

УДК 539.1:539.1.05

ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ NICA-MPD ПРИ РЕГИСТРАЦИИ D МЕЗОНОВ

© 2022 г. В. П. Кондратьев^{1, 2, *}, Н. А. Мальцев^{1, 2}, Ю. А. Мурин²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

²Международная межправительственная научно-исследовательская организация
“Объединенный институт ядерных исследований”, Дубна, Россия

*E-mail: kondrat_vp@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

Выходы очарованных частиц являются важными наблюдаемыми, чувствительными к критическим явлениям в сильно взаимодействующей материи. Идентификационная способность трековой системы MPD, включающей внутренний трекер на базе монолитных активных пиксельных сенсоров, была изучена при восстановлении распадов D^+ , D^0 и D_s^+ , рождающихся в Au + Au столкновениях при энергиях коллайдера NICA.

DOI: 10.31857/S0367676522080117

ВВЕДЕНИЕ

Выходы частиц с тяжелыми ароматами, к числу которых относятся D мезоны, будут зависеть от того, в какой фазе находится возбужденная ядерная среда. Ожидается, что частицы, содержащие очарованные кварки, будут рождаться на самой ранней стадии реакции и, следовательно, дадут возможность исследовать партонные степени свободы. В зависимости от их взаимодействия со средой очарованные кварки адронизируются в D мезоны или чармоний. Поэтому отношение выхода чармония к выходу мезонов с открытым очарованием, измеренное в столкновениях тяжелых ионов при различных энергиях, может дать информацию о степенях свободы в образующемся файерболе. Отношение $R = Y(J/\Psi)/Y(D + \bar{D})$ выхода J/Ψ мезонов к выходу $D + \bar{D}$ мезонов в Au + Au столкновениях в диапазоне энергий коллайдера NICA было рассчитано с использованием двух различных моделей: динамической модели адронных струн (HSD) [1], которая описывает образование очарованных частиц в адронной среде, и модели статистической адронизации (SHM) [2], в которой очарованные кварки образуются в фазе деконфаймента. HSD предсказывает увеличение R с уменьшением энергии столкновения, что обусловлено различными порогами рождения очарованных частиц в нуклон-нуклонных столкновениях. В расчетах по SHM предполагается,

что c -кварки рождаются в фазе деконфаймента, а адроны образуются на стадии вымораживания. Следовательно, в этом случае нет индивидуальных порогов рождения адронов, и модель SHM предсказывает более или менее энергонезависимое отношение R . Измерение выходов J/Ψ мезонов и D мезонов в Au + Au столкновениях на коллайдере NICA, безусловно, поможет ответить на вопрос, в каком состоянии ядерной материи они образуются.

Регистрация на установке MPD короткоживущих D мезонов со средними пробегами в несколько сотен микрометров невозможна без использования детекторов с высоким пространственным разрешением, расположенных как можно ближе к точке образования частиц. В качестве таких детекторов, входящих в состав внутренней трековой системы (ITS) эксперимента MPD, планируется использовать кремниевые пиксельные сенсоры, обладающие наилучшим пространственным разрешением при высокой скорости счета [3]. В этой работе исследована идентификационная способность трековой системы MPD, включающей ITS и время-проекционную камеру (TPC) [4], при реконструкции распадов D^0 , D^+ и D_s^+ , образующихся в центральных Au + Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ.

Таблица 1. Геометрические параметры 5-слойной конструкции внутреннего трекера MPD с ионопроводом $\varnothing 40$ мм

Слой	Средний радиус, мм	Длина, мм	Эффективная толщина (Si), мкм
1	24.5	750	50
2	43.3	750	50
3	62.5	750	50
4	146.2	1526	700
5	196.0	1526	700

Таблица 2. Каналы распада D мезонов, используемые для их реконструкции в трековой системе MPD

Адрон	Масса, МэВ \cdot с ⁻²	Средняя длина пробега (σ), мкм	Канал распада	BR
D^+	1869.62 ± 0.20	312	$\pi^+ + \pi^+ + K^-$	9.13%
D^0	1864.84 ± 0.17	123	$\pi^+ + K^-$	3.89%
D_s^+	1968.47 ± 0.33	150	$\pi^+ + K^+ + K^-$	5.50%

ВНУТРЕННЯЯ ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА MPD

Элементарной основой проектного варианта ITS являются монолитные активные пиксельные сенсоры (MAPS), объединенные в линейки и расположенные вдоль поверхности 5 коаксиальных цилиндров вокруг ионопровода. Два внешних слоя ITS (внешний баррель) будут укомплектованы сенсорами с толщиной 50 мкм, тогда как линейки трех внутренних слоев (внутренний баррель) будут содержать изогнутые MAPS нового поколения с большой площадью и уменьшенной толщиной эпитаксиального слоя. Размер пикселей чувствительной матрицы таких сенсоров обеспечивает внутреннее пространственное разрешение на уровне 5 мкм.

