

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.12

ИЗУЧЕНИЕ РАСПАДОВ B_s^0 МЕЗОНА В МНОГОЧАСТИЧНОЕ СОСТОЯНИЕ $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$

© 2021 г. Т. А. Овсянникова^а, *, И. М. Беляев^а, Д. Ю. Голубков^а^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: tatiana.ovsiannikova@cern.ch

Поступила в редакцию 19.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 14.01.2021 г.

Распады прелестных адронов в конечное состояние с чармонием являются уникальной системой для изучения свойств чармониев и подобных им состояний. Природа многих из этих состояний до сих пор не ясна, поэтому сравнение вероятностей между распадами прелестных мезонов в состоянии с новыми и известными чармониями, может помочь получить дополнительную информацию о механизмах рождения подобных частиц. В статье представлены результаты исследования распадов B_s^0 мезона в многочастичное состояние $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$. Результаты получены на основе анализа полного образца данных, набранных экспериментом LHCb в 2011–2018 гг. Приведены первые наблюдения нескольких распадов и измерены отношения парциальных ширин для этих распадов, а также прецизионное измерение массы B_s^0 мезона.

Ключевые слова: НЕР, b-физика, LHCb

DOI: 10.56304/S2079562920060433

1. ВВЕДЕНИЕ

Распады прелестных адронов в конечные состояния, содержащие c и анти- c кварки, представляют собой уникальную лабораторию для изучения свойств чармониев и чармониеподобных состояний. В таких распадах было обнаружено большое количество новых состояний, в том числе частица $\chi_{c1}(3872)$ [1], пентакварки [2, 3] и многочисленные кандидаты в тетракварки [4–6], а также обычные чармониевые состояния. Природа многих экзотических чармониеподобных кандидатов остается неясной. Сравнение парциальных ширин таких систем по сравнению с обычными состояниями чармония в распадах прелестных адронов может пролить свет на механизмы их образования.

Состояние $\chi_{c1}(3872)$ известно уже более 15 лет [1], однако до сих пор не удалось установить является ли это состояние тетракварком, $D^{*0} \bar{D}^{*0}$ молекулой или чармониевым состоянием.

Распад $B_s^0 \rightarrow (\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)(\phi \rightarrow K^+ K^-)$ недавно был обнаружен коллаборацией CMS [7], которая измерила отношение парциальных ширин распадов $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ и $B^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^0$. Оно оказалось совместимо с единицей в пределах ошибок и в два раза меньше, чем отношение пар-

циальных ширин распадов $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ и $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$.

В распаде B_s^0 мезона в конечное состояние $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ существует возможность исследовать спектр масс системы $J/\psi \phi$ мезонов. Не так давно четыре кандидата в тетракварк были обнаружены коллаборацией LHCb в амплитудном анализе распадов [6]. Эти состояния названы $\chi_{c1}(4140)$, $\chi_{c1}(4274)$, $\chi_{c0}(4500)$ и $\chi_{c0}(4700)$ [8]. В распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \phi$, масса $J/\psi \phi$ комбинации может быть исследована в диапазоне масс, который примерно на 300 МэВ/ c^2 выше допустимого кинематического предела распадов $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$.

В 2020 году коллаборация LHCb изучила распад B_s^0 мезона в многочастичное конечное состояние $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ [9] на данных эксперимента LHCb, набранных при энергии протон-протонных (pp) столкновений в системе центра масс 7, 8 и 13 ТэВ и соответствующих интегральной светимости порядка 9 фб⁻¹. Для выделения B_s^0 мезонов фон от случайных комбинаций вторичных заряженных частиц был подавлен с помощью критериев отбора, основанных на информации о кинематике распадающейся частицы, топологии продуктов распада и идентификации частиц. В анализе

