

Определение эффективности инклюзивного восстановления чармония в распадах В-мезонов с помощью моделирования сигнала методом Монте-Карло

И. Лилиенберг

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация

В работе представлен метод измерения относительной вероятности процессов распада В-мезонов в состояния с чармонием и каоном. Произведено изучение сигнала от данного распада, полученного с помощью моделирования методом Монте-Карло. Выполнена оценка эффективности инклюзивного восстановления чармония в спектре недостающей массы к каону. Рассчитано число событий, ожидаемое на данных на статистике эксперимента Belle в области $\Upsilon(4S)$ -резонанса.

Введение

Наряду с обычным чармонием, представляющим собой связанное состояние $c\bar{c}$, в настоящее время известны так называемые экзотические чармониеподобные состояния, такие как $X(3872)$, $X(3940)$, $Y(4260)$, $Z^+(4430)$ и другие. Наиболее известным и хорошо изученным из них является $X(3872)$, хотя его природа также остаётся неизвестной.

Молекулярной моделью [1] предсказывается доминирование распада $X(3872) \rightarrow D^0 D^{*0}$, тогда как в гибридной интерпретации [2] данный процесс подавлен. Однако на текущий момент относительная вероятность распада $X(3872)$ в два D-мезона, так же, как и в другие моды, не измерена. Установлен верхний предел на 90%-м уровне достоверности: $\mathcal{B}(X(3872) \rightarrow D^0 D^{*0}) \geq 24\%$ [3]. Известны отношения вероятностей распада $X(3872)$ в ряд состояний, а также величины вида $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X(3872)K^+) \times \mathcal{B}(X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) = (8.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-6}$ [3]. Таким образом, для измерения относительных вероятностей распадов $X(3872)$ в наблюдаемые моды необходимо определить $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X(3872)K^+)$.

Работа по измерению $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+)$ была проделана в эксперименте BaBar [4] в 2006 году, в 2016 году был представлен обновлённый анализ на всей статистике эксперимента, составляющей 424 фб⁻¹ [5]. В данном исследовании изучался спектр импульсов каонов из распада $B^+ \rightarrow X(3872)K^+$ в системе покоя В-мезона. Коллаборацией BaBar был обнаружен ряд пиков, отвечающих состояниям чармония и D-мезонам, однако значимый сигнал от $X(3872)$ не был получен. Относительная вероятность распада $B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+$, найденная в эксперименте BaBar, составила $(1.4 \pm 1.5) \cdot 10^{-4}$. Таким образом, вопрос о величине вероятностей распада $X(3872)$ в наблюдаемые каналы в настоящее время остаётся открытым.

Анализ сигнала от процессов $B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+$

Процессы $B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+$ изучаются также в эксперименте Belle на асимметричном электрон-позитронном коллайдере КЕКВ. Детектор Belle состоит из кремниевого вершинного детектора, цилиндрической дрейфовой камеры, аэрогелевых черенковских счётчиков, времяпролётной системы, электромагнитного калориметра и системы регистрации мюонов и долгоживущих нейтральных каонов. Подробное описание детектора Belle изложено в работе [6].

Энергия и импульс электронного и позитронного пучков подобраны так, что их энергия в системе отсчёта центра масс соответствует массе $\Upsilon(4S)$ резонанса: $E_{cm_s} = 10.58$ ГэВ. Статистика

эксперимента Belle на данной энергии составляет 711 фб^{-1} . $\Upsilon(4S)$ практически всегда распадается в пару $B\bar{B}$. Это позволяет рассчитать энергию и величину импульсов В-мезонов, зная только энергию пучков, что важно для измерения $\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X(3872)K^+)$.

