

## ИЗУЧЕНИЕ РОЖДЕНИЯ $\varphi$ -МЕЗОНОВ В ЛЕГКИХ СИСТЕМАХ СТОЛКНОВЕНИЙ

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

В рамках изучения рождения  $\varphi$ -мезонов в малых системах столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в эксперименте PHENIX на RHIC исследуются факторы ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов в различных системах столкновений, таких как  $p + Al$ ,  $p + Au$ ,  $d + Au$  и  ${}^3He + Au$ . Проведено сравнение факторов ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов с факторами ядерной модификации  $\pi^0$ -мезонов во взаимодействиях  $p + Al$  и  ${}^3He + Au$ , а также факторов ядерной модификации  $\varphi$ -,  $\pi^0$ -мезонов и  $(p + \bar{p})/2$  во взаимодействиях  $p + Au$ .

This paper is devoted to the study of  $\varphi$ -meson production in small collision systems at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV measured by the PHENIX experiment at RHIC. The  $\varphi$ -meson nuclear modification factors were measured in different collision systems, such as  $p + Al$ ,  $p + Au$ ,  $d + Au$  and  ${}^3He + Au$ . The comparison of  $\varphi$ -meson nuclear modification factors to  $\pi^0$ -meson nuclear modification factors in  $p + Al$  and  ${}^3He + Au$  collisions and the comparison of  $\varphi$ -meson nuclear modification factors to  $\pi^0$ -meson and  $(p + \bar{p})/2$  nuclear modification factors are provided.

PACS: 25.75.-q

### ВВЕДЕНИЕ

Квантовая хромодинамика предсказывает такое состояние вещества, как кварк-глюонная плазма (КГП), в котором кварки и глюоны находятся в несвязанном состоянии [1]. Столкновения тяжелых ионов предоставляют уникальную возможность изучать свойства и характеристики КГП в лабораторных условиях, что является главной целью эксперимента PHENIX [2].

Исследовать характеристики сильновзаимодействующей плотной и горячей материи (КГП), образующейся в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов, позволяет изучение потерь энергии партонів в данной материи путем исследования рождения адронов. Потери энергии партонів в КГП могут быть обнаружены через подавление рождения

---

\* E-mail: mashalario@gmail.com

адронов с большим поперечным импульсом  $p_T$  в столкновениях тяжелых ионов, чем в протон-протонных взаимодействиях (так называемый эффект гашения струй [3]). Другим свидетельством образования КГП является увеличенный выход странности в столкновениях релятивистских ионов по сравнению с элементарными протон-протонными взаимодействиями, который заключается в избыточном рождении адронов, содержащих  $s$ - и  $\bar{s}$ -кварки. Избыточное рождение странных частиц в высокоэнергетических столкновениях тяжелых ионов по сравнению с взаимодействиями  $p + p$  является прямым следствием процесса химического равновесия странных кварков в КГП [4].

Одним из способов экспериментального исследования свойств КГП является измерение выходов частиц в конечном состоянии. Векторный  $\varphi$ -мезон обладает малым сечением взаимодействия с нестранными адронами, и время его жизни ( $42 \text{ фм} \cdot c^{-1}$  [5]) гораздо больше времени существования КГП ( $\sim 5 \text{ фм} \cdot c^{-1}$  [6]). Благодаря этим свойствам на образование  $\varphi$ -мезона меньше влияют адронные взаимодействия на поздней стадии эволюции системы, образованной в столкновении тяжелых ядер, а его дочерние частицы не перерассеиваются в адронной фазе. Измерение выходов  $\varphi$ -мезона используется для изучения как зависимости эффекта гашения струй от кваркового состава рождающихся частиц, так и повышенного выхода странности в столкновениях релятивистских ионов, так как  $\varphi$ -мезон представляет собой наиболее легкое связанное состояние  $s$ - и  $\bar{s}$ -кварков и может быть измерен в области больших поперечных импульсов [5]. Также масса  $\varphi$ -мезона ( $(1019,46 \pm 0,02) \text{ МэВ} \cdot c^{-2}$  [7]) сравнима с массой наиболее легких барионов, таких как протон, что позволит изучить процессы образования адронов в зависимости от аромата, количества кварков и массы рождающихся частиц.

