

## Ядерная физика

Научная статья

УДК 539.125.4, 539.126.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18307>

### АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РОЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ВИСМУТА ПРИ ЭНЕРГИИ 9,2 ГэВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ BLAST-WAVE

Д. М. Ларионова , Я. А. Бердников, Д. О. Котов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 [dashalario@gmail.com](mailto:dashalario@gmail.com)

**Аннотация.** В работе представлены инвариантные спектры по поперечной массе для заряженных адронов в столкновениях ядер висмута ( $\text{Bi} + \text{Bi}$ ) при энергии 9,2 ГэВ, полученные путем моделирования с использованием гибридного генератора UrQMD и пакета MPDroot. Проведен анализ спектров в рамках статистической и Blast-Wave моделей, в результате которого получены значения температуры и барионных химических потенциалов, соответствующих стадиям кинетического и химического вымораживания в столкновениях  $\text{Bi} + \text{Bi}$ . Полученные результаты рассмотрены в контексте фазовой диаграммы ядерной материи.

**Ключевые слова:** кварк-глюонная плазма, заряженные адроны, MPD, NICA, фазовая диаграмма; ядерная материя

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

**Для цитирования:** Ларионова Д. М., Бердников Я. А., Котов Д. О. Анализ особенностей рождения заряженных адронов в столкновениях ядер висмута при энергии 9,2 ГэВ с помощью модели Blast-Wave // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 3. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18307>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18307>

### AN ANALYSIS OF THE FEATURES OF CHARGED HADRON PRODUCTION IN COLLISIONS OF BISMUTH NUCLEI AT AN ENERGY OF 9.2 GeV USING THE BLAST-WAVE MODEL

D. M. Larionova , Ya. A. Berdnikov, D.O. Kotov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 [dlar@bk.ru](mailto:dlar@bk.ru)

**Abstract.** The paper presents charged hadron invariant spectra obtained in  $\text{Bi} + \text{Bi}$  collisions at an energy of 9.2 GeV on the basis of simulation performed using the UrQMD hybrid generator and the MPDroot package. The spectra were analyzed in the framework of statistical and Blast-Wave models, resulting in the values of temperatures and baryonic chemical potentials corresponding to the stages of kinetic and chemical freeze-out in  $\text{Bi} + \text{Bi}$  collisions. The results were discussed in the context of the phase diagram of nuclear matter.



**Keywords:** quark-gluon plasma, charged hadrons, MPD, NICA, phase diagram, nuclear matter

**Funding:** The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2025-0009).

**For citation:** Larionova D. M., Berdnikov Ya. A., Kotov D. O., An analysis of the features of charged hadron production in collisions of bismuth nuclei at an energy of 9.2 GeV using the Blast-Wave model, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 82–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18307>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Многоцелевой детектор (*англ.* Multi-Purpose Detector (MPD)) [1] является одной из двух экспериментальных установок, расположенных на коллайдере NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [2], – флагманском проекте Объединенного института ядерных исследований (институт находится в наукограде Дубна Московской области, Россия; для краткости применяется термин «эксперимент MPD»).

Основные задачи эксперимента MPD заключаются в исследовании границы фазового перехода и поиске критической точки на фазовой диаграмме ядерной материи путем изучения особенностей рождения частиц в столкновениях тяжелых ядер в диапазоне энергий  $\sqrt{s_{NN}}$  от 4 до 11 ГэВ [3].

Фазовая граница ядерной материи определяет переход адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП) [4, 5] при повышении температуры  $T$  и/или барионного химического потенциала  $\mu_B$ . Формирование КГП и соответствующий фазовый переход в ядро-ядерных столкновениях были экспериментально подтверждены при энергиях, превышающих 100 ГэВ [4 – 6], что соответствует температурам около 200 МэВ и значениям  $\mu_B \approx 10$  МэВ, достигаемым в столкновении. Тем не менее, изучение остальной части фазовой диаграммы и поиск признаков КГП в ядро-ядерных столкновениях при более низких энергиях (менее и порядка 100 ГэВ) остаются важными и актуальными задачами.