$X(3872)$ восстанавливается инклюзивно, вне зависимости от канала его распада. Это означает невозможность непосредственного восстановления сигнального В-мезона B_{sig} . Поэтому необходимо восстановить второй, тагирующий В-мезон в событии, обозначаемый B_{tag} . Реконструкция изначально производилась в 10 каналах распада B_{tag} , $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+\pi^0$, $B^+ \rightarrow D^-\pi^+\pi^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\pi^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\pi^+\pi^0$, $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$, $B^+ \rightarrow J/\psi K^+\pi^0$, $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+\pi^-\pi^-$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*-}\pi^+\pi^+$, при дальнейшем анализе два канала $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+\pi^0$ и $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\pi^+\pi^0$ были исключены. 4-импульс B_{sig} может быть найден следующим образом:

$$E_{sig} = E_{cms} - E_{tag}.$$

$$\vec{p}_{sig} = -\vec{p}_{tag}.$$

Также восстанавливается K^+ из распада B_{sig} . После чего строится распределение по недостающей массе к каону:

$$M_{recoil} = \frac{1}{c} \sqrt{(p_{sig} - p_K)^2}.$$

Различным состояниям чармония соответствуют пики в спектре M_{recoil} с вершинами в массах, соответствующих массам чармониевых состояний. Из числа событий в пиках вероятность процесса $B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+$ находится как

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow X_{c\bar{c}}K^+) = \frac{N_X}{N_{full}\varepsilon\mathcal{B}}, \quad (1)$$

где N_X — число событий в пике, N_{full} — полная статистика эксперимента Belle в области $\Upsilon(4S)$ резонанса, ε — эффективность восстановления чармония в недостающей массе, \mathcal{B} — сумма относительных вероятностей распада B_{tag} и его дочерних частиц в восстанавливаемые моды распада.

Эффективность восстановления чармония определялась с помощью моделирования методом Монте-Карло. Кинематика сигнальных процессов моделировалась в программе EvtGen [7]. B_{tag} распадался только в 10 изначально восстанавливаемых каналов, B_{sig} — только в состояния с каоном и одним из состояний чармония: η_c , J/ψ , χ_{c0} , $\eta_c(2S)$, $X(3872)$. Моды распада дочерних частиц В-мезонов не зафиксированы. Отклик детектора на прохождение через него долгоживущих частиц моделируется программой GEANT [8]. Долгоживущие частицы восстанавливаются тем же программным обеспечением, что и реальные данные эксперимента Belle.

Для изучения результатов моделирования применяются те же критерии отбора, что и при анализе реальных данных. Для долгоживущих заряженных частиц требовалось, чтобы их треки начинались от точки взаимодействия пучков на расстоянии не более 2 см в направлении, перпендикулярном оси детектора, и не более 5 см в направлении вдоль оси пучка. Также накладывалось требование на вероятность идентификации каонов $P(K/\pi) > 0.6$. π^0 -мезоны восстанавливались в распаде $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ с условием $E_\gamma > 50$ МэВ. Также требовалось, чтобы инвариантная масса системы двух фотонов отличалась от массы π^0 не более чем на $12 \text{ МэВ}/c^2$. K_s -мезон восстанавливался в распаде $K_s \rightarrow \pi^+\pi^-$ с наложением условия на инвариантную массу двух пионов $|M_{\pi\pi} - M_{K^0}| < 15 \text{ МэВ}/c^2$. Для D-мезонов требовалось попадание инвариантной массы их дочерних частиц в диапазон $\pm 15 \text{ МэВ}/c^2$ от значения M_D из [3]. Для распада $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^+\pi^-$ диапазон был сужен до $\pm 10 \text{ МэВ}/c^2$. D^* -мезоны отбирались с массовым окном $3 \text{ МэВ}/c^2$ от табличного значения. Для всех короткоживущих частиц осуществлялась подгонка 4-импульсов табличными значениями масс.

