

DOI: 10.18721/JPM.14312
УДК 539.12

АНАЛИЗ РОЖДЕНИЯ ϕ -МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ С ЯДРАМИ АЛЮМИНИЯ И ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИЯХ 200 ГэВ

**М.М. Митранкова, Е.В. Банников, А.Я. Бердников,
Я.А. Бердников, А.В. Дубов, Д.О. Котов, Ю.М. Митранков**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе изучено рождение ϕ -мезонов в релятивистских столкновениях пучков протонов с ядрами алюминия ($p + Al$) и золота ($p + Au$) при энергиях 200 ГэВ, в области малых быстрот. Исследование проведено с помощью детекторной системы «ФЕНИКС» на коллайдере RHIC. С помощью различных теоретических моделей рассчитаны факторы ядерной модификации ϕ -мезонов в указанных взаимодействиях при условиях, идентичных экспериментальным, проведено сравнение результатов. Установлено, что учет фазы образования кварк-глюонной плазмы (КГП) при моделировании дает хорошее согласие с экспериментом для взаимодействия $p + Au$ и не дает его для $p + Al$, что может говорить о недостаточности размера системы взаимодействия последнего при энергии 200 ГэВ для формирования КГП, а также достаточности созданных минимальных условий для ее формирования в первом случае.

Ключевые слова: кварк-глюонная плазма, эффект холодной ядерной материи, фактор ядерной модификации

Ссылка при цитировании: Митранкова М.М., Банников Е.В., Бердников А.Я., Бердников Я.А., Дубов А.В., Котов Д.О., Митранков Ю.М. Анализ рождения ϕ -мезонов в столкновениях пучков протонов с ядрами алюминия и золота при энергиях 200 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 158–167. DOI: 10.18721/JPM.14312

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

AN ANALYSIS OF ϕ MESON PRODUCTION IN THE COLLISIONS OF PROTON BEAMS WITH ALUMINUM AND GOLD NUCLEI AT ENERGIES OF 200 GeV

**M.M. Mitrankova, E.V. Bannikov, A.Ya. Berdnikov,
Ya.A. Berdnikov, A.V. Dubov, D.O. Kotov, Yu.M. Mitrankov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

In the paper, ϕ meson production in the relativistic collisions at energies of 200 GeV measured by the PHENIX experiment (RHIC) has been studied. Phi mesons' nuclear modification factors were calculated for the mentioned interactions under conditions identical to the experimental ones, using different theoretical models, the results being compared. The accounting for the formation phase of quark-gluon plasma (QGP) in simulation was established to agree well with experiment for the $p + Au$ collisions and disagree for the $p + Al$ ones. This result could indicate an insufficient size of the interaction system of the latter to form QGP at an energy of 200 GeV and the sufficiency of the created minimum conditions for its formation in the former interaction system.

Keywords: quark-gluon plasma, cold nuclear matter effect, nuclear modification factor



Citation: Mitrankova M.M., Bannikov E.V., Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Dubov A.V., Kotov D.O., Mitrankov Iu.M., An analysis of ϕ meson production in the collisions of proton beams with aluminum and gold nuclei at energies of 200 GeV, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (3) (2021) 158–167. DOI: 10.18721/JPM.14312

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

Введение

Расчеты квантовой хромодинамики на решетке предсказывают фазовый переход адронного газа в такое состояние вещества, как кварк-глюонная плазма (КГП) при температуре $T \approx 150 \text{ МэВ} \approx 10^{12} \text{ К}$ (рис. 1 [1]). КГП представляет собой материю из сильно взаимодействующих элементарных частиц, в которой кварки и глюоны находятся в несвязанном состоянии и могут двигаться как квазисвободные частицы.

Систематическое изучение столкновений релятивистских ядер представляет уникальную возможность для исследования фазового перехода квантовой хромодинамики (КХД) в лабораторных условиях. Физическая программа эксперимента «ФЕНИКС» [2] на релятивистском коллайдере тяжелых ионов (*англ.* The Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC [3]) включает широкий спектр систем сталкивающихся ядер: от базовых взаимодействий протонных пучков до столкновений тяжелых ионов. Это позволяет изучать различные аспекты условий, необходимых для формирования КГП.