Изучение потоков различного порядка в столкновениях легких систем ( $p + \text{Au}$ ,  $d + \text{Au}$ ,  $^3\text{He} + \text{Au}$ ) позволило предположить, что в этих столкновениях вопреки ожиданиям может образовываться КГП [8]. Если это так, то могут быть обнаружены свидетельства потери энергии в плазме, которые проявят себя через особенности рождения адронов.

Изучение малых систем также может помочь интерпретировать результаты рождения легких адронов в столкновениях тяжелых ионов, в частности наблюдаемую разницу между факторами ядерной модификации  $\pi^0$ -,  $\varphi$ -мезонов и  $(p + \bar{p})/2$ , полученными во взаимодействиях  $\text{Au} + \text{Au}$ ,  $\text{Cu} + \text{Cu}$ ,  $\text{Cu} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$  и взаимодействиях  $\text{U} + \text{U}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 192 \text{ ГэВ}$  [9, 10].

## 1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Использованные экспериментальные данные во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  и  $p + \text{Au}$  были получены в эксперименте PHENIX в 2015 г. и во взаимодействиях  $^3\text{He} + \text{Au}$  в 2014 г. при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$  в области малых быстрот ( $|\eta| < 0,35$ , где  $\eta$  — псевдобыстрота).

Два центральных спектрометрических плеча детектора PHENIX — восточное и западное — предназначены для регистрации электронов, заряженных адронов и фотонов. Для данного анализа были использованы дрейфовые камеры, которые определяют импульс заряженных частиц и ВВС-детектор, предназначенный для определения центральности столкновения [2].

Каоны, образующиеся в распаде  $\varphi$ -мезона, невозможно отличить от других каонов, поэтому все треки заряженных частиц от каждого события объединяются в пары с разноименными зарядами. Все заряженные частицы считаются каонами, и им приписывается масса каона. С помощью дрейфовой камеры определяются компоненты вектора 3-импульса каждого трека, на основе которых согласно кинематике двухчастичного распада вычисляются инвариантная масса и поперечный импульс для пары каонов.

Распределение по инвариантной массе для пары каонов с разными знаками помимо полезного сигнала  $\varphi$ -мезонов содержит комбинаторный фон, состоящий из двух компонентов: коррелированного и некоррелированного фона. Для оценки некоррелированного фона использовался метод смешанных событий [11]. После вычитания некоррелированного фона из общего спектра распределение по инвариантной массе аппроксимировалось сверткой функции Брейта–Вигнера с функцией Гаусса для описания сигнала и полиномиальной функцией для описания коррелированного фона. Дисперсия функции Гаусса, интерпретируемая как массовое разрешение детектора, и эффективность восстановления  $\varphi$ -мезонов были определены с помощью полного моделирования детектора PHENIX в программном пакете Geant [12] с нулевой шириной  $\varphi \rightarrow K^+K^-$ , в котором  $\varphi$ -мезон имеет бесконечное время жизни. Выходы  $\varphi$ -мезонов были получены путем интегрирования распределения по инвариантной массе в интервале  $\pm 9 \text{ МэВ} \cdot \text{с}^{-2}$  вблизи массы  $\varphi$ -мезона ( $1,019 \text{ ГэВ} \cdot \text{с}^{-2}$ ) после вычитания комбинаторного фона.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 представлены инвариантные спектры по поперечному импульсу  $S = 1/(2\pi p_T) d^2N/(dp_T dy)$  (где  $y$  — быстрота,  $N$  — число мезонов, зарегистрированных экспериментальной установкой (выход мезонов) [13])  $\varphi$ -мезонов во взаимодействиях  $p + \text{Al}$ ,  $p + \text{Au}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ ГэВ}$  в области малых быстрот ( $|\eta| < 0,35$ ). Измерения проводились в интервале по поперечному импульсу от 1,1 до 3,95  $\text{ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  для четырех классов событий по центральности во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  и  $p + \text{Au}$  и в интервале от 1,1 до 7,0  $\text{ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  для пяти классов событий по центральности во взаимодействиях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ . Полученные значения инвариантных спектров  $\varphi$ -мезонов используются для расчета факторов ядерной модификации [13].

