

## РЕДКИЕ РАСПАДЫ В-МЕЗОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

С. М. Поликарпов<sup>1,2</sup>

*Изучение редких распадов тяжёлых адронов позволяет проводить чувствительные проверки предсказаний Стандартной Модели. В данной работе представлены новые измерения распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  в эксперименте CMS, выполненные с использованием данных, набранных в столкновениях протонов с энергией 13 ТэВ, и соответствующие интегральной светимости  $140 \text{ фбн}^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** эксперименты на ускорителях, физика тяжёлых кварков, физика ароматов, редкие распады, результаты БАК, CMS.

*Введение.* В экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (БАК) ATLAS [1], CMS [2], и LHCb [3] активно ищут проявления физики вне Стандартной Модели (СМ), используя как прямые, так и непрямые подходы. Наиболее чувствительные непрямые поиски ведутся путём исследования редких и запрещённых распадов тяжёлых мезонов и барионов, где вклады от процессов Новой Физики (НФ) могут иметь значительную амплитуду, по сравнению с небольшой амплитудой этих распадов в СМ. Отдельным типом редких процессов являются переходы с нейтральным током, меняющим аромат (Flavor-changing neutral current, FCNC), которые проходят через фейнмановские диаграммы с электрослабыми петлями (т. н. пингвинные диаграммы). Частицы НФ, в том числе, тяжёлые, могут давать вклад в эти петли, что будет проявляться в отличающихся от предсказаний СМ характеристиках распадов.

В последние несколько лет был обнаружен ряд отклонений от предсказаний СМ в FCNC процессах с кварковым переходом  $b \rightarrow sl^+l^-$ . В частности, многие эксперименты провели анализ угловых распределений распада  $B^0 \rightarrow K^*(892)^0\mu^+\mu^-$ : BaBar, CDF, LHCb, Belle, ATLAS, CMS. Наиболее точное измерение выполнено коллаборацией LHCb [4]. Помимо этого выполнены также измерения дифференциального брэнчинга и углового анализа распада  $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$  [5, 6], где обнаружены отличия от предсказаний СМ на уровне  $3.6\sigma$ . В распаде  $B^+ \rightarrow K^{*+}\mu^+\mu^-$  [7] один из параметров также

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sergey.polikarpov@cern.ch.

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

отличается на  $\sim 3\sigma$  от предсказаний. Стоит отметить, что во всех этих распадах важную роль играют теоретические неопределённости, связанные с описанием адронизации кварков в лёгкие мезоны.

В случае распадов  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  таких погрешностей в теоретических предсказаниях нет, так как частицы конечного состояния – два лептона. Однако эти распады очень подавлены: предсказанные значения брэнчингов составляют около  $3.7 \times 10^{-9}$  ( $1 \times 10^{-10}$ ) для  $B_s^0(B^0)$ , что затрудняет точное экспериментальное измерение их вероятностей.

Первое обнаружение распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  было представлено в 2014 г. в результате комбинации данных коллабораций CMS и LHCb [8]. Летом 2020 г. была представлена комбинация обновлённых измерений коллабораций CMS, ATLAS и LHCb, где было обнаружено небольшое ( $2\sigma$ ) отклонение от предсказаний СМ. Недавно коллаборация LHCb представила результат, полученный с использованием данных первых двух запусков БАК [9].

В данной работе описан результат, полученный с использованием данных второго запуска БАК в эксперименте CMS [10, 11] в 2016–2018 г.г. Вероятность распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  измеряется с использованием нормировочного канала  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$  по формуле

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = \mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi K^+) \times \frac{N(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)}{N(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)} \frac{\epsilon_{B^+ \rightarrow J/\psi K^+} f_s}{\epsilon_{B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-} f_u},$$

где  $N$  и  $\epsilon$  означают количество восстановленных событий и полную эффективность реконструкции, соответственно, а  $f_s/f_u$  – отношение долей рождения  $B_s^0$  и  $B^+$  мезонов в столкновениях протонов. Для  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  используется похожая формула, но без множителя  $f_s/f_u$ , т.к. считается, что доли рождения  $B^+$  и  $B^0$  мезонов совпадают.

*Отбор событий, источники фона.* Эксперимент CMS (Компактный Мюонный Соленоид) [2] является одним из четырёх больших экспериментальных установок на БАК. Ключевыми элементами установки являются трековая система, электромагнитный и адронный калориметры, заключённые внутри сверхпроводящего магнита, и мюонные камеры, через которые проходит возвратное ярмо магнита. Система сбора данных включает в себя аппаратный триггер первого уровня, уменьшающий частоту событий с  $\sim 40$  МГц до  $\sim 100$  кГц с использованием информации из калориметра и мюонных камер, и программируемый триггер высокого уровня, на котором выполняется предварительная реконструкция события, после которого частота записываемых событий составляет  $\sim 1$ – $1.5$  кГц.

