

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.12

ИЗУЧЕНИЕ ПРЕЛЕСТНЫХ БАРИОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ LHCb

© 2021 г. В. И. Матюнин*

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: matyunin@itep.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

Высокая статистика, набранная экспериментом LHCb в протон-протонных столкновениях за время сеанса 1 и 2 на Большом адронном коллайдере, открывает уникальную возможность для изучения прелестных барионов и расширения знаний об их спектроскопии. В работе представлены недавние результаты поисков новых распадов прелестных частиц, а также результаты поисков новых возбужденных состояний b -адронов. В частности, первое наблюдение возбужденных Ω_b^- состояний, обнаружение двух узких $\Lambda_b(6146)^0$ и $\Lambda_b(6152)^0$ состояний, обнаружение Λ_b^{**0} состояния, совместного с предсказанием для $\Lambda_b(2S)^0$ бариона и обнаружение распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^-$.

Ключевые слова: физика высоких энергий, физика элементарных частиц, LHCb

DOI: 10.56304/S2079562920060408

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько лет большое количество интересных результатов было получено при исследовании прелестных адронов. Среди них есть первое наблюдение пентакварковых и тетракварковых резонансов, наблюдение целого ряда возбужденных состояний тяжелых барионов и много других. Тем не менее, многие из предсказанных состояний не обнаружены, параметры некоторых из известных состояний адронов измерены с небольшой точностью, и, кроме того, существует целый ряд состояний, которые не укладываются в спектр кваркония. Поэтому изучение спектроскопии b -адронов представляет особый интерес для современной физики высоких энергий.

Описанные ниже результаты основаны на данных, набранных в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК) в протон-протонных (pp) столкновениях при энергиях столкновений $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ суммарной светимостью 3 fb^{-1} (сеанс 1 БАК) и $\sqrt{s} = 13$ ТэВ суммарной светимостью 6 fb^{-1} (сеанс 2 БАК).

2. ПЕРВОЕ НАБЛЮДЕНИЕ

ВОЗБУЖДЕННЫХ Ω_b^- СОСТОЯНИЙ

Недавно были обнаружены пять новых узких возбужденных Ω_b^0 барионов [1]. Некоторые теоре-

тические модели, описывающие Ω_c^0 состояния, также предсказывают распад Ω_b^- состояний до конечного состояния $\Xi_b^0 K^-$. Поэтому поиск аналогичных возбужденных состояний с использованием данных эксперимента LHCb представляет особый интерес. В эксперименте LHCb исследован спектр масс $\Xi_b^0 K^-$ с целью поиска узких резонансов близких к порогу [2]. В анализе использовался набор данных pp-столкновений, соответствующий суммарной светимости 9 fb^{-1} сеансов 1 и 2 БАК. Для реконструкции Ξ_b^0 барионов использовалась мода распада $\Xi_c^+ \pi^-$, где Ξ_c^+ барионы восстанавливались по моде распада $p K^- \pi^+$. Распределение разности масс для комбинации с правильным знаком $m(\Xi_b^0 K^-) - m(\Xi_b^0)$ и с неправильным знаком $m(\Xi_b^0 K^+) - m(\Xi_b^0)$ показано на рис. 1а и 1б соответственно. На распределении для комбинации с правильным знаком обнаружены четыре узких пика. Спектры для комбинации с неправильным и правильным знаком аппроксимировались одновременно, с общей формой фоновой компоненты. Параметры всех четырех пиков, полученные из результатов аппроксимации, вместе со значимостью приведены в работе [2]. Массы и ширины новых резонансов согласуются с ожиданиями для возбужденных Ω_b^- состояний.

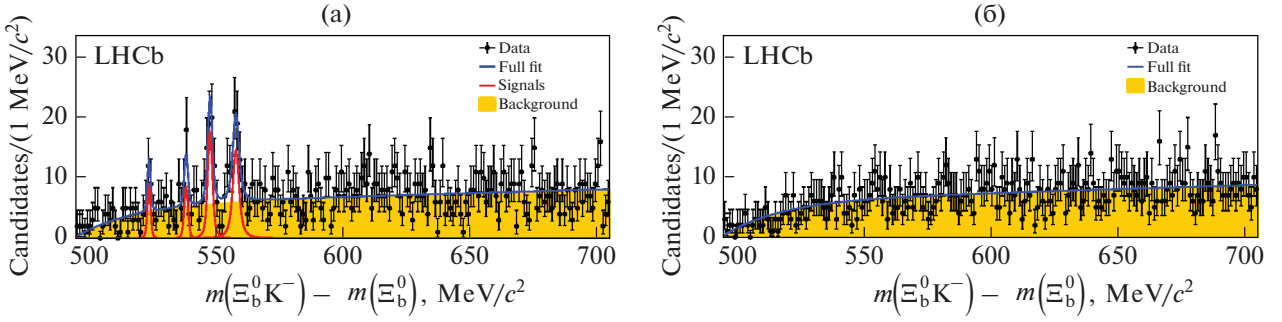


Рис. 1. Распределения разницы масс для комбинации с правильным знаком $m(\Xi_b^0 K^-) - m(\Xi_b^0)$ (а) и с неправильным знаком $m(\Xi_b^0 K^+) - m(\Xi_b^0)$ (б). Различные компоненты, используемые при аппроксимации, указаны в легенде.