Экспериментальные свидетельства образования КГП были ранее получены при проведении соударений таких систем, как тяжелые ионы золота ($\text{Au} + \text{Au}$) [4], меди и золота ($\text{Cu} + \text{Au}$), при ускорении ядер до релятивистской энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$, а также ускорении ядер урана ($\text{U} + \text{U}$) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192 \text{ ГэВ}$ [5]. Что же касается динамики протонных взаимодействий ($p + p$), то она хорошо описывается расчетами пертурбативной КХД [1].

Изучение эллиптического и триангулярного потоков заряженных адронов в малых системах взаимодействий, таких как пучков протонов с ядрами золота ($p + \text{Au}$), ядер дейтерия с ядрами золота ($d + \text{Au}$), ядер гелия-3 с ядрами золота (${}^3\text{He} + \text{Au}$), позволило выдвинуть предположение, что плотность энергии в таких столкновениях достаточна для образования горячей и плотной материи КГП [6, 7]. Для более глубокого понимания эволюции системы необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

Исследование особенностей рождения легких адронов — это один из широко используемых способов изучения процесса образования КГП во взаимодействиях релятивистских ядер [5].

Среди большого разнообразия легких адронов ϕ -мезон представляет особый интерес [8], поскольку он содержит (анти)странные кварки ($s\bar{s}$), его выходы измеримы до больших значений поперечного импульса и он имеет относительно небольшое сечение адронного взаимодействия, а также время жизни большее, чем время жизни КГП ($\sim 46 \text{ фм/с}$, по сравнению со значением $\sim 5 \text{ фм/с}$, где c — скорость света в вакууме [1]).

Изучение рождения легких адронов в результате взаимодействий релятивистских ядер позволяет наблюдать различные эффекты горячей (предполагающей образование КГП) [1] и холодной (отражающей начальные и конечные условия взаимодействия) [9] ядерной материи. К явлениям, свидетельствующим об образовании горячей и плотной материи, относят коллективные эффекты, такие как повышенный выход странности [10] и эффект гашения струй [11]. Под эффектами холодной ядерной материи подразумевают эффект Кронина [12], многократное партонное рассеяние [13], модификация начальных функций распределения партонов в ядре [14] и другие эффекты.

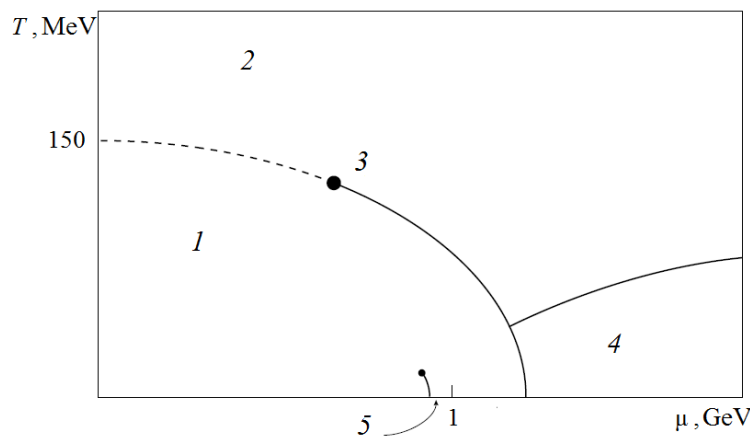


Рис. 1. Теоретическая фазовая диаграмма ядерной материи как функция температуры T и барионного химического потенциала μ : 1 – адронный газ, 2 – кварк-глюонная плазма, 3 – критическая точка, 4 – цветовая сверхпроводимость, 5 – нормальная ядерная материя. Пунктирной линией показан фазовый переход второго рода

Таким образом, множество эффектов, обусловленных различной природой и свидетельствующих об образовании или отсутствии КГП способны влиять на рождение ϕ -мезона во взаимодействии релятивистских ядер. Моделирование взаимодействий при тех же самых условиях, при которых проводили эксперимент, позволяет получать, с помощью различных теоретических моделей, ожидаемое влияние эффектов горячей и холодной ядерной материи на рождение ϕ -мезонов.

Интерпретация экспериментальных данных на основе сравнения с результатами моделирования необходима для понимания минимальных условий формирования КГП.

В данной работе ставилась цель исследования эволюции столкновения систем протонных пучков с ядрами алюминия и золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ путем моделирования и сравнения с экспериментом особенностей рождения ϕ -мезона в подобных столкновениях.

Для моделирования эволюции системы без образования фазы КГП использовались программные пакеты PYTHIA [15] и AMPT [16] с параметрами по умолчанию. Для рассмотрения коллективных эффектов (эффектов КГП) использовалась конфигурация программного пакета AMPT «плавление струн».