Геометрические параметры проектной конфигурации ITS, адаптированной для ионопровода с диаметром 40 мм, приведены в табл. 1. Эффективные толщины пяти слоев ITS в кремниевом эквиваленте рассчитывались с учетом радиационной толщины материалов, из которых будут состоять фермы, удерживающие пиксельные детекторы, система охлаждения, сами детекторы и front-end электроника.

МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ РАСПАДОВ D МЕЗОНОВ

Оценка идентификационной способности трековой системы MPD при регистрации D мезонов проводилась в программной объектно-ориентированной среде Mpdroot [5]. Чистые сигнальные события, отвечающие выбранным распадам очарованных мезонов (см. табл. 2), разыгрывались в рамках теплового генератора [6], настроенного на энергию коллайдера NICA. Моделирование комбинаторного фона, обусловленного случайными комбинациями треков, не соответствующих продуктам распада D мезонов, про-

водилось с использованием QGSM генератора [7] событий ядро-ядерных столкновений.

Реконструкция треков заряженных частиц осуществлялась двумя методами: методом фильтра Калмана (KF) [8] и методом векторного поиска треков (VF) [9]. В первом случае треки, найденные в TPC по большому числу (порядка 40) кластеров, затем слой за слоем пролонгировались в ITS. Во втором случае треки реконструировались независимо в TPC и ITS, после чего треки, отвечающие одной и той же частице, объединялись в один глобальный трек.

Выделение сигналов D мезонов в спектре по инвариантной массе продуктов их распада также производилось двумя методами: классическим методом топологических катов (TC) и методом многовариантного анализа данных (MVA) [10], предоставляющим алгоритмы классификации для решения задачи отделения сигнала от фона. В качестве параметров отбора сигнальных событий были выбраны следующие переменные, диктуемые топологией распада D мезонов:

- 1) расстояние наибольшего сближения между треками продуктов распада и первичной вершиной взаимодействия сталкивающихся ядер — *dca*;
- 2) сумма наименьших расстояний между каждой парой треков дочерних частиц в точке распада D мезона — *distance*;
- 3) длина пробега материнской частицы от точки ее образования до точки распада — *path*;
- 4) угол между вектором, соединяющим первичную и вторичную вершину, и вектором реконструированного импульса материнской частицы — *angle*.

При использовании метода TC выбор значений топологических параметров отбора производился в соответствии с максимумом функции значимости, построенной на основе распределе-

Таблица 3. Параметры выделения D^0 и D^+ сигналов в центральных Au + Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ

Частица	D^0				D^+			
	KF		VF		KF		VF	
Метод выделения D -мезонов	ТС	MVA	ТС	MVA	ТС	MVA	ТС	MVA
Сигнал/фон	0.10	0.11	0.74	0.75	0.12	0.14	0.50	0.80
Значимость	5.3	5.5	16.8	17.0	7.0	10.5	21.2	28.5
Эффективность, %	0.80	0.85	1.67	1.70	0.5	1.0	1.5	2.0

ний этих параметров в сигнальных и фоновых событиях. В случае MVA был выбран BDT классификатор [10], на основе которого указанные топологические переменные отображались в одномерную переменную – отклик классификатора.

РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПАДОВ D^0 И D^+ МЕЗОНОВ

Для выделения сигнала D мезонов на комбинаторном фоне оптимизированные параметры отбора были применены к 10^6 сигнальных и 10^5 фоновых событий. Сигнальный спектр по инвариантной массе, удовлетворяющий выбранному критерию отбора, приводился к статистике 10^8 центральных Au + Au столкновений с учетом множественности D мезонов и вероятности их распада (BR) по выбранному каналу. Множественность D мезонов в центральных Au + Au столкновениях была оценена в рамках динамической модели адронной струны [11] и при энергиях коллайдера NICA составляет 10^{-2} мезон/событие. Остаточный комбинаторный фон после применения критерия отбора к фоновым событиям также приводился к статистике 10^8 событий и складывался с сигнальным спектром. Результаты выделения D^0 и D^+ сигналов в результирующем спектре при такой статистической обеспеченности приведены в табл. 3. Как видно, в случае ре-

конструкции треков методом векторного поиска эффективность выделения D^0 и D^+ сигналов на комбинаторном фоне оказывается в три раза выше по сравнению с методом фильтра Калмана. Кроме того, использование MVA для выделения сигнала дает в случае D^+ мезонов 30% выигрыш в эффективности при более высоком уровне значимости по сравнению с методом ТС.

РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПАДОВ D_s^+ МЕЗОНОВ

Выделение сигналов D_s^+ мезонов является более сложной задачей по сравнению с D^+ по трем причинам. Во-первых, длина их распада в 2 раза короче; во-вторых, вероятность распада в 2 раза меньше; и в-третьих, в канале их распада присутствуют 2 каона, эффективность реконструкции треков которых ниже, чем для пионов. В связи с этим реконструкция распадов D_s^+ в трековой системе MPD была проведена с использованием векторного алгоритма трекинга, преимущество которого было продемонстрировано в предыдущем разделе.

На рис. 1 показаны распределения по топологическим параметрам отбора в сигнальных и фоновых событиях и соответствующие функции

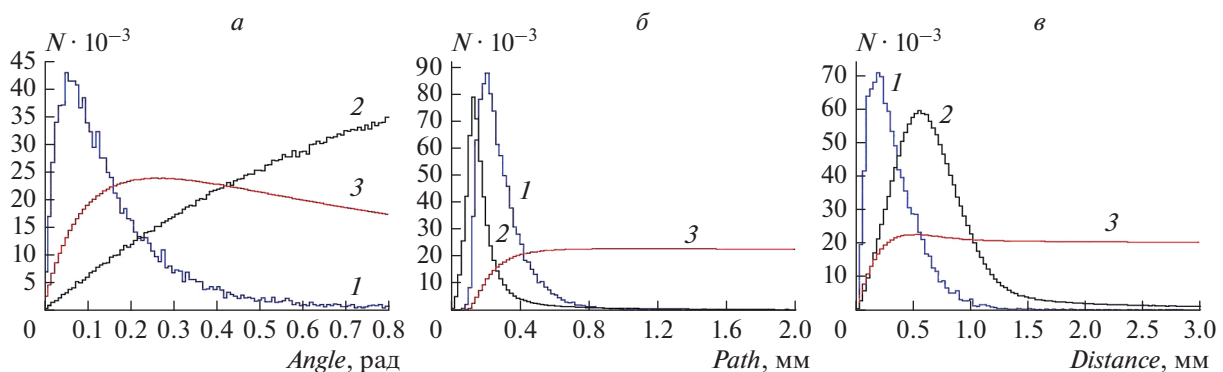


Рис. 1. Распределения по топологическим параметрам (a – angle, b – path, e – distance) в сигнальных $D_s^+ \rightarrow \pi^+ + K^+ + K^-$ и фоновых Au + Au событиях. 1 – сигнал, 2 – фон, 3 – функция значимости.

Таблица 4. Параметры выделения D_s^+ сигналов в центральных Au + Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ

Метод	Сигнал/фон	Значимость	Эффективность, %
ТС	0.03	1.3	0.12
MVA	0.02	1.3	0.13

значимости, а рис.2 демонстрирует распределение откликов классификатора BDT на сигнальные и фоновые события.

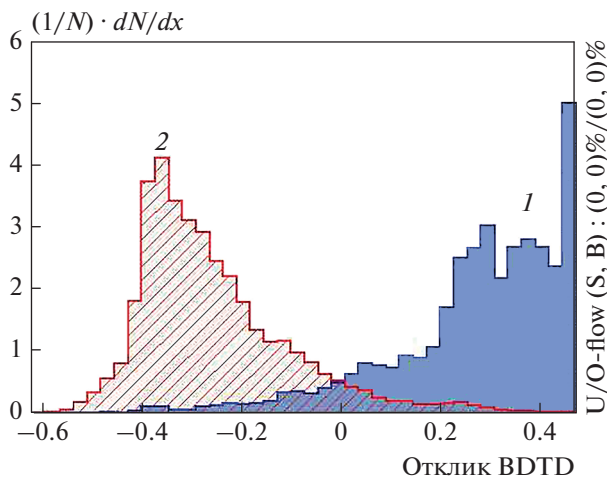


Рис. 2. Распределение откликов классификатора BDT на сигнальные $D_s^+ \rightarrow \pi^+ + K^+ + K^-$ и фоновые Au + Au события. 1 – сигнал, 2 – фон.