Для выявления потенциальных признаков фазового перехода в ядро-ядерных столкновениях при энергиях NICA необходимо определить доступную область параметров температуры  $T$  и барионного химического потенциала  $\mu_B$ . Оценку значений  $T$  и  $\mu_B$  можно провести путем анализа особенностей рождения заряженных адронов с использованием статистической модели и модели Blast-Wave (ударной волны) [7, 8], основанной на подходе релятивистской гидродинамики.

В настоящей работе представлены инвариантные спектры по поперечной массе  $m_T$ , измеренные для заряженных адронов ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) в столкновениях ядер висмута (Bi + Bi) при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ; эти результаты получены на основе данных моделирования с использованием гибридного генератора UrQMD [9] и пакета MPDroot [1], который воспроизводит работу детекторной системы эксперимента MPD.

Проведен анализ полученных спектров в рамках статистической модели и модели Blast-Wave. Полученные результаты рассмотрены в контексте фазовой диаграммы ядерной материи.

## Эволюция ядро-ядерных столкновений

Процесс эволюции релятивистских столкновений можно разделить на четыре основные стадии:

- начальная стадия,
- термализация и коллективное расширение,
- химическое вымораживание,
- кинетическое вымораживание [10].

*Начальная стадия* соответствует первичному взаимодействию сталкивающихся ядер,

которое сопровождается обменом глюонами и кварками. Этот процесс приводит к быстрому нагреву системы и возможному образованию КГП (если достигаются значения  $T_{QGP}$  и  $\mu_B$ , необходимые для фазового перехода).

*Вторая стадия.* В результате последующих взаимодействий между частицами система термализуется, после чего начинается ее коллективное расширение.

*Третья стадия.* Когда система частиц расширяется до состояния, при котором прекращаются неупругие реакции, изменяющие ее состав, и устанавливаются окончательные относительные количества различных частиц, происходит химическое вымораживание.

Согласно статистической модели, после наступления химического вымораживания отношение выходов антипротонов к выходам протонов определяется величиной барионного химического потенциала  $\mu_B$  [11]:

$$\frac{\bar{p}}{p} = \exp\left(-\frac{2\mu}{T}\right) \Leftrightarrow \mu = T \cdot \frac{\ln(\bar{p}/p)}{2} \Leftrightarrow T = -\frac{2\mu}{\ln(\bar{p}/p)}. \quad (1)$$

*Четвертая стадия.* После наступления химического вымораживания система частиц продолжает расширяться и охлаждаться. Когда длина свободного пробега частиц становится больше размеров системы, упругие столкновения прекращаются, фиксируя импульсное распределение частиц, что соответствует наступлению кинетического вымораживания.

Для изучения характеристик кинетического вымораживания используются феноменологические модели, такие как Blast-Wave [7, 8]. Эта модель основана на релятивистском гидродинамическом подходе и описывает коллективное движение частиц в расширяющейся системе.

**Модель Blast-Wave.** Она основана на том, что разогретая материя обладает высокой температурой, распределенной неравномерно: в центре системы частиц температура выше, чем на ее периферии, что создает градиент давления. Согласно уравнениям гидродинамики, материя из центра устремляется наружу, формируя ударную волну.

Согласно модели Blast-Wave, все адроны формируются из кварков и глюонов одновременно, вследствие чего приобретают одинаковую среднюю скорость радиального расширения. При этом расширение адронной системы описывается в терминах релятивистской гидродинамики.

В рамках модели Blast-Wave инвариантные спектры частиц по поперечной массе  $m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$  можно описать следующей формулой:

$$\frac{dN}{m_T dm_T} = C \int^R r dr m_T I_0\left(\frac{p_T \sinh \rho}{T_0}\right) K_1\left(\frac{p_T \cosh \rho}{T_0}\right), \quad (2)$$

где  $C$  — нормировочная константа;  $T_0$  — температура кинетического вымораживания;  $R$  — максимальный радиус расширяющейся системы во время стадии «вымораживания»;  $I_0$ ,  $K_1$  — модифицированные функции Бесселя;  $\rho(r)$  — поперечное ускорение, зависящее от координаты частицы,

$$\rho(r) = \tanh^{-1}(\beta_T) \cdot r / R$$

( $\beta_T$  — средняя скорость радиального потока частиц);  $C$ ,  $\beta_T$ ,  $T_0$  — это свободные параметры модели.

