

## ОЧАРОВАННЫЕ БАРИОНЫ В ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

*Е. И. Соловьева* \*

Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный, Россия

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва  
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

Представлена современная классификация очарованных барионов и обзор экспериментально наблюдаемых состояний очарованных барионов. Основное внимание уделено вкладу установок, набравших данные на электрон-позитронных ускорителях.

In this paper, we present the charmed baryon classification. A review of recent experimental results on charmed baryons with particular focus on the contribution of experiments that took data at electron–positron colliders is included as well.

PACS: 13.30.Eg; 14.20.Lq

Экспериментальное и теоретическое изучение слабых распадов очарованных барионов остается на шаг позади той же области для очарованных мезонов, где и экспериментальные данные, и теоретические модели более богаты. Тем не менее результаты, полученные в экспериментах Belle и BaBar, могут стимулировать развитие теоретических моделей, описывающих слабые распады очарованных барионов. Они также могут обеспечить схему для дальнейших исследований очарованных барионов на будущих суперфабриках.

Уровни экспериментально обнаруженных барионных состояний с  $C = 1$ , а также переходы между ними или в основные состояния графически отображены на рисунке.

Первые два состояния,  $\Lambda_c(2595)^+$  и  $\Lambda_c(2625)^+$ , хорошо изучены. На основании измеренных масс считается, что они являются орбитальными возбуждениями  $\Lambda_c^+$  с полным моментом легких кварков  $j = 1$ . В экспериментах

---

\*E-mail: lena@lebedev.ru

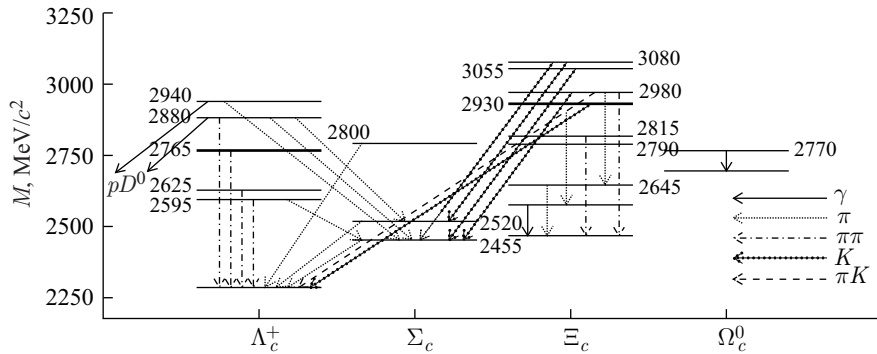


Диаграмма уровней известных состояний очарованных барионов и переходов между ними

ARGUS и CLEO обнаружена следующая закономерность: эти состояния распадаются на  $\Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-$ , но не на  $\Lambda_c^+ \pi^0$ , а значит, имеют изоспин 0 (являясь  $\Lambda_c$ ), а не 1 ( $\Sigma_c$ ) [1]. Состояниям были присвоены квантовые числа  $J^P = (1/2)^-$  и  $J^P = (3/2)^-$ .

Следующие два состояния,  $\Lambda_c(2765)^+$  и  $\Lambda_c(2880)^+$ , были обнаружены коллаборацией CLEO в канале  $\Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-$  [2]. Также оказалось, что  $\Lambda_c(2880)^+$  может распадаться и на  $\Sigma_c(2445)^{+,0} \pi^-$  [3]. Позже коллаборация BaBar объявила, что это состояние имеет и моду  $D^0 p$  [4], что было первым примером распада очарованного бариона на очарованный мезон и легкий барион\*. В этом же анализе впервые было обнаружено еще одно состояние, распадающееся на  $D^0 p$  —  $\Lambda_c(2940)^+$ . Поскольку при исследовании конечного состояния  $D^+ p$  не было найдено указаний на сигнал, был сделан вывод, что  $\Lambda_c(2880)^+$  и  $\Lambda_c(2940)^+$  действительно являются возбужденными состояниями  $\Lambda_c^+$ , а не  $\Sigma_c$ . В эксперименте Belle был проведен угловой анализ, результаты которого говорили в пользу квантового числа  $5/2$  для полного углового момента  $\Lambda_c(2880)^+$  [3]. Кроме того, измеренное отношение вероятностей распадов  $\mathcal{B}(\Lambda_c(2880)^+ \rightarrow \Sigma_c(2520)\pi^\pm) / \mathcal{B}(\Lambda_c(2880)^+ \rightarrow \Sigma_c(2455)\pi^\pm) = (0,225 \pm 0,062 \pm 0,025)$ , объединенное с теоретическими предсказаниями, основанными на симметрии тяжелых кварков [5], указывало на положительную четность.

