

# ПЕРСПЕКТИВЫ ДЕТЕКТОРА MPD ПО ИЗМЕРЕНИЮ СПЕКТРОВ ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ АДРОНОВ В Bi + Bi-СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ

*А. Мудрох* \*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Измерение спектров легких адронов является одной из приоритетных задач эксперимента MPD на NICA. Представлена оценка эффективности регистрации дифференциальных спектров рождения идентифицированных адронов по поперечному импульсу в детекторе MPD, рожденных в соударениях ядер висмута при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ.

One of the main goals of MPD/NICA scientific programme is the precise measurements of light hadron spectra. We present the MPD performance to measure  $p_T$  spectra of identified light hadrons produced in Bi + Bi collisions at the centre-of-mass energy  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  GeV.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

## ВВЕДЕНИЕ

Расчеты квантовой хромодинамики (КХД) на решетке [1] предсказывают существование фазового перехода между адронной материей и состоянием квазисвободных кварков и глюонов, называемым кварк-глюонной плазмой (КГП). Исследование горячей и плотной барионной материи, рождение КГП и поиск границы фазового перехода и критической точки [2] — одни из наиболее амбициозных задач в современной физике высоких энергий.

В лабораторных условиях образование плотной барионной материи изучается в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов. Множество ускорителей, таких как SPS, RHIC и LHC, сталкивает тяжелые ионы для изучения фазовой диаграммы КХД при различных температурах и конечных значениях нет-барионных плотностей. Новый ускорительный комплекс NICA в Дубне [3] способен дополнить эти исследова-

---

\* E-mail: mudrokh@jinr.ru

ния детальным изучением образующейся при столкновении ядер материи в слабо изученной области энергий 2,3–11 ГэВ.

При энергиях NICA около 90% всех частиц, рожденных в центральных ядро-ядерных соударениях, — это легкие адроны ( $\pi$ ,  $K$  и  $p$ ), что делает их одним из основных инструментов для анализа структуры фазовой диаграммы КХД. Измерения дифференциальных спектров рождения легких адронов по поперечному импульсу ( $p_T$ ) позволяют определить их интегральные выходы, извлечь температуру  $T$  и бариохимический потенциал  $\mu_B$  системы во время химической заморозки и определить положение системы на диаграмме ( $T$ ,  $\mu_B$ ) на момент адронизации. Это также позволит изучить эффект избыточного выхода странности, проявляющийся в виде немонотонной зависимости отношения выходов  $K^+$  и  $\pi^+$  от энергии взаимодействия ядер (так называемый хорн-эффект). Измерения данного отношения в экспериментах на ускорителях SPS [4] и RHIC [5] в центральных ядро-ядерных соударениях показали, что максимум отношения  $K^+/\pi^+$  достигается в области энергий около 8 ГэВ. Эффект сильно зависит от размеров сталкиваемой системы и может быть дополнительно изучен на ускорительном комплексе NICA.

Целью данной работы является развитие методов идентификации заряженных частиц и измерения их дифференциальных спектров рождения в различных интервалах по скорости и центральности ядерных столкновений в установке MPD.

## ДЕТЕКТОР MPD НА NICA

Многоцелевой детектор MPD [6] представляет собой широкоугольный спектрометр, предназначенный для изучения столкновений тяжелых ионов в области энергий  $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$  ГэВ. Первая стадия детектора включает в себя следующие подсистемы: время-проекционную камеру ТРС, времяпролетную систему TOF, быстрый передний детектор FFD, электромагнитный и передний адронный калориметры (ECAL, FhCAL).

ТРС является основным трековым детектором установки MPD. Подсистема обеспечивает измерение импульсов заряженных частиц с разрешением  $\sigma_p/p \approx 2\%$  при значении поперечного импульса 1 ГэВ/ $c$ , а также измерение характерных ионизационных потерь частиц ( $dE/dx$ ) в рабочей газовой смеси детектора (90% аргон и 10% метан) со средним разрешением  $\sigma_{dE/dx} \approx 8\%$  для треков, имеющих по крайней мере 20 зарегистрированных хитов в ТРС.