### Методика измерений

В данной работе использованы данные моделирования 15 млн. столкновений  $Bi + Bi$  при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ; данные получены с помощью пакета MPDroot [1]. Последний использует гибридный генератор событий UrQMD [9], включающий в себя гидродинамический подход; кроме того, MPDroot позволяет воспроизводить отклик детекторных подсистем эксперимента MPD с помощью пакета Geant4 [12, 13].

Идентификация заряженных адронов в MPD осуществляется путем анализа: во-первых, — потерь энергии частицами, измеренных во времяпроекционной камере, во-вторых, — измеренного времени пролета частиц во времяпролетной камере. С деталями моделирования и процедурой идентификации частиц можно ознакомиться в работах [3, 14].

### Результаты анализа особенностей рождения заряженных адронов

**Определение параметров кинетического вымораживания.** На рис. 1 представлены инвариантные спектры по поперечной массе  $m_T$ , измеренные для заряженных адронов в различных центральностях столкновений Bi+Bi при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ. Линии обозначают аппроксимацию полученных спектров соответствующей функцией модели Blast-Wave (см. ф-лу (2)).

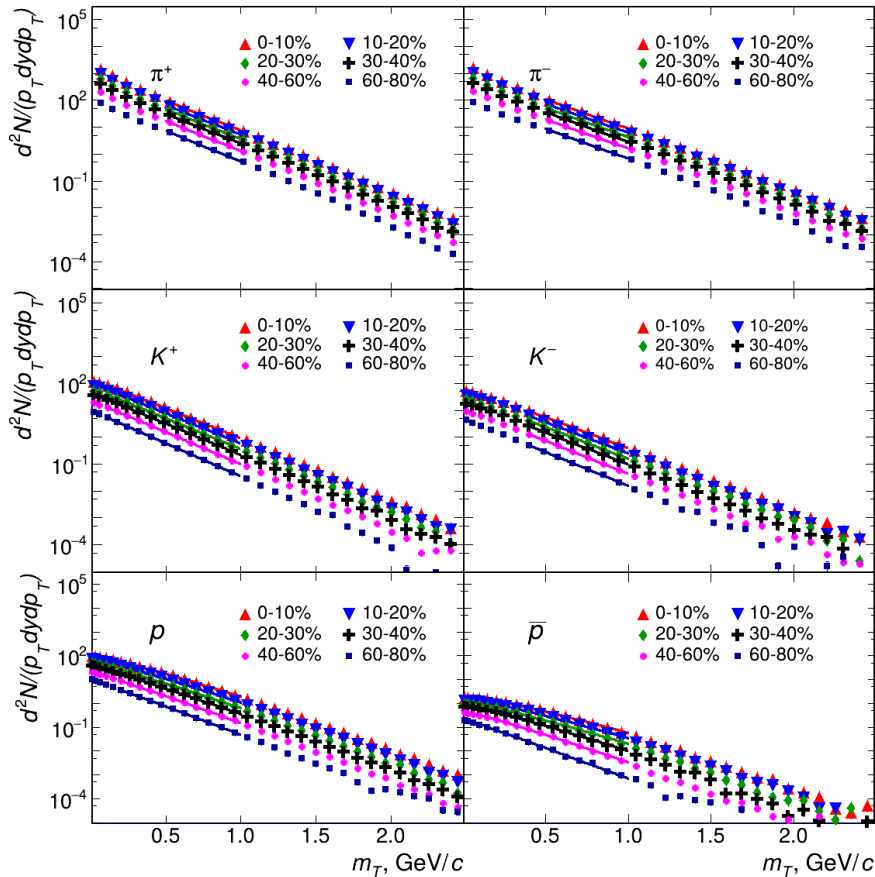


Рис. 1. Инвариантные спектры по поперечной массе, измеренные для частиц  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$  в различных центральностях столкновений Bi + Bi при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ. Аппроксимации спектров соответствующей функцией модели Blast-Wave (см. ф-лу (2)) показаны прямыми отрезками

Аппроксимация инвариантных  $m_T$ -спектров различных частиц функцией Blast-Wave проводилась в следующих диапазонах.