3. ВОЗБУЖДЕННЫЕ Λ_b^0 СОСТОЯНИЯ

Помимо самого легкого прелестного бариона, Λ_b^0 бариона, при более высоких массах ожидается большое количество радиально и орбитально возбужденных состояний. Ранее, экспериментом LHCb был произведен поиск возбужденных состояний в спектре $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$, и были обнаружены два узких состояния [3]. Поэтому интересно исследовать спектр $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ с полной статистикой, собранной экспериментом LHCb. Спектр массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ комбинации изучался с использованием полной выборки данных pp-столкновений сеансов 1 и 2, соответствующих суммарной светимости 9 fb^{-1} [4, 5]. Для реконструкции Λ_b^0 барионов использовались две моды распадов: $\Lambda_c^+ \pi^-$ и $J/\psi K^-$. Исследование проводилось в трех $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ массовых интервалах соответствующих большому, среднему и малым массам. В интервале высоких масс $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ обнаружен новый пик примерно при $6.15 \text{ GeV}/c^2$ [4]. Пик находится выше порога $\Sigma_b^{(*)\mp} \pi^\pm$, поэтому спектр исследовался в трех неперекрывающихся областях массы $\Lambda_b^0 \pi^\pm$ комбинации: двух резонансных $\Sigma_b^\mp$ и $\Sigma_b^{*\mp}$ областях и нерезонансной области. Проводилась одновременная аппроксимация трех распределений массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ комбинации. Было установлено, что для описания наблюдаемой структуры гипотеза двух пиков предпочтительна по сравнению с гипотезой одного пика со статистической значимостью более 7σ . Распределение массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ комбинации показано на рис. 2а. В результате аппроксимации масса и ширина двух пиков получились

$$m_{\Lambda_b(6146)^0} = 6146.17 \pm 0.33 \pm 0.22 \pm 0.16 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$\Gamma_{\Lambda_b(6146)^0} = 2.9 \pm 1.3 \pm 0.3 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$m_{\Lambda_b(6152)^0} = 6152.51 \pm 0.26 \pm 0.22 \pm 0.16 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$\Gamma_{\Lambda_b(6152)^0} = 2.1 \pm 0.8 \pm 0.3 \text{ МэВ}/c^2,$$

здесь и на протяжении всей работы первая погрешность является статистической, вторая — систематической, а третья (если указана) связана с неопределенностью номинальной массы Λ_b^0 бариона. Измеренные массы согласуются с дублетом $\Lambda_b(1D)^0$ с квантовыми числами $J^P = \frac{3}{2}^+$ и $\frac{5}{2}^+$ [6, 7].

В интервале высоких масс $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ обнаружено новое барионное состояние [5]. Осуществлялась одновременная аппроксимация шести массовых распределений, в которых Λ_b^0 барионы восстанавливались по двум разным модам распадов: $\Lambda_c^+ \pi^-$ и $J/\psi K^-$, в каждом случае для одной комбинации с правильным знаком $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ и для двух комбинаций с неправильным знаком $\Lambda_b^0 \pi^\pm \pi^\pm$. Массовые распределения показаны на рис. 2б и 2в. Масса и ширина нового пика равны

$$m_{\Lambda_b^{**0}} = 6072.3 \pm 2.9 \pm 0.6 \pm 0.2 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$\Gamma_{\Lambda_b^{**0}} = 72 \pm 11 \pm 2 \text{ МэВ}/c^2.$$

Наблюдаемый пик согласуется с широким пиком, о котором ранее сообщал эксперимент CMS [8]. Измеренные масса и ширина согласуются с ожиданиями для $\Lambda_b(2S)^0$ состояния. Также, исследовались вклады от $\Sigma_b^{(*)\mp}$ резонансов и было получено, что основной вклад дает нерезонансная компонента.

