

УДК 539.1

ИЗУЧЕНИЕ МЕЗОНОВ $B_{s2}^*(5840)^0$ И $B_{s1}(5830)^0$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

С. М. Поликарпов

С использованием данных, набранных экспериментальной установкой CMS на Большом адронном коллайдере в столкновениях протонов с энергией в системе центра масс 8 ТэВ, изучены возбуждённые P -волновые состояния B_s^0 мезона $B_{s2}^*(5840)^0$ и $B_{s1}(5830)^0$. Впервые обнаружен распад $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_s^0$, получено первое свидетельство существования распада $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_s^0$, измерены вероятности этих распадов по отношению к соответствующим распадам на $B^{(*)+} K^-$. Основные состояния B^0 и B^+ восстановлены с использованием распадов $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ и $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$. Измерены массы P -волновых B_s^0 мезонов, естественная ширина $B_{s2}^*(5840)^0$ мезона, и впервые определена разность масс между заряженным и нейтральным B^* мезонами $M(B^{*0}) - M(B^{*+})$.

Ключевые слова: спектроскопия, тяжёлые адроны, ЛНС.

Введение. Поиск и исследование тяжёлых адронов и их возбуждённых состояний, а также изучение их свойств (масс, ширин, квантовых чисел и каналов распадов) является важной задачей экспериментальной физики частиц. Новые результаты в этой области необходимы для проверки кварковой модели и применимости разных теоретических подходов к описанию частиц, содержащих тяжёлые кварки. Данная работа описывает исследование P -волновых состояний B_s^0 мезона, проведённое в эксперименте CMS автором этой статьи.

Отбор событий. Восстановление кандидатов начинается с поиска двух мюонов противоположного заряда, образующих J/ψ -кандидат, который затем комбинируется с одним или двумя треками, формируя, соответственно, $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ или $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ кандидат. Для подавления фона требуется, чтобы восстановленное положение вершины распада B кандидата было удалено от первичной вершины, а измеренный импульс был

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: spolikar@cern.ch.

параллелен направлению из первичной вершины в реконструированную вершину распада B кандидата. На рис. 1 приведены распределения инвариантных масс $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ и $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ кандидатов. В случае распада $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ \pi^-$ есть вероятность, что при реконструкции пион и каон будут перепутаны ($K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$), этот эффект изучается с использованием моделирования. В модель аппроксимации распределения инвариантной массы включается компонента с фиксированной формой, учитывающая возможность такого перепутывания, и измеренная доля $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$ в сигнальном диапазоне B^0 составляет около 19%.

