

УДК 539.1

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗБУЖДЁННЫХ СОСТОЯНИЙ Λ_b^0 В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

С. М. Поликарпов

Используя данные, набранные в эксперименте CMS на БАК в течение 2016–2018 г.г., исследованы прелестные барионы, распадающиеся на $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$. Существование состояний $\Lambda_b(5912)^0$, $\Lambda_b(5920)^0$, $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$ подтверждено и измерены их массы.

Ключевые слова: спектроскопия, тяжёлые адроны, БАК.

Введение. Изучение тяжёлых адронов и поиски их возбуждённых состояний, измерения масс и естественных ширин являются актуальными задачами современной физики высоких энергий. Новые результаты в этой области помогают развивать новые теоретические модели сильного взаимодействия, объясняющие механизмы, связывающие кварки друг с другом. В данной работе изложено изучение возбуждённых состояний Λ_b^0 -бариона, выполненное в эксперименте CMS на БАК, используя данные pp -столкновений с энергией 13 ТэВ.

Отбор событий. Возбуждённые состояния Λ_b^0 -бариона изучаются в распаде на $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$, где основное состояние Λ_b^0 восстанавливается в трёх каналах распада: $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ ($J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$), $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ ($\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$) и $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$ ($\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$). Во всех трёх каналах Λ -гиперон восстановлен в распаде на протон и пион противоположного заряда.

Димюонные распады состояний чармония $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$ восстановлены, используя мюоны, которые прошли мягкие требования на идентификацию и имеют поперечный импульс $p_T > 3$ ГэВ. Димюоны комбинируются с кандидатами $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ с вершиной распада, значительно удалённой от области pp -столкновений, образуя Λ_b^0 -кандидаты. Далее используется кинематический фит вершины Λ_b^0 , в котором требуется, чтобы масса пары мюонов после фита совпадала с известной массой J/ψ или $\psi(2S)$. В случае канала $\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ два дополнительных трека также включены в кинематический фит. Для подавления большого комбинаторного фона от частиц, рождённых напрямую в pp -столкновениях, требуется, чтобы восстановленная вершина

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: spolikar@cern.ch.

(SV) распада Λ_b^0 была значительно удалена от первичной вершины pp -взаимодействия (PV), а импульс Λ_b^0 был параллелен направлению из PV в SV. Восстановленное количество сигнальных событий Λ_b^0 в анализируемом наборе данных составляет 39 000, 3400 и 4300 для каналов $J/\psi\Lambda$, $\psi(2S)\Lambda$ ($\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$) и $\psi(2S)\Lambda$ ($\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$), соответственно.

Кандидаты $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$ получаютс комбинарованием полученных Λ_b^0 кандидатов с парой треков противоположного заряда, исходящих из первичной вершины.

Специальная процедура перефитирования первичной вершины была разработана для улучшения разрешения по инвариантной массе. Вместо суммирования “сырых” 4-импульсов или 4-импульсов из вершинного фита $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$ используется новый подход: все треки, образующие первичную вершину, включая пару треков из $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$ -кандидата и “виртуальный трек” Λ_b^0 -кандидата, фитируются в первичную вершину, для переопределения 4-импульсов пионов и Λ_b^0 -кандидата. Затем полученные 4-импульсы суммируются для определения массы $\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$ -кандидата. Такая процедура, как выяснилось при

