

УДК 539.126.6

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ $\Xi_b^-$ -БАРИОНОВ НА ДАННЫХ CMS

К. М. ИВАНОВ

*Данная работа посвящена вопросу экспериментального изучения и восстановления  $\Xi_b^-$ -барионов с использованием данных, набранных экспериментом CMS Большого адронного коллайдера в 2016–2018 годах в протон-протонных столкновениях с энергией в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, что соответствует интегральной светимости  $140 \text{ fb}^{-1}$ . Было восстановлено более 900 событий распада  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$ , где  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ ,  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ . Измеренная масса  $\Xi_b^-$  бариона прекрасно согласуется с табличной, а полученные результаты демонстрируют возможность выполнять работы по спектроскопии прелестных адронов на экспериментальной установке CMS.*

**Ключевые слова:** CMS, физика частиц,  $b$ -физика, спектроскопия.

*Введение.*  $\Xi_b$ -барионы – семейство изодублетов с кварковым составом  $qsb$  (где легкий кварк первого поколения  $q$  является  $u$  для  $\Xi_b^0$  и  $d$  для  $\Xi_b^-$ ), имеющих сразу два аромата: прелесть  $B = -1$ , странность  $S = -1$ . Изучение этих частиц началось с обнаружения коллаборациями D0 [1] и CDF [2] распада  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$  в 2007 г. в протон-антипротонных столкновениях на Тэватроне. В 2011 г. CDF также обнаружила и нейтральный  $\Xi_b^0$  в распаде на  $\Xi_c^+ \pi^-$  [3].

В соответствии с теоретическими предсказаниями [4, 5], у семейства  $\Xi_b$  должно существовать и множество возбуждений, различные изодублеты которых характеризуются спином  $j$  легкого  $qs$  дикварка и спин-четностью бариона  $J^P$  (так, для основного состояния  $j = 0$  и  $J^P = 1/2^+$ ). Несколько таких  $\Xi_b$  резонансов было обнаружено экспериментами Большого адронного коллайдера (БАК) в сильных распадах:  $\Xi_b^{*0}$  коллаборацией CMS [6] (позднее подтвержден на LHCb [7]) и состояния  $\Xi_b^{\prime-}$ ,  $\Xi_b^{*-}$  на LHCb [8], где  $\Xi_b^{\prime-}$

---

МФТИ, 141700 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kirill.ivanov@cern.ch.

имеет характеристики  $j = 1, J^P = 1/2^+$ , а  $\Xi_b^* - j = 1, J^P = 3/2^+$ . Недавно в эксперименте LHCb был обнаружен еще один резонанс,  $\Xi_b(6227)^-$  [9], но его квантовые числа неизвестны и нуждаются в дальнейших исследованиях.

Таким образом, на примере семейства  $\Xi_b$  видно, что эксперименты БАК благодаря большой энергии  $pp$ -столкновений и рекордным объемам записанных данных позволяют выполнять исследования в области спектроскопии тяжелых адронов, в частности, поиск новых состояний и распадов, точные измерения их масс и времен жизни. Это важно для проверки и уточнения теоретических моделей сильного межкваркового взаимодействия в квантовой хромодинамике. Так как большинство возбужденных состояний распадается по сильному каналу на основное состояние + легкие адроны, для поиска новых резонансов очень важным является вопрос надежного восстановления и изучения основных состояний тяжелых адронов. Именно этому и посвящена настоящая работа, описывающая методику, процедуру и результаты восстановления  $\Xi_b^-$  адронов в канале  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$  с последующими распадами  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ ,  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ . Были использованы данные, набранные детектором CMS БАК [10] в 2016–2018 годах в результате протон-протонных столкновений при энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, что соответствует интегральной светимости  $140 \text{ фб}^{-1}$ .

*Отбор и восстановление событий.* Для восстановления кандидатов  $\Xi_b^-$  используется процедура, близкая к используемым в предыдущих работах CMS по  $b$ -физике. Схематичное изображение топологии распада представлено на рис. 1.

