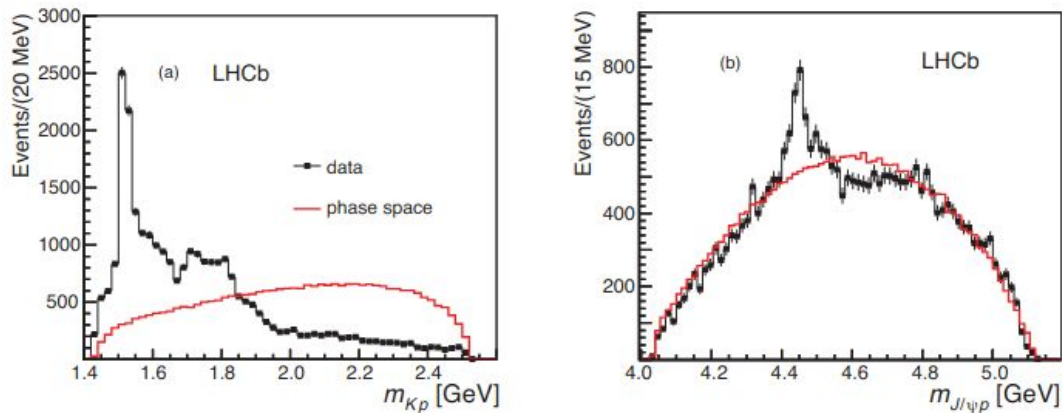


Figure 2: Invariant mass of (a) $K^- p$ and (b) $J/\psi p$ combinations from $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays. The solid (red) curve is the expectation from phase space. The background has been subtracted.

Разделение сигнала от фона с помощью метода машинного обучения **BDTG (Gradient Boosted Decision Tree)**

- Процедура обучения:

Техника **BDTG** требует обучения на основе данных, чтобы построить модель, которая может эффективно отделять сигнал от фона. Для обучения используют два типа данных:

1. Данные фона из побочных полос — это данные, которые представляют собой фоновые события, которые не относятся к интересующему нас процессу, но схожи по своей структуре.
2. Сымитированные образцы сигнала — это данные, полученные с помощью симуляции распадов частиц, которые представляют собой интересующий нас физический процесс

- Генерация событий:

Для создания сымитированных данных используется генератор событий **Pythia**, который генерирует события, равномерно распределенные в фазовом пространстве, что соответствует возможным распадам частиц, которые могут быть зарегистрированы детектором.

Детектор **LHCb** используется для симуляции того, как эти события будут зафиксированы на эксперименте. Эта симуляция основана на **Geant4**, системе, которая моделирует взаимодействия частиц с материалом детектора.

- Каждый трек должен быть хорошего качества, и многократные реконструкции одного и того же трека удаляются.
- Требования к отдельным частицам включают $p_T > 550$ МэВ для мюонов и $p_T > 250$ МэВ для адронов.
- Каждый адрон должен иметь значение параметра импульса χ^2 относительно первичной вершины pp-взаимодействия больше 9
- Система K-p должна образовывать вершину с $\chi^2 < 16$, как и два мюона от распада J/ψ.
- Требования к кандидату Λ_b^0 включают χ^2 вершины < 50 при 5 степенях свободы и расстояние полёта более 1,5 мм.
- Вектор от первичной вершины к вершине Λ_b^0 должен быть сонаправлен с импульсом Λ_b^0 так, чтобы косинус угла между ними был больше 0,999.
- Комбинации $\mu^+\mu^-$ должны быть приведены к массе J/ψ для последующего использования в отборе событий

Ограничения на мюоны

- Поперечный импульс мюонов $P_T > 500$ МэВ
- Система двух мюонов должна формировать вершину с $\chi^2 < 16$
- Ограничение по массе:
Первый этап: ± 120 МэВ вокруг массы J/ψ (около 3.1 ГэВ)
Второй этап: -48 МэВ и $+43$ МэВ вокруг массы J/ψ .
- Система из двух мюонов должна быть значительно смещенной относительно ближайшей вершины взаимодействия pp

Фиттинг (подгонка данных): Исследователи использовали сложный метод анализа данных, называемый амплитудным анализом, чтобы понять, какие состояния возникают в распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$. Для этого они использовали пять углов распада и инвариантную массу m_{Kp} в качестве независимых переменных.

Проверка моделей: Сначала пытались подогнать данные с помощью модели, включающей известные состояния Λ^* (суммарно 14 состояний). Однако эта модель не смогла адекватно описать экспериментальные данные.