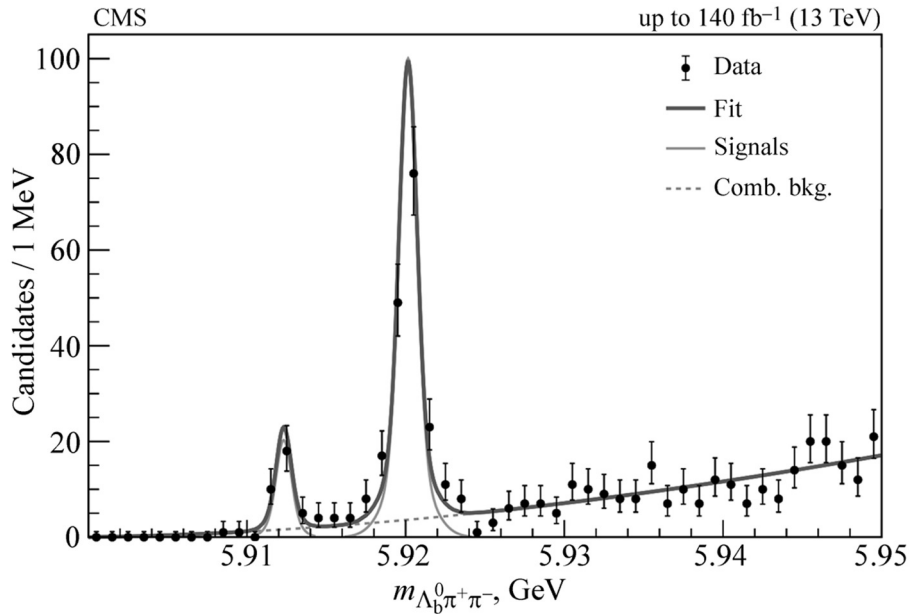


Рис. 1: Полученное из данных эксперимента CMS распределение кандидатов по $m_{\Lambda_b^0\pi^+\pi^-}$ у кинематического порога [3]. Чёрные точки с погрешностями показывают данные, толстая сплошная кривая иллюстрирует суммарную функцию аппроксимации, которая является суммой фоновой функции (пунктирная линия) и двух сигнальных функций (тонкие линии).

изучении данных моделирования, существенно улучшает разрешение по массе $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$: улучшение разрешения составляет вплоть до 50%.

В следующих двух частях описано раздельное изучение массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ вблизи порога (до 5.95 ГэВ) и в диапазоне более высоких масс (до 6.4 ГэВ).

Распределение $m_{\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-}$ вблизи порога. Рис. 1 показывает восстановленное распределение массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ вблизи кинематического порога. Два явных узких пика, обнаруженные в распределении, соответствуют сигналам состояний $\Lambda_b(5912)^0$ и $\Lambda_b(5920)^0$, обнаруженных ранее коллаборациями LHCb [1] и CDF (только $\Lambda_b(5920)^0$) [2].

Распределение аппроксимируется суммой двух сигнальных функций (двойные функции Гаусса с общим средним, свободным при аппроксимации, и параметрами формы, фиксированными к найденным в моделировании) и фоновой пороговой функции. С помощью аппроксимации измеряются массы возбуждённых состояний $\Lambda_b(5912)^0$ и $\Lambda_b(5920)^0$, а также вычисляется значимость сигналов, которая составила 5.7σ и более 6σ [3], соответственно. Это соответствует первому подтверждению со значимостью $> 5\sigma$ обоих состояний $\Lambda_b(5912)^0$ и $\Lambda_b(5920)^0$.