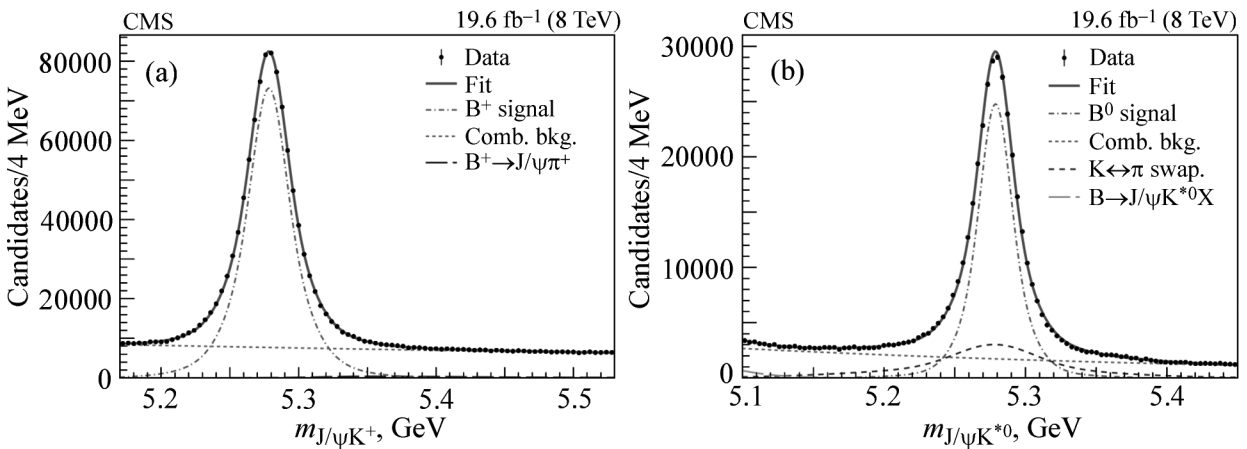


Рис. 1: Распределения инвариантной массы $J/\psi K^+$ (a) и $J/\psi K^+ \pi^-$ (b) кандидатов [2]. Ширина интервала по массе $J/\psi K^+$ ($J/\psi K^+ \pi^-$) составляет 4 (3.5) МэВ.

Для образования $B^+ K^-$ кандидатов дополнительный каон отбирается из треков, образующих первичную вершину, а для формирования $B^0 K_S^0$ кандидатов отбирается кандидат $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ с вершиной распада, значительно удалённой от области столкновений.

В работе использованы 9 наборов данных моделирования, в которых сгенерированы распады P -волновых B_S^0 мезонов на $B^{(*)+} K^-$, $B^{(*)0} K_S^0$, а также распады P -волновых B^0 мезонов на $B^{(*)+} \pi^-$ для изучения вкладов этих распадов в исследуемое распределение массы $B^+ K^-$.

Исследование инвариантных масс BK . На рис. 2 представлены полученные распределения инвариантных масс отобранных BK кандидатов. Как получено в моделировании, в распределение массы $B^+ K^-$ дают вклад распады возбуждённых B^0 мезонов $B_2^* \rightarrow B^+ \pi^-$, $B_2^* \rightarrow B^{*+} \pi^-$ и $B_1 \rightarrow B^{*+} \pi^-$. Формы этих вкладов определены из моделирования, а величины – из данных. Из моделирования также вычислены разрешения

