

УДК 539.1

## ОБНАРУЖЕНИЕ РАСПАДА $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

Н. К. Петров

*Данная работа посвящена обнаружению распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  на данных, набранных экспериментом CMS Большого адронного коллайдера в 2018 году в результате протон-протонных ( $pp$ ) столкновений при энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, что соответствует интегральной светимости  $60 \text{ fb}^{-1}$ . Было измерено отношение вероятностей распадов  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) \Lambda) = (8.26 \pm 0.90(\text{стат.}) \pm 0.68(\text{сист.}) \pm 0.11(\mathcal{B})) \times 10^{-2}$ , где первая погрешность статистическая, вторая – систематическая, а третья отражает погрешности в известных вероятностях распада  $\phi$  и  $\psi(2S)$  в восстановленные нами конечные состояния.*

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

1. *Введение.* Изучение различных распадов b-барионов, в том числе  $\Lambda_b^0$ , является важным направлением в современной физике высоких энергий. Подобные исследования могут помочь улучшить наше понимание сильных взаимодействий. Также распады  $\Lambda_b^0$ -барионов являются отличным источником экзотических состояний. Недавно коллаборация LHCb обнаружила 3 кандидата в пентакварки [1, 2]  $P_c(4312)^+$ ,  $P_c(4380)^+$  and  $P_c(4450)^+$  в инвариантной массе  $J/\psi p$  в распадах  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ . Поэтому дальнейшие исследования распадов  $\Lambda_b^0$ -барионов с чармонием в конечном состоянии представляют огромный интерес и могут помочь понять механизмы рождения экзотических многокварковых состояний.

Настоящая статья рассказывает об обнаружении распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  [3], а также об измерении отношения вероятностей распадов  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) \Lambda)$ . Частицы  $J/\psi$ ,  $\Lambda$ ,  $\phi$  и  $\psi(2S)$  были восстановлены в следующих конечных состояниях:  $\mu^+ \mu^-$ ,  $p \pi^-$ ,  $K^+ K^-$  и  $J/\psi \pi^+ \pi^-$  соответственно. Канал  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S) \Lambda$  был выбран как нормировочный по отношению к  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  благодаря совпадающей топологии распада.

---

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

Кроме того распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  является барионным аналогом распада  $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ , где в распределении по инвариантной массе  $J/\psi\phi$  сразу несколько экспериментов [4–7] обнаружили богатую резонансную структуру. Таким образом, изучаемый нами распад может предоставить возможность проверки и дальнейшего изучения найденных экзотических состояний после набора достаточного числа сигнальных событий. Также в распаде  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  можно исследовать инвариантную массу  $J/\psi\Lambda$ , где тоже возможно наличие экзотических многокварковых состояний.

2. *Отбор и восстановление событий.* Процессы реконструкции  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$  и  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$  кандидатов очень похожи между собой. Все начинается с восстановления треков пары мягких противоположно заряженных мюонов с  $p_T(\mu^\pm) > 4$  ГэВ и  $|\eta(\mu^\pm)| < 2.4$ . Димюон комбинируется с  $\Lambda$ -кандидатом, представляющим собой отлетевшую вершину и пару противоположно заряженных треков ( $p\pi^-$ ), выходящих из нее. После чего добавляется два трека с каонными массовыми гипотезами в случае основного канала и пионными – для нормировочного. Для восстановления итогового  $\Lambda_b^0$ -кандидата применяется кинематический фит треков всех вышеописанных частиц в общую вершину, с требованием совпадения массы димюона с известной массой  $J/\psi$  мезона из Particle Data Group (PDG) [8].

Для подавления комбинаторного фона используются следующие ограничения: вершина реконструированного  $\Lambda_b^0$ -кандидата должна иметь значимый отлет от вершины первичного  $pp$ -взаимодействия, а угол между направлением вылета и импульсом  $\Lambda_b^0$  быть близок к нулю. Для выделения  $\psi(2S)$  и  $\phi$  кандидатов требуется, чтобы инвариантные массы  $J/\psi\pi^+\pi^-$  и  $K^+K^-$  были близки к известным значениям из PDG.

3. *Получение результатов.* Для вычисления отношения вероятностей распадов используется формула (1):

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)} = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi) \epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) \mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda) \epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi) \mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+K^-)}, \quad (1)$$

где  $N(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi)$  и  $N(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$  – измеренные количества сигнальных событий для основного и нормировочного каналов,  $\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi)$  и  $\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$  обозначают полные эффективности соответствующих распадов, включая аксектенс детектора и эффективность реконструкции, а  $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)$  и  $\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+K^-)$  – известные вероятности распадов, взятые из PDG.