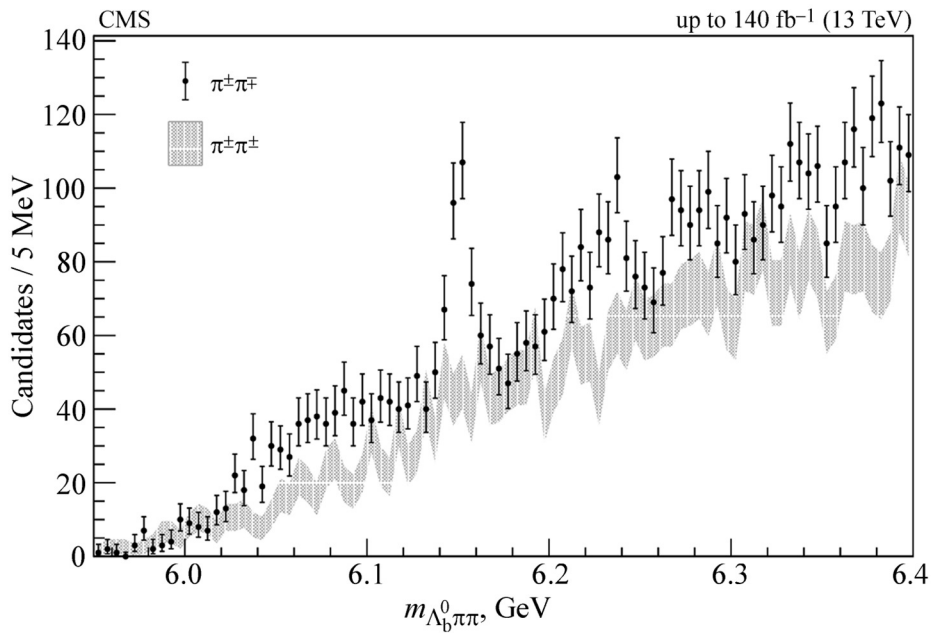


Рис. 2: Полученное из данных эксперимента CMS распределение кандидатов по $m_{\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-}$ между 5.95 и 6.4 ГэВ, в сравнении с распределением ложного знака, которое получено комбинированием кандидатов Λ_b^0 с двумя треками одного заряда [3].

Распределение $m_{\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-}$ от 5.95 до 6.4 ГэВ. На рис. 2 представлено распределение кандидатов по инвариантной массе $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$, на которое наложено распределение ложного знака, в диапазоне 5.95 – 6.4 ГэВ. Распределение ложного знака получено комбинированием Λ_b^0 -кандидата с двумя пионами одинакового заряда. Наглядно видна существенная разница между распределениями, в частности, широкий пик между 6.0 и 6.1 ГэВ и отчётливый узкий пик около 6.15 ГэВ. Второй пик согласуется с наложенными друг на друга сигналами от распадов $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$, недавно обнаруженными коллаборацией LHCb [4].

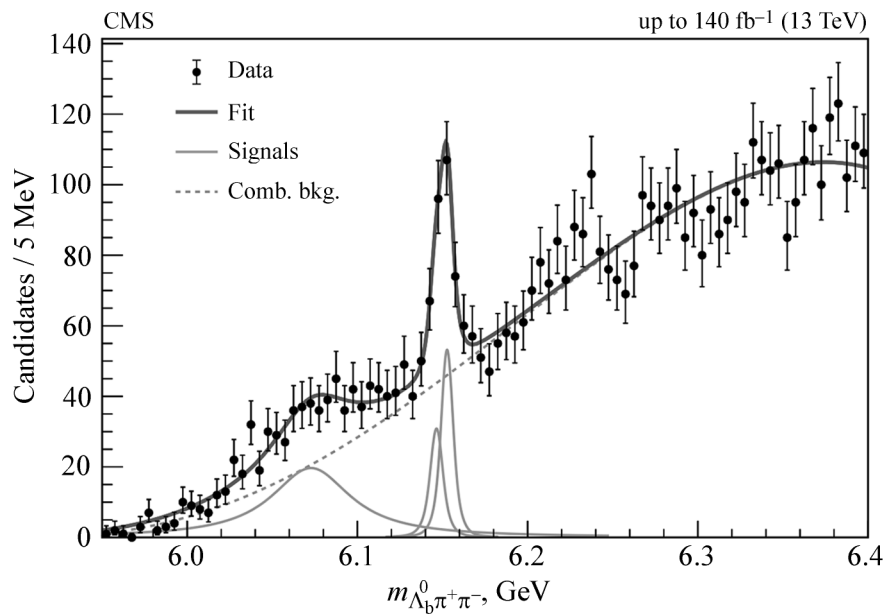


Рис. 3: Полученное из тех же данных распределение кандидатов по $m_{\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-}$ между 5.95 и 6.4 ГэВ (чёрные точки) с результатами аппроксимации: толстая сплошная линия показывает суммарную функцию аппроксимации, которая является суммой фона (пунктирная линия) и трёх сигнальных вкладов (тонкие линии) [3].

