

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ITS MPD С ФОКУСОМ НА ОЧАРОВАННЫЕ МЕЗОНЫ

В. П. Кондратьев^{1,2,*}, *Н. А. Мальцев*^{1,2}, *Ю. А. Мурин*¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Повышение точности реконструкции вершин распада короткоживущих частиц играет фундаментальную роль в секторе тяжелых ароматов физической программы эксперимента MPD. Внутренняя трековая система (ITS) MPD, основанная на новом поколении кремниевых детекторов — монолитных активных пиксельных сенсорах, открывает новые возможности при регистрации очарованных частиц. В ходе компьютерного моделирования в рамках MpdRoot была изучена идентификационная способность трековой системы MPD, включающей в себя ITS и времяпроекционную камеру (TPC), при реконструкции распадов D -мезонов, образующихся в центральных столкновениях Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ. Выделение сигналов D -мезонов в спектре по инвариантной массе продуктов их распада осуществлялось с использованием метода многовариантного анализа данных.

Improving the accuracy of reconstruction of the decay vertices of short-lived particles plays a fundamental role in the heavy-flavor sector of the MPD physics program. The MPD Inner Tracking System (ITS) based on a new generation of silicon detectors — Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) — would certainly offer new possibilities within the scope of charm particle detection. A quality assessment of the MPD tracking system including ITS and Time Projection Chamber (TPC), when reconstructing the decays of D mesons produced in central Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 9$ GeV has been performed in the course of computer simulations in the MpdRoot framework. The selection of D -meson signals in the invariant mass spectrum of their decay products was performed using a toolkit for multivariate data analysis.

PACS: 29.40.Gx; 25.75.Cj; 29.20.db; 24.10.Lx

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных физических задач эксперимента MPD является изучение фазовой диаграммы горячей и плотной ядерной материи, образующейся в релятивистских столкновениях ядер при энергии коллайдера NICA [1].

*E-mail: kondrat_vp@mail.ru

О механизмах адронизации такой возбужденной ядерной материи можно судить по выходам частиц с тяжелыми ароматами [2–4], идентифицируя их по инвариантной массе продуктов их распада. В эксперименте частицы с открытым очарованием, к числу которых относятся D -мезоны, могут быть сравнительно легко идентифицированы по адронным каналам их распада: $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ и $D^+ \rightarrow K^- + \pi^+ + \pi^+$. В связи с малым временем жизни этих частиц их длина распада составляет всего несколько сотен микрометров: $\lambda(D^0) = 123$ мкм, $\lambda(D^+) = 312$ мкм. Для надежной реконструкции вершины распада таких короткоживущих частиц требуются вершинные трековые детекторы с высоким пространственным разрешением и гранулярностью, чтобы разместить их максимально близко к точке рождения искомой частицы-пробника. В данной работе исследована идентификационная способность внутренней трековой системы ITS установки MPD при регистрации D^0 - и D^+ -мезонов, рождающихся в Au + Au-столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ.

1. ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА MPD

Трековая система эксперимента MPD включает в себя времяпроекционную камеру TPC (Time Projection Chamber) и вершинные детекторы, входящие в состав ITS. Предполагается, что элементной основой ITS будут монолитные активные пиксельные сенсоры (MAPS) [5], обладающие наилучшим пространственным разрешением при высокой скорости счета. MAPS группируются в линейки, расположенные вдоль поверхности пяти коаксиальных цилиндрических слоев вокруг точки взаимодействия ядер [6]. В проектном варианте ITS два внешних слоя будут укомплектованы сенсорами толщиной 100 мкм. Линейки трех внутренних слоев будут содержать MAPS нового поколения с уменьшенной толщиной эпитаксиального слоя — порядка 30 мкм. Размер пикселей чувствительной матрицы таких сенсоров обеспечивает внутреннее пространственное разрешение на уровне 5 мкм. Геометрические параметры двух моделей ITS, адаптированных к ионопроводу диаметром 40 и 64 мм соответственно, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические параметры двух моделей 5-слойной ITS для ионопровода диаметром 40 мм (ITS5-40) и 64 мм (ITS5-64)

Слой	Средний радиус, мм		Длина линейки, мм		Эффективная толщина (Si), мкм
	ITS5-40	ITS5-64	ITS5-40	ITS5-64	
1	24,5	37,5	750	940	50
2	43,3	64,5	750	940	50
3	62,5	90,5	750	940	50
4	146,2	146,2	1526	1526	700
5	196,0	196,0	1526	1526	700

2. РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПАДОВ D -МЕЗОНОВ В ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЕ TPC + ITS5-40

Оценка идентификационной способности трековой системы MPD при реконструкции распадов D -мезонов проводилась в программной объектно-ориентированной среде MpdRoot [7]. Чистые сигнальные события, отвечающие распадам D -мезонов, моделировались в рамках теплового генератора [8], настроенного на энергию коллайдера NICA. Для моделирования комбинаторного фона, обусловленного случайными комбинациями треков, не соответствующих продуктам распада реальной частицы, использовался генератор событий, построенный на базе кварк-глюонной струнной модели (QGSM) [9]. Выделение сигналов D -мезонов в спектре по инвариантной массе продуктов их распада осуществлялось с использованием метода многовариантного анализа данных (MVA) [10], предоставляющего алгоритмы классификации для решения задачи отделения сигнала от фона.

В качестве параметров отбора сигнальных событий были выбраны следующие переменные, обусловленные топологией распада D -мезонов:

- сумма наименьших расстояний между каждой парой треков дочерних частиц в точке распада материнской частицы (distance);
- длина пробега материнской частицы от точки ее образования до точки распада (path);
- угол между вектором, соединяющим первичную и вторичную вершину, и вектором реконструированного импульса материнской частицы (angle).

Распределения этих переменных в 10^6 сигнальных событиях распадов D -мезонов и в 10^5 фоновых событиях центральных Au + Au-столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ показаны на рис. 1.

В процессе классификации указанные переменные отображаются в одномерную переменную — отклик классификатора. Распределение откликов классификатора BDT (Boosted Decision Tree) на сигнальные и фоновые события представлено на рис. 2.

Разделение сигнала и фона осуществлялось с применением к 10^6 сигнальным и 10^5 фоновым событиям оптимального ката по отклику классификатора BDT, выбранного в соответствии с распределением на рис. 2. Сигнальный спектр по инвариантной массе $M(K^-\pi^+\pi^+)$, удовлетворяющий выбранному критерию отбора, приводился к статистике 10^8 центральных Au+Au-столкновений с учетом множественности D -мезонов и вероятности их распада по каналу. Множественность D^0 и D^+ в центральных Au + Au-столкновениях была оценена в рамках динамической модели адронной струны [11] и при энергии коллайдера NICA составила 10^{-2} мезонов/событие. Остаточный комбинаторный фон после применения критерия отбора к фоновым событиям равномерно распределялся по выбранному диапазону по инвариантной массе 1,7–2,1 ГэВ/ c^2 и затем также приводился к статистике