Временное разрешение детектора TOF составляет 80 пс. В комбинации с ТРС две подсистемы обеспечивают надежную идентификацию заряженных частиц в широкой области быстрот ( $|\eta| < 1,4$ ) и поперечных импульсов.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ В MPD

Для изучения возможностей экспериментальной установки MPD для измерения дифференциальных спектров рождения легких адронов было проанализировано 50 млн смоделированных событий столкновений  $V_i + V_i$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ с величиной прицельного параметра, разыгранной в диапазоне 0–16 фм. Для моделирования событий ядерных столкновений использовался гибридный генератор событий UrQMD [7], включающий в себя микроскопический и гидродинамический подходы к эволюции сильновзаимодействующей ядерной материи. Прохождение частиц через материал детектора моделировалось с помощью пакета Geant4 [8–10]. Отклик детекторных подсистем на прохождение через них заряженных частиц реалистично моделировался с использованием программного кода MPDRoot [6].

Реконструированные треки заряженных частиц экстраполировались до пересечения с осью пучковой трубы для определения координаты вершины взаимодействия. В анализ отбирались только события с вершиной взаимодействия, расположенной не далее  $\pm 100$  см от геометрического центра экспериментальной установки вдоль оси пучка. Треки также экстраполировались до пересечения с подсистемой TOF для ассоциации с измеренными TOF-точками и определения времени лета частиц вдоль восстановленной траектории частицы.

Идентификация заряженных адронов в MPD осуществляется путем анализа измеренных в TPC энергопотерь частиц  $dE/dx$ , а также измеренного времени пролета частиц в TOF. Для выделения первичных треков накладывается дополнительное условие на максимальное расстояние между треком и реконструированной вершиной события  $DSA < 3$  см. Частицы, удовлетворяющие этому условию, считаются идентифицированными, если отклоняются не более чем на три среднеквадратичных отклонения от сигналов, ожидаемых для соответствующего типа частицы в подсистемах ( $n\sigma$ -метод). На рис. 1 представлен пример распределения измеренных энергетических потерь  $dE/dx$  в TPC как функция полного импульса для заряженных частиц. Сплошные линии на рисунке соответствуют сигналам, ожидаемым для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$  и  $\bar{p}$  в пределах трех среднеквадратичных отклонений. На рис. 2 представлены эффективность и загрязнение идентификации для положительно заряженных адронов в зависимости от полного импульса, где эффективность соответствует доле верно идентифицированных среди общего числа сгенерированных частиц, а загрязнение — доле неверно идентифицированных среди всех идентифицированных частиц.

Центральность событий определялась из анализа распределения множественности заряженных частиц, зарегистрированных в объеме детектора TPC. В работе представлены результаты для шести интервалов центральности ядерных столкновений: 0–5, 5–10, 10–20, 20–40, 40–60 и 60–80 %.

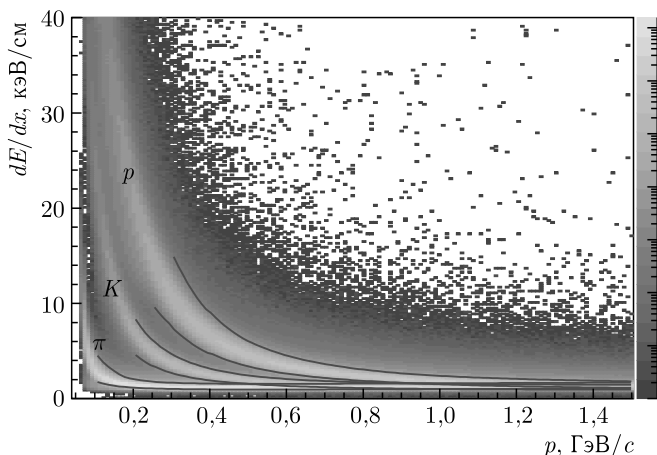


Рис. 1. Энергетические потери  $dE/dx$  в ТРС как функция полного импульса для  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$  и  $\bar{p}$  в центральных соударениях  $\text{Bi} + \text{Bi}$ . Сплошные линии на рисунке соответствуют ожидаемым сигналам  $dE/dx$  в пределах трех среднеквадратичных отклонений