Методика измерения и используемые модели

Наборы экспериментальных данных, использованные в анализе, были получены в эксперименте «ФЕНИКС» на коллайдере RHIC при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в $(p + Al)$ - и $(p + Au)$ -взаимодействиях в области малых быстрот ($|\eta| < 0,35$). Рождение ϕ -мезонов изучалось по каналу распада на два разнозаряженных K -мезона. Значения массы ϕ -мезона, его среднего времени жизни и вероятности распада по данному каналу (B_r) представлены в таблице [14].

Т а б л и ц а

Основные характеристики изучаемого распада ϕ -мезона

Канал распада	Масса, МэВ/ c^2	Среднее время жизни, фм/ c	B_r , %
$\phi \rightarrow K^+K^-$	$1019,455 \pm 0,020$	$46,3 \pm 0,4$	$48,9 \pm 0,5$



Согласно модели Глаубера [17], при отсутствии коллективных эффектов, взаимодействие релятивистских ядер можно представить в виде суперпозиции элементарных нуклон-нуклонных взаимодействий. Однако различные эффекты как горячей материи, так и холодной могут влиять на эволюцию системы сталкивающихся ядер. Поэтому для изучения коллективных эффектов, влияющих на рождение частиц в столкновениях ультрарелятивистских ядер, используются факторы ядерной модификации R_{AB} [18]. Эта величина вычисляется как отношение инвариантных выходов адронов в столкновении $A + B$ к инвариантному выходу этих же адронов в столкновениях протонных пучков ($p + p$) при той же энергии, нормированное на число неупругих нуклон-нуклонных столкновений (N_{coll}) в системе $A + B$.

В модели Глаубера значение N_{coll} оценивается с помощью моделирования Монте-Карло.

Для более глубокого анализа полученных экспериментальных данных, с помощью программных пакетов РУТНА и АМРТ было осуществлено моделирование взаимодействий $p + Al$ и $p + Au$ при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, аналогичных взаимодействиям, проведенным экспериментально. Модель Лунда фрагментации струн широко используется для описания процесса адронизации ($p + p$)-столкновений и для выполнения расчетов КХД [19].

В 1997 году на основе этой модели был создан программный пакет РУТНІА, целью которого является моделирование процесса взаимодействия протонов при высокой энергии. Современной версией программного пакета является РУТНІА 8, которая и использовалась в настоящей работе. Однако результаты вычислений, относящихся к рождению ϕ -мезона во взаимодействиях протонных пучков при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, имеют расхождение с экспериментальными данными [20]. Для описания взаимодействий тяжелых (тяжелее протона) релятивистских ядер, на базе РУТНІА была создана новая гибридная модель РУТНІА/Angantyr [21]. В рамках этой модели взаимодействие ядер $A + B$ описывается как суперпозиция элементарных нуклон-нуклонных взаимодействий разного типа (упругое, дифракционное, поглощающее).

В данной работе вычисление факторов ядерной модификации ϕ -мезона на основе моделирования взаимодействий в программном пакете РУТНІА произведено в соответствии с той же процедурой, которая применялась к экспериментальным данным. Значения фактора ядерной модификации R_{AB} вычислялись как отношение инвариантных выходов ϕ -мезонов во взаимодействиях $p + Al$ или $p + Au$, полученных с помощью программного пакета РУТНІА/Angantyr, к аналогичному инвариантному выходу ϕ -мезонов во взаимодействии протонных пучков при той же энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, полученное с помощью стандартного пакета РУТНІА 8. Данное отношение нормировано на экспериментальное число неупругих нуклон-нуклонных столкновений (N_{coll}) в системе $p + Al$ или $p + Au$ соответственно. Благодаря такой процедуре вычисления факторов ядерной модификации, устраняется вышеупомянутое расхождение экспериментальных данных с расчетными для инвариантного выхода ϕ -мезонов во взаимодействиях протонных пучков, выполненных с помощью пакета РУТНІА 8.

Другой теоретической моделью, широко используемой для описания эволюции столкновений релятивистских ионов, является многофазная транспортная модель (*англ.* A Multi-Phase Transport model, АМРТ model). Программный пакет, основанный на данной модели, дает возможность всестороннего исследования процесса возможного образования КГП. Модель АМРТ с параметрами по умолчанию описывает эволюцию взаимодействия релятивистских ядер без учета образования КГП. Данная конфигурация модели АМРТ включает следующие стадии:

начальные условия;

партонный каскад с учетом связанного состояния кварков и глюонов;

переход от партонной к адронной материи на основе модели Лунда фрагментации струн;

адронные взаимодействия.

