

## СКАНИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ $e^+e^-$ -АННИГИЛЯЦИИ В КВАРКОНИИ И ЛЕГКИЕ АДРОНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ BELLE

*Р. В. Мизюк\**, *А. В. Нефедьев*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Представлены результаты измерения энергетической зависимости сечений  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2, 3$ ) и  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) от порогов до 11,02 ГэВ с использованием данных эксперимента Belle, набранных на  $e^+e^-$ -коллайдере КЕКВ. В сечениях обнаружены пики резонансов  $\Upsilon(10860)$  и  $\Upsilon(11020)$  без значимого вклада континуума. Найдено, что распады  $\Upsilon(11020) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  идут исключительно через промежуточные изовекторные состояния  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ .

We report on the energy scan of the cross sections  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2, 3$ ) and  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) from respective thresholds up to 11.02 GeV using data collected by the Belle experiment at the KEKB asymmetric energy  $e^+e^-$  collider. The cross sections exhibit clear  $\Upsilon(10860)$  and  $\Upsilon(11020)$  peaks without significant continuum contribution. The decays  $\Upsilon(11020) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  are found to proceed entirely via intermediate isovector states  $Z_b(10610)$  and  $Z_b(10650)$ .

PACS: 13.66.Bc

Квантовая хромодинамика предсказывает существование адронных состояний разного типа, одним из которых является кварконий — связанное состояние кварка и антикварка. В случае тяжелых кваркониев ( $c\bar{c}$  или  $b\bar{b}$ ) тяжелые кварки движутся относительно медленно, поэтому основные черты такой системы достаточно хорошо описываются в рамках нерелятивистских потенциальных кварковых моделей [1]. Первое состояние в спектре тяжелых кварков, свойства которого не описывались потенциальной кварковой моделью, было обнаружено в эксперименте Belle в 2003 г. [2]. На сегодняшний день количество таких состояний достигает уже двух десятков [3], причем все они лежат выше порога рождения открытого аромата.

Значительное количество экзотических кваркониеподобных состояний было обнаружено при сканировании сечений  $e^+e^-$ -аннигиляции в конеч-

---

\*E-mail: mizuk@lebedev.ru

ные состояния с обычным кварконием и легкими адронами. Так, в спектре чармония это  $Y(4008)$  и  $Y(4260)$ , обнаруженные в конечном состоянии  $J/\psi\pi^+\pi^-$  [4], затем  $Y(4360)$  и  $Y(4660)$  в конечном состоянии  $\psi(2S)\pi^+\pi^-$  [5],  $\psi(4040)$  и  $\psi(4160)$  в  $J/\psi\eta$  [6] и, возможно,  $Y(4220)$  в  $h_c\pi^+\pi^-$  [7]. Примечательно, что парциальные ширины соответствующих переходов существенно превышают оценки для распадов обычного кваркония [8], причем каждое из состояний  $Y$  или  $\psi$  распадается только по одному каналу с чармонием в конечном состоянии. Теоретическое обоснование такой «избирательности» является серьезным вызовом для феноменологии сильных взаимодействий. Например, в работе [9] предложена модель адрочармония — связанного состояния бесцветного чармония и легких адронов. Для подобной системы, действительно, вполне естественно распасться в основном на свои составляющие.

Измерение энергетической зависимости сечений  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2, 3$ ) и  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) в эксперименте Belle [10–12]

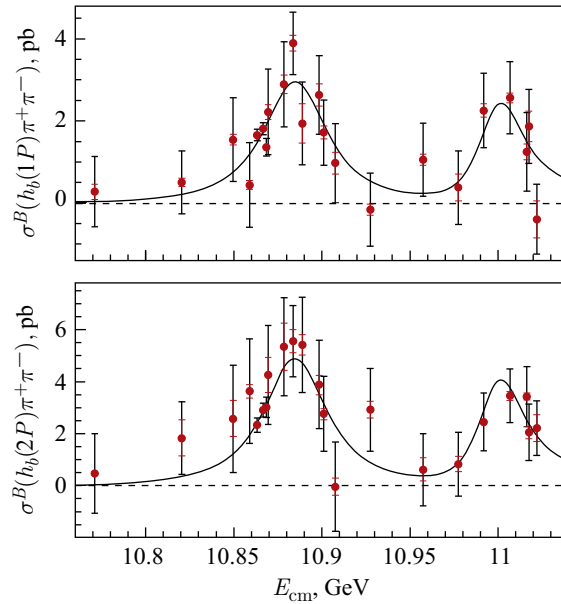


Рис. 1. Сечения процессов  $e^+e^- \rightarrow h_b(1P)\pi^+\pi^-$  и  $e^+e^- \rightarrow h_b(2P)\pi^+\pi^-$  в зависимости от энергии сталкивающихся пучков. Точками с ошибками показаны экспериментальные данные, причем внешние ошибки задают статистические неопределенности, а внутренние — некоррелированные систематические неопределенности. Сплошной кривой отмечен результат фитирования суммой амплитуд Брейта–Вигнера