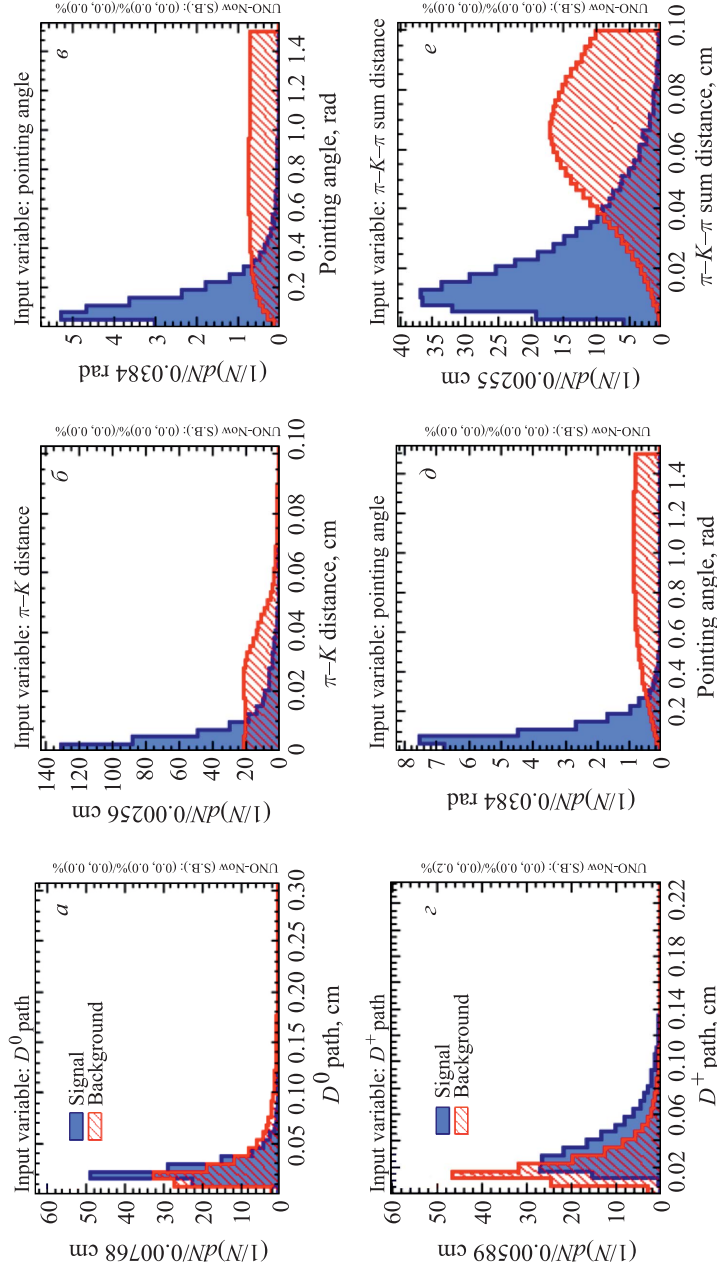


Рис. 1. Распределения входных переменных для классификатора BDT в сигнальных и фоновых событиях при реконструкции распадов $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ (a-e) и $D^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + K^-$ (e-e)

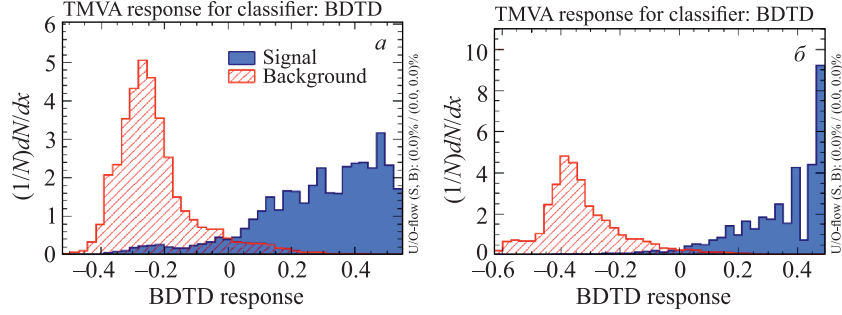


Рис. 2. Распределение откликов классификатора BDT на сигнальные и фоновые события при реконструкции распадов $D^0 \rightarrow K^- + \pi^+$ (а) и $D^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + K^-$ (б)

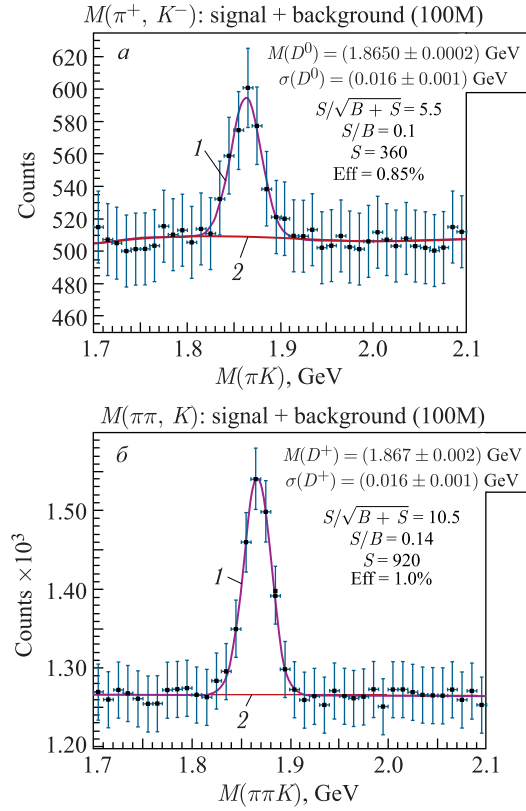


Рис. 3. Сигналы D^0 (а) и D^+ (б) в спектре по инвариантной массе продуктов распада, выделенные в 10^8 центральных Au + Au-столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ в трековой системе TPC + ITS5-40: сиреневая линия, 1 — полный спектр; красная линия, 2 — остаточный комбинаторный фон

10^8 событий с добавлением статистических флуктуаций. На рис. 3 показаны результирующие спектры, полученные суммированием сигнального и фонового спектров, нормированных на 10^8 центральных Au + Au-столкновений. Как видно из рис. 3, выделение сигналов D^0 и D^+ на комбинаторном фоне при такой статистической обеспеченности может быть осуществлено с эффективностью 0,85 и 1 % соответственно.

3. РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПАДОВ D^+ В ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЕ TPC + ITS5-64

Сравнение идентификационной способности двух моделей ITS, адаптированных к ионопроводу диаметром 40 и 64 мм, проводилось на примере реконструкции D^+ -мезонов. Выделение сигналов D^+ в трековой системе с ITS5-64 осуществлялось с использованием такого же метода и на той же статистике генераторных событий, что и для ITS5-40. Для подавления комбинаторного фона в обоих случаях использовался один и тот же набор параметров отбора.

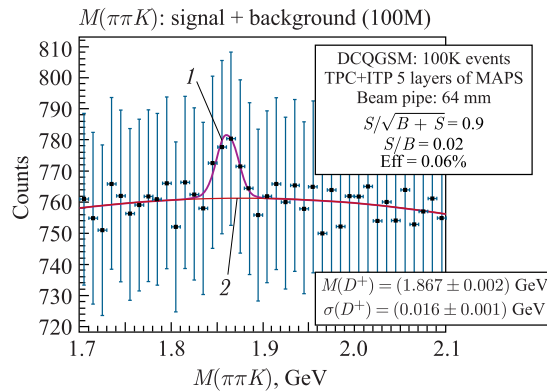


Рис. 4. Сигнал D^+ в спектре по инвариантной массе продуктов распада, выделенный в 10^8 центральных Au + Au-столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ в трековой системе TPC + ITS5-64: сиреневая линия, 1 — полный спектр; красная линия, 2 — остаточный комбинаторный фон

Таблица 2. Параметры реконструкции D^+ в трековой системе с ITS5-40 и ITS5-64

Параметр	Модель	
	ITS5-40	ITS5-64
Число событий	10^8	
Эффективность, %	1,0	0,06
Значимость $S/\sqrt{S+B}$	10,5	0,9

Результат обработки 10^8 событий при реконструкции D^+ в трековой системе TPC + ITS5-64 представлен на рис. 4 и в табл. 2. Как видно, эффективность реконструкции D^+ -мезонов в трековой системе с ITS5-64 уменьшается на порядок по сравнению с ITS5-40. Полученные данные свидетельствуют о том, что для надежной реконструкции очарованных частиц в эксперименте MPD необходимо уменьшать диаметр ионопровода установки MPD до оптимальной величины 40 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована идентификационная способность трековой системы MPD, включающей в себя времяпроекционную камеру и вершинный трековый детектор на базе пиксельных сенсоров, при регистрации D -мезонов, образующихся в Au + Au-столкновениях при энергии NICA. Моделирование показывает осуществимость идентификации частиц с открытым очарованием при условии, что диаметр ионопровода будет уменьшен до оптимального значения 40 мм после завершения первого этапа настройки коллайдера NICA.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-02-40119).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abraamyan Kh. U. et al.* The MPD Detector at the NICA Heavy-Ion Collider at JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 628. P. 99–102.
2. *Mueller B.* Hadronic Signals of Deconfinement at RHIC // Nucl. Phys. A. 2005. V. 750. P. 84–97.
3. *Moore G. D., Teaney D.* How Much Do Heavy Quarks Thermalize in a Heavy-Ion Collision // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 064904.
4. *Hees H., Rapp R.* Thermalization of Heavy Quarks in the Quark–Gluon Plasma // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 034907.
5. *Abelev B. et al.* Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 08700.
6. *Zinchenko A. I., Igolkin S. N., Kondratiev V. P., Murin Yu. A.* NICA-MPD Vertex Tracking Detector Identification Capability for Reconstructing Strange and Charmed Particle Decays // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17. P. 856.
7. MpdRoot Software. <http://git.jinr.ru/nica/mpdroot>.
8. *Tawfik A. N., Abbas E.* Thermal Description of Particle Production in Au–Au Collisions at RHIC Energies (STAR) // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 521.
9. *Mashnik S. G., Sierk A. J.* User Manual for the Code LAQGSM. Report LA-UR-01-6804. Los Alamos Nat. Lab. Los Alamos, 2001.
10. *Hoecker A., Speckmayer P., Stelzer J., Therhaag J., von Toerne E., Voss H.* TMVA4 — Toolkit for Multivariate Data Analysis with Root. arXiv: physics/0703039v5 [physics.data-an].
11. *Cassing W., Bratkovskaya E. L., Sibirtsev A.* Open Charm Production in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions // Nucl. Phys. A. 2001. V. 691. P. 753–778.