

УДК 539.126.4

## ИЗУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ $D_s^+$ МЕЗОНОВ НА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

Я. А. Андреев<sup>1</sup>, К. М. Иванов<sup>1</sup>, Р. Н. Чистов<sup>1,2</sup>

*Данная работа посвящена поиску источников рождения  $D_s^+$  мезонов в эксперименте CMS. Работа была проведена с использованием образца данных, набранного в CMS в 2018 году в протон-протонных столкновениях на Большом Адронном Коллайдере при энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ (соответствует интегральной светимости  $60 \text{ фб}^{-1}$ ). Были исследованы  $D_s^+$  мезоны, рождающиеся в первичной вершине  $pp$  взаимодействия, и  $D_s^+$  мезоны, рождающиеся из полуплеетонных распадов  $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)+} \mu^- \bar{\nu}_\mu$ . Было найдено, что оба источника в сумме дают более 3.5 миллионов  $D_s^+$  мезонов, восстановленных в канале  $D_s^+ \rightarrow \phi (\rightarrow K^+ K^-) \pi^+$ . Такой образец данных открывает возможность для поиска редких распадов  $D_s^+$  мезонов, в частности, для поиска тяжелого стерильного нейтрино в распаде  $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \mu^+ \pi^-$ .*

**Ключевые слова:** CMS, физика элементарных частиц,  $b$ -физика,  $c$ -физика.

*Введение.* Как известно, Стандартная модель, которая является основной теоретической моделью для описания процессов в физике элементарных частиц, неполна. Существует ряд явлений, которые не описываются ею, например: нейтринные осцилляции, темная материя, барионная асимметрия во Вселенной.

Исследование редких и запрещенных распадов является одним из основных способов проверки Стандартной модели и поиска Новой физики. К таким распадам относятся процессы с нарушением лептонного числа, лептонного аромата, а также процессы, идущие через нейтральный ток, меняющий аромат. Отдельно стоит отметить процессы, происходящие с участием гипотетических тяжелых стерильных нейтрино – частиц, взаимодействующих только с обычными нейтрино путем осцилляций. Согласно пред-

<sup>1</sup> МФТИ, Физтех, 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: andreev.yaa@phystech.edu.

сказаниям теоретических моделей [1, 2], существование стерильных нейтрино может объяснить многие процессы, которые сейчас не описаны Стандартной моделью, и поэтому их поиск является актуальной проблемой. Многие из вышеуказанных процессов можно изучать в распадах  $D$  и  $D_s^\pm$  мезонов, и такие исследования проводились экспериментами LHCb [3], BaBar [4], CLEO [5] и другими.

Мы считаем, что исследование таких процессов возможно и в эксперименте CMS. Выяснению перспектив этого как раз и посвящена данная работа, а именно исследованию источников  $D_s^+$  мезонов в наборе данных, набранном в конце второго периода (Run-2) работы БАК. Из-за большого количества протон-протонных взаимодействий в каждом столкновении протонных пучков (в среднем несколько десятков на столкновение) на CMS, практически в каждом втором описанном событии присутствует  $c\bar{c}$  пара, которая является существенным источником  $c$ -кварков, фрагментирующих в очарованные адроны. Благодаря высокой светимости и большому сечению рождения пар очарованных кварков, рождение в  $pp$ -столкновениях должно быть существенным источником  $D_s^+$  мезонов в эксперименте CMS.

Еще одним источником  $D_s^+$  мезонов, характерным для выбранного набора данных, являются полуплептонные распады  $B_s^0$ -мезонов. Благодаря новому триггеру, требующему наличия высокоэнергичного мюона в событии, данные содержат большое количество  $B_s^0$  мезонов, распадающихся полуплептонно с участием  $D_s^+$  мезонов. Анализу двух вышеперечисленных источников и посвящено настоящее исследование.