Для подавления континуального фона $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ использовалось значение второго момента Фокса — Вольфрама R_2 [9]. Отбирались только те события, в которых $R_2 < 0.5$. Также применялись ограничения на углы θ_1 и θ_2 , где θ_1 — угол между импульсом каона и осью B_{tag} в системе центра масс, θ_2 — угол между импульсом каона и осью остатка (всех частиц, кроме B_{tag} и K) в системе покоя остатка. (Осью системы называется ось, сумма проекций импульсов частиц системы на которую максимальна.) Кроме того, в каждом событии отбирался только один В-мезон, обладающий минимальным значением χ^2 в данном событии.

B_{tag} отбирается с помощью переменных $|\Delta E| = |E_B - \frac{M_{\Upsilon(4S)}c^2}{2}|$ и $M_{bc} = \sqrt{\left(\frac{M_{\Upsilon(4S)}}{2}\right)^2 - \frac{p_B^2}{c^2}}$. В различных каналах восстановления B_{tag} величина сигнальной области по $|\Delta E|$ менялась от 15 МэВ в распаде $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+\pi^-\pi^-$ до 30 МэВ в каналах $B^+ \rightarrow \bar{D}^0\pi^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^{*0}\pi^+$, $B^+ \rightarrow J/\psi K^+\pi^0$. На

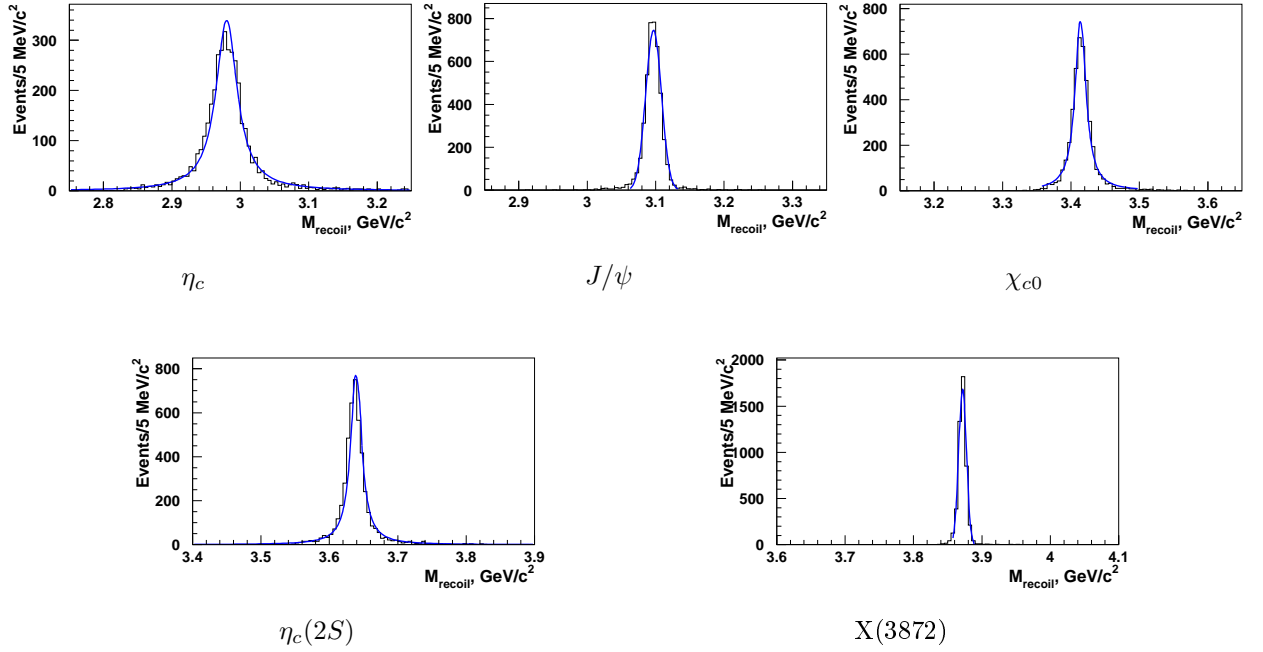


Рис. 1: Распределение по недостающей массе в пяти каналах распада сигнального В-мезона.