В расширенной конфигурации программного пакета АМРТ «плавление струн» учитывается формирование фазы КГП: проводится моделирование партонного каскада, после которого следует объединение партонов в адроны с помощью модели кварковой коалесценции [16]. В данном случае факторы ядерной модификации ϕ -мезона были рассчитаны как отношение их инвариантных выходов в изучаемых взаимодействиях, полученных с помощью программного пакета АМРТ, к экспериментальному значению аналогичного инвариантного выхода во взаимодействии протонных пучков ($p + p$) при той же энергии [22], нормированное на экспериментальное число N_{coll} неупругих нуклон-нуклонных столкновений $p + Al$ или $p + Au$ соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Сравнение факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в столкновениях $p + Al$ и $p + Au$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, полученных в эксперименте «ФЕНИКС», и факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в аналогичных взаимодействиях, рассчитанных с помощью

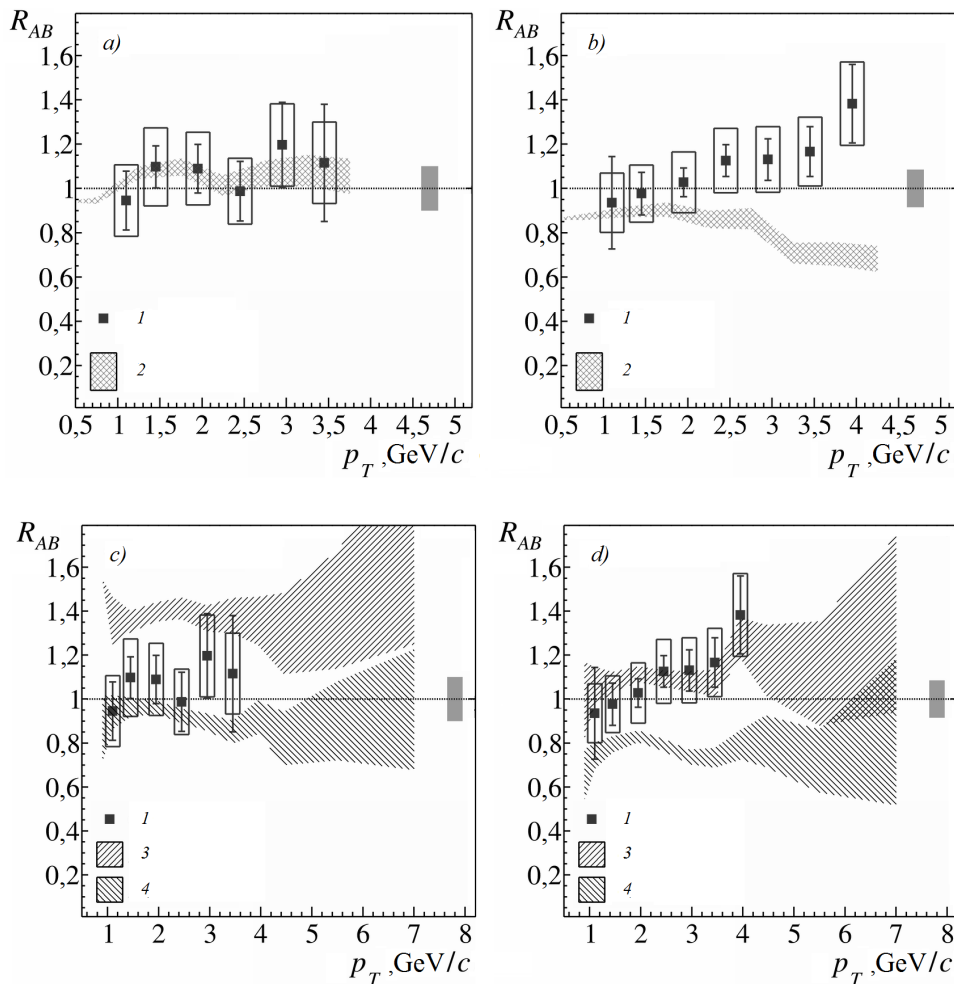


Рис. 2. Распределения факторов ядерной модификации ϕ -мезонов по поперечному импульсу p_T в ($p + Al$)- (a,c) и ($p + Au$)- (b,d) взаимодействиях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ; данные получены экспериментально (1), с помощью программного пакета PYTHIA (2), программного пакета АМРТ, версия с плавлением струн (3) и с параметрами по умолчанию (4). «Усы» и «прямоугольники» обозначают статистическую и систематическую неопределенности измерений, затушенные прямоугольники справа обозначают нормировочную неопределенность