Тип заряженного адрона	Диапазон аппроксимации, ГэВ
$\pi^+$ , $\pi^-$ .....	0,50 – 1,00
$K^+$ , $\bar{p}$ .....	0,12 – 1,00
$K^-$ .....	0,40 – 1,00
$p$ .....	0,20 – 1,00

Выбор диапазонов аппроксимации диктовался достижением наилучшего согласия с данными моделирования. Установлено, что отличие значений данных моделирования от функции Blast-Wave не превышало 1%.

Поскольку функция Blast-Wave является интегральной, свободные параметры аппроксимации ( $C$ ,  $T_0$ ,  $\beta_T$ ) чувствительны к изменению диапазона аппроксимации, выбору начальных значений параметров и наложенных ограничений на значения параметров.

Влияние этих факторов было учтено путем оценки систематических неопределенностей.

Для указанной оценки условия аппроксимации, указанные ниже, варьировались на  $\pm 10\%$ . Это были следующие условия:

- границы диапазонов;
- начальные значения параметров;
- ограничения значений параметров.

Итоговые значения систематических неопределенностей определяли среднеквадратичной суммой процентных различий между итоговыми значениями параметров и полученными при разных условиях аппроксимации.

На рис. 2 представлены итоговые значения параметров  $T_0$  и  $\beta_T$ , полученные с помощью аппроксимации функцией Blast-Wave инвариантных различных типов заряженных адронов ( $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$ ,  $\bar{p}$ ) в зависимости от центральности столкновений  $\text{Bi} + \text{Bi}$ . Систематические погрешности представлены прямоугольниками.

Получено, что значения температуры кинетического вымораживания  $T_0$  не проявляют существенных зависимостей ни от центральности столкновения, ни от типа заряженных адронов. Среднее значение температуры кинетического вымораживания  $T_0 = 109$  МэВ (обозначено на рис. 2, *a* пунктирной красной линией).

Средние скорости радиального расширения частиц  $\beta_T$  демонстрируют тенденцию к убыванию с уменьшением области перекрытия сталкивающихся ядер (это соответствует увеличению значений центральности в процентах). Тем не менее, уменьшение значений  $\beta_T$  в периферических столкновениях, по сравнению с центральными, не является значимым с учетом систематических погрешностей.

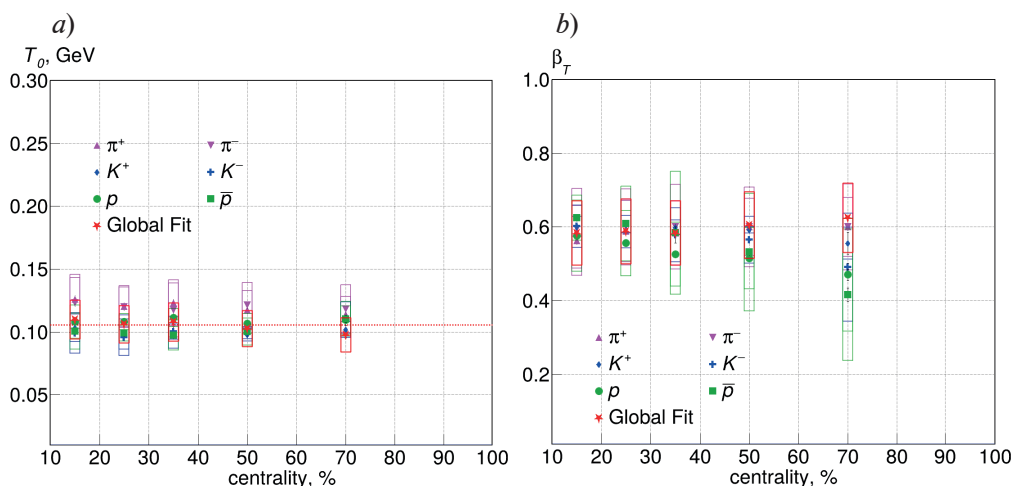


Рис. 2. Значения температуры кинетического вымораживания  $T_0$  (*a*) и средних скоростей радиального расширения системы частиц  $\beta_T$  (*b*) в зависимости от центральности ( $\text{Bi} + \text{Bi}$ )-столкновений. Прямоугольники показывают статистические погрешности определения значений  $T_0$  и  $\beta_T$ . Среднее значение  $T_0 = 109$  МэВ (горизонтальная пунктирная красная линия)

**Определение параметров фазового перехода.** Проведена оценка значения барионного химического потенциала и температуры, соответствующих фазовому переходу, путем вычисления отношений выходов антипротонов к выходам протонов ( $\bar{p}/p$ ).