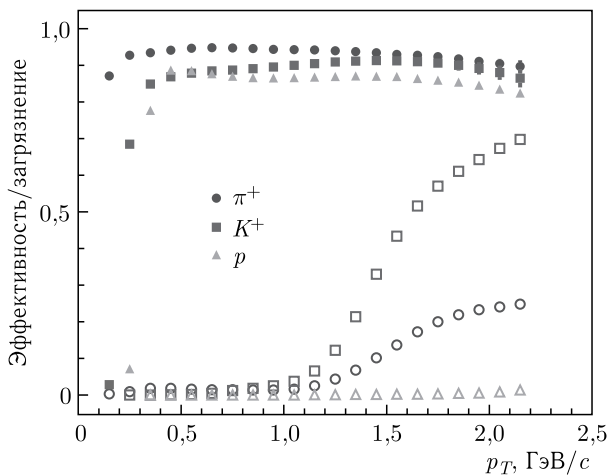


Рис. 2. Эффективность (темные символы) и загрязнение идентификации (светлые символы)  $\pi^+$ ,  $K^+$  и  $p$  как функция поперечного импульса

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Фазовое пространство для идентифицированных пионов, каонов и протонов, рожденных в центральных (0–5%) соударениях ядер висмута, представлено на рис. 3. Фазовое пространство разбито на 8 диапа-

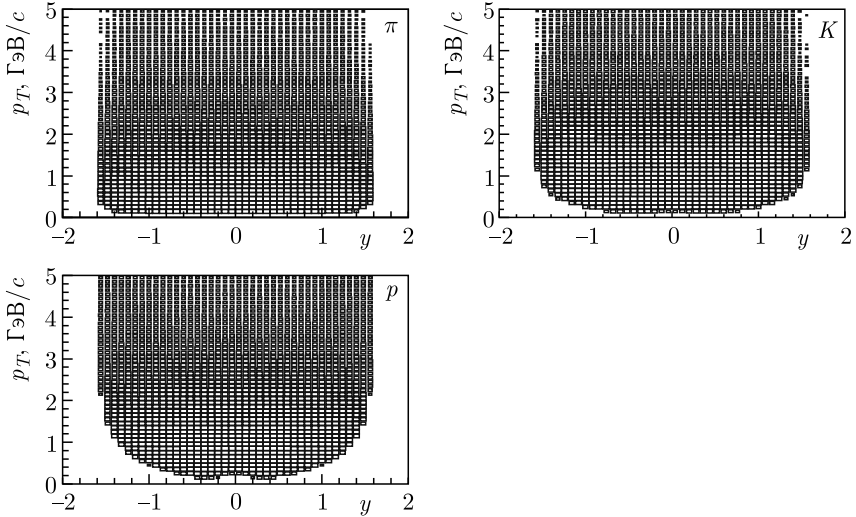


Рис. 3. Фазовое пространство идентифицированных  $\pi^+$ ,  $K^+$  и  $p$ , рожденных в центральных соударениях  $\text{Bi}+\text{Bi}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ, в модели UrQMD

зон по быстрой ширинной 0,3 единицы ( $-1,2 < y < -0,9$ ,  $-0,9 < y < -0,6$  и т.д.), в каждом из которых проводился независимый набор адронных спектров.

Дифференциальные спектры рождения идентифицированных каонов, пионов и протонов по поперечному импульсу в центральных (0–5%) соударениях ядер висмута и центральной области по быстрой представлены на рис. 4. Спектры на рис. 4 представлены в виде  $1/p_T(d^2N/dy dp_T)$ . Так как центры исследуемых интервалов по поперечному импульсу не совпадают со средними поперечными импульсами частиц, были введены коррекции, учитывающие переоценку выхода рождающихся частиц.