программного пакета RYTHIA, представлено на рис. 2, *a, b*. Видно, что результаты расчета факторов ядерной модификации ϕ -мезонов, полученные с помощью программного пакета RYTHIA, хорошо согласуются с экспериментальными результатами в столкновениях $p + \text{Al}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Однако во взаимодействиях $p + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ значения R_{AB} , рассчитанные с помощью модели RYTHIA, оказываются меньше, чем R_{AB} , полученные в эксперименте. При этом следует отметить, что расхождение растет с увеличением поперечного импульса p_T .

На рис. 2, *c, d* представлены распределения факторов ядерной модификации R_{AB} по поперечному импульсу, измеренные для ϕ -мезонов в $(p + \text{Al})$ - и $(p + \text{Au})$ -взаимодействиях при той же энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, в эксперименте «ФЕНИКС» и с помощью программного пакета AMPT. Модель AMPT с параметрами по умолчанию хорошо описывает экспериментальные результаты в $(p + \text{Al})$ -взаимодействиях, в то время как для $(p + \text{Au})$ -взаимодействий конфигурация AMPT «плавление срун» дает меньшие значения R_{AB} , чем экспериментальные. С другой стороны, значения факторов ядерной модификации ϕ -мезонов, рассчитанные с помощью конфигурации модели AMPT «плавление струн», превосходят экспериментальные в $(p + \text{Al})$ -взаимодействиях, но хорошо согласуются с таковыми в $(p + \text{Au})$ -взаимодействиях.

Заключение

В настоящей работе проведен анализ рождения ϕ -мезонов в столкновениях протонных пучков с ядрами алюминия и ядрами золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области малых быстрот. Проведено моделирование взаимодействий при тех же условиях, что исследовались в эксперименте, с помощью программных пакетов RYTHIA и AMPT и сравнение полученных экспериментальных результатов с данными теоретических расчетов.

Распределение факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в $(p + \text{Au})$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области малых быстрот совпадает с расчетными результатами, выполненными с помощью конфигурации модели AMPT «плавление струн», в пределах погрешностей, в то время как значения факторов ядерной модификации, полученные в программных пакетах RYTHIA и AMPT с параметрами по умолчанию, оказались меньше экспериментальных значений.

Напротив, распределение факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в $(p + \text{Al})$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, в области малых быстрот, совпадает с расчетными данными, выполненными с помощью RYTHIA и AMPT с параметрами по умолчанию, в пределах погрешностей, в то время как значения факторов ядерной модификации, полученные с помощью конфигурации модели AMPT «плавление струн», оказались больше экспериментальных значений.