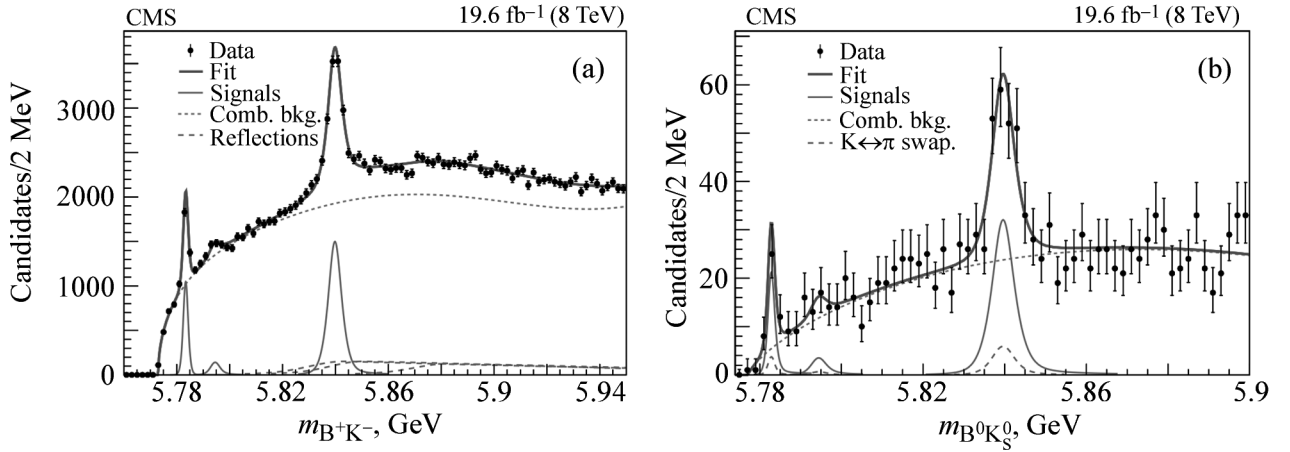


Рис. 2: Распределения инвариантной массы V^+K^- (a) и $V^0K_s^0$ (b) кандидатов [2]. Точки показывают данные, толстая кривая – полная функция аппроксимации, тонкие линии – вклады сигналов, а фон показан пунктирной линией. Длиннопунктирные кривые иллюстрируют: в (a) вклады от распадов $B_{1,2}^{(*)} \rightarrow V^{(*)+}\pi^-$, в (b) вклад $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$ компоненты. Ширина интервала по массам V^+K^- и $V^0K_s^0$ составляет 2 МэВ.

по инвариантной массе V^+K^- . Функция, описывающая распределения инвариантной массы V^+K^- , состоит из гладкой кривой для описания фона, трёх вкладов от распадов возбуждённых V^0 мезонов и трёх сигнальных вкладов (релятивистских функций Брейта–Вигнера, свёрнутых с функциями разрешения), соответствующих распадам $B_{s2}^* \rightarrow V^+K^-$, $B_{s2}^* \rightarrow V^{*+}K^-$ и $B_{s1} \rightarrow V^{*+}K^-$. Измерены количества событий в трёх сигналах, $\Gamma(B_{s2}^*)$ и разности масс; полученные значения представлены в табл. 1. Распределение инвариантной массы отобранных $V^0K_s^0$ кандидатов, показанное на рис. 2(b), аппроксимируется суммой гладкой функции для описания фона, трёх сигнальных компонент, описывающих вклады распадов $B_{s2}^* \rightarrow V^0K_s^0$, $B_{s2}^* \rightarrow V^{*0}K_s^0$ и $B_{s1} \rightarrow V^{*0}K_s^0$, и трёх вкладов от $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$ (их формы получены в моделировании, а количества событий фиксированы по отношению к сигналам). Статистические значимости сигналов $B_{s2}^* \rightarrow V^0K_s^0$ и $B_{s1} \rightarrow V^{*0}K_s^0$ составляют, соответственно, 6.3σ и 3.6σ , что свидетельствует о первом обнаружении распада $B_{s2}^* \rightarrow V^0K_s^0$ и первом свидетельстве распада $B_{s1} \rightarrow V^{*0}K_s^0$. Результаты аппроксимации представлены в табл. 1.

С использованием полученных разностей масс, измеряются также разности

$$M(B^0) - M(B^+) = \Delta M_{B_{s2}^*}^\pm - \Delta M_{B_{s2}^*}^0 + M(K^-) - M(K_s^0)$$

и

$$M(B^{*0}) - M(B^{*+}) = \Delta M_{B_{s1}}^{\pm} - \Delta M_{B_{s1}}^0 + M(K^-) - M(K_S^0),$$

где

$$\begin{aligned} \Delta M_{B_{s2}}^{\pm} &= M(B_{s2}^*) - M(B^+) - M(K^-), & \Delta M_{B_{s1}}^{\pm} &= M(B_{s1}) - M(B^{*+}) - M(K^-), \\ \Delta M_{B_{s2}}^0 &= M(B_{s2}^*) - M(B^0) - M(K_S^0), & \Delta M_{B_{s1}}^0 &= M(B_{s1}) - M(B^{*0}) - M(K_S^0). \end{aligned}$$

Т а б л и ц а 1

Результаты аппроксимации распределений m_{BK} : количества сигнальных событий (N), естественные ширины (Γ) и разности масс

