

DOI: 10.18721/JPM.13212
УДК 539.12

ИЗМЕРЕНИЕ ФАКТОРОВ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ϕ -МЕЗОНА В СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ С ЯДРАМИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ

**М.М. Митранкова, Я.А. Бердников, А.Я. Бердников,
Ю.М. Митранков, Д.О. Котов**

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

В работе изучено рождение ϕ -мезонов в релятивистских столкновениях пучков протонов с ядрами алюминия ($p + Al$, малая система) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, проведенных в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC. Измерены инвариантные спектры ϕ -мезонов по поперечному импульсу и их факторы ядерной модификации для четырех классов событий по центральности, %: 0 – 20, 20 – 40, 40–72, 0 – 72. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными данными по рождению π^0 -мезонов. Анализ полученных экспериментальных данных привел к заключению, что во всех доступных диапазонах по центральности и поперечному импульсу факторы ядерной модификации ϕ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерения. Полученный результат свидетельствует в пользу того, что в рассматриваемых столкновениях кварк-глюонная плазма не образуется.

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

Ссылка при цитировании: Митранкова М.М., Бердников Я.А., Бердников А.Я., Митранков Ю.М., Котов Д.О. Измерение факторов ядерной модификации ϕ -мезона в столкновениях протонных пучков с ядрами алюминия при энергии 200 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 2. С. 152–159. DOI: 10.18721/JPM.13212

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

MEASUREMENT OF ϕ -MESON'S NUCLEAR MODIFICATION FACTORS IN THE COLLISIONS OF PROTON BEAMS WITH ALUMINUM NUCLEI AT AN ENERGY OF 200 GeV

**M.M. Mitrankova, Ya.A. Berdnikov, A.Ya. Berdnikov,
Iu.M. Mitrankov, D.O. Kotov**

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

The ϕ -mesons production in the relativistic collisions of proton beams with aluminum nuclei ($p + Al$, small system) at $\sqrt{s_{NN}}$ energy of 200 GeV has been studied. The PHENIX experiment was carried out at the RHIC. The ϕ -mesons' invariant transverse momentum spectra and their nuclear modification factors were measured in four centrality bins of the range of transverse momentum (%): 0 – 20, 20 – 40, 40 – 72, 0 – 72. The obtained results were compared with similar data on the π^0 -mesons production. The experimental data analysis led to the conclusion that the ϕ -mesons' nuclear modification factors were equal to one (within the measurement uncertainties) over all available ranges of centrality and transverse momenta. The findings of the work testified that quark-gluon plasma did not produce in the performed collisions.

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



Citation: Mitrankova M.M., Berdnikov Ya.A., Berdnikov A.Ya., Mitrankov Iu.M., Kotov D.O., Measurement of ϕ -meson's nuclear modification factors in the collisions of proton beams with aluminum nuclei at an energy of 200 GeV, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (2) (2020) 152–159. DOI: 10.18721/JPM.13212

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

Введение

Квантовая хромодинамика предсказывает существование такого состояния вещества как кварк-глюонная плазма (КГП), в котором кварки и глюоны находятся в несвязанном состоянии.

Ультррелятивистские столкновения тяжелых ионов позволяют изучать поведение ядерной материи при значениях температуры и давления, достаточных для образования КГП [1]. Таким образом, можно контролируемо создавать и изучать свойства КГП и ее эволюцию в адронный газ, что является основным назначением эксперимента PHENIX [2] на коллайдере RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, находится в Брукхейвенской национальной лаборатории, штат Нью-Йорк, США) [3].

Одним из способов экспериментального исследования свойств КГП является измерение выходов частиц в конечном состоянии. Среди многочисленных элементарных частиц ϕ -мезон обладает рядом отличительных свойств, в частности малым сечением взаимодействия с нестранными адронами, и его время жизни (42 фм/с) гораздо больше времени существования КГП [4]. Благодаря этим свойствам, на образование ϕ -мезона меньше влияют адронные взаимодействия на поздней стадии эволюции системы, образованной в столкновении тяжелых ядер, а также его дочерние частицы не перерасеиваются в адронной фазе.

Таким образом, свойства ϕ -мезона в первую очередь определяются условиями в ранней партонной фазе, и измерение его выходов можно считать «чистым» способом исследования свойств вещества, образованного в столкновениях релятивистских ядер.