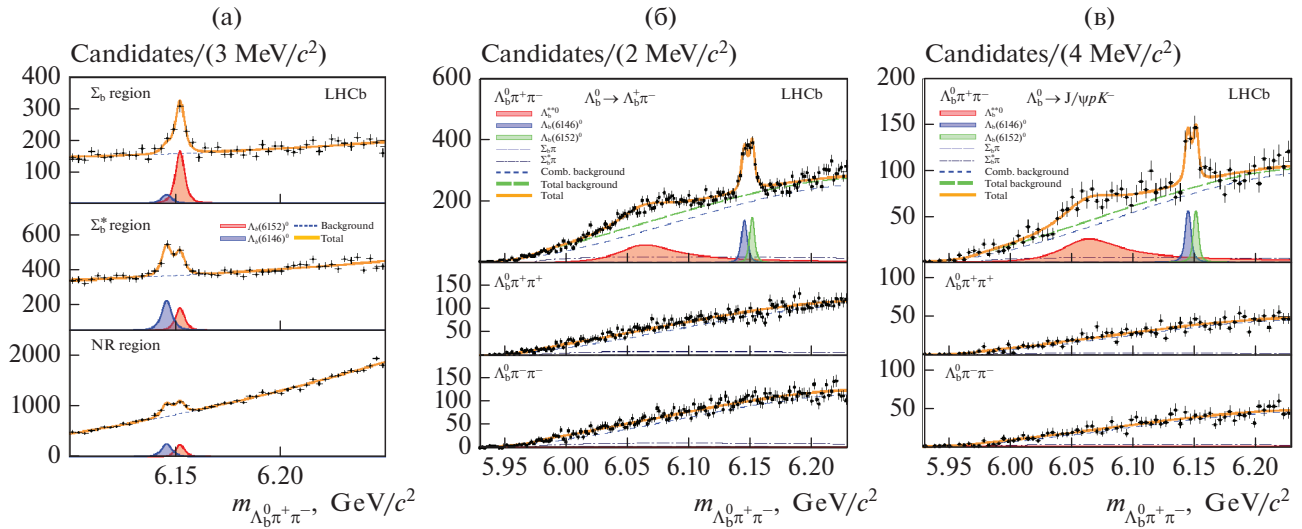


Рис. 2. (а) Распределение массы $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ комбинации для трех областей по массе $\Lambda_b^0 \pi^\pm$: (вверху) $\Sigma_b^\mp$ барион, (в центре) $\Sigma_b^\mp$ барион и (внизу) нерезонансной области. Массовые спектры (вверху) $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$, (в центре) $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^+$ и (внизу) $\Lambda_b^0 \pi^- \pi^-$ комбинаций для случая реконструкции Λ_b^0 бариона по моде (б) $\Lambda_c^+ \pi^-$ и (в) $J/\psi p K^-$.

В интервале малых масс $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ подтверждены два состояния, наблюдавшиеся ранее [3]. Выполнялась одновременная аппроксимация шести массовых распределений, в которых Λ_b^0 барион восстанавливался по двум разным модам распада и в каждом случае для комбинации с правильным знаком $\Lambda_b^0 \pi^+ \pi^-$ и двух комбинаций с неправильным знаком $\Lambda_b^0 \pi^\pm \pi^\pm$. Измерены масса и ширина данных состояний:

$$m_{\Lambda_b(5912)^0} = 5912.21 \pm 0.03 \pm 0.01 \pm 0.21 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$\Gamma_{\Lambda_b(5912)^0} < 0.25 (0.28) \text{ МэВ}/c^2,$$

$$m_{\Lambda_b(5920)^0} = 5920.11 \pm 0.02 \pm 0.01 \pm 0.21 \text{ МэВ}/c^2,$$

$$\Gamma_{\Lambda_b(5920)^0} < 0.19 (0.20) \text{ МэВ}/c^2.$$

Для ширин указаны верхние пределы с вероятностью 90% (95%). Параметры измерены с точностью примерно в четыре раза более высокой по сравнению с результатами, приведенными в работе [3].

4. ОБНАРУЖЕНИЕ РАСПАДА $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$

В эксперименте LHCb впервые обнаружен Кабиббо-подавленный распад $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$ [11]. Для анализа использовались данные протон-протонных столкновений, соответствующие суммарной светимости 3 фб^{-1} набора данных сеанса 1 БАК

и 1.9 фб^{-1} части набора данных сеанса 2 БАК. В работе было измерено отношение парциальных ширин исследуемого распада по отношению к распаду $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p K^-$. Для реконструкции $\psi(2S)$ мезона использовалась мода распада $\mu^+ \mu^-$. На рис. 3 представлены распределения инвариантной массы отобранных $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$ кандидатов, а также кандидатов для нормировочного канала $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p K^-$. Наблюдаемое число событий распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$ составило 121 ± 13 . Полученное отношение парциальных ширин:

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p K^-)} = (11.4 \pm 1.3 \pm 0.2)\%.$$

Также, проведенный анализ парных комбинаций продуктов распада позволил сделать вывод об отсутствии вкладов от экзотических состояний.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент LHCb вносит существенный вклад в изучение спектроскопии прелестных адронов. В частности, обнаружены новые возбужденные состояния Ω_b^- и Λ_b^0 , измерены масса и ширина новых состояний, открыт новый распад $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p \pi^-$ и измерено отношение парциальной ширины этого распада по отношению к $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) p K^-$.