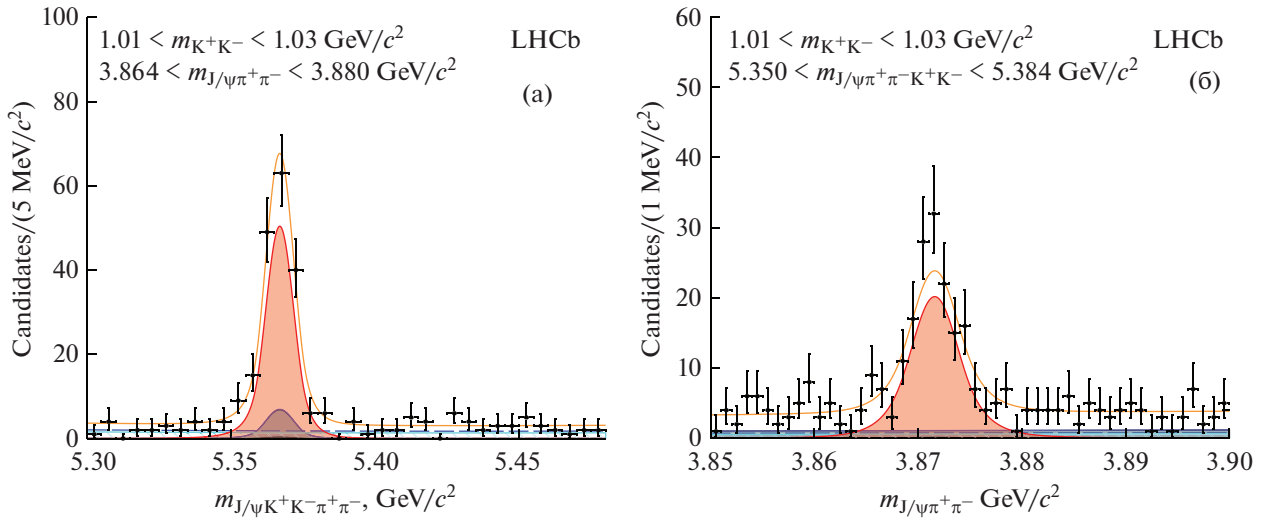


Рис. 1. Распределения по массе $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ комбинации (а), и $J/\psi \pi^+ \pi^-$ комбинации (б) для отобранных $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ кандидатов (точки с ошибками). Аппроксимация показана линиями, а также заполненными областями.

использовались события, принятые димьюнным триггером. После применения критериев отбора количество сигнальных событий B_s^0 мезонов составляет $(26.5 \pm 0.2) \cdot 10^3$, что впоследствии использовались для выделения различных промежуточных каналов распада.

2. РАСПАДЫ $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$

И $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+K^-$

Обнаружено 154 ± 15 событий для $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ канала, со статистической значимостью около 12 стандартных отклонений, при этом использовалась полная эксперимента LHCb. Сигналы для $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ канала и нормировочного $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$ канала выделены с помощью одновременной аппроксимации трехмерных распределений $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$, $J/\psi \pi^+ \pi^-$, $K^+ K^-$ в двух регионах по массе $J/\psi \pi^+ \pi^-$ соответствующих массам $\psi(2S)$ и $\chi_{c1}(3872)$ мезонов. Параметры состояния $\chi_{c1}(3872)$ была сконструированы с учетом недавно измеренных значений [7, 8]. На рис. 1 показаны проекции распределений инвариантной массы комбинаций $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ и $J/\psi \pi^+ \pi^-$ для канала $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$. С помощью полученных сигналов было измерено отношение парциальных ширины между $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$ и $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$ каналами.

Используя измеренные выходы сигналов и отношения эффективностей, было рассчитано отношение парциальных ширины:

$$\frac{B(B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi) \times B(\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)}{B(B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi) \times B(\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)} = (2.42 \pm 0.23 \text{ (стат.)} \pm 0.07 \text{ (сист.)}) \times 10^2.$$

Полученный результат согласуется с результатом коллаборации CMS [8], но имеет лучшую точность.