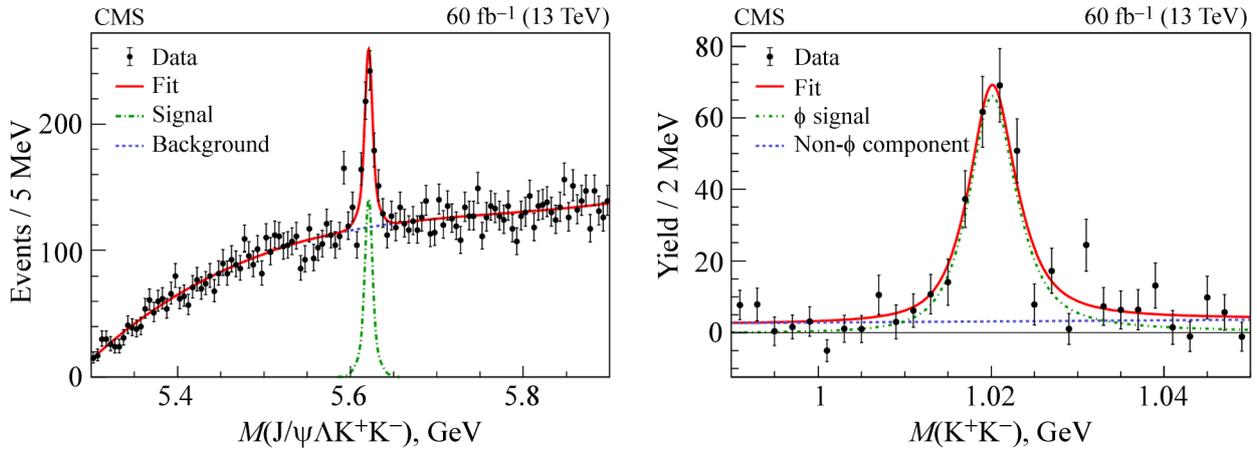


Рис. 1: Распределения по инвариантной массе  $J/\psi\Lambda K^+K^-$  (слева) и  $K^+K^-$  после вычитания фона (справа). Точки показывают данные, вертикальные линии являются статистическими погрешностями, а линии описывают результаты аппроксимации, описанной в тексте.

Используя процедуру отбора, описанную в секции 2, было получено распределение событий по инвариантной массе  $J/\psi\Lambda K^+K^-$ , представленное на рис. 1 (слева). Для описания этого распределения используется небинированная аппроксимация, включающая сигнальную и фоновую компоненты. Сигнальная компонента описана двойной функцией Гаусса с общим центральным значением. Форма сигнала зафиксирована из симуляции Монте-Карло (МС), в то время как центральное значение и нормировка остаются свободными параметрами аппроксимации. Фон параметризован полиномом Бернштейна на 3 степени со всеми свободными параметрами.

В результате аппроксимации было получено  $380 \pm 32$  сигнальных события. Локальная статистическая значимость сигнала превышает 9 стандартных отклонений с учетом вариаций фоновых и сигнальных моделей. Важно, однако, отметить, что приведенное число событий является количеством распадов  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda K^+K^-$ . Для того чтобы извлечь количество сигнальных событий  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda\phi$ , была использована техника *sPlot* [9], которая позволяет разделить сигнальную и фоновую компоненты статистически. Так для сигнальной компоненты было получено распределение  $M(K^+K^-)$  с вычтенными фоновыми событиями (рис. 1, справа). Для его описания использована свертка функций релятивистского Брейт-Вигнера и детекторного разрешения для  $\phi$ -компоненты, и полиномом первой степени для нерезонансного вклада. Разрешение описано двойной функцией Гаусса с общим средним, форма которой определена из МС

симуляции, а натуральная ширина  $\Gamma$  была зафиксирована равной табличному значению для  $\phi$ -резонанса из PDG. Из аппроксимации было получено истинное количество сигнальных событий  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  равное  $286 \pm 29$ .