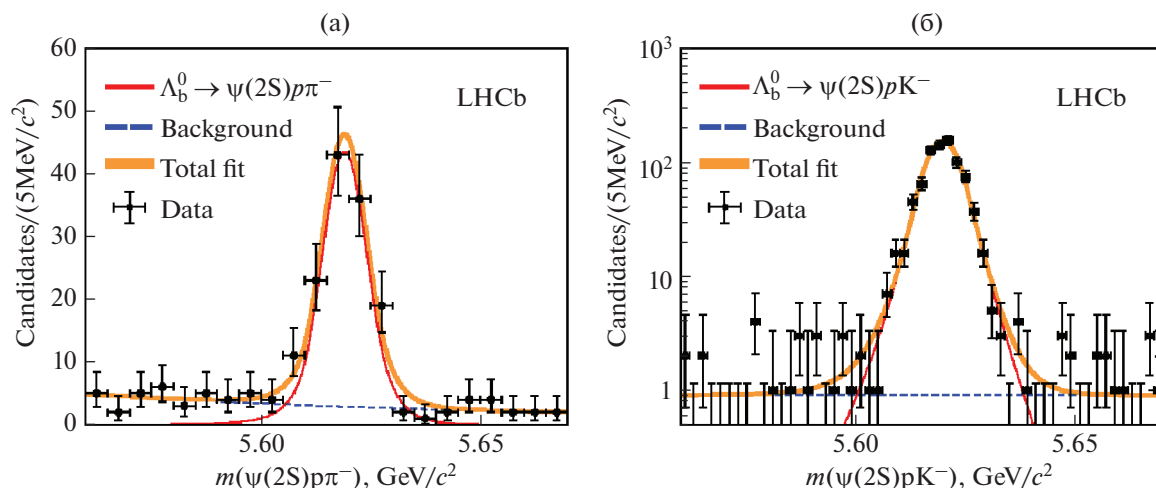


Рис. 3. Массовые спектры отобранных кандидатов в канале (а) $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)p\pi^-$ и (б) $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)pK^-$. Различные компоненты, используемые при аппроксимации, указаны на рисунке.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 20-32-90166). Автор выражает благодарность организаторам конференции МКТЭФ-2020 за прекрасную конференцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *LHCb Collab.* // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 182001.
2. *LHCb Collab.* // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124. P. 082002.
3. *LHCb Collab.* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109. P. 172003.
4. *LHCb Collab.* // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 123. P. 152001.
5. *LHCb Collab.* // *J. High Energy Phys.* 2020. V. 2020 (6). P. 136.
6. *Chen B., Wei K.-W., Zhang A.* // *Eur. Phys. J. A* . 2015. V. 51. P. 82.
7. *Capstick S., Isgur N.* // *Phys. Rev. D.* 1986. V. 34. P. 2809.
8. *CMS Collab.* // *Phys. Lett. B.* 2020. V. 803. P. 135345.
9. *Brambilla N. et al.* // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71. P. 1534.
10. *LHCb Collab.* // *Phys. Rev. D.* 2019. V. 100. P. 112006.
11. *LHCb Collab.* // *J. High Energy Phys.* 2018. V. 2018 (8). P. 131.

Study of Beauty Baryons at the LHCb Experiment

V. I. Matiunin*

National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

*e-mail: matyunin@itep.ru

Received December 28, 2020; revised December 30, 2020; accepted January 14, 2021

The high statistics collected by the LHCb experiment in proton-proton collisions during Run 1 and 2 of the Large Hadron Collider provides a unique opportunity for study of beauty baryons and to broaden knowledge about their spectroscopy. The paper presents the recent results of searches for new beauty particles decays, as well as the results of searches for new excited states of b-hadrons. In particular, the first observation of excited Ω_b^- states, the observation of two narrow $\Lambda_b(6146)^0$ and $\Lambda_b(6152)^0$ states, the observation of new Λ_b^{*0} state consistent with the prediction for $\Lambda_b(2S)^0$ baryon, and the observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)p\pi^-$ decay are presented.

Keywords: high energy physics, elementary particles physics, LHCb