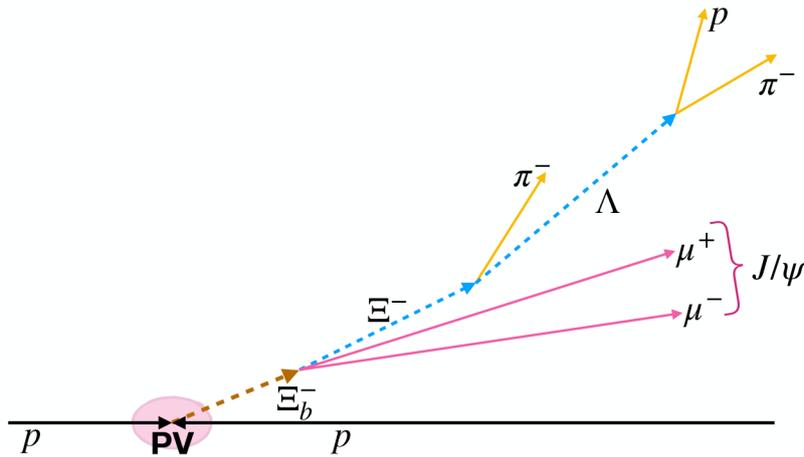


Рис. 1: Топология распада  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Xi^-$  с последующими распадами  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ,  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ ,  $\Lambda \rightarrow p \pi^-$ .

Реконструкция начинается с поиска и восстановления двух мюонов противоположного заряда с ограничениями на поперечный импульс  $p_T(\mu^\pm) > 3.0$  ГэВ и псевдобыстроту  $|\eta(\mu^\pm)| < 2.4$ , прошедших soft-мюон идентификацию CMS [11]. Их треки фитируются в общую вершину с наложением требования на  $\chi^2$  вероятность фита более 1%. Масса димюонного кандидата должна принадлежать диапазону  $2.9 \text{ ГэВ} < M(\mu^+\mu^-) < 3.45 \text{ ГэВ}$  по инвариантной массе для предварительного отбора событий и затем – в пределах 100 МэВ от табличной массы  $J/\psi$  согласно [12].

Затем кандидаты  $\Lambda$  формируются как удаленная вершина распада с двумя исходящими треками в форме буквы  $V$  с суммарным нулевым зарядом ( $V0$ -кандидаты), что соответствует распаду  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ . Треку с наибольшим импульсом присваивается массовая гипотеза протона, соответственно второму – пиона. Инвариантная масса  $p\pi^-$  должна лежать в массовом окне 10 МэВ от табличной массы  $\Lambda$  согласно [12], что соответствует примерно трем детекторным разрешениям, а вероятность фита треков в общую вершину должна быть более 1%. Также отобранный  $V0$ -кандидат должен иметь  $p_T > 1$  ГэВ.

После этого для восстановления кандидатов  $\Xi^-$  отобранный ранее  $\Lambda$  барион комбинируется с заряженным треком с пионной гипотезой, удовлетворяющим требованиям  $p_T(\pi^-) > 0.3$  ГэВ и  $|\eta(\pi^-)| < 2.4$ . Вероятность вершинного фита  $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$  должна быть выше 1%, а инвариантная масса кандидатов должна лежать в диапазоне  $|M(\Lambda\pi^-) - m^{\text{PDG}}(\Xi^-)| < 10$  МэВ, соответствующему примерно 3 разрешениям по массе  $\Xi^-$ . Так как  $\Lambda$  является долгоживущей частицей и ее распад удален от вершины  $\Xi^-$ , накладывається ограничение на  $\cos(\alpha(\Lambda, \Xi^-))$ , который должен быть положительным. Здесь  $\alpha(\Lambda, \Xi^-) = \angle\{\vec{L}_{xy}(\Lambda - \Xi^-), \vec{p}_T(\Lambda)\}$  – направляющий угол между импульсом  $\Lambda$  и вектором ее отлета от вершины  $\Xi^-$  в поперечной плоскости.

Наконец, кандидаты  $\Xi_b^-$  получают в результате фитирования отобранных  $J/\psi$  и  $\Xi^-$  в общую вершину с требованием совпадения массы димюонного кандидата с известной массой  $J/\psi$  мезона [12]. При выборе первичной вершины ( $PV$ ) из всех восстановленных в результате  $pp$ -столкновений выбирается та, которая наиболее соответствует рождению восстановленного кандидата  $\Xi_b^-$ . Для каждой  $PV$  вычисляется направляющий на нее угол между импульсом кандидата  $\Xi_b^-$  и вектором между  $PV$  и вершиной распада  $\Xi_b^-$ , после чего выбирается та  $PV$ , для которой этот угол минимален (косинус максимален). При таком переборе  $PV$  проверяется, чтобы формирующие положение  $PV$  треки не совпадали ни с одним из тех пяти, которые были отобраны на предыдущих этапах. В случае нахождения совпадения такой трек удаляется из списка формирующих  $PV$ ,

и положение  $PV$  вычисляется заново с помощью фита всех этих треков.