Полученное распределение моделируется суммой трёх сигнальных функций для описания двух узких пиков около 5.16 ГэВ и широкого резонанса, и пороговой функции для описания фона. Сигнальные компоненты – функции Брейта–Вигнера (естественные ширины $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$ фиксированы к значениям, полученным LHCb), свёрнутые с функциями разрешения. Результаты аппроксимации показаны на рис. 3. Измеренные массы состояний $\Lambda_b(6146)^0$, $\Lambda_b(6152)^0$ и широкого пика составляют, соответственно, 6146.5 ± 1.9 МэВ, 6152.7 ± 1.1 МэВ и 6073 ± 5 МэВ, где погрешности – только статисти-

ческие [3]. Естественная ширина функции Брейта–Вигнера широкого резонанса равна 55 ± 11 МэВ. Ограниченные разрешение по массе и набор данных не позволяют разделить сигналы $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$, не фиксируя их естественные ширины, однако вычисленная значимость сигнала около 6.15 ГэВ составляет более 5 стандартных отклонений. Статистическая значимость широкого резонанса равна 4σ . В распределении $m_{\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-}$ также наблюдается небольшой пик около 6240 МэВ, однако его значимость составляет менее 2σ .

Эти результаты являются первым подтверждением существования состояний $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$, а также первым свидетельством существования широкого резонанса, распадающегося на $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$, с массой около 6070 МэВ и шириной порядка 50 МэВ.

Систематические погрешности. Исследовано несколько источников систематических погрешностей для измеряемых масс. Они включают в себя выбор функции для описания сигналов и фона, а также возможную разницу в разрешении по массе между данными и моделированием. Погрешность, связанная с возможной неточностью в юстировке детектора, считается пренебрежимо малой. Для состояний $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$, дополнительные погрешности оцениваются исключением из аппроксимации области широкого резонанса и варьированием естественных ширин в пределах погрешностей, приведённых в работе коллаборации LHCb [4].

Итоговые систематические погрешности составляют 9 кэВ, 11 кэВ, 0.77 МэВ и 0.41 МэВ для масс состояний $\Lambda_b(5912)^0$, $\Lambda_b(5920)^0$, $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$, соответственно [3].

Результаты. Используя данные pp -столкновений с $\sqrt{s} = 13$ ТэВ, набранные в эксперименте CMS на БАК в 2016–2018 г.г., исследованы возбуждённые состояния Λ_b^0 -бариона, распадающиеся на $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$.

Показано существование четырёх возбуждённых состояний и измерены их массы [3]:

$$M(\Lambda_b(5912)^0) = 5912.32 \pm 0.12 \text{ (стат.)} \pm 0.01 \text{ (сист.)} \pm 0.17(\Lambda_b^0) \text{ МэВ,}$$

$$M(\Lambda_b(5920)^0) = 5920.16 \pm 0.07 \text{ (стат.)} \pm 0.01 \text{ (сист.)} \pm 0.17(\Lambda_b^0) \text{ МэВ,}$$

$$M(\Lambda_b(6146)^0) = 6146.5 \pm 1.9 \text{ (стат.)} \pm 0.8 \text{ (сист.)} \pm 0.2(\Lambda_b^0) \text{ МэВ,}$$

$$M(\Lambda_b(6152)^0) = 6152.7 \pm 1.1 \text{ (стат.)} \pm 0.4 \text{ (сист.)} \pm 0.2(\Lambda_b^0) \text{ МэВ,}$$

где последние погрешности связаны с неточностью среднемирового значения массы Λ_b^0 . В дополнение, в распределении массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ обнаружен широкий пик, согласующийся с Брейт–Вигнеровским резонансом с массой 6073 ± 5 МэВ и естественной шириной

55 ± 11 МэВ, где погрешности – только статистические [3]. Полученные значения масс согласуются с измерениями коллабораций LHCb [1] и CDF [2].

Эти результаты демонстрируют возможность изучать спектроскопию тяжёлых адронов на установке CMS, которая изначально не была оптимизирована под исследования в этой области. Полученные результаты будут использованы для улучшения точности среднемировых значений масс прелестных барионов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.W03.31.0026.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. Aaij et al., (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **109**, 172003 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.172003.
- [2] T. Aaltonen et al., (CDF Collaboration), Phys. Rev. D. **88**, 071101 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevD.88.071101.
- [3] A. M. Sirunyan et al., (CMS Collaboration), Phys. Lett. B **803**, 135345 (2020). DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135345.
- [4] R. Aaij et al., (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **123**, 152001 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.152001.

Поступила в редакцию 12 ноября 2020 г.

После доработки 21 ноября 2020 г.

Принята к публикации 23 ноября 2020 г.

Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики-2020 (ФИАН, Москва).