Открытыми вопросами в семействе  $\Lambda_c^+$  остаются экспериментальное определение квантовых чисел для почти всех состояний, а также природа  $\Lambda_c(2765)^+$ -бариона: является ли он возбуждением  $\Sigma_c^+$  или  $\Lambda_c^+$ .

\*Обычно возбужденные очарованные барионы распадаются на очарованный барион и легкие мезоны.

Триплет  $\Sigma_c(2520)^{+,+,0}$ -барионов хорошо исследован. Так, коллаборация Belle точно измерила разности масс  $[\Delta M(\Sigma_c) = M(\Sigma_c) - M(\Lambda_c^+)]$  и ширины двухзарядных и нейтральных членов этого триплета со следующими результатами:  $\Delta M(\Sigma_c(2520)^{++}) = (231,99 \pm 0,10 \pm 0,02) \text{ МэВ}/c^2$  и  $\Gamma(\Sigma_c(2520)^{++}) = (14,77 \pm 0,25_{-0,30}^{+0,18}) \text{ МэВ}/c^2$ ,  $\Delta M(\Sigma_c(2520)^0) = (231,98 \pm 0,11 \pm 0,04) \text{ МэВ}/c^2$  и  $\Gamma(\Sigma_c(2520)^0) = (15,41 \pm 0,41_{-0,32}^{+0,20}) \text{ МэВ}/c^2$  [6].

Короткий список экспериментально наблюдаемых возбужденных  $\Sigma_c$ -барионов завершает триплет  $\Sigma_c(2800)$ , обнаруженный в эксперименте Belle [7]. Основываясь на измеренных массах и теоретических расчетах [8], можно в порядке рабочей гипотезы идентифицировать эти состояния как члены предсказанного  $3/2^-$ -триплета  $\Sigma_{c2}$ . При изучении резонансных структур в распадах  $B^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} \pi^-$  коллаборация BaBar нашла значительный сигнал в инвариантной массе комбинации  $\Lambda_c^+ \pi^-$  [9]. Его среднее значение превышало результат Belle более чем на  $3\sigma$ ; при этом ширины измерений Belle и BaBar в пределах ошибок согласовывались друг с другом.

Недавно список возбуждений  $\Xi_c$  обогатился несколькими состояниями с массами выше  $2900 \text{ МэВ}/c^2$ , которые распадаются на  $\Lambda_c^+ K^-$  и  $\Lambda_c^+ K^0 \pi^+ \pi^-$ . Некоторые из этих состояний наблюдались и Belle, и BaBar, и потому считаются достоверными ( $\Xi_c(2980)^+$  и  $\Xi_c(3080)^{+,0}$  [10, 11];  $\Xi_c(3055)^+$  [11, 12]). А все остальные состояния требуют подтверждения и более тщательного изучения. Таким является, например, обнаруженный в эксперименте BaBar  $\Xi_c(2930)^0$  (в конечном состоянии  $\Lambda_c^+ K^-$ ) [11].

Возбужденные дважды странные очарованные барионы  $\Omega_c^{*0}$  наблюдались коллаборациями BaBar [13] и Belle [14]. Измеренные в обоих экспериментах разности масс  $[\Delta M(\Omega_c^{*0}) = M(\Omega_c^{*0}) - M(\Omega_c^0)]$  и ширины согласуются друг с другом, а также с большинством теоретических предсказаний [15].

Подытоживая экспериментальный обзор, следует сказать, что интересной особенностью, открытой коллаборациями Belle и BaBar, является возможность переходов между семействами  $\Xi_c$  и  $\Lambda_c$ , а также распады высоких возбуждений  $\Lambda_c^+$  на очарованный мезон и протон.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (контракты 16-32-60134 и 15-32-20810).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Albrecht H. et al. (CLEO Collab.)*. Observation of a New Charmed Baryon // *Phys. Lett. B*. 1993. V. 317. P. 227;  
*Edwards K. W. et al. (ARGUS Collab.)*. Observation of Excited Baryon States Decaying to  $\Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-$  // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 74. P. 3331;  
*Albrecht H. et al. (CLEO Collab.)*. Evidence for  $\Lambda_c(2593)^+$  Production // *Phys. Lett. B*. 1997. V. 402. P. 207.