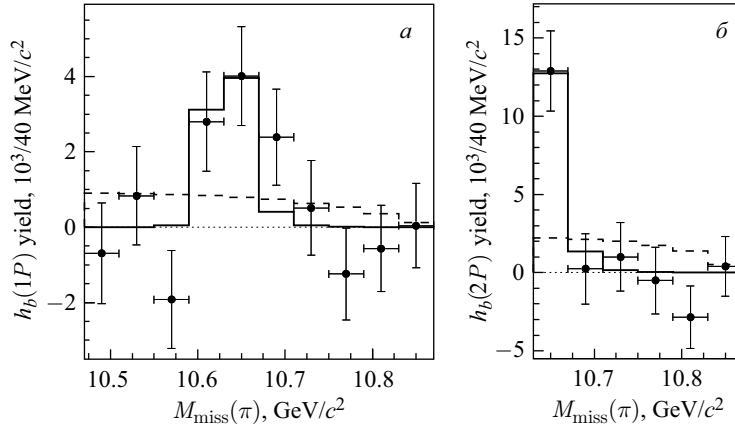


Рис. 2. Выход  $h_b(1P)\pi^+\pi^-$  (а) и  $h_b(2P)\pi^+\pi^-$  (б) в зависимости от  $M_{\text{miss}}(\pi^\pm) \equiv M[h_b(nP)\pi^\mp]$  для данных в области пика  $\Upsilon(11020)$ . Сплошная гистограмма — результат фитирования для гипотезы двух состояний  $Z_b$  с параметрами из работы [15], штриховая линия — результат фитирования фазовым объемом

показало, что в секторе боттомония ситуация иная: во всех сечениях видны пики резонансов  $\Upsilon(10860)$  и  $\Upsilon(11020)$ , причем без заметного вклада континуума (рис. 1). Причина столь драматического различия между чармониеподобными и боттомониеподобными состояниями пока не прояснена.

Ранее процессы  $e^+e^- \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$  ( $n = 1, 2$ ) наблюдались лишь при энергии вблизи пика резонанса  $\Upsilon(10860)$  [14]. При этом было обнаружено, что они идут исключительно через промежуточные изовекторные состояния  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ , расположенные вблизи порогов рождения  $B\bar{B}^*$  и  $B^*\bar{B}^*$  [15] и, по-видимому, имеющие соответствующую молекулярную структуру [16].

С использованием данных сканирования в области  $\Upsilon(11020)$  была изучена резонансная структура распада  $\Upsilon(11020) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$ , причем все события оказались сконцентрированы в узкой области, также отвечающей рождению промежуточных состояний  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$  [12] (рис. 2).

К сожалению, существующие данные не позволяют надежно установить соотношение между вероятностями рождения  $Z_b(10610)$  и  $Z_b(10650)$ . Так, гипотеза, что рождается только  $Z_b(10610)$ , исключена на уровне 3,3 стандартных отклонений, тогда как гипотеза, что рождается только  $Z_b(10650)$ , на значимом уровне не исключена.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 15-12-30014).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brambilla N. et al.* // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71. P. 1534.
2. *Choi S. K. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91. P. 262001.
3. *Olive K. A. et al. (Particle Data Group)* // *Chin. Phys. C.* 2014. V. 38. P. 090001.
4. *Lees J. P. et al. (BaBar Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2012. V. 86. P. 051102;  
*Liu Z. Q. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. P. 252002.
5. *Lees J. P. et al. (BaBar Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 111103;  
*Wang X. L. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 112007.
6. *Wang X. L. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2013. V. 87. P. 051101;  
*Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91. P. 112005.
7. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 242001;  
*Yuan C. Z.* // *Chin. Phys. C.* 2014. V. 38. P. 043001.
8. *Brambilla N. et al.* // *Eur. Phys. J. C.* 2014. V. 74. P. 2981.
9. *Dubynskiy S., Voloshin M. B.* // *Phys. Lett. B.* 2008. V. 666. P. 344.
10. *Chen K.-F. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2010. V. 82. P. 091106.
11. *Santel D. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93. P. 011101.
12. *Abdesselam A. et al. (Belle Collab.)*. arXiv:1508.06562 [hep-ex].
13. *Voloshin M. B.* // *Phys. Rev. D.* 2012. V. 85. P. 034024.
14. *Adachi I. et al. (Belle Collab.)* // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 032001.
15. *Bondar A. et al. (Belle Collab.)* // *Ibid.* P. 122001.
16. *Bondar A. et al.* // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 84. P. 054010.