*Данные.* В настоящей работе используется образец данных второго периода работы БАК (Run-2), полученный в 2018 году в результате протон-протонных столкновений при энергии в системе центра инерции  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ в эксперименте CMS [6], что соответствует интегральной светимости  $60 \text{ фб}^{-1}$ . Как уже было сказано выше, в работе используется набор данных, обогащенный полуплептонными распадами тяжелых адронов (далее – BParking), триггерным событием для которого является высокоэнергичный мюон, трек от которого не совместим с гипотезой рождения в первичной вершине  $pp$ -взаимодействия. Для записи образца данных использовалась комбинация из 9 триггеров, представляющих собой различные ограничения на поперечный импульс (от 7 до 12 ГэВ/с) и значимость прицельного параметра мюона (от 3 до 6), динамически меняющихся с изменением светимости (детали представлены в [7]). Основным источником таких мюонов являются инклюзивные распады  $b$ -адронов типа  $b \rightarrow X\mu$ , где  $X$  – не восстанавливаемый на триггерном уровне остаток таких распадов. Среди распадов  $b$ -кварка, протекающих со сменой поколения, лидирующую роль играют полуплептон-

ные распады с переходом в  $c$  кварк:  $b \rightarrow c\mu^-\bar{\nu}_\mu$ . Таким образом, большое количество  $b$ -событий означает и большое количество  $c$ -событий, поэтому этот набор данных и был выбран для исследования.

При наборе данных применялось два новых метода для CMS: схема Parking – запись всех данных столкновений на ленту (tape) и дальнейший перевод их в основные файловые форматы данных в течение длительного периода времени (уже после окончания Run-2 сеанса работы БАК), а также динамическое изменение значений уровней триггеров по мере падения общей светимости пучков. Оба этих метода в сумме позволили отобрать порядка  $10^{10}$  событий с  $b$ -кварком [7]. Такое большое количество  $b$ -событий означает и большое количество  $D_s^+$  мезонов, получающихся из полулептонных распадов  $B_s^0$ , поэтому изучение источников  $D_s^+$  мезонов было начато с этого источника. В то же время, из-за новых методов было записано большее, по сравнению с предыдущими наборами данных, количество событий, происходящих в вершинах протон-протонных взаимодействий. Так как большая часть таких событий содержит распады  $c$ -адронов, то рождающиеся напрямую в  $pp$ -столкновениях  $D_s^+$  мезоны являются еще одним важным источником, и изучение такого вклада важно для понимания полной картины. В ходе исследования обоих источников,  $D_s^+$  мезон восстанавливался в одном и том же канале распада –  $D_s^+ \rightarrow \phi (\rightarrow K^+K^-) \pi^+$ <sup>1</sup>.

*Отбор событий  $B_s^0 \rightarrow D_s^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$ .* В первую очередь был реконструирован и исследован канал распада  $B_s^0 \rightarrow D_s^+ (\rightarrow \phi (\rightarrow K^+K^-) \pi^+) \mu^- \bar{\nu}_\mu$ . Реконструкция начинается с поиска и восстановления двух заряженных треков с противоположными зарядами и поперечным импульсом  $p_T(K^\pm) > 1.5$  ГэВ/с и псевдобыстротой  $|\eta| < 2.4$ , которым была присвоена массовая гипотеза каона. Инвариантная масса двух каонов должна лежать в массовом окне  $10$  МэВ/с<sup>2</sup> от табличной массы  $\phi$  мезона [8]. Дополнительно ищется заряженный трек с пионной массовой гипотезой, удовлетворяющий ограничениям  $p_T(\pi^+) > 1$  ГэВ/с и  $|\eta| < 2.4$ . К комбинации трех треков применяется кинематический фит в общую вершину, причем  $\chi^2$  вероятность фита должна превышать 1%. На инвариантную массу получившегося кандидата накладывается ограничение  $1.8$  ГэВ/с<sup>2</sup>  $< M(\pi^+K^+K^-) < 2.05$  ГэВ/с<sup>2</sup> для изучения событий в области известной массы  $D_s^+$  мезона.

Далее ищется мюонный трек, прошедший soft-muon [9] идентификацию CMS, с зарядом, противоположным ранее отобранному пиону. Также применяются требования на поперечный импульс и псевдобыстроту  $p_T(\mu^-) > 2.5$  ГэВ/с,  $|\eta| > 2.4$ . Для

<sup>1</sup>Здесь и далее в тексте работы подразумевается равное присутствие заряжено-сопряженных частиц.

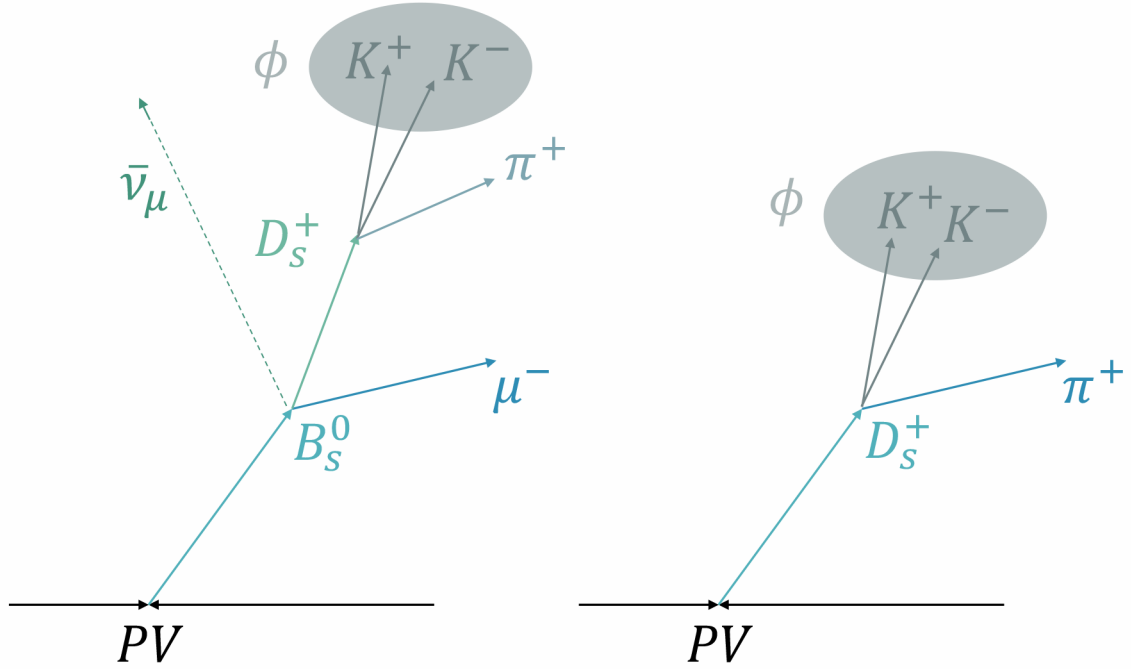


Рис. 1: Топологии распадов  $B_s^0 \rightarrow D_s^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$  с последующими распадами  $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$ ,  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  (слева) и  $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$  с последующим распадом  $\phi \rightarrow K^+ K^-$  (справа).

получения частично-восстановленного  $B_s^0$  мезона, мюон комбинируется с ранее отобранным  $D_s^+$ -кандидатом (так как нейтрино невозможно восстановить экспериментально на CMS). Вероятность кинематического вершинного фита  $B_s^0 \rightarrow D_s^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$  должна быть выше 1%, а получившиеся  $B_s^0$ -кандидаты должны удовлетворять требованиям  $M(D_s^+ \mu^-) < 5.55 \text{ ГэВ}/c^2$ ,  $p_T(B_s^0) > 6 \text{ ГэВ}/c$ .

После восстановления первичной вершины накладываются ограничения, соответствующие топологии распада (рис. 1, слева). В силу значительных времен жизни и импульсов частиц, накладываются ограничения на направляющие углы  $\cos(B_s^0, D_s^+) > 0.99$ ,  $\cos(B_s^0, PV) > 0.9$ , значимость поперечного прицельного параметра  $IPS(K^\pm, \pi^+) > 0.8$ ,  $IPS(\mu^-) > 0.5$ , где  $IPS = d_{xy}/\sigma_{d_{xy}}$ , где  $d_{xy}$  – наименьшее расстояние от PV до трека, и значимость отлета в поперечной плоскости от области  $pp$ -столкновений  $L_{xy}/\sigma_{L_{xy}}(B_s^0, PV) > 4$ . Также были применены дополнительные ограничения на поперечный импульс и значимость прицельного параметра  $p_T(\mu^-) > 7 \text{ ГэВ}$ ,  $IPS(\mu^-) > 3$ , повторяющие минимальные ограничения, наложенные на триггерном уровне на мюон в используемом образце данных WParking. Так как в CMS отсутствует идентификация частиц, в сигнале присутствуют события из распада

$B^0 \rightarrow D^+(\rightarrow K^-\pi^+\pi^+)\mu^-$ , для удаления которых в процессе реконструкции каону, имеющему одинаковый заряд с пионом, приписывается пионная массовая гипотеза, после чего в инвариантной массе  $K^-\pi^+\pi^+$  кандидатов удаляются события из массового окна  $D^+$  мезона (1.839–1.899 ГэВ/ $c^2$ ).