Затем на отобранные кандидаты  $\Xi_b^-$  накладываются следующие ограничения:  $p_T(\Xi_b^-) > 10$  ГэВ,  $P_{vtx}(\Xi_b^-) > 1\%$ . Также в силу значительного времени жизни  $\Xi^-$  необходимо потребовать  $\cos \alpha(\Xi^-, \Xi_b^-) > 0.999$  и наложить на пион из распада  $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$  ограничение на значимость поперечного прицельного параметра  $d_{xy}/\sigma_{d_{xy}} > 1$ , где этот параметр  $d_{xy}$  определяется как наименьшее расстояние между треком и  $PV$ . Так как распад  $b$  кварка должен быть значимо отдален от положения  $PV$ , вершина распада кандидата  $\Xi_b^-$  должна удовлетворять условиям на значимость отлета от области  $pp$ -столкновений  $L_{xy}(\Xi_b^-, PV) > 3\sigma_{L_{xy}(\Xi_b^-, PV)}$  и на направляющий угол  $\cos \alpha(\Xi_b^-, PV) > 0.99$ . Восстановленная инвариантная масса должна лежать в диапазоне  $[5.6, 6.0]$  ГэВ.

Для получения детекторных разрешений по инвариантной массе были использованы наборы смоделированных данных CMS, сгенерированные методом Монте-Карло. Процедура реконструкции событий в симуляции полностью идентична используемой для реальных данных за исключением дополнительного требования соответствия восстановленных частиц с теми, что были на самом деле сгенерированы.

Изучение распадов  $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$  и  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ . Полученные распределения по инвариантной массе для  $\Lambda\pi^-$  и  $J/\psi\Xi^-$  представлены на рис. 2 (слева и справа, соответственно). С использованием Монте-Карло симуляции были получены следующие значения детекторного разрешения:  $3.55 \pm 0.15$  МэВ для сигнала  $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$  и  $17.8 \pm 1.2$  МэВ – для  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ .

#### Т а б л и ц а 1

*Параметры, полученные в результате аппроксимаций распределений по инвариантной массе  $\Lambda\pi^-$  и  $J/\psi\Xi^-$ . Массы и разрешения даны в МэВ.*

*Погрешности являются только статистическими*

Сигнал	N	$m^{\text{fit}}$	$\sigma_{\text{eff}}$ (МС)	$\chi^2/n_{\text{dof}}$
$\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$	$2269 \pm 68$	$1321.91 \pm 0.09$	3.55	112.9/96
$\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$	$932 \pm 42$	$5796.95 \pm 0.73$	17.8	103.6/96

Аппроксимация отобранных событий выполнена с помощью библиотеки RooFit программного пакета ROOT. Для обоих изучаемых распределений сигнальная функция смоделирована двойной функцией Гаусса с общим средним, форма которой определена из симуляции, в то время как фон описан полиномом 1-ой степени. Численные результаты аппроксимации представлены в табл. 1. Измеренная масса  $\Xi^-$  гиперона равна  $1321.92 \pm 0.11$  МэВ, что находится в согласии с результатами Particle

Data Group (PDG) [12]  $1321.71 \pm 0.07$  МэВ. Результаты аппроксимации для массы  $\Xi_b^-$ -бариона,  $5796.95 \pm 0.73$  МэВ, также отлично согласуются с табличными:  $m_{\Xi_b^-}^{\text{PDG}} = 5797.0 \pm 0.9$  МэВ [12].