Значения  $\bar{p}/p$ , измеренные в различных центральностях ( $\text{Bi} + \text{Bi}$ )-столкновений, представлены на рис. 3, *a*. Видно, что они не проявляют значимой зависимости от центральности столкновений и поперечного импульса  $p_T$ . Среднее значение отношения  $\bar{p}/p = 0,025$  (обозначено горизонтальным красным пунктиром) и было использовано для дальнейших вычислений.

Согласно расчетам в рамках квантовой хромодинамики, границу фазового перехода можно выразить следующей формулой [15]:

$$T_{\text{QGP}} = \frac{\sqrt{3/34}}{\pi} \sqrt{\sqrt{340\pi^2 (220)^4 + 55\mu^4} - 15\mu^2}. \quad (3)$$





В то же время барионный химический потенциал  $\mu$  можно выразить через температуру и отношение  $\bar{p}/p$  формулой (1). Таким образом, температуру и барионный химический потенциал, соответствующие фазовому переходу, можно найти как точку пересечения кривой, выраженной формулой (3), и прямой, задаваемой уравнением (1).

Получены следующие значения  $T_{\text{QGP}}$  и  $\mu_B$ , соответствующие фазовому переходу в столкновениях  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при энергиях коллайдера NICA:

$$T_{\text{QGP}} = 131 \text{ МэВ}, \mu_B = 247 \text{ МэВ}.$$

**Визуализация полученных результатов на диаграмме фазовой материи.** На рис. 3, *b* представлена фазовая диаграмма ядерной материи. Красной линией обозначена фазовая граница, вычисленная по формуле (3). Линии соответствуют значениям температуры, выраженным через барионный химический потенциал и найденное значение  $\bar{p}/p = 0,025$  (см. ф-лу (2)). Фиолетовая прямая на рис. 3, *b* выражает зависимость  $T(\mu_B, \bar{p}/p)$ , полученную с использованием значения  $\bar{p}/p = 0,025$ , соответствующего столкновениям  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 9,2 \text{ ГэВ}$ .

С использованием формулы (2) дополнительно было вычислено значение барионного химического потенциала  $\mu_B$ , соответствующего температуре кинетического вымораживания в столкновениях  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 9,2 \text{ ГэВ}$  (температура определена ранее с помощью модели Blast-Wave). Найденное значение  $\mu_B = 205 \text{ МэВ}$ .

Для сравнения приведены значения температуры кинетического вымораживания и фазового перехода, соответствующие энергии эксперимента PHENIX ( $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200 \text{ ГэВ}$ ). Зависимость  $T(\mu_B, \bar{p}/p)$  в виде прямой (показана на рис. 3, *b* черным цветом) получена с учетом значения  $\bar{p}/p = 0,79$ , измеренного в эксперименте PHENIX при  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200 \text{ ГэВ}$ .

Синие точки на рис. 3, *b* отмечают значения температуры и барионного химического потенциала системы частиц при столкновении на этапе кинетического вымораживания, а красные — они же, но на этапе фазового перехода.