Быстротное распределение  $dN/dy$  получается путем интегрирования спектра по поперечному импульсу. Для получения  $dN/dy$  в измеренной области значения в интервалах по поперечному импульсу складываются, вклад из областей малых и больших импульсов (до 5 ГэВ/с) вычисляется путем экстраполяции спектров в эти области. Формы каонных и протонных спектров описывались с помощью гидродинамической модели Blast-Wave [12]:

$$\frac{d^2N}{p_t dp_t dy} = C \int_0^1 p_t f(\xi) K_1 \left( \frac{m_t \text{ch } \rho}{T} \right) I_0 \left( \frac{p_t \text{sh } \rho}{T} \right) \xi d\xi, \quad (1)$$

где  $C$  — нормировочный коэффициент;  $T$  — эффективная температура.

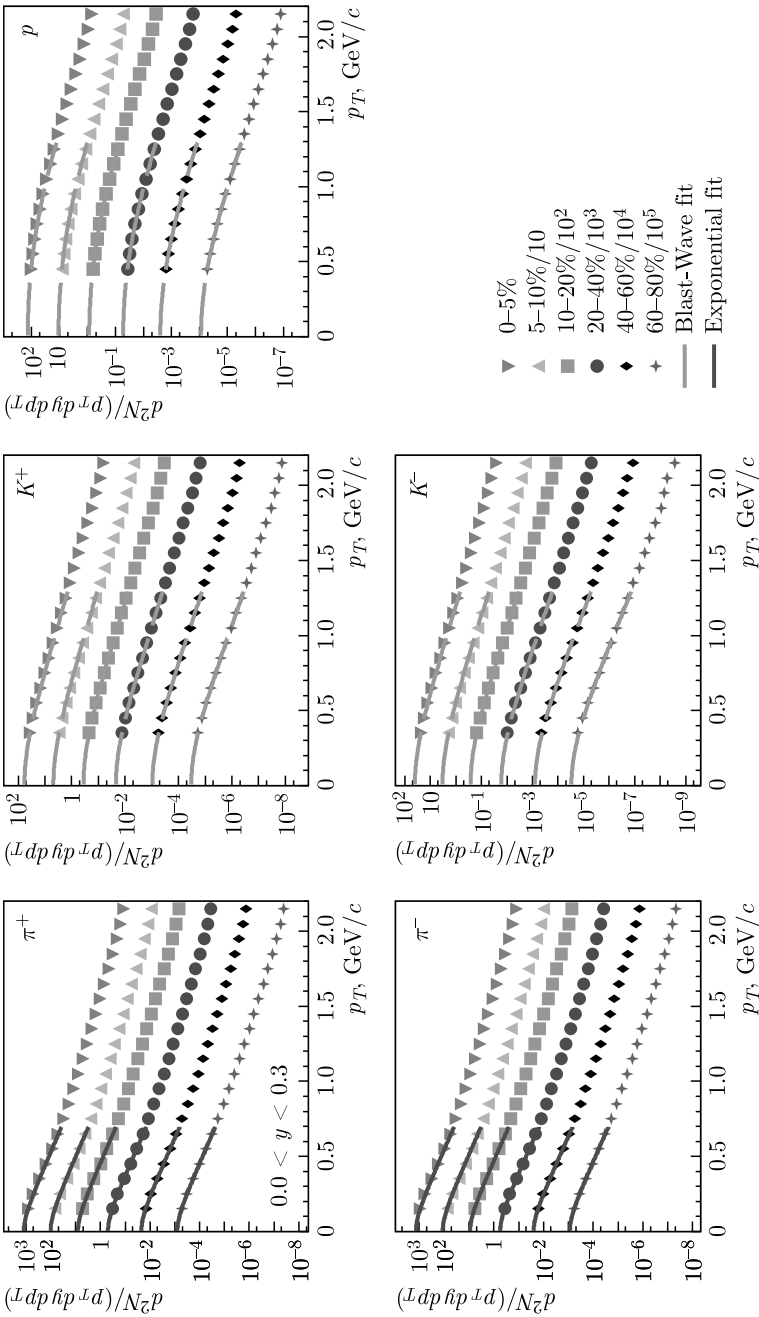


Рис. 4. Дифференциальные спектры рождения по поперечному импульсу в центральной области  $0 < y < 0,3$  при энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ. Для наглядности спектры в центральных столкновениях нарисованы без изменений, остальные распределения последовательно уменьшаются в 10 раз по мере уменьшения центральности. Сплошными линиями показана функция фита