Полученный результат может свидетельствовать в пользу того, что механизм образования ϕ -мезона при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ во взаимодействиях протонных пучков с ядрами алюминия существенно отличается от такового во взаимодействиях протонных пучков с ядрами золота. Минимальные условия (температура и барионная плотность), необходимые для формирования КГП, возможно, достигаются во взаимодействиях пучков протонов с ядрами золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, в то время как во взаимодействиях пучков протонов с ядрами алюминия при той же энергии признаков образования КГП не наблюдается.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2020-0024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Adcox K., Adler S.S., Afanasiev S., et al.** 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.
2. **Adcox K., Adler S.S., Aizama M., et al.** (PHENIX Collaboration). PHENIX detector overview // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 469–479.
3. **Harrison M., Ludlam T., Ozaki S.** RHIC project overview // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 235–244.
4. **Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al.** Nuclear modification factors of ϕ mesons in $d + Au$, $Cu + Cu$ and $Au + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Physical Review. C. 2011. Vol. 83. No. 2. P. 024909.
5. **Berdnikov A., Berdnikov Ya., Kotov D., et al.** Phi meson measurements in $Cu + Au$ collisions at 200 GeV and in $U + U$ collisions at 192 GeV // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1135. No. 1. P. 012044.
6. **Aidala C., Akiba Y., Alfred M., et al.** (PHENIX Collaboration). Creation of quark-gluon plasma droplets with three distinct geometries // Nature Physics. 2019. Vol. 15. March. Pp. 214–220.
7. **Nagle J., Zajt W.** Small system collectivity in relativistic hadronic and nuclear collisions // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2018. Vol. 68. Pp. 211–235.
8. **Shor A.** Phi meson production as a probe of the quark-gluon plasma // Physical Review Letters. 1985. Vol. 54. No. 11. Pp. 1122–1125.
9. **Armesto N.** Small collision systems: theory overview on cold nuclear matter effects // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 171. P. 11001.
10. **Koch P., Müller B., Rafelski J.** Strangeness in relativistic heavy ion collisions // Physics Reports. 1986. Vol. 142. No. 4. Pp. 167–262.
11. **d’Enterria D.** (CERN and MIT, LNS). 6.4. Jet quenching. Springer materials (Germany). Ed. by R. Stock. Landolt-Bornstein – Group I – Elementary Particles, Nuclei and Atoms. 2010. Vol. 23 (Relativistic Heavy Ion Physics). Pp. 471–520.
12. **Kopeliovich B.Z., Nemchik J., Schäfer A., Tarasov A.V.** Cronin effect in hadron production of nuclei // Physical Review Letters. 2002. Vol. 88. No. 23. P. 232303.
13. **Arneodo M.** Nuclear effects in structure functions // Physics Reports. 1994. Vol. 240. No. 5–6. Pp. 301–393.
14. **Nakamura K. et Particle Data Group.** Review of particle physics // Journal of Physics G. 2010. Vol. 37. No. 7A. P. 075021.
15. **Sjostrand T., Ask S., Christiansen J., Corke R., Desai N., Ilten P., Mrenna S., Prestel S., Rasmussen C., Skands P.** An introduction to PYTHIA 8.2 // Computer Physics Communications. 2015. Vol. 191. June. Pp. 159–177.
16. **Lin Z.-W., Ko C. M., Li B.-A., Zhang B., Pal S.** Multiphase transport model for relativistic heavy ion collisions // Physical Review C. 2005. Vol. 72. No. 6. P. 064901.
17. **Miller M., Reygers K., Sanders S., Steinberg P.** Glauber modeling in high energy nuclear collisions // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2007. Vol. 57. Pp. 205–243.
18. **Mitranskova M.M., Berdnikov Ya.A., Berdnikov A.Ya., Kotov D.O., Mitrankov Iu.M.** Production of light flavor hadrons in small systems measured by PHENIX at RHIC // Physica Scripta. 2021. Vol. 96. No. 8. P. 084010
19. **Andersson B., Mohanty S., Soderberg F.** Parton fragmentation and string dynamics // Physics Reports. 1983. Vol. 97. No. 2–3. Pp. 31–145.
20. **Adam J., Adamova D., Aggarwal M., et. al.** $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ meson production at high transverse momentum in p - p and Pb - Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Physical Review. C. 2017. Vol. 95. No. 6. P. 064606.



21. **Bierlich C., Gustafson G., Lönnblad L., Shah H.** The Angantyr model for heavy-ion collisions in PYTHIA 8 // Journal of High Energy Physics. 2018. Vol. 2018. No. 10. P. 134.

22. **Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al.** Measurement of neutral mesons in $p + p$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and scaling properties of hadron production // Physical Review D. 2011. Vol. 83. No. 5. P. 052004.

Статья поступила в редакцию 20.06.2021, принята к публикации 05.07.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИТРАНКОВА Мария Максимовна – аспирантка Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mashalario@gmail.com

БАНИКОВ Егор Викторович – студент магистратуры Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
bannikov.ev.21@gmail.com

БЕРДНИКОВ Александр Ярославич – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alexber@phmf.spbstu.ru

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
berdnikov@spbstu.ru

ДУБОВ Александр Викторович – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
alexanderpolytech@mail.ru

КОТОВ Дмитрий Олегович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
dmitriy.kotov@gmail.com

МИТРАНКОВ Юрий Михайлович – ассистент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация. 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mitrankovy@gmail.com

