

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

This paper is devoted to the study of φ -meson production in small collision systems at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV measured by the PHENIX experiment at RHIC. The φ -meson nuclear modification factors were measured in different collision systems, such as $p + Al$, $p + Au$, $d + Au$ and ${}^3He + Au$. The comparison of φ -meson nuclear modification factors to π^0 -meson nuclear modification factors in $p + Al$ and ${}^3He + Au$ collisions and the comparison of φ -meson nuclear modification factors to π^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 партