

УДК 539.126.4

ИЗУЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ D_s^+ МЕЗОНОВ НА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

Я. А. Андреев¹, К. М. Иванов¹, Р. Н. Чистов^{1,2}

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 фб^{-1}). Были исследованы D_s^+ мезоны, рождающиеся в первичной вершине pp взаимодействия, и D_s^+ мезоны, рождающиеся из полулептонных 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-

¹ МФТИ, Физтех, 141700 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

² 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 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 – $D_s^+ \rightarrow \phi (\rightarrow K^+K^-) \pi^+$ ¹.

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/с² от табличной массы ϕ 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 χ^2 вероятность фита должна превышать 1%. На инвариантную массу получившегося кандидата накладывается ограничение 1.8 ГэВ/с² $< M(\pi^+K^+K^-) < 2.05$ ГэВ/с² 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

¹Здесь и далее в тексте работы подразумевается равное присутствие заряжено-сопряженных частиц.

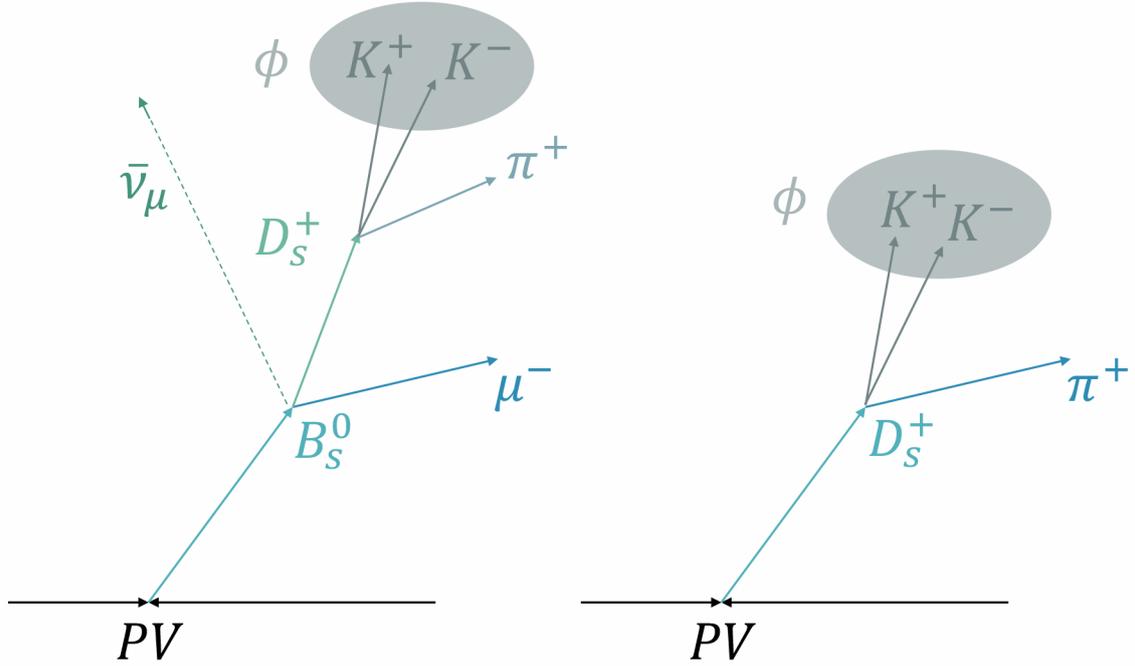


Рис. 1: Топологии распадов $B_s^0 \rightarrow D_s^+ \mu^- \bar{\nu}_\mu$ с последующими распадами $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$, $\phi \rightarrow K^+ K^-$ (слева) и $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$ с последующим распадом $\phi \rightarrow K^+ K^-$ (справа).

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).

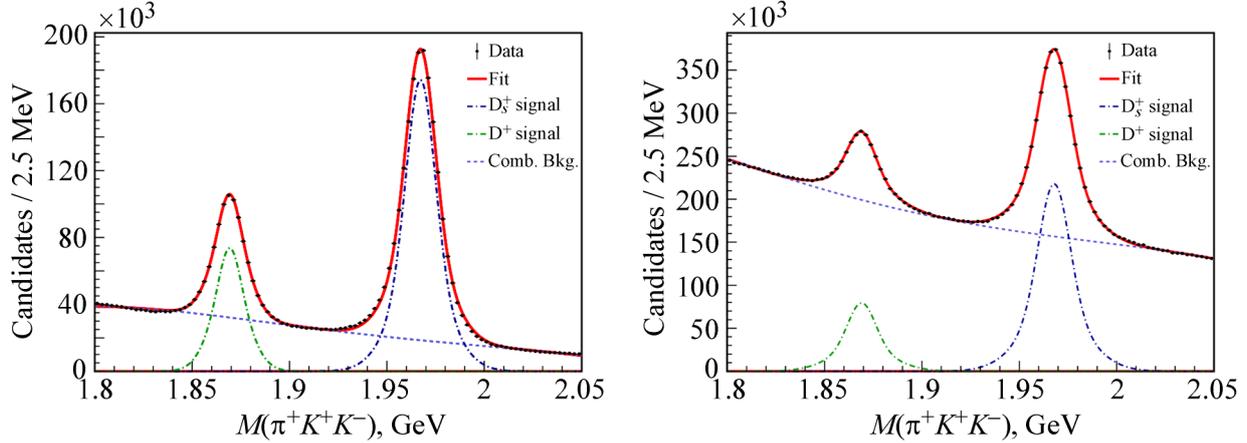


Рис. 2: Распределения инвариантной массы $\pi^+K^+K^-$ в распаде $B_s^0 \rightarrow D_s^+(\rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\pi^+)\mu^-\bar{\nu}_\mu$ (слева) и $D_s^+ \rightarrow \phi(\rightarrow K^+K^-)\pi^+$ (справа).

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 ± 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 ± 3	3.500 ± 0.020	626 ± 2
inclusive- D_s^+	2280 ± 10	0.509 ± 0.003	788 ± 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)