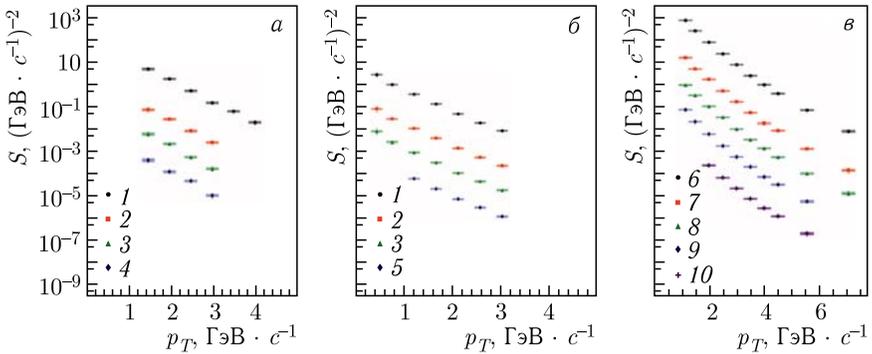


Рис. 1. Инвариантные спектры по поперечному импульсу  $S$ , измеренные для  $\varphi$ -мезонов во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  (а),  $p + \text{Au}$  (б) и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (в) при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в области малых быстрот. Измерения проведены для различных классов событий по центральности: 1 —  $(0-72(84)\%) \cdot 10^4$ ; 2 —  $(0-20\%) \cdot 10^2$ ; 3 —  $(20-40\%) \cdot 10^1$ ; 4 —  $(40-72\%) \cdot 10^0$ ; 5 —  $(40-84\%) \cdot 10^0$ ; 6 —  $(0-88\%) \cdot 10^5$ ; 7 —  $(0-20\%) \cdot 10^3$ ; 8 —  $(20-40\%) \cdot 10^2$ ; 9 —  $(40-60\%) \cdot 10^1$ ; 10 —  $(60-88\%) \cdot 10^1$  (представлены с соответствующими множителями для большей ясности). «Усы» и прямоугольники обозначают статистические и систематические погрешности

Факторы ядерной модификации  $R_{AB}$  [13], измеренные для  $\varphi$ -мезонов во взаимодействиях  $p + \text{Al}$ ,  $p + \text{Au}$ ,  $d + \text{Au}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ и различной центральности столкновений, показаны на рис. 2. Во всех центральностях во всем диапазоне по поперечному импульсу значения  $R_{AB}$   $\varphi$ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерений.

На рис. 3, а и в приведены для сравнения факторы ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов и  $\pi^0$ -мезонов во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ.

Во всех центральностях во всем диапазоне по поперечному импульсу значения  $R_{AB}$   $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов одинаковые в пределах неопределенностей измерений. Это может указывать на то, что повышенный выход странности в малых системах столкновений не наблюдается. Также это может свидетельствовать о том, что эффекты холодной ядерной материи не оказывают влияния на различие значений  $R_{AB}$   $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов во взаимодействиях  $\text{Au} + \text{Au}$ ,  $\text{Cu} + \text{Cu}$ ,  $\text{Cu} + \text{Au}$  и  $\text{U} + \text{U}$  [9, 10].

На рис. 3, б представлены для сравнения факторы ядерной модификации  $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов с факторами ядерной модификации  $(p + \bar{p})/2$  во взаимодействиях  $p + \text{Au}$ . Значения факторов ядерной модификации легких мезонов совпадают между собой в пределах погрешностей, тогда как значения факторов ядерной модификации  $(p + \bar{p})/2$  больше, чем значения факторов ядерной модификации  $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов. Различие зна-