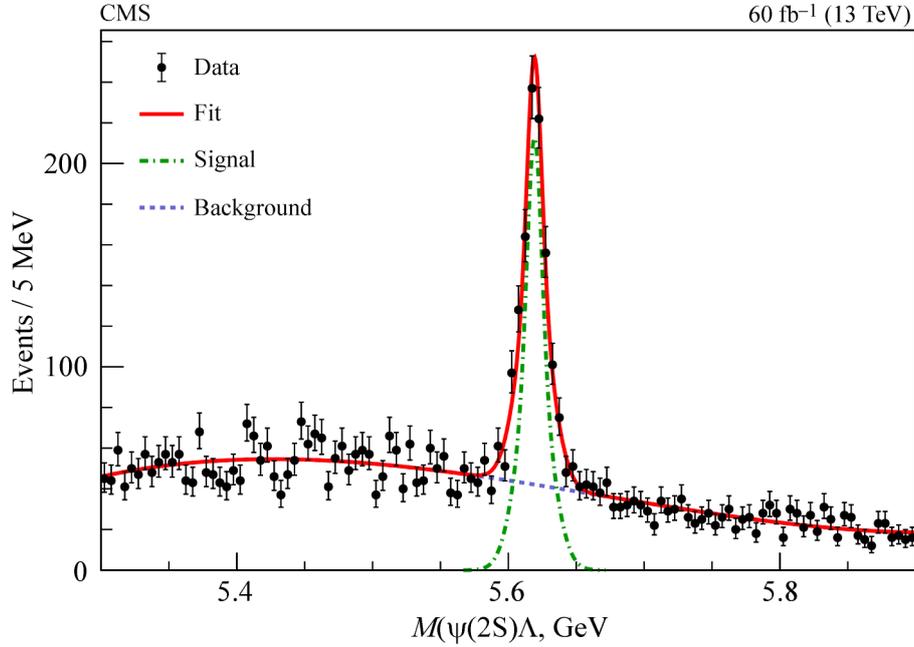


Рис. 2: Распределение по инвариантной массе  $\psi(2S)\Lambda$ -кандидатов. Точки показывают данные, линии описывают результаты аппроксимации, описанной в тексте.

Рис. 2 показывает распределение событий инвариантной массы  $\psi(2S)\Lambda$ . Сигнальная компонента  $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda$  моделируется двойной функцией Гаусса со свободным общим значением и нормировкой, в то время как его форма определена из симуляции. Фон описан полиномом Бернштейна 3 степени. В результате аппроксимации было получено  $884 \pm 37$  сигнальных события для нормировочного канала.

В процессе изучения MC симуляций было посчитано отношение эффективностей для основного и нормировочного каналов. Было получено значение  $\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)/\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi) = 0.363 \pm 0.011$ .

Одной из важных компонент вычисления отношения вероятностей распадов является оценка систематической погрешности. Она была получена в результате вариаций различных сигнальных и фоновых моделей. Вклад вносит также конечность размеров моделированного набора данных и некоторые различия между данными и симуляцией.

4. *Результаты и выводы.* Используя данные  $pp$ -столкновений, набранных в 2018 году в эксперименте CMS при энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ, что

соответствует интегральной светимости  $60 \text{ фб}^{-1}$ , был обнаружен распад  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  и измерено отношение вероятностей распадов  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi)/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$ . Отношение  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi)/\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda)$  равняется  $(8.26 \pm 0.90(\text{стат.}) \pm 0.68(\text{сист.}) \pm 0.11(\mathcal{B})) \times 10^{-2}$ , где первая погрешность статистическая, вторая – систематическая, а третья отражает погрешности известных вероятностей распадов  $\phi$  и  $\psi(2S)$  в восстановленные нами конечные состояния. Обнаружение распада  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda \phi$  открывает возможность дальнейших поисков экзотических состояний в массовых спектрах  $J/\psi \Lambda$  и  $J/\psi \phi$ .

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 072001 (2015).
- [2] R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 222001 (2019).
- [3] A. M. Sirunyan et al., Phys. Lett. B **802**, 135203 (2020).
- [4] T. Aaltonen et al., Mod. Phys. Lett. A **32**, 1750139 (2017).
- [5] S. Chatrchyan et al., Phys. Lett. B **734**, 261 (2014).
- [6] V. M. Abazov et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 232001 (2015).
- [7] R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 022003 (2017).
- [8] Particle Data Group, M. Tanabashi, et al., Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).
- [9] M. Pivk and F. R. Le Diberder, Nucl. Instrum. Meth. A **555**, 356 (2005).

Поступила в редакцию 19 августа 2020 г.

После доработки 27 ноября 2020 г.

Принята к публикации 28 ноября 2020 г.

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