Таблица 1: Количество восстановленных событий в пике N_{MC} , ширина пика, эффективность восстановления и ожидаемое на данных число событий N_{data} для пяти сгенерированных состояний.

$X_{c\bar{c}}$	N_{MC}^{full}	f_{fit}	N_{MC}	$\Gamma(\sigma)$, МэВ	ε , %	N_{data}
η_c	895000	BW	4033	37.7	4.2	158
J/ψ	930000	G	4269	10.5	4.0	155
χ_{c0}	930000	BW	4360	17.8	4.1	24
$\eta_c(2S)$	1000000	BW	4815	19.7	4.2	55
$X(3872)$	860000	G	4781	5.5	4.8	25...84

M_{bc} было установлено требование $|M_{bc} - 5.2795 \text{ ГэВ}/c^2| < 0.0080 \text{ ГэВ}/c^2$. Для подавления фона от быстрых каонов не из распада B_{sig} требуется, чтобы инвариантная масса каона из B_{sig} и любого пиона из остатка была не ближе 10 МэВ/ c^2 к табличной массе D^0 -мезона.

Результаты моделирования представлены на рис. 1. На гистограммах отображены только события с истинным B_{tag} и К из B_{sig} . Для состояний J/ψ и $X(3872)$ пик аппроксимируется функцией Гаусса (G), для остальных состояний — распределением Брейта — Вигнера (BW). Число событий, ширина пиков, эффективность восстановления и ожидаемое количество сигнальных событий на данных представлены в табл. 1.

Эффективность восстановления чармония находится как

$$\varepsilon = N_{MC}^{full} \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow 8 \text{ channels}) \times \mathcal{B}(D^{(*)} \rightarrow \dots)}{\mathcal{B}(B \rightarrow 10 \text{ channels})},$$

где N_{MC}^{full} — количество сгенерированных событий в каждом из каналов распада B_{sig} , $\mathcal{B}(B \rightarrow 8 \text{ channels})$, $\mathcal{B}(B \rightarrow 10 \text{ channels})$, $\mathcal{B}(D^{(*)} \rightarrow \dots)$ — соответственно сумма относительных вероятностей распада B_{tag} в 8 итоговых каналах, распада B_{tag} в 10 изначально рассматриваемых каналов, распада дочерних частиц B_{tag} в восстанавливаемые моды распада. Ожидаемое на данных количество сигнальных событий рассчитывается по формуле (1). Верхняя граница на число событий в пике, отвечающем $X(3872)$, получена из суммирования нижних пределов на все моды распада

данной частицы, кроме $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ [10].

Заключение

В данной работе произведено изучение смоделированных методом Монте-Карло сигналов от состояний чармония в недостающей массе к каону в распадах заряженных В-мезонов. Рассчитана эффективность восстановления чармония, оценено ожидаемое число событий на данных эксперимента Belle в области $\Upsilon(4S)$ резонанса. Полученная оценка важна для анализа физических данных с целью непосредственного определения относительной вероятности распада заряженного В-мезона в $X(3872)$ и каон.

Список литературы

- [1] N. A. Tornqvist, Phys. Lett. B **590**, 209 (2004).
- [2] F. E. Close and S. Godfrey, Phys. Lett. B **574**, 210 (2003).
- [3] C. Patrignani *et al* (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **40**, 100001 (2016).
- [4] B. Aubert *et al.* [BaBar Collaboration], Phys. Rev. Lett. **96**, 052002 (2006)
- [5] E. Fioravanti, TALK-16/058, CHARM 2016
- [6] A. Abashian *et al.* (Belle Collaboration), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **479** (2002) 117–232.
- [7] D. J. Lange, Nucl. Instrum. Meth. A **462**, 152 (2001)
- [8] R. Brun *et al.*, CERN-DD-78-2-REV
- [9] G. C. Fox and S. Wolfram, Phys. Rev. Lett. **41**, 1581 (1978)
- [10] C.-Z. Yuan arXiv:0910.3138 [hep-ex] (2009)