С помощью измерения выхода ϕ -мезона можно исследовать так называемые эффекты

холодной ядерной материи в столкновениях малых систем [5]. Под эффектами холодной ядерной материи подразумевают модификации функций распределения партонов в ядре [6], эффект Кронина [7], который связывают с процессом многократного перерасеяния входящего партона внутри ядра-мишени, и другие эффекты.

Исследование эффектов холодной ядерной материи путем измерения рождения ϕ -мезонов в малых системах позволяет установить, связаны ли наблюдаемые эффекты в столкновении тяжелых ядер с эффектами холодной или горячей ядерной материи. В частности, результаты подобного исследования помогают объяснить разницу между значениями факторов ядерной модификации π^0 -мезонов, ϕ -мезонов и протонов, полученными в столкновениях ядер золота (Au+Au), меди (Cu+Cu), меди и золота (Cu+Au) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, а также ядер урана (U+U) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ [8, 9].

Методика измерения

В настоящей работе используются результаты измерений, выполненных с помощью детектора PHENIX на коллайдере RHIC. Проведенное исследование направлено на изучение рождения ϕ -мезонов по каналу распада на заряженные каоны по схеме $\phi \rightarrow K^+ K^-$ в столкновениях протонов с ядрами алюминия ($p+Al$) при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Главной задачей анализа является получение инвариантных спектров по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации R_{AB} ϕ -мезона в столкновениях $p + Al$.

Каоны, образующиеся при распаде ϕ -мезона, невозможно отличить от других каонов, поэтому все треки каонов от каждого события объединяются в пары с разноименными зарядами. Для каждого трека компо-

ненты вектора 3-импульса \mathbf{p} измеряются с помощью дрейфовой камеры. Инвариантная масса и поперечный импульс для пары каонов вычисляются на основе кинематики двухчастичного распада.

Спектр инвариантной массы для пары каонов с разными знаками содержит как полезный сигнал ϕ -мезонов, так и комбинаторный фон. Комбинаторный фон состоит из двух составляющих: коррелированный фон и некоррелированный. Для оценки последнего применяется метод смешанных событий [12]. После вычитания некоррелированного фона из общего спектра необходимо оценить коррелированный фон путем аппроксимации распределения инвариантной массы сверткой функции Брейта – Вигнера с функцией Гаусса (с дисперсией, равной экспериментальному массовому разрешению детектора) для описания сигнала и с полиномиальной функцией для описания фона.

Экспериментальное массовое разрешение детектора оценивается с использованием моделирования работы спектрометра методом Монте-Карло с нулевой шириной $\phi \rightarrow K^+ K^-$, в котором ϕ -мезон имеет бесконечное время жизни. Выходы ϕ -мезонов были получены путем интегрирования распределения по инвариантной массе в интервале ± 9 МэВ/ c^2 вблизи массы ϕ -мезона (1,019 ГэВ/ c^2 [13]) после вычитания комбинаторного фона.

Инвариантный спектр рождения ϕ -мезона в каждом интервале по поперечному импульсу вычисляется следующим образом:

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{1}{N_{event}} \frac{1}{Br} \frac{1}{\epsilon_{eff}(p_T)} \frac{N(\Delta p_T)}{\Delta p_T \Delta y}, \quad (1)$$

где p_T , Δp_T , ГэВ/ c , – поперечный импульс мезона и интервал по нему, соответственно; y , Δy – быстрота и интервал по ней; $N(\Delta p_T)$ – число мезонов, зарегистрированных экспериментальной установкой (выход мезонов); N_{event} – полное число анализиру-

емых событий в выбранном диапазоне центральности; $\epsilon_{eff}(p_T)$ – эффективность восстановления ϕ -мезонов, полученная с помощью моделирования распада, прохождения и восстановления мезонов в экспериментальной установке PHENIX методом Монте-Карло; Br – вероятность распада мезона по исследуемому каналу.

Подавление выходов частиц в столкновениях релятивистских ядер изучается путем определения факторов ядерной модификации R_{AB} , вычисляемых как отношение инвариантных выходов частиц, измеренных в релятивистских столкновениях тяжелых ионов, к выходам этих же частиц, измеренных в элементарных столкновениях протонов ($p + p$); величина выхода в $(A+B)$ -столкновении нормируется на число неупругих нуклон-нуклонных столкновений.