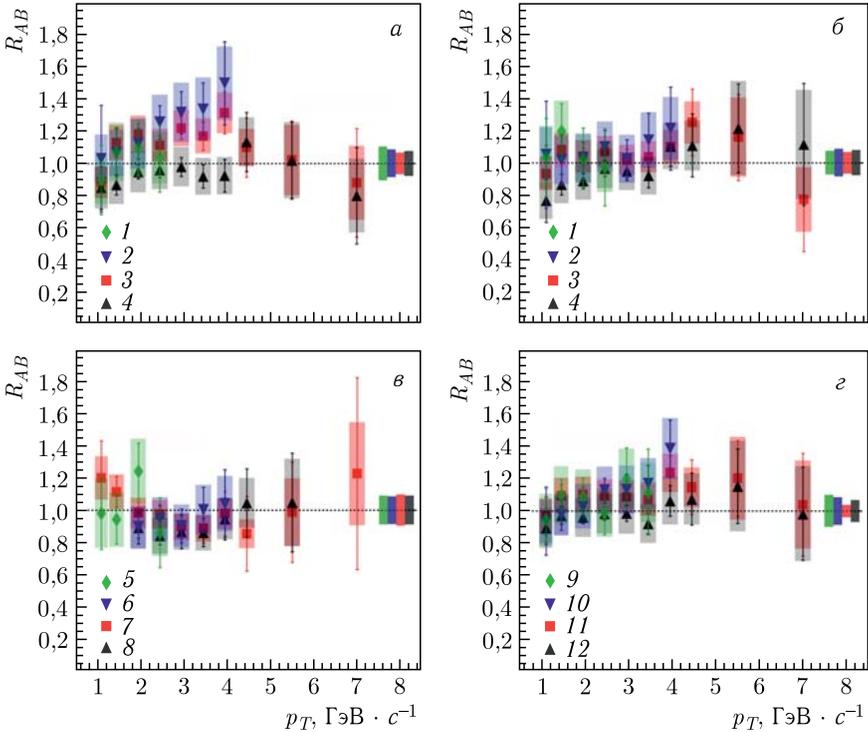


Рис. 2. Факторы ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов во взаимодействиях (1 —  $p + \text{Al}$ ; 2 —  $p + \text{Au}$ ; 3 —  $d + \text{Au}$  и 4 —  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ) для четырех классов событий по центральности (0–20% (а); 20–40% (б); 5 — 40–72%  $p + \text{Al}$ ; 6 — 40–84%  $p + \text{Au}$ ; 7 — 60–88%  $d + \text{Au}$ ; 8 — 60–88%  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (в); 9 — 0–72%  $p + \text{Al}$ ; 10 — 0–84%  $p + \text{Au}$ ; 11 — 0–88%  $d + \text{Au}$ ; 12 — 0–88%  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (г)) в области малых быстрот. Систематическая неопределенность, связанная с неопределенностью числа бинарных нуклон-нуклонных столкновений, обозначена прямоугольником справа

чений факторов ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов и  $(p + \bar{p})/2$  указывает на то, что рождение этих адронов определяется кварковым составом, а не массой рождающихся частиц. Аналогичный результат для  $(p + \bar{p})/2$  был получен в столкновениях тяжелых ионов, тогда как значения факторов ядерной модификации легких мезонов в столкновениях тяжелых ионов отличаются от результатов, полученных в легких системах столкновений: выходы  $\pi^0$ -мезонов подавлены в большей степени, чем выходы  $\varphi$ -мезонов [9].

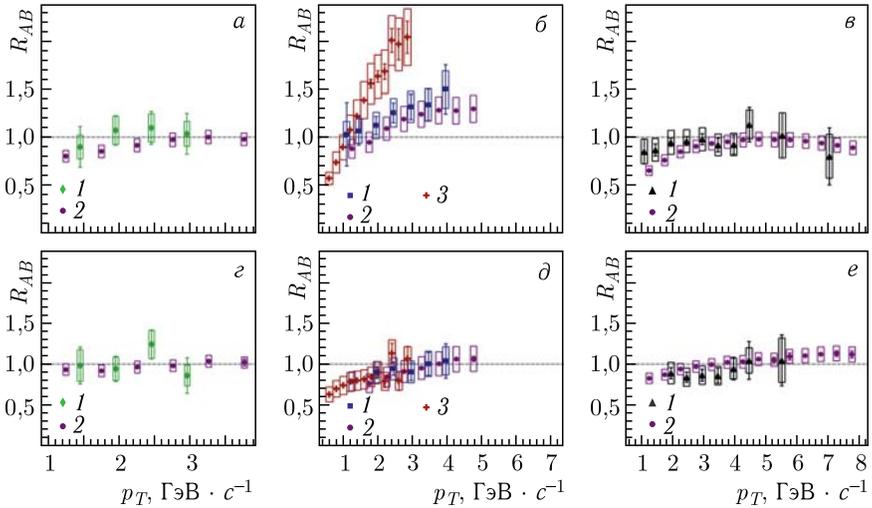


Рис. 3. Факторы ядерной модификации  $\varphi$ -мезона (1) и  $\pi^0$ -мезона (2) во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  (а) и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  (в) и  $\varphi$ -мезона (1),  $\pi^0$ -мезона (2) и  $(p + \bar{p})/2$  (3) во взаимодействиях  $p + \text{Au}$  (б) при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ в области малых быстрот