	B^+K^-	$B^0K_S^0$
$N(B_{s2}^* \rightarrow BK)$	5424 ± 269	128 ± 22
$N(B_{s2}^* \rightarrow B^*K)$	455 ± 119	12 ± 11
$N(B_{s1} \rightarrow B^*K)$	1329 ± 83	34.5 ± 8.3
$\Gamma(B_{s2}^*), \text{ МэВ}$	1.52 ± 0.34	2.1 ± 1.3
$\Gamma(B_{s1}), \text{ МэВ}$	0.10 ± 0.15	0.4 ± 0.4
$M(B_{s2}^*) - M(B) - M(K), \text{ МэВ}$	66.926 ± 0.093	62.42 ± 0.48
$M(B_{s1}) - M(B^*) - M(K), \text{ МэВ}$	10.495 ± 0.089	5.65 ± 0.23

Эффективности, систематические погрешности. В работе измеряются отношения вероятностей $R_2^{0\pm}$, $R_1^{0\pm}$, R_{2*}^{\pm} , R_{2*}^0 , R_{σ}^{\pm} и R_{σ}^0 :

$$\begin{aligned} R_2^{0\pm} &= \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)}, & R_1^{0\pm} &= \frac{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0}K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+}K^-)}, \\ R_{2*}^{\pm} &= \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*+}K^-)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)}, & R_{2*}^0 &= \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*0}K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)}, \\ R_{\sigma}^{\pm} &= \frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1}X) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+}K^-)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^*X) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)}, \\ R_{\sigma}^0 &= \frac{\sigma(pp \rightarrow B_{s1}X) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0}K_S^0)}{\sigma(pp \rightarrow B_{s2}^*X) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)}. \end{aligned}$$

Они вычисляются как отношения соответствующих чисел событий в данных, скорректированные на отношение эффективностей (ϵ), а для $R_2^{0\pm}$ и $R_1^{0\pm}$ также и на вероятности промежуточных распадов. Например, отношение $R_2^{0\pm}$ вычисляется по формуле

$$R_2^{0\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)} = \frac{N(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)}{N(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)} \times \frac{\epsilon(B_{s2}^* \rightarrow B^+K^-)}{\epsilon(B_{s2}^* \rightarrow B^0K_S^0)} \times$$

$$\times \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0})\mathcal{B}(K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-)\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)}.$$

Систематические погрешности измеренных отношений вероятностей распадов, естественной ширины B_{s2}^* мезона и разностей масс связаны: с выбором моделей аппроксимации распределений; погрешностями эффективности реконструкции треков, погрешностями в разрешениях по инвариантной массе и доле $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$; возможным вкладом не резонансного распада $B^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$ (не через $K^*(892)^0$); возможными ошибками в юстировке детектора; числом событий в моделировании; и сдвигом между сгенерированной и реконструированной массами, обнаруженным в моделировании. Полученные систематические погрешности составляют до 20% для отношений вероятностей распадов, до 0.1 МэВ для разностей масс и 0.3 МэВ для $\Gamma(B_{s2}^*)$.

Результаты. Впервые обнаружен распад $B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0$ и получено первое свидетельство распада $B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0$. Измерены отношения вероятностей распадов [2]

$$R_2^{0\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.432 \pm 0.077 (\text{стат.}) \pm 0.075 (\text{сист.}) \pm 0.021 (\text{PDG}),$$

$$R_1^{0\pm} = \frac{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)} = 0.49 \pm 0.12 (\text{стат.}) \pm 0.07 (\text{сист.}) \pm 0.02 (\text{PDG}),$$

$$R_{2*}^\pm = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*+} K^-)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.081 \pm 0.021 (\text{стат.}) \pm 0.015 (\text{сист.}),$$

$$R_{2*}^0 = \frac{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)} = 0.093 \pm 0.086 (\text{стат.}) \pm 0.014 (\text{сист.}),$$

где третьи погрешности связаны с погрешностями табличных вероятностей распадов [1].