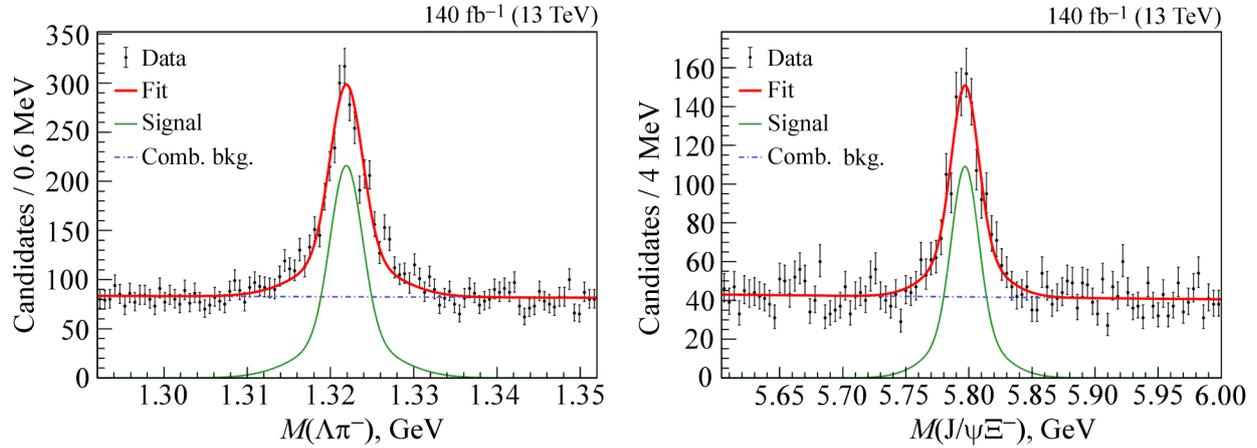


Рис. 2: Распределения по инвариантной массе  $\Lambda\pi^-$  (слева) и  $J/\psi\Xi^-$  (справа) кандидатов, полученных на полном наборе данных 2016–2018 годов  $pp$ -столкновений. Точки показывают данные, толстая красная кривая — результаты аппроксимаций, тонкие зеленые линии описывают вклады сигнальных компонент, а фон изображен фиолетовой штрихпунктирной линией.

*Заключение.* Таким образом, было восстановлено  $932 \pm 42$  события  $\Xi_b^-$ -бариона в его распаде  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Xi^-$ , что почти в 10 раз превосходит предыдущий результат коллаборации CMS [6]. Это является первым изучением спектроскопии  $\Xi_b^-$ -барионов коллаборацией CMS на данных RunII БАК. Измеренная в работе масса  $\Xi_b^-$ -бариона  $5796.95 \pm 0.73$  МэВ прекрасно согласуется с усредненным значением PDG [12]  $5797.0 \pm 0.9$ , а также с недавним измерением коллаборации LHCb 2019 года [13]  $5797.70 \pm 0.39 \pm 0.15 \pm 0.17$  МэВ, где вторая и третья ошибка связаны с систематическими погрешностями и неточностью табличного значения массы  $\Lambda_b^0$ -бариона. Полученные нами результаты демонстрируют отличную способность эксперимента CMS восстанавливать  $b$ -адроны и открывают возможности для дальнейшего изучения спектроскопии тяжелых состояний, распадающихся с участием  $\Xi_b^-$ -бариона.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. Abazov and others (D0 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **99**, 052001 (2007). DOI:10.1103/PhysRevLett.99.052001.
- [2] T. Aaltonen and others (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **99**, 052002 (2007). DOI:10.1103/PhysRevLett.99.052002.
- [3] T. Aaltonen and others (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 102001 (2011). DOI:10.1103/PhysRevLett.107.102001.
- [4] E. Klempt and J.-M. Richard, Rev. Mod. Phys. **82**, 1095 (2010).
- [5] M. Karliner, B. Keren-Zur, H. J. Lipkin, and J. L. Rosner, Annals Phys. **324**, 2 (2009). DOI:10.1016/j.aop.2008.05.003.
- [6] S. Chatrchyan and others (CMS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **108**, 252002 (2012). DOI:10.1103/PhysRevLett.108.252002.
- [7] R. Aaij and others (LHCb Collaboration), JHEP **05**, 161 (2016). DOI:10.1007/JHEP05(2016)161.
- [8] R. Aaij and others (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **114**, 062004 (2015). DOI:10.1103/PhysRevLett.114.062004.
- [9] R. Aaij and others (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **121**(7), 072002 (2018). DOI:10.1103/PhysRevLett.121.072002.
- [10] S. Chatrchyan and others (CMS Collaboration), JINST **3**, 1 (2008) S08004. DOI:10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [11] S. Chatrchyan and others (CMS Collaboration), JINST **7**, 1 (2012) P10002. DOI:10.1088/1748-0221/7/10/P10002.
- [12] M. Tanabashi and others (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018). DOI:10.1103/PhysRevD.98.030001.
- [13] R. Aaij and others (LHCb Collaboration), Phys. Rev. D **99**(5), 052006 (2019). DOI:10.1103/PhysRevD.99.052006.

Поступила в редакцию 19 августа 2020 г.

После доработки 24 ноября 2020 г.

Принята к публикации 25 ноября 2020 г.

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