Факторы ядерной модификации частиц в столкновениях различных ядер используются для изучения коллективных эффектов, влияющих на спектры рождения частиц по поперечному импульсу, и вычисляются в соответствии с формулой

$$R_{AB}(p_T) = \frac{f_{bias} \sigma_{pp}^{inel}}{N_{coll}} \frac{dN_{AB}(p_T)}{d\sigma_{pp}(p_T)}, \quad (2)$$

где

$$dN_{AB}(p_T) = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N_{AB}(p_T)}{dp_T dy}$$

– инвариантный спектр рождения мезонов в столкновениях тяжелых ядер;

$$d\sigma_{pp}(p_T) = \frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 \sigma_{pp}}{dp_T dy}$$

– инвариантное дифференциальное сечение рождения этих частиц в $(p + p)$ -столкновениях при той же энергии в системе центра масс; f_{bias} – Байес-фактор, корректирующий неточность определения центральности столкновения; $\sigma_{pp}^{inel} = 42,2$ мб – полное сечение неупругого протон-протонного взаимодействия; N_{coll} – число бинарных столкновений в выбранном диапазоне по центральности.

Если $R_{AB}(p_T) \approx 1$, то вероятно, что коллективные эффекты во взаимодействиях тя-

желых ядер отсутствуют, а взаимодействия могут быть представлены в виде суперпозиции взаимодействий отдельных нуклонов. Если $R_{AB}(p_T) < 1 (> 1)$, то выходы частиц подавлены (находятся в избытке), что может свидетельствовать о наличии коллективных эффектов во взаимодействиях тяжелых ядер.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Инвариантные спектры рождения ϕ -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях $p + Al$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ представлены на рис. 1. Данные спектры были измерены для четырех классов событий по центральности, %: 0 – 72, 0 – 20, 20 – 40 и 40 – 72, в диапазоне значений поперечного импульса 1,0 – 4,0 ГэВ/с. Аппроксимация выполнялась с помощью функции Леви:

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2N}{dp_T dy} = \frac{m}{2\pi} \times \left(\frac{(n-1)(n-2)}{(k+m_\phi(n-1))(k+m_\phi)} \right) \left(\frac{k + \sqrt{p_T^2 + m_\phi^2}}{k+m_\phi} \right), \quad (3)$$

где m_ϕ , ГэВ/с², – инвариантная масса ϕ -мезона; k, m, n – свободные параметры.

Полученные спектры по поперечному им-

пульсу использовались для расчетов факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в $(p + Al)$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

На рис. 2 представлены распределения факторов ядерной модификации R_{AB} по поперечному импульсу, измеренные для ϕ -мезонов в $(p + Al)$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, при различных интервалах центральности столкновений. Видно, что для всех интервалов центральности, на всем диапазоне поперечного импульса значения факторов ядерной модификации R_{AB} для ϕ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерений.

На рис. 3 приведены сравнения факторов ядерной модификации ϕ - и π^0 -мезонов в $(p + Al)$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Видно, что для всех интервалов центральности и на всем диапазоне поперечного импульса значения факторов ядерной модификации ϕ - и π^0 -мезонов принимают одинаковые значения в пределах неопределенностей измерений. Это может свидетельствовать о том, что эффекты холодной ядерной материи не оказывают какого-либо влияния на различие значений факторов ядерной модификации ϕ - и π^0 -мезонов в столкновениях тяжелых ядер золота, меди и урана (Au+Au, Cu+Cu, Cu+Au и U+U) [8, 9].

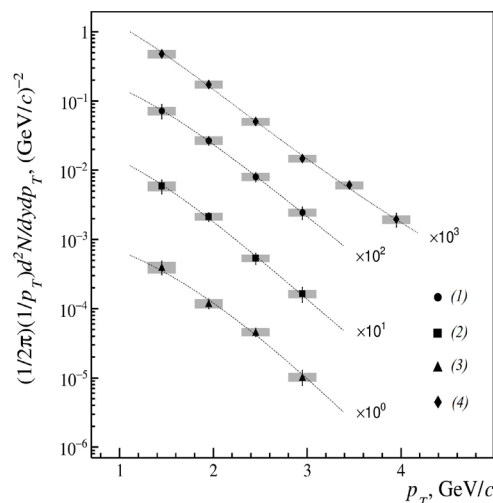


Рис. 1. Инвариантные спектры рождения ϕ -мезонов по поперечному импульсу в $(p + Al)$ -столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ для четырех классов событий по центральности, %: 0 – 20 (1), 20 – 40 (2), 40–72 (3), 0 – 72 (4).