Формы пионных спектров описывались экспоненциальной зависимостью:

$$\frac{1}{p_t} \frac{d^2 N}{dp_t dy} = \frac{C}{T(m+T)} \exp\left(-\frac{m_t - m}{T}\right), \quad (2)$$

где  $C$  и  $T$  — параметры фитирования;  $m_t = \sqrt{p_t^2 + m^2}$  — поперечная масса;  $m$  — масса покоя пиона.

Вклад от экстраполяции в  $dN/dy$  составлял 5–10% для пионов и 20–30% для каонов и протонов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция дифференциальных спектров рождения идентифицированных адронов по поперечному импульсу, рожденных в соударениях  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ, выполнена в восьми быстротных интервалах в диапазоне  $-1,2 < y < 1,2$  и шести интервалах по центральности. Подобраны оптимальные функции, описывающие форму полученных спектров: экспоненциальная для пионов и Blast-wave для каонов и протонов. Оценен вклад в  $dN/dy$  от экстраполяций, составляющий 5–10% для пионов и 20–30% для каонов и протонов. Выбранные функции описывают дифференциальные спектры рождения адронов в неизмеренных областях по поперечному импульсу в пределах 5%.

Поправки на эффективность регистрации треков в ТРС, эффективность выделения первичных частиц по ДСА, полученные в данной работе, стабильны по отношению к событиям, смоделированным различными генераторами. Эффективность идентификации также стабильна к различным входным данным, поскольку используемый в анализе  $n\sigma$ -метод идентификации, в отличие от байесовского подхода, опирается только на ожидания сигналов для различных типов частиц в подсистемах. Однако загрязнение может быть разным, так как оно зависит от области перекрытия сигналов, которая, в свою очередь, зависит от относительного выхода частиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aoki Y., Endrodi G., Fodor Z., Katz S.D., Szabo K.K.* The Order of the Quantum Chromodynamics Transition Predicted by the Standard Model of Particle Physics // *Nature*. 2006. V. 443. P. 675–678.
2. *Berges J., Rajagopal K.* Color Superconductivity and Chiral Symmetry Restoration at Nonzero Baryon Density and Temperature // *Nucl. Phys. B*. 1999. V. 538. P. 215–232.
3. *Kekelidze V.D., Lednický R., Matveev V.A., Meshkov I.N., Sorin A.S., Trubnikov G.V.* Three Stages of the NICA Accelerator Complex // *Eur. Phys. J. A*. 2016. V. 52. P. 211.

4. *Alt C. et al. (NA49 Collab.)*. Pion and Kaon Production in Central Pb + Pb Collisions at 20A and 30A GeV: Evidence for the Onset of Deconfinement // Phys. Rev. C. 2008. V. 77. P. 024903.
5. *Abelev B.I. (STAR Collab.)*. Enhanced Strange Baryon Production in Au + Au Collisions Compared to  $p + p$  at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Ibid. P. 044908.
6. *Abraamyan K. U. et al.* The MPD Detector at the NICA Heavy-Ion Collider at JINR // Nucl. Instr. Meth A. 2011. V. 628, No. 4. P. 99–102.
7. *Petersen H., Steinheimer J., Baur G., Bleicher M., Stöcker H.* Fully Integrated Transport Approach to Heavy Ion Reactions with an Intermediate Hydrodynamic Stage // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 044901.
8. *Agostinelli S. et al.* Geant4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506. P. 250–303.
9. *Allison J. et al.* Geant4 Developments and Applications // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 270–278.
10. *Allison J. et al.* Recent Developments in Geant4 // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186–225.
11. *Rogachevsky O. V., Bychkov A. V., Krylov A. V. et al.* Software Development and Computing for the MPD Experiment // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52. P. 817–820.
12. *Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U.* Thermal Phenomenology of Hadrons from 200A GeV S + S Collisions // Phys. Rev. C. 1993. V. 48. P. 2462.