В анализе обнаружена не связанная с ϕ -мезоном компонента распада $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+K^-$. На рис. 2 показано распределение по инвариантной массе K^+K^- комбинации после вычитания комбинаторного фона, поправленное на отношение эффективностей. В распределении по инвариантной массе K^+K^- комбинации видны возможные вклады от $f_0(980)$, $f_2(1270)$, $f_0(1370)$ и $f_2(1370)$ мезонов. Для того, чтобы определить их точные парциальные ширины требуется полный амплитудный анализ, что находится за рамками результатов данной работы, в которой было определено отношение парциальных ширины для моды $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+K^-$, не включающей ϕ -резонанс, к моде $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$:

$$\frac{B(B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)(K^+K^-)_{\text{non-}\phi})}{B(B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi)} = 1.52 \pm 0.32 \text{ (стат.)} \pm 0.12 \text{ (сист.)}$$

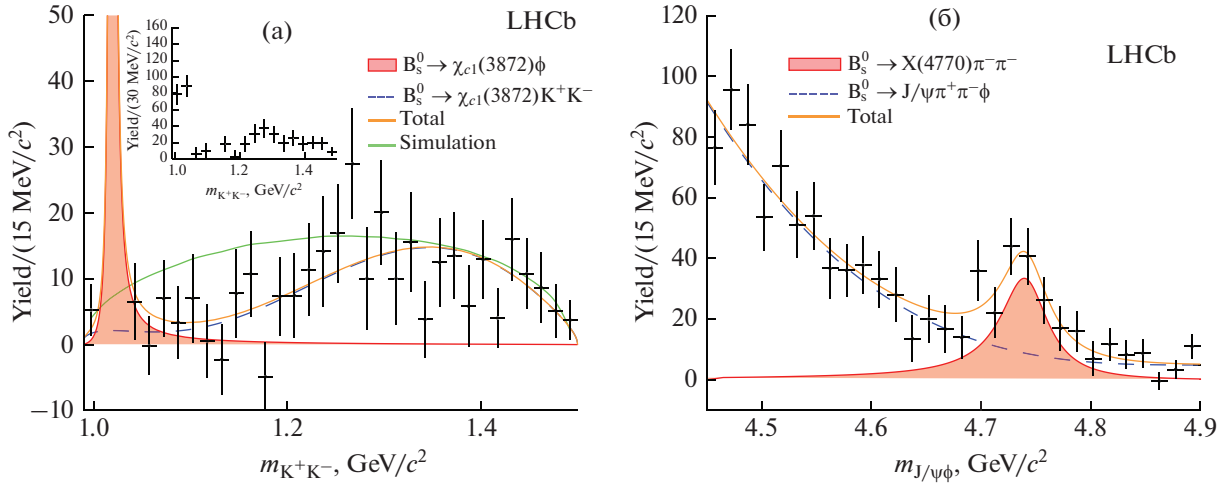


Рис. 2. (а) Поправленное на эффективность распределение по массе K^+K^- комбинации после вычитания фона для отобранных $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+K^-$ кандидатов (точки с ошибками). Толстая зеленая линия показывает результат математического моделирования, согласно фазовому объему. (б) Распределения по массе $J/\psi\phi$ комбинации после вычитания фона отобранных $B_s^0 \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\phi$ кандидатов (точки с ошибками). Аппроксимация показана цветом.

3. ОБНАРУЖЕНИЕ РАСПАДА $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} K^{*0}$

В анализе измерено отношение парциальных ширины для обнаруженного впервые канала $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} K^{*0}$ по отношению к $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$ кана-

лу. Сигнал выделен с помощью аппроксимации трехмерного распределения по инвариантным массам комбинаций $J/\psi K^+K^+\pi^-$, $K^+\pi^-$ и $K^-\pi^+$ и составил 5447 ± 125 (стат.) событий. Используя измеренные выходы сигналов и отношения эффективности, рассчитано отношение парциальных ширины:

$$\frac{B(B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} K^{*0}) \times B(K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-)^2}{B(B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi) \times B(\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-) \times B(\phi \rightarrow K^+K^-)} = 1.22 \pm 0.03 \text{ (стат.)} \pm 0.04 \text{ (сист.)}.$$