Аппроксимация кривых функцией Леви представлена точечными линиями.

Здесь и далее «усы» и «прямоугольники» обозначают статистическую и систематическую неопределенности измерений

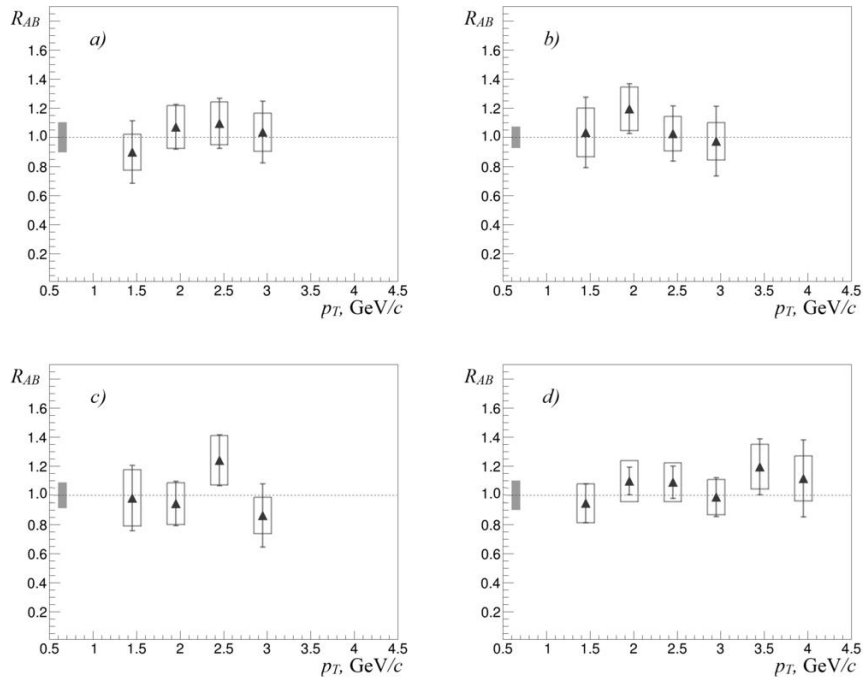


Рис. 2. Распределения факторов ядерной модификации ϕ -мезонов по поперечному импульсу в $(p + \text{Al})$ -столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ для четырех классов событий по центральности, %: 0 – 20 (a), 20 – 40 (b), 40–72 (c), 0 – 72 (d); $|y| < 0,35$

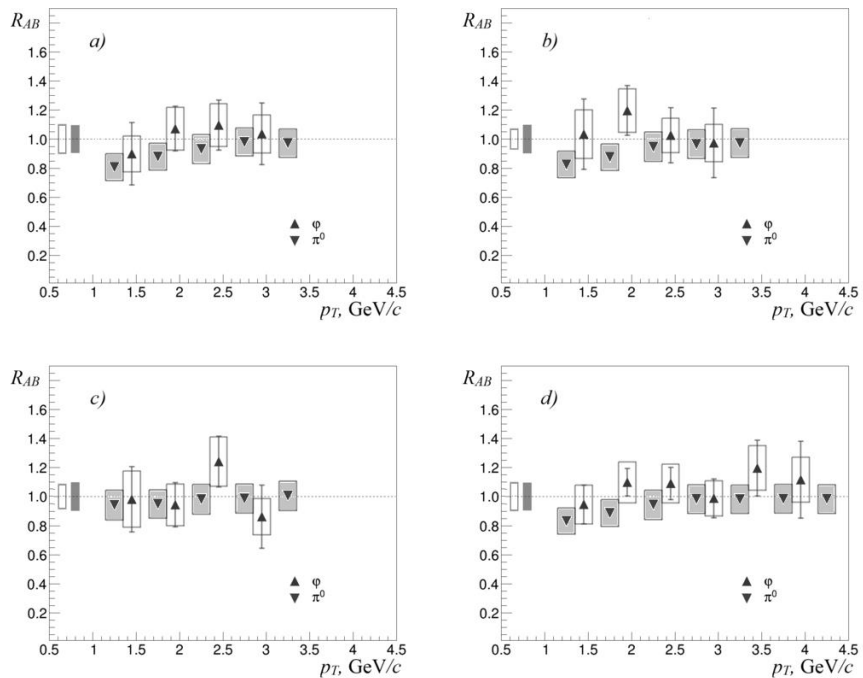


Рис. 3. Распределения факторов ядерной модификации ϕ - и π^0 -мезонов по поперечному импульсу в $(p + \text{Al})$ -столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ для четырех классов событий по центральности, %: 0 – 20 (a), 20 – 40 (b), 40–72 (c), 0 – 72 (d); $|y| < 0,35$