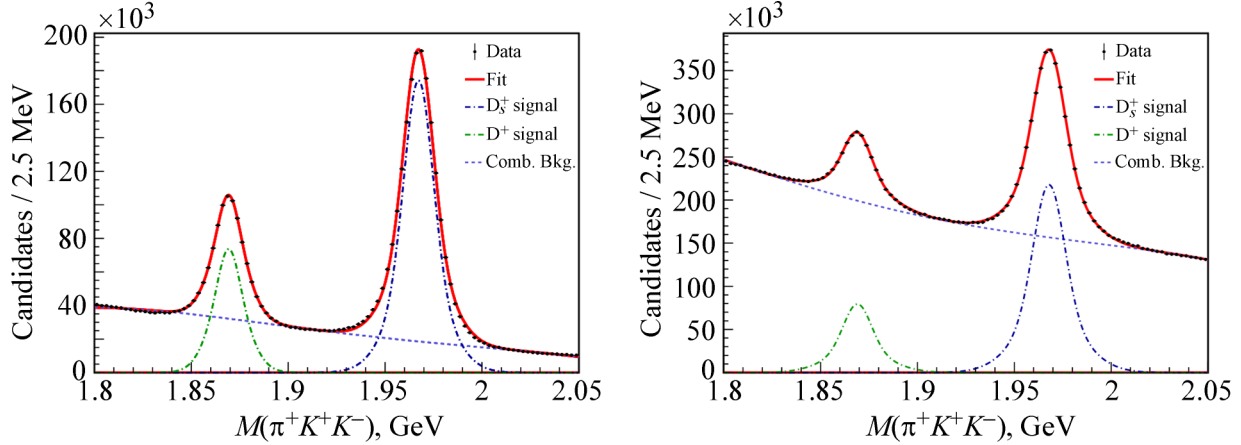


Рис. 2: Распределения инвариантной массы  $\pi^+K^+K^-$  в распаде  $B_s^0 \rightarrow D_s^+(\rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\pi^+)\mu^-\bar{\nu}_\mu$  (слева) и  $D_s^+ \rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\pi^+$  (справа).

Полученное после всех ограничений распределение по инвариантной массе  $\phi\pi^+$  кандидатов представлено на рис. 2 (слева). В нем явно видны пики, соответствующие табличным массам  $D^+$  и  $D_s^+$  мезона [8]. В результате аппроксимации отобранных событий двойной функцией Гаусса с общим средним для каждого из сигналов  $D^+$  и  $D_s^+$  мезонов и полиномом четвертой степени для комбинаторного фона, получено более 1.7 миллиона сигнальных событий  $D_s^+$ . С учетом большого отношения сигнала к фону (оцененного в области  $\pm 3$  детекторных разрешений по массе  $D_s^+$ ), полулептонный канал рождения  $D_s^+$  мезона, как будет показано в следующем пункте, является основным кандидатом в качестве источника  $D_s^+$  мезонов при последующем поиске редких распадов  $D_s^+$  (в частности, на мюон и тяжелое стерильное нейтрино).

Т а б л и ц а 1

Параметры, полученные в результате аппроксимаций распределений по инвариантной массе  $\pi^+K^+K^-$ . Погрешности являются только статистическими

Сигнал	$N(D_s^+) [10^3]$	Сигнал/фон	$N(D^+) [10^3]$
$B_s^0 \rightarrow D_s^+\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$1729 \pm 3$	$3.500 \pm 0.020$	$626 \pm 2$
inclusive- $D_s^+$	$2280 \pm 10$	$0.509 \pm 0.003$	$788 \pm 12$