Кандидаты в сигнальные распады образуются путём реконструкции двух мюонов с  $p_T > 4$  ГэВ,  $|\eta| < 1.4$  и их кинематического фита в общую вершину с качеством аппроксимации вершины  $P_{\text{vtx}} > 2.5\%$ . Требуется, чтобы эта вершина была удалена от области столкновений протонов на расстояние  $d$ , превышающее 6 погрешностей  $d$ . Основные источники фона включают: (1) комбинации двух мюонов, рождённых в распадах двух различных долгоживущих частиц; (2) частично восстановленные полулептонные распады; (3) адронные распады  $B$ -мезонов, где адроны реконструированы, как мюоны. Для подавления (3) используется многопараметрический классификатор ( $MVA_\mu$ ), обученный отличать реальные мюоны от адронных треков и пионов или каонов, распавшихся по полулептонному каналу с участием мюона ( $K^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ ,  $K^+ \rightarrow \pi^0\mu^+\nu_\mu$ ,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ ) с использованием информации из трековой и мюонной систем эксперимента CMS. Производительность этого  $MVA_\mu$  калибруется на данных с использованием распадов  $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  и  $\phi \rightarrow K^+K^-$ . После применения этого  $MVA_\mu$  вклад адронных распадов  $B$ -мезонов становится пренебрежимо малым. Для подавления фона от (1) и (2) разработан отдельный классификатор  $MVA_B$ , в котором использованы переменные, описывающие характерную топологию исследуемого процесса  $pp \rightarrow B_s^0 \dots \rightarrow \mu^+\mu^- \dots$  с димюонной вершиной, удалённой от области  $pp$ -столкновений, и импульсом димюона, сонаправленным вектору отлёта (от вершины  $pp$  до вершины распада). В качестве нормировочного процесса используется распад  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ . Этот распад также использован для исследования разности между данными и моделированием, и коррекции моделирования.

*Измерение характеристик сигналов.* Для увеличения чувствительности анализа данные разбиты на 16 категорий на основе периода набора данных, значения  $MVA_B$  и значения псевдобыстроты. Эти 16 диапазонов характеризуются разным разрешением по массе и разным уровнем фона. В каждом из них распределение инвариантной массы  $\mu^+\mu^-$  аппроксимируется аналитической функцией, включающей сигналы  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ , комбинаторный фон, а также вклады полулептонных распадов  $B \rightarrow h\mu\nu$  и  $B \rightarrow \mu\mu h$  и адронных распадов. Вклады двух последних источников (как формы, так и количества событий) определены с использованием моделирования. Сигналы описаны с учётом разрешения по массе  $\mu^+\mu^-$  в каждом событии, которое откалибровано с использованием сигналов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Полученные распределения, суммированные по периодам набора данных и диапазонам псевдобыстроты, представлены на рис. 1 вместе с проекцией результатов аппроксимации. Обнаруженная (ожидаемая) значимость сигнала  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  составляет 12.5 (13.1) стандартных отклонений. Значимого сигнала  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  не обнаружено.