Также измерены произведения сечений рождения на вероятности распадов [2]

$$R_\sigma^\pm = \frac{\sigma(\text{pp} \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)}{\sigma(\text{pp} \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)} = 0.233 \pm 0.019 (\text{стат.}) \pm 0.018 (\text{сист.}),$$

$$R_\sigma^0 = \frac{\sigma(\text{pp} \rightarrow B_{s1} \dots) \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0)}{\sigma(\text{pp} \rightarrow B_{s2}^* \dots) \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)} = 0.266 \pm 0.079 (\text{стат.}) \pm 0.063 (\text{сист.}).$$

Измеренные разности масс составляют [2]

$$\Delta M_{B_{s2}^*}^\pm = M(B_{s2}^*) - M(B^+) - M(K^-) = (66.87 \pm 0.09 (\text{стат.}) \pm 0.07 (\text{сист.})) \text{ МэВ},$$

$$\Delta M_{B_{s2}^*}^0 = M(B_{s2}^*) - M(B^0) - M(K_S^0) = (62.37 \pm 0.48 (\text{стат.}) \pm 0.07 (\text{сист.})) \text{ МэВ},$$

$$\Delta M_{B_{s1}}^\pm = M(B_{s1}) - M(B^{*+}) - M(K^-) = (10.45 \pm 0.09 (\text{стат.}) \pm 0.06 (\text{сист.})) \text{ МэВ},$$

$$\Delta M_{B_{s1}}^0 = M(B_{s1}) - M(B^{*0}) - M(K_S^0) = (5.61 \pm 0.23 (\text{стат.}) \pm 0.06 (\text{сист.})) \text{ МэВ}.$$

Используя эти измерения, определены разности масс между заряженными и нейтральными B -мезонами [2]:

$$M(B^0) - M(B^+) = 0.566 \pm 0.487 \text{ (стат.)} \pm 0.098 \text{ (сист.)} \pm 0.020 \text{ (PDG)} \text{ МэВ,}$$

$$M(B^{*0}) - M(B^{*+}) = 0.906 \pm 0.242 \text{ (стат.)} \pm 0.085 \text{ (сист.)} \pm 0.020 \text{ (PDG)} \text{ МэВ.}$$

Разность масс $M(B^{*0}) - M(B^{*+})$ измерена впервые, и в данной работе представлен новый метод измерения этих разностей масс. Наконец, измерена естественная ширина B_{s2}^* мезона: $\Gamma(B_{s2}^*) = 1.52 \pm 0.34 \text{ (стат.)} \pm 0.30 \text{ (сист.)} \text{ МэВ}$ [2].

Полученные разности масс $\Delta M_{B_{s2}^*}^\pm$ и $\Delta M_{B_{s1}^*}^\pm$, отношения $R_{2^*}^\pm$ и R_σ^\pm и естественная ширина $\Gamma(B_{s2}^*)$ находятся в согласии с предыдущими экспериментальными результатами коллабораций LHCb [3] и CDF [4].

Результаты работы демонстрируют возможность проводить исследования спектроскопии прелестных адронов на установке CMS, изначально не оптимизированной для исследований в этой области. Впервые исследованные распады P -волновых B_s^0 мезонов на $B^0 K_s^0$ обогащают экспериментальные знания об этих частицах. Измеренные значения естественной ширины, масс и разностей масс (включая новые измерения) позволят уточнить табличные значения свойств частиц и настроить новые теоретические модели.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Patrignani and Particle Data Group 2016, Chin. Phys. C **40**, 10 (2016): 100001, doi: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [2] A. Sirunyan et al. (CMS Collaboration), Eur. Phys. J. C **78**, 11 (2018): 939, doi: 10.1140/epjc/s10052-018-6390-z.
- [3] R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. **110**, 15 (2013): 151803, doi: 10.1103/PhysRevLett.110.151803.
- [4] R. Aaij et al. (CDF Collaboration), Phys. Rev. D **90**, 1 (2014): 012013.

Поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.

После доработки 16 апреля 2020 г.

Принята к публикации 17 апреля 2020 г.

Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики-2019 (ФИАН, Москва).