REFERENCES

1. **Adcox K., Adler S.S., Afanasiev S., et al.**, 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.
2. **Adcox K., Adler S.S., Aizama M., et al.** (PHENIX Collaboration), PHENIX detector overview, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A.* 499 (2–3) (2003) 469–479.
3. **Harrison M., Ludlam T., Ozaki S.**, RHIC project overview, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A.* 499 (2–3) (2003) 235–244.
4. **Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al.**, Nuclear modification factors of ϕ mesons in $d + Au$, $Cu + Cu$ and $Au + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. C.* 83 (2) (2011) 024909.
5. **Berdnikov A., Berdnikov Ya., Kotov D., et al.**, Phi meson measurements in $Cu + Au$ collisions at 200 GeV and in $U + U$ collisions at 192 GeV, *J. Phys., Conf. Ser.* 1135 (1) (2018) 012044.
6. **Aidala C., Akiba Y., Alfred M., et al.** (PHENIX Collaboration), Creation of quark-gluon plasma droplets with three distinct geometries, *Nat. Phys.* 15 (March) (2019) 214–220.
7. **Nagle J., Zajc W.**, Small system collectivity in relativistic hadronic and nuclear collisions, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 68 (2018) 211–235.
8. **Shor A.** Phi meson production as a probe of the quark-gluon plasma, *Phys. Rev. Lett.* 54 (11) (1985) 1122–1125.
9. **Armesto N.**, Small collision systems: theory overview on cold nuclear matter effects, *EPJ Web of Conferences.* 171 (2018) 11001.
10. **Koch P., Müller B., Rafelski J.**, Strangeness in relativistic heavy ion collisions, *Phys. Rep.* 142 (4) (1986) 167–262.
11. **d’Enterria D.** (CERN and MIT, LNS), 6.4. Jet quenching, Springer materials (Germany), Ed. by R. Stock, Landolt-Bornstein – Group I – Elementary Particles, Nuclei and Atoms. 23 (Relativistic Heavy Ion Physics) (2010) 471–520.
12. **Kopeliovich B.Z., Nemchik J., Schäfer A., Tarasov A.V.**, Cronin effect in hadron production of nuclei, *Phys. Rev. Lett.* 88 (23) (2002) 232303.
13. **Arneodo M.**, Nuclear effects in structure functions, *Phys. Rep.* 240 (5–6) (1994) 301–393.
14. **Nakamura K. et Particle Data Group.**, Review of particle physics, *J. Phys. G.* 37 (7A) (2010) 075021.
15. **Sjostrand T., Ask S., Christiansen J., et al.**, An introduction to PYTHIA 8.2, *Comp. Phys. Comm.* 191 (June) (2015) 159–177.
16. **Lin Z.-W., Ko C. M., Li B.-A., et al.**, Multiphase transport model for relativistic heavy ion collisions, *Phys. Rev. C.* 72 (6) (2005) 064901.
17. **Miller M., Reygers K., Sanders S., Steinberg P.**, Glauber modeling in high energy nuclear collisions, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 57 (2007) 205–243.
18. **Mitrankova M.M., Berdnikov Ya.A., Berdnikov A.Ya., et al.**, Production of light flavor hadrons in small systems measured by PHENIX at RHIC, *Phys. Scr.* 96 (8) (2021) 084010.
19. **Andersson B., Mohanty S., Soderberg F.**, Parton fragmentation and string dynamics, *Phys. Rep.* 97 (2–3) (1983) 31–145.
20. **Adam J., Adamova D., Aggarwal M., et al.**, $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ meson production at high transverse momentum in p - p and Pb - Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, *Phys. Rev. C.* 95 (6) (2017) 064606.
21. **Bierlich C., Gustafson G., Lönnblad L., Shah H.**, The Angantyr model for heavy-ion collisions in PYTHIA 8, *J. High Energy Phys.* 2018 (10) (2018) 134.
22. **Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al.**, Measurement of neutral mesons in $p + p$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and scaling properties of hadron production, *Phys. Rev. D.* 83 (5) (2011) 05200422.

Received 20.06.2021, accepted 05.07.2021.

THE AUTHORS**MITRANKOVA Mariia M.***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

mashalario@gmail.com

BANNIKOV Egor V.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

bannikov.ev.21@gmail.com

BERDNIKOV Alexander Ya.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

alexber@phmf.spbstu.ru

BERDNIKOV Yaroslav A.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

berdnikov@spbstu.ru

DUBOV Alexander V.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

alexanderpolytech@mail.ru

KOTOV Dmitry O.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

dmitriy.kotov@gmail.com

MITRANKOV Iurii M.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

mitrankovy@gmail.com