*Отбор inclusive- $D_s^+$  событий.* Еще одним возможным источником  $D_s^+$  мезонов являются  $D_s^+$  мезоны, получившиеся в результате инклюзивного рождения из первичной вершины  $pp$ -столкновений. Их алгоритм реконструкции похож на описанный ранее, но останавливается на восстановлении  $D_s^+$  (рис. 1, справа). Также слегка отличаются некоторые кинематические и топологические ограничения: на поперечный импульс каонов  $p_T(K^\pm) > 3$  ГэВ/с, прицельные параметры пионов и каонов  $IPS(K^\pm, \pi^+) > 0.5$ , поперечный импульс  $D_s^+$  кандидата  $p_T(D_s^+) > 6$  ГэВ/с, значимость отлета  $L_{xy}/\sigma_{L_{xy}}(D_s^+, PV) > 5$  и косинус направляющего угла  $\cos(D_s^+, PV) > 0.99$ . На рис. 2 (справа) представлено распределение по инвариантной массе  $D_s^+$ -кандидатов, полученных в результате такого отбора событий. Аппроксимация (модель которой аналогична использованной для полулептонного канала) дает нам более 2.2 миллионов сигнальных событий  $D_s^+$ , но отношение сигнала к фону существенно меньше полулептонного источника (0.509 против 3.500), поэтому в качестве основного нормировочного распада предполагается использовать распад  $B_s \rightarrow D_s^+(\rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\pi^+)\mu^-\bar{\nu}_\mu$ , описанный в предыдущем пункте.

Несмотря на то, что целью данного отбора было выбрать  $D_s^+$  мезоны, рождающиеся напрямую в первичной вершине столкновений, не все из событий, прошедших отбор, таковыми являются. Среди них могли оказаться также  $D_s^+$  мезоны, рожденные из полулептонных распадов, распадов возбужденных состояний ( $D_s^{*+}$  и другие) и из других возможных источников, которые случайно прошли наш отбор. Среди  $D_s^+$  мезонов из полулептонных распадов  $B_s^0$ , из-за более сложной топологии и явных признаков полулептонного распада, вероятность того, что  $D_s^+$  мезон из другого источника пройдет отбор, значительно ниже, и, значит, полулептонный канал более точен в этом отношении. Тем не менее стоит подчеркнуть, что поиск редкого распада  $D_s^+$  мезона и восстановление его нормировочного канала  $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^+$  будет выполняться на одном и том же наборе данных, вне зависимости от его происхождения.

*Заключение.* В работе был сделан анализ данных VParking, набранных в эксперименте CMS в 2018 году. В результате был проведен поиск и восстановление  $D_s^+$  мезонов в полулептонных распадах  $B_s^0 \rightarrow D_s^{(*)+}\mu^-\bar{\nu}_\mu$  и  $D_s^+$  мезонов, инклюзивно рождающихся напрямую в  $pp$ -столкновениях. В обоих случаях восстановление происходило через канал  $D_s^+ \rightarrow \phi(\rightarrow (K^+K^-)\pi^+)$ . В результате проведенного впервые в CMS исследования были успешно восстановлены 1.7 и 2.2 миллиона  $D_s^+$  кандидатов по каждому из источников соответственно. Наш результат позволит использовать эти источники для

поиска редких распадов  $D_s^+$  мезонов, в том числе для поиска и исследования их распадов с рождением тяжелого нейтрино.

Исследование было выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-22-00401.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] T. Asaka, M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B **620**, 17 (2005). DOI: 10.1016/j.physletb.2005.06.020, arXiv: hep-ph/0505013.
- [2] D. Gorbunov, PoS EPS-HEP2015 (2015) 092. DOI: 10.22323/1.234.0092.
- [3] LHCb Collaboration, “Searches for 25 rare and forbidden decays of  $D^+$  and  $D_s^+$  mesons”, arXiv: 2011.00217.
- [4] BaBar Collaboration, Phys. Rev. D **84**, 072006 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevD.84.072006, arXiv: 1107.4465.
- [5] CLEO Collaboration, Phys. Rev. D **82**, 092007 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevD.82.092007, arXiv: 1009.1606.
- [6] CMS Collaboration, JINST **3**, S08004 (2008). DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [7] CMS Collaboration, “Recording and reconstructing 10 billion unbiased b hadron decays in CMS”, CMS Detector Performance Note CMS-DP-2019-043, 2019. cds.cern.ch/record/2704495.
- [8] Particle Data Group, R. L. Workman, et al., PTEP **2022**, 083C01 (2022). DOI: 10.1093/ptep/ptac097.
- [9] CMS Collaboration, JINST **13**(06), P06015 (2018). DOI: 10.1088/1748-0221/13/06/P06015, arXiv: 1804.04528.

Поступила в редакцию 12 ноября 2022 г.

После доработки 1 декабря 2022 г.

Принята к публикации 2 декабря 2022 г.

*Публикуется по рекомендации Московской международной школы физики-2022 (ФИАН, Москва)*