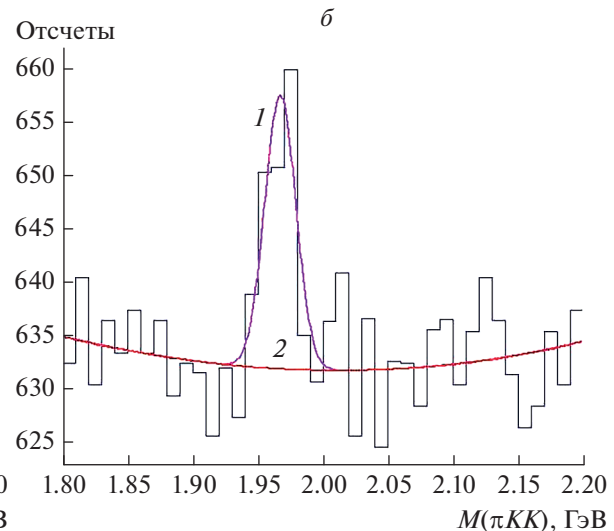
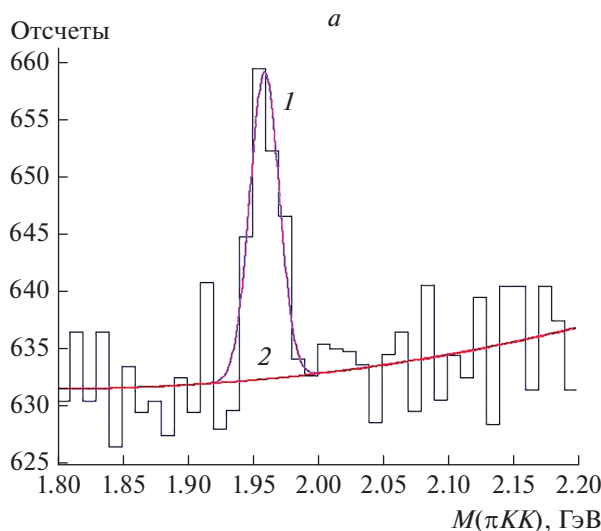


Рис. 3. Сигнал D_s^+ в спектре по инвариантной массе, выделенный методом ТС (а) и MVA (б) в 10^8 центральных Au + Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ. 1 – полный спектр, 2 – остаточный комбинаторный фон.

На рис. 3 представлены спектры по инвариантной массе, полученные после применения критериев отбора, выбранных в соответствии с распределениями на рис. 1 и 2, а в табл. 4 приведены параметры выделения D_s^+ сигнала. Как видно, применение алгоритма векторного поиска треков позволяет выделять сигнал D_s^+ мезонов с эффективностью порядка 0.1% при регистрации их распадов в трековой системе MPD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована идентификационная способность трековой системы MPD, включающей время-проекционную камеру и внутренний трекер на базе монолитных активных пиксельных сенсоров, при регистрации D мезонов, образующихся в центральных Au + Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ. Показано, что применение алгоритма векторного поиска для реконструкции треков заряженных частиц позволяет выделять сигналы D^+ , D^0 и D_s^+ в спектре по инвариантной массе продуктов их распада с эффективностью 2.0, 1.7 и 0.13% соответственно. Полученный результат свидетельствует о возможности изучать выходы очарованных частиц в экспериментах по столкновениям тяжелых ионов на установке NICA-MPD.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-02-40119 и № 18-02-40075).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Linnyk O., Bratkovskaya E.L., Cassing W., Stöcker H.* // Nucl. Phys. A. 2007. V. 786. P. 183.
2. *Andronic A., Braun-Munzinger P., Redlich K., Stachel J.* // Phys. Lett. B. 2008. V. 659. P. 149.
3. *Abelev B., Adam J., Adamová D. et al.* // J. Phys. G. 2014. V. 41. Art. No. 087002.
4. *Vereschagin S., Bazhazhin A., Fateev O. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2020. V. 958. Art. No. 162793.
5. <http://git.jinr.ru/nica/mpdroot>.
6. *Tawfik A.N., Abbas E.* // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12. № 4(195). С. 818.
7. *Gudima K.K., Mashnik S.G., Sierk A.J.* User manual for the code LAQGSM. Los Alamos National Laboratory Report. LA-UR-01-6804. Los Alamos, 2001.
8. *Frühwirth R.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1987. V. 262. P. 444.
9. *Zinchenko D.A., Zinchenko A.I., Nikonov E.G.* // Письма в ЭЧАЯ. 2021. V. 18. No. 1(233). P. 134.
10. *Hoecker A., Speckmayer P., Stelzer J. et al.* // arXiv: physics/0703039v5. 2009.
11. *Cassing W., Bratkovskaya E.L., Sibirtsev A.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 691. P. 753.

The identification capability of the inner tracking system for the detection of D -mesons at the NICA-MPD facility

V. P. Kondratev^{a, b, *}, N. A. Maltsev^{a, b}, Yu. A. Murin^b

^a Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034 Russia

^b Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

*e-mail: kondrat_vp@mail.ru

The yields of charmed particles are the important observables sensitive to critical phenomena in strongly interacting matter at high baryon density. The identification capability of the MPD tracking system including the Inner tracker based on Monolithic Active Pixel Sensors has been studied during the Monte Carlo simulation, when reconstructing the decays of D^+ , D^0 and D_s^+ , produced in central Au + Au collisions at NICA collider energies.