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены инвариантные спектры по поперечному импульсу и факторы ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов, измеренные во взаимодействиях  $p + \text{Al}$ ,  $p + \text{Au}$  и  ${}^3\text{He} + \text{Au}$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ (в диапазоне по поперечному импульсу  $1,0 < p_T < 4,0$  ГэВ  $\cdot$   $c^{-1}$  во взаимодействиях  $p + \text{Al}$  и  $p + \text{Au}$  и в диапазоне  $1,0 < p_T < 7,0$  ГэВ  $\cdot$   $c^{-1}$  во взаимодействиях  ${}^3\text{He} + \text{Au}$ ) для различных классов событий по центральности по каонному каналу распада. Во всех центральных по всем диапазонам по поперечному импульсу значения факторов ядерной модификации  $\varphi$ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерений. Совпадение значений факторов ядерной модификации  $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов в легких системах может означать, что повышенный выход странности не наблюдается в легких системах столкновений и эффекты холодной ядерной материи не оказывают влияния на различие значений факторов ядерной модификации  $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов в столкновениях тяжелых ионов. Факторы ядерной модификации  $(p + \bar{p})/2$  принимают значения большие, чем значения факторов ядерной модификации  $\varphi$ - и  $\pi^0$ -мезонов. Различие значений выходов  $\varphi$ -мезонов и  $(p + \bar{p})/2$  указывает на то, что процессы рождения этих адронов определяются кварковым составом, а не массой рождающихся частиц. Данное исследование является первым, когда изучается рождение  $\varphi$ -мезонов в асимметричных малых системах на RHIC, и

дополняет исследования рождения  $\varphi$ -мезонов во взаимодействиях  $p + p$ ,  $d + Au$  и в столкновениях тяжелых ионов.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adcox K. et al. (PHENIX Collab.)*. Formation of Dense Partonic Matter in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions at RHIC: Experimental Evaluation by the PHENIX Collaboration // *Nucl. Phys. A*. 2005. V. 757. P. 184–283.
2. *Adcox K. et al. (PHENIX Collab.)*. PHENIX Detector Overview // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2003. V. 499. P. 469–479.
3. *d’Enterria D.* Jet Quenching // Springer Verlag; Landolt-Boernstein, 2009. V. 23. P. 471.
4. *Koch P., Muller B., Rafelski J.* Strangeness in Relativistic Heavy Ion Collisions // *Phys. Rep. (Rev. Sec. Phys. Lett.)*. 1986. V. 142, No. 4. P. 167–172.
5. *Shor A.*  $\varphi$ -Meson Production as a Probe of the Quark–Gluon Plasma // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54, No. 11. P. 1122–1125.
6. *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.* 2021. V. 96, No. 8. P. 084010.
7. *Beringer J. et al. (Particle Data Group)*.  $\varphi$  (1020) // *Phys. Rev. D*. 2012. V. 86. P. 010001.
8. *Aidala C. et al. (PHENIX Collab.)*. Creation of Quark–Gluon Plasma Droplets with Three Distinct Geometries // *Nature Phys.* 2019. V. 15. P. 214–220.
9. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Nuclear Modification Factors of  $\varphi$ -Mesons in  $d + Au$ ,  $Cu + Cu$ , and  $Au + Au$  Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // *Phys. Rev. C*. 2011. V. 83, No. 2. P. 024909.
10. *Berdnikov A., Berdnikov Ya., Kotov D., Mitrankov Yu.*  $\varphi$ -Meson Measurements in  $Cu + Au$  Collisions at 200 GeV and in  $U + U$  Collisions at 192 GeV // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1135, No. 1. P. 012044.
11. *Adler S. S. et al. (PHENIX Collab.)*. Production of  $\varphi$ -Mesons at Midrapidity in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV  $Au + Au$  Collisions at Relativistic Energies // *Phys. Rev. C*. 2005. V. 72. P. 014903.
12. *Brun R., Carminati F., Giani S.* GEANT Detector Description and Simulation Tool. Geneva: CERN, 1993. 430 p.
13. *Бердников А. Я., Бердников Я. А., Котов Д. О., Ларионова Д. М., Ларионова М. М., Митранков Ю. М.* Измерения  $\varphi$ -мезона в  $p + Au$  и  ${}^3He + Au$  столкновениях при энергии 200 ГэВ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84, № 12. С. 1796–1799.