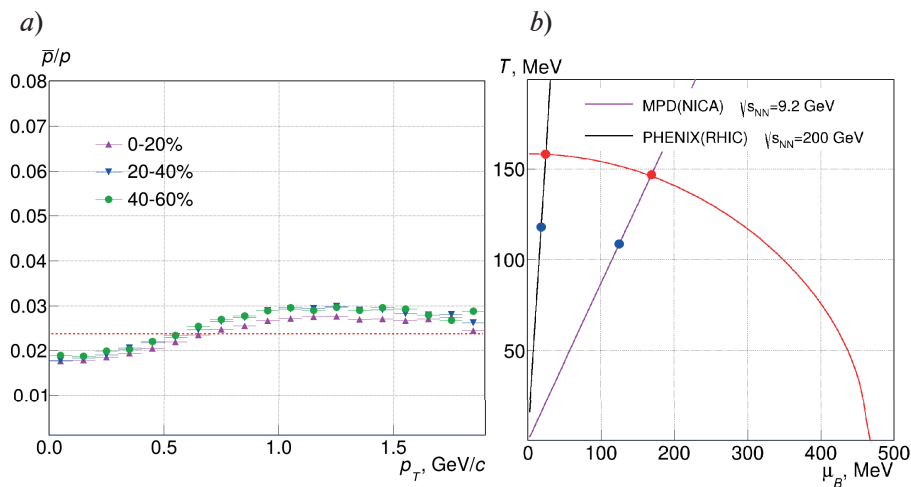


Рис. 3. Зависимости отношения выходов антипротонов к выходам протонов  $\bar{p}/p$  от поперечного импульса, измеренные в различных диапазонах центральности (%) столкновений  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при энергии  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 9,2 \text{ ГэВ}$  (а), и соответствующая фазовая диаграмма ядерной материи (зависимость температуры от барионного химического потенциала) (б)

### Закключение

В работе представлены спектры по поперечной массе заряженных адронов  $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$ , полученные с помощью моделирования столкновений  $\text{Bi} + \text{Bi}$  при энергии  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 9,2 \text{ ГэВ}$  с использованием гибридного генератора UrQMD и пакета MPDroot.

В результате анализа полученных спектров заряженных адронов в рамках модели Blast-Wave были найдены значения температуры кинетического вымораживания  $T_0$  и средней скорости радиального расширения системы частиц  $\beta_T$  в зависимости от центральности столкновений.

Вычисление отношений выходов антипротонов к выходам протонов позволило определить значения температур  $T_0$  и  $T_{\text{QGP}}$ , а также барионного химического потенциала  $\mu_B$ , соответствующих фазе кинетического вымораживания и фазового перехода. Были получены следующие значения параметров:

$T_0 \approx 109$  МэВ,  $\mu_B \approx 205$  МэВ при кинетическом вымораживании;

$T_{\text{QGP}} \approx 131$  МэВ,  $\mu_B \approx 247$  МэВ при фазовом переходе.

Представленные результаты позволяют оценить доступную область параметров температуры  $T$  и барионного химического потенциала  $\mu_B$ , что важно для потенциальных признаков фазового перехода в ядро-ядерных столкновениях при энергиях NICA.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abraamyan Kh. U., Afanasyev S. V., Alfeev V. S., et al.** (MPD Collaboration). The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. 2011. Vol. 628. No. 1. Pp. 99–102.
2. **Kekelidze V. D., Lednicky R., Matveev V. A., Meshkov I. N., Sorin A. S., Trubnikov G. V.** Three stages of the NICA accelerator complex // The European Physical Journal A. 2016. Vol. 52. No. 8. P. 211.
3. **Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al.** (MPD Collaboration). Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // The European Physical Journal A. 2022. Vol. 58. No. 7. P. 140.
4. **Adcox K., Adler S. S., Afanasyev S., et al.** (PHENIX Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 184–283.
5. **Rafelski J.** Melting hadrons, boiling quarks // The European Physical Journal A. 2015. Vol. 51. No. 9. P. 114.
6. **Adams J., Aggarwal M. M., Ahammed Z., et al.** (STAR Collaboration). Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 102–183.
7. **Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W.** Fireball spectra (Chapter) // Gutbrod H. H., Rafelski J. (Eds). Particle production in highly excited matter. NATO Science Book Series B: Physics. Vol. 303. Boston, MA, USA: Springer, 1993. Pp. 175–206.
8. **Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W.** Thermal phenomenology of hadrons from 200A GeV S+S collisions // Physical Review C. 1993. Vol. 48. No. 5. P. 2462.
9. **Petersen H., Steinheimer J., Burau G., Bleicher M., Stöcker H.** Fully integrated transport approach to heavy ion reactions with an intermediate hydrodynamic stage // Physical Review C. 2008. Vol. 78. No. 4. P. 044901.
10. **Bjorken J. D.** Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region // Physical Review D. 1983. Vol. 27. No. 1. P. 140.
11. **Гангрский Ю. П., Григорьев В. А., Емельянов В. М., Лapidус К. О., Оганесян Ю. Ц., Пенионжкевич Ю. Э., Пятков Ю. В.** Введение в физику тяжелых ионов. Под ред. Ю. Ц. Оганесяна. М.: Изд-во МИФИ, 2008. 424 с.
12. **Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.** Geant4 – a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. 2003. Vol. 506. No. 3. Pp. 250–303.
13. **Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al.** Recent developments in Geant4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A. 2016. Vol. 835. 1 November. Pp. 186–225.
14. **Мудрох А.** Перспективы детектора MPD по измерению спектров идентифицированных адронов в (Bi + Bi)-столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2024. Т. 55. № 4. С. 1128–1135.
15. **Aoki Y., Endrydi 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. Vol. 443. No. 7112. Pp. 675–678.