Исследование спектра $J/\psi\phi$ комбинации

Проведено исследование инвариантной массы $J/\psi\phi$, полученной в распадах $B_s^0 \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\phi$. На рис. 2 показан спектр инвариантной массы $J/\psi\phi$ после вычитания фона. В области масс 4.7 ГэВ/ c^2 обнаружена структура, которая не может быть ассоциирована с распадами $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$ и $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872)\phi$, так как области по массе $J/\psi\pi^+\pi^-$ соответствующие этим мезонам, то есть диапазоны $3.864 < m_{J/\psi\pi^+\pi^-} < 3.880$ ГэВ/ c^2 и $3.672 < m_{J/\psi\pi^+\pi^-} < 3.700$ ГэВ/ c^2 , исключены. Структура не видна и в более высоком диапазоне $1.060 < m_{K^+K^-} < 1.15$ ГэВ/ c^2 спектра K^+K^- массы. В распределении инвариантной массы комбинации $\phi\pi^+\pi^-$ обнаружено значительное отклонение от распределения величины по фазовому объему, что указывает на возможное присутствие возбуж-

денных ϕ -состояний. Распады $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi^*$ через промежуточные состояния $\phi(1680)$, $\phi(1850)$ или $\phi(2170)$ [10] были исследованы с помощью математического моделирования и было показано, что такие распады не формируют структуры в распределении по массе $J/\psi\phi$ комбинации. Отметим, что в данном анализе не учитывались сложные интерференционные эффекты, в то время как для понимания природы обнаруженной структуры, требуется полный амплитудный анализ. Параметры структуры определены с помощью подгонки распределения инвариантной массы $J/\psi\phi$ комбинации показанном на рис. 2б. Количество событий для структуры равно 175 ± 39 , что соответствует значимости сигнала больше 5 стандартных отклонений. Значения массы и ширины оказались равными: 4741 ± 6 (стат.) ± 6 (сист.) МэВ/ c^2 и 53 ± 15 (стат.) ± 11 (сист.) МэВ.

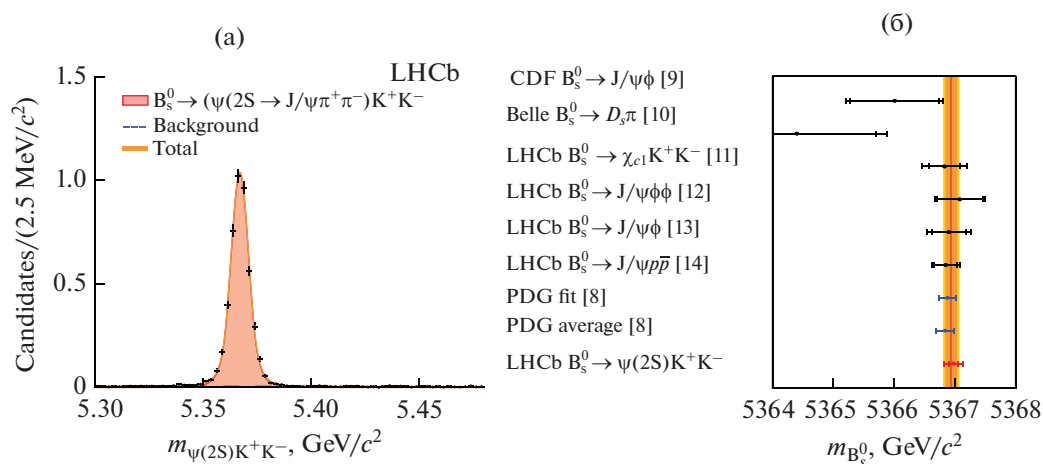


Рис. 3. (а) Распределения по инвариантной массе $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ комбинации отобранных $B_s^0 \rightarrow \psi(2S) K^+ K^-$ кандидатов (точки с ошибками). Подгонка показана цветом. (б) Сравнение измерений массы B_s^0 L-мезона. Внутренние ошибки представляют статистическую неопределенность, а внешние неопределенности соответствуют квадратичной сумме статистических и систематических погрешностей. Вертикальная полоса представляет собой среднее значение и погрешность измерений эксперимента LHCb.

После модернизации ускорительного комплекса “Большой адронный коллайдер” и набора новых данных, будет возможно проведение амплитудного анализа данного конечного состояния, это позволит измерить квантовые числа состояния и идентифицировать его природу и определить возможные связи с другими резонансами в системе $J/\psi \phi$, в частности, с тетракварковым кандидатом $\chi_{c0}(4700)$, обнаруженным в эксперименте LHCb ранее [6].

5. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ B_s^0 МЕЗОНА

Распады B_s^0 мезона в конечное состояние $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ проходят через промежуточные состояния с достаточно небольшим энерговыделением $\sim 500\text{--}700$ МэВ, например, обнаруженные $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} K^0$ и $B_s^0 \rightarrow \psi(2S) \phi$ каналы, что позволяет измерить массу B_s^0 мезона с хорошей точностью. В данной статье представлен результат измерения массы с помощью подгонки распределения в очень узком диапазоне по инвариантной массе системы $J/\psi \pi^+ \pi^-$: $3.679 < m_{J/\psi \pi^+ \pi^-} < 3.694$ ГэВ/ c^2 и диапазоне по инвариантной массе $K^+ K^-$ комбинации, соответствующему основной доле сигнала ϕ мезона $m_{K^+ K^-} < 1.060$ ГэВ/ c^2 . Такой диапазон масс позволяет использовать гипотезу о распадах через $\psi(2S)$ состояние для реконструкции инвариантной массы B_s^0 мезона, что существенно улучшает разрешение и уменьшает систематическую ошибку. На рис. 3а показан результат под-

гонки распределения инвариантной массы $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ комбинации. Измеренное значение составляет:

$$m_{B_s^0} = 5366.98 \pm 0.07 \text{ (стат.)} \pm 0.13 \text{ (сист.) МэВ}/c^2.$$

Доминирующий вклад в полную систематическую неопределенность вносит ошибка, связанная с неизвестной массовой шкалой эксперимента из-за неопределенности магнитного поля. Так же на рис. 3 показаны предыдущие измерения массы B_s^0 мезона. Видно, что новое измерение согласуется с предыдущими, но имеет лучшую точность.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования распадов B_s^0 мезона в многочастичное конечное состояние $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ на данных эксперимента LHCb, набранных при энергии протон–протонных (p–p) столкновений в системе центра масс 7, 8 и 13 ТэВ и соответствующих интегральной светимости порядка 9 фб $^{-1}$. Были измерены отношения парциальных ширин нескольких новых каналов. Проведено измерение массы B_s^0 мезона с рекордной точностью. Впервые обнаружен кандидат на новое состояние $X(4740)$ в спектре инвариантной массы $J/\psi \phi$ системы. Более подробно с результатами представленного анализа можно ознакомиться в работе [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Choi S.K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. P. 262001.
2. *Aaij R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 072001.
3. *Aaij R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 222001.
4. *Chilikin K. et al.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 074026.
5. *Aaij R. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 1019.
6. *Aaij R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 022003.
7. *Aaij R. et al.* // J. High Energy Phys. 2020. V. 2020 (8). P. 123.
8. *Pereima D.* // Search for New Decays of Beauty Particles at the LHCb Experiment. PhD Thesis. 2020. Moscow: NRC Kurch. Inst. CERN-THESIS-2020-204.
9. *Aaij R. et al.* // Phys. Lett. B. 2012. V. 708. P. 241.
10. *Sirunyan A.M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. P. 152001.
11. *Aaij R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2019. V. 122. P. 191804.

Study of B_s^0 Meson Decays to $J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ Final State

T. A. Ovsiannikova^{1, *}, I. M. Belyaev¹, and D. Yu. Golubkov¹

¹*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

**e-mail: tatiana.ovsiannikova@cern.ch*

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

The decays of $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ are studied using a data set corresponding to an integrated luminosity of 9 fb^{-1} collected by the LHCb experiment in proton–proton collisions between 2011 and 2018. The decays $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} \bar{K}^{*0}$ and $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872) K^+ K^-$ where the $K^+ K^-$ pair does not originate from the ϕ meson are observed for the first time. Precise measurements of the branching fraction ratios between $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} \bar{K}^{*0}$, $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872) \phi$, $B_s^0 \rightarrow \psi(2S) \phi$ and $B_s^0 \rightarrow \chi_{c1}(3872) K^+ K^-$ channels are reported. A structure denoted $X(4740)$ is observed in the $J/\psi \phi$ mass spectrum with a significance in excess of 5.3 standard deviation. In addition, the most precise measurement of the B_s^0 meson mass is made.

Keywords: HEP, b-physics, LHCb