Заключение

В настоящей работе было проведено измерение инвариантных спектров по поперечному импульсу и факторов ядерной модификации ϕ -мезонов в $(p + Al)$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Во всех доступных диапазонах по центральности и поперечному импульсу факторы ядерной модификации ϕ -мезонов рав-

ны единице в пределах неопределенностей измерения. Полученный результат свидетельствует в пользу того, что в рассматриваемых столкновениях кварк-глюонная плазма не образуется.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы 0784-2020-0024)

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. **Koch P., Müller B., Rafelski J.** Strangeness in relativistic heavy ion collisions // Physics Reports. 1986. Vol. 142. No. 4. Pp. 167–262.
5. **Armesto N.** Small collision systems: theory overview on cold nuclear matter effects // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 171. P. 11001.
6. **Arneodo M.** Nuclear effects in structure functions // Physics Reports. 1994. Vol. 240. No. 5–6. Pp. 301–393.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **Adcox K., Ajitanand N.N., Alexander J., et al.** (PHENIX Collaboration). PHENIX central arm tracking detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 489–507.
11. **Ikematsu K., Iwata Y., Kaimi K., et al.** A start-timing detector for the collider experiment PHENIX at RHIC-BNL // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1998. Vol. 411. No. 2–3. Pp. 238–248.
12. **L'Hôte D.** About resonance signal extraction from multiparticle data: combinatorics and event mixing methods // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 1994. Vol. 337. No. 2–3. Pp. 544–556.
13. **Beringer J., et al.** (Particle Data Group). Review of particle physics // Physical Review. D. 2012. Vol. 86. No. 1. P. 010001.

Статья поступила в редакцию 31.03.2020, принята к публикации 20.04.2020.

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

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

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

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

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

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, Nuclear Physics. A. 757 (1–2) (2005) 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. 499 (2–3) (2003) 469–479.
3. Harrison M., Ludlam T., Ozaki S., RHIC project overview, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A., 499 (2–3) (2003) 235–244.
4. Koch P., Müller B., Rafelski J., Strangeness in relativistic heavy ion collisions, Physics Reports. 142 (4) (1986) 167–262.
5. Armesto N., Small collision systems: theory overview on cold nuclear matter effects, EPJ Web of Conferences. 171 (2018) 11001.
6. Arneodo M., Nuclear effects in structure functions, Physics Reports. 240 (5–6) (1994) 301–393.
7. Kopeliovich B.Z., Nemchik J., Schäfer A., Tarasov A.V., Cronin effect in hadron production of nuclei, Physical Review Letters. 88 (23) (2002) 232303.
8. 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. 83 (2) (2011) 024909.

9. **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.

10. **Adcox K., Ajitanand N.N., Alexander J., et al.** (PHENIX Collaboration), PHENIX central arm tracking detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. 499 (2–3) (2003) 489–507.

11. **Ikematsu K., Iwata Y., Kaimi K., et al.**, A

start-timing detector for the collider experiment PHENIX at RHIC-BNL, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. 411 (2–3) (1998) 238–248.

12. **L'Hôte D.**, About resonance signal extraction from multiparticle data: combinatorics and event mixing methods, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section, A. 337 (2–3) (1994) 544–556.

13. **Beringer J., et al.** (Particle Data Group), Review of particle physics, Physical Review, D. 86 (1) (2012) 010001.

Received 31.03.2020, accepted 20.04.2020.

THE AUTHORS

MITRANKOVA Mariia M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
mashalario@gmail.com

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
berdnikov@spbstu.ru

BERDNIKOV Alexander Ya.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
alexber@phmf.spbstu.ru

MITRANKOV Iurii M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
mitrankovy@gmail.com

KOTOV Dmitry O.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
dmitriy.kotov@gmail.com