## REFERENCES

1. **Abraamyan Kh. U., Afanasyev S. V., Alfeev V. S., et al.** (MPD Collaboration), The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A. 628 (1) (2011) 99–102.
2. **Kekelidze V. D., Lednicky R., Matveev V. A., et al.**, Three stages of the NICA accelerator complex, Eur. Phys. J. A. 52 (8) (2016) 211.
3. **Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al.** (MPD Collaboration), Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA, Eur. Phys. J. A. 58 (7) (2022) 140.
4. **Adcox K., Adler S. S., Afanasyev S., et al.** (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration, Nucl. Phys. A. 757 (1–2) (2005) 184–283.
5. **Rafelski J.**, Melting hadrons, boiling quarks, Eur. Phys. J. A. 51 (9) (2015) 114.
6. **Adams J., Aggarwal M. M., Ahammed Z., et al.** (STAR Collaboration), Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions, Nucl. Phys. A. 757 (1–2) (2005) 102–183.
7. **Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W.**, Fireball spectra (Chapter), In book: Gutbrod H. H., Rafelski J. (Eds). Particle production in highly excited matter, NATO Science Ser. B: Phys. Vol. 303. Springer, Boston, MA, USA (1993) 175–206.
8. **Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W.**, Thermal phenomenology of hadrons from 200 A GeV S+S collisions, Phys. Rev. C. 48 (5) (1993) 2462.
9. **Petersen H., Steinheimer J., Burau G., et al.**, Fully integrated transport approach to heavy ion reactions with an intermediate hydrodynamic stage, Phys. Rev. C. 78 (4) (2008) 044901.
10. **Bjorken J. D.**, Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region, Phys. Rev. D. 27 (1) (1983) 140.
11. **Gangrskiy Yu. P., Grigor'yev V. A., Emel'yanov V. M., et al.**, Vvedeniye v fiziku tyazhelykh ionov [Introduction to heavy-ion physics], MIFI Publishing, Moscow, 2008 (in Russian).
12. **Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.**, Geant4 – a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 506 (3) (2003) 250–303.
13. **Allison J., K. Amako K., Apostolakis J., et al.**, Recent developments in Geant4, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 835 (1 Nov) (2016) 186–225.
14. **Mudrokh A.**, Prospects of the MPD detector for measuring the spectra of identified hadrons in Bi+Bi collisions at energy  $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$  GeV, Phys. Particl. Nucl. 55 (4) (2024) 937–977.
15. **Aoki Y., Endrydi G., Fodor Z., et al.**, The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics, Nature. 443 (7112) (2006) 675–678.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛАРИОНОВА Дарья Максимовна** — кандидат физико-математических наук, ассистент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
dashalario@gmail.com  
ORCID: 0009-0007-7019-5586

**БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович** — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
berdnikov@spbstu.ru  
ORCID: 0000-0003-0309-5917



**КОТОВ Дмитрий Олегович** — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

dmitriy.kotov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3395-0454

#### THE AUTHORS

**LARIONOVA Daria M.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

dlar@bk.ru

ORCID: 0009-0007-7019-5586

**BERDNIKOV Yaroslav A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

berdnikov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-0309-5917

**КОТОВ Dmitry O.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

dmitriy.kotov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3395-0454

*Статья поступила в редакцию 12.03.2025. Одобрена после рецензирования 17.03.2025. Принята 17.03.2025.*

*Received 12.03.2025. Approved after reviewing 17.03.2025. Accepted 17.03.2025.*