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

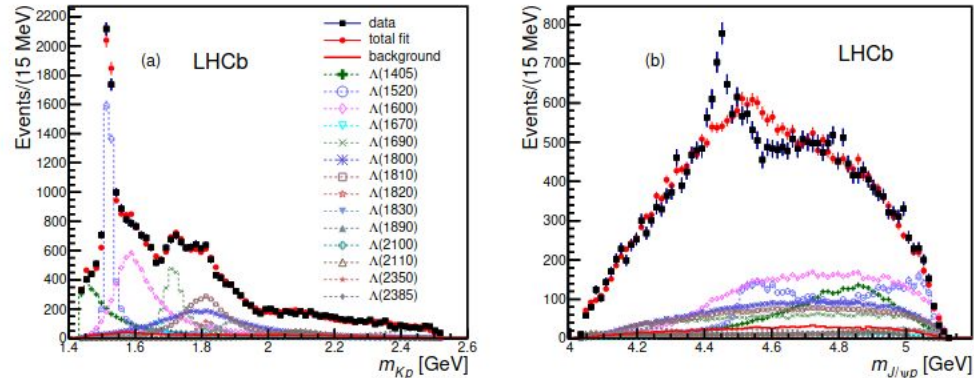
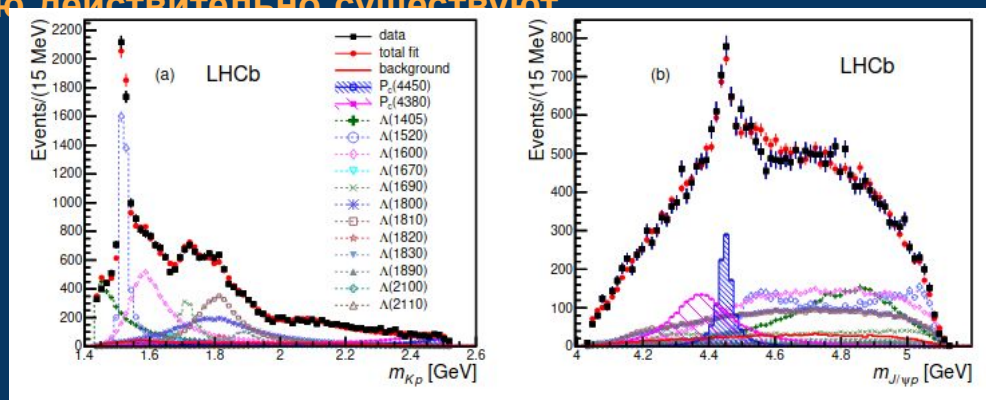


Figure 6: Results for (a) m_{Kp} and (b) $m_{J/\psi p}$ for the extended Λ^* model fit without P_c^+ states. The data are shown as (black) squares with error bars, while the (red) circles show the results of the fit. The error bars on the points showing the fit results are due to simulation statistics.

Добавление новых состояний: Для улучшения согласования с данными было добавлено одно новое состояние P_{s^+} . Когда этого оказалось недостаточно, добавили второе состояние. В результате были обнаружены два новых состояния пентакварков с массами $4380 \pm 8 \pm 29$ МэВ и $4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$ МэВ. Ширины этих состояний составили $205 \pm 18 \pm 86$ МэВ и $39 \pm 5 \pm 19$ МэВ соответственно.

Доля выборки: Обнаружено, что доля событий, связанная с состояниями меньшей и большей масс, составляет примерно 8.4% и 4.1% от общей выборки данных.

Значимость обнаружения: Статистическая значимость этих состояний, равная 9 и 12 стандартным отклонениям соответственно, подтверждает, что вероятность того, что они являются случайными флуктуациями, крайне мала. Это означает, что новые состояния с высокой вероятностью действительно существуют.



Conclusions



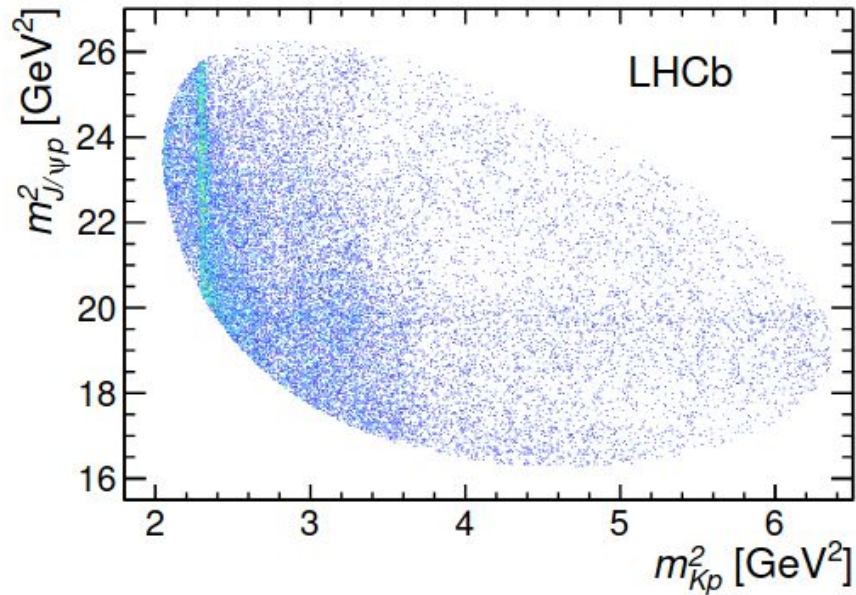


Figure 5: Invariant mass squared of K^-p versus $J/\psi p$ for candidates within ± 15 MeV of the Λ_b^0 mass.