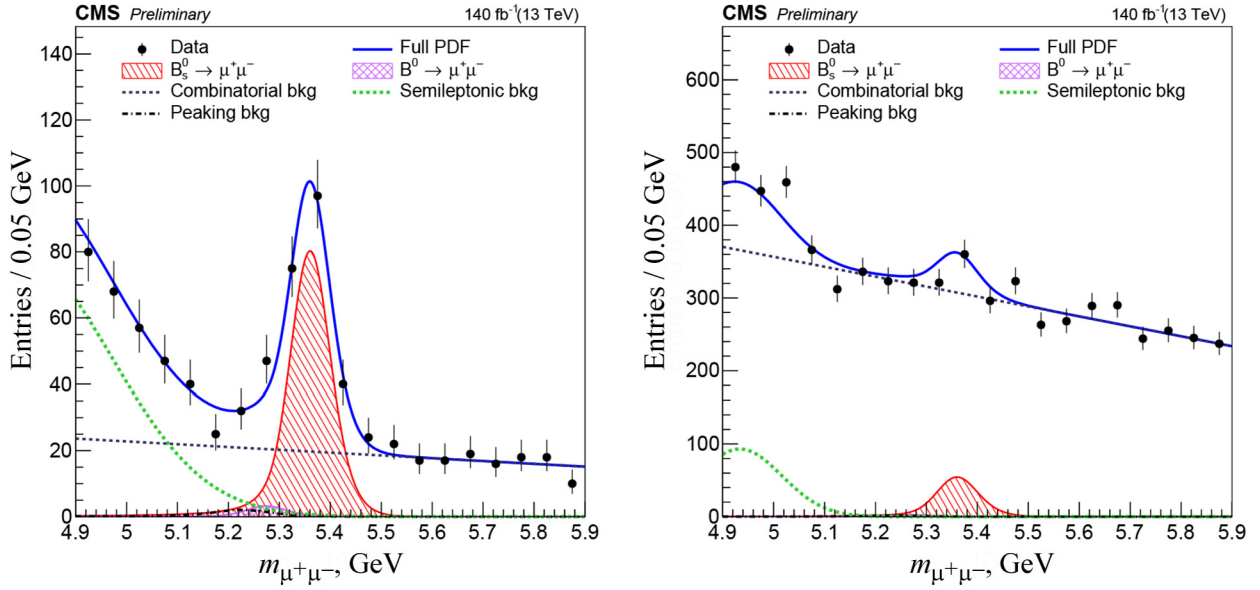


Рис. 1: Полученные распределения по массе  $\mu^+\mu^-$  для  $MVA_B > 0.99$  (слева) и  $0.90 < MVA_B < 0.99$  (справа) [10, 11].

*Систематические погрешности.* При измерении брэнчинга распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  учитывается ряд систематических погрешностей. Ведущими являются погрешности, связанные с коррекцией моделирования из-за различия данных и моделирования, обнаруженного в контрольном распаде  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ ; погрешность триггерной эффективности и эффективности восстановления дополнительного каона. Первые две из них получены с использованием большого количества сигнала в нормировочном распаде  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ , а погрешность реконструкции каона оценена с использованием распадов очарованных мезонов в 3- и 5-частичные каналы распада. Также учтены погрешности, связанные с формами сигналов и фона в сигнальном и нормировочном каналах, вероятностью нормировочного распада и погрешностью аппроксимации, которая оценена с помощью псевдоэкспериментов. Суммарная систематическая погрешность в измеряемой вероятности распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  составляет около 5%.

*Результаты.* Полученные значения вероятности  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  и  $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  составляют [10, 11]

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = [3.83_{-0.36}^{+0.38} (\text{стат.})_{-0.16}^{+0.19} (\text{сист.})_{-0.13}^{+0.14} (f_s/f_u)] \times 10^{-9},$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = [0.37_{-0.67}^{+0.75} (\text{стат.})_{-0.09}^{+0.08} (\text{сист.})] \times 10^{-10},$$

где первые погрешности – статистические, вторые – систематические, а третья по-

грешность в  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$  связана с использованием внешнего измерения  $f_s/f_u = 0.231 \pm 0.008$ . Отношение долей рождения  $B_s^0$  и  $B^+$  мезонов в столкновениях протонов  $f_s/f_u$  получено с использованием результатов работы коллаборации LHCb [12], где это отношение измерено в зависимости от поперечного импульса. Погрешность, связанную с этим отношением, можно будет уменьшить в будущем, если коллаборация CMS проведёт точное измерение  $f_s/f_u$  в своём кинематическом диапазоне.

Измерение  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$  является самым точным на данный момент и хорошо согласуется с предсказанием СМ. Верхний предел на вероятность димюонного распада  $B^0$ -мезона составляет  $1.9 \times 10^{-10}$  на уровне достоверности 95%. После того, как эксперимент ATLAS опубликует свой результат с использованием всех данных второго запуска БАК, планируется усреднить результаты всех трёх экспериментов: CMS, ATLAS и LHCb. Так как статистическая погрешность в описанном измерении – ведущая, обработка новых данных с третьего запуска БАК (2022–2024 г.г.) позволит улучшить точность измерения вероятности  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и достичь чувствительности на уровне 3-4 стандартных отклонений для распада  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

Работа была выполнена при поддержке программы “Приоритет 2030” НИЯУ МИФИ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] The ATLAS Collaboration, JINST **3**, S08003 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08003.
- [2] The CMS Collaboration, JINST **3**, S08004 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [3] The LHCb Collaboration, JINST **3**, S08005 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08005.
- [4] The LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett. **125**, 011802 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.011802.
- [5] The LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett. **127**, 151801 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.151801.
- [6] The LHCb Collaboration, JHEP **11**, 043 (2021). DOI: 10.1007/JHEP11(2021)043.
- [7] The LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett. **126**, 161802 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.161802.
- [8] CMS and LHCb Collaborations, Nature **522**, 68 (2015). DOI: 10.1038/nature14474.

- [9] The LHCb Collaboration, Phys. Rev. D **105**, 012010 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.105.012010.
- [10] The CMS Collaboration, Preliminary result CMS-PAS-BPH-21-006.
- [11] The CMS Collaboration, arXiv:2212.10311, submitted to Physics Letters B.
- [12] The LHCb Collaboration, Phys. Rev. D. **104**, 032005 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.032005.

Поступила в редакцию 13 декабря 2022 г.

После доработки 3 февраля 2023 г.

Принята к публикации 6 февраля 2023 г.

*Публикуется по рекомендации оргкомитета Московской международной школы физики 2022 (<http://mosphys.ru>)*