2. *Artuso M. et al. (CLEO Collab.)*. Observation of New States Decaying into  $\Lambda_c^+ \pi^- \pi^+$  // *Phys. Rev. Lett.* 2001. V. 86. P. 4479.
3. *Mizuk R. et al. (Belle Collab.)*. Experimental Constraints on the Spin and Parity of the  $\Lambda_c(2880)^+$  // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. P. 262001.
4. *Aubert B. et al. (BaBar Collab.)*. Observation of a Charmed Baryon Decaying to  $D^0 p$  at a Mass near  $2.94 \text{ GeV}/c^2$  // *Ibid.* P. 012001.
5. *Isgur N., Wise B.* Spectroscopy with Heavy-Quark Symmetry // *Phys. Rev. Lett.* 1991. V. 66. P. 1130;  
*Cheng H.-Y., Chua C.-K.* Strong Decays of Charmed Baryons in Heavy Hadron Chiral Perturbation Theory // *Phys. Rev. D.* 2007. V. 75. P. 014006.
6. *Lee S.-H. et al. (Belle Collab.)*. Measurements of the Masses and Widths of the  $\Sigma_c(2455)^{0/++}$  and  $\Sigma_c(2520)^{0/++}$  Baryons // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 091102 (RC).
7. *Mizuk R. et al. (Belle Collab.)*. Observation of an Isotriplet of Excited Charmed Baryons Decaying to  $\Lambda_c \pi$  // *Phys. Rev. Lett.* 2005. V. 94. P. 122002.
8. *Copley L., Isgur N., Karl G.* Charmed Baryons in a Quark Model with Hyperfine Interactions // *Phys. Rev. D.* 1979. V. 20. P. 768;  
*Pirjol D., Yan T.-M.* Predictions for  $s$ -Wave and  $p$ -Wave Heavy Baryons from Sum Rules and the Constituent Quark Model: Strong Interactions // *Phys. Rev. D.* 1997. V. 56. P. 5483.
9. *Aubert B. et al. (BaBar Collab.)*. Measurements of  $\mathcal{B}(\overline{B}^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-)$  and  $\mathcal{B}(B^- \rightarrow \Lambda_c^+ p \pi^-)$  and Studies of  $\Lambda_c^+ \pi^-$  Resonances // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 78. P. 112003.
10. *Chistov R. et al. (Belle Collab.)*. Observation of New States Decaying into  $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$  and  $\Lambda_c^+ K_S^0 \pi^-$  // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. P. 162001.
11. *Aubert B. et al. (BaBar Collab.)*. A Study of Excited Charm-Strange Baryons with Evidence for New Baryons  $\Xi_c(3055)^+$  and  $\Xi_c(3123)^+$  // *Phys. Rev. D.* 2008. V. 77. P. 012002.
12. *Kato Y. et al. (Belle Collab.)*. Search for Doubly Charmed Baryons and Study of Charmed Strange Baryons at Belle // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 052003.
13. *Aubert B. et al. (BaBar Collab.)*. Observation of an Excited Charm Baryon  $\Omega_c^*$  Decaying to  $\Omega_c^0 \gamma$  // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. P. 232001.
14. *Solovieva E. et al. (Belle Collab.)*. Study of  $\Omega_c^0$  and  $\Omega_c^{*0}$  Baryons at Belle // *Phys. Lett. B.* 2009. V. 672. P. 1.
15. *Roncaglia B., Lichtenberg B., Predazzi E.* Predicting the Masses of Baryons Containing One or Two Heavy Quarks // *Phys. Rev. D.* 1995. V. 52. P. 1722;  
*Rosner L.* Charmed Baryons with  $J = 3/2$  // *Ibid.* P. 6461;  
*Savage J.* Charmed Baryon Masses in Chiral Perturbation Theory // *Phys. Lett. B.* 1995. V. 359. P. 189;  
*Lichtenberg B., Roncaglia R., Predazzi E.* Mass Sum Rules for Heavy-Flavored Hadrons // *Phys. Rev. D.* 1996. V. 53. P. 6678;  
*Jenkins E.* Heavy Baryon Masses in the  $1/m_Q$  and  $1/N_c$  Expansions // *Ibid.* V. 54. P. 4515;

*Glozman Y., Riska D.* The Charm and Bottom Hyperons in a Chiral Quark Model // Nucl. Phys. A. 1996. V. 603. P. 326;

*Zalewska A., Zalewski K.* Heavy Baryon Masses. hep-ph/9608240;

*Burakovsky L., Goldman T., Horwitz L.* New Quadratic Baryon Mass Relations // Phys. Rev. D. 1997. V. 56. P. 7124;

*Mathur N., Lewis R., Woloshyn M.* Charmed and Bottom Baryons from Lattice Non-relativistic QCD // Phys. Rev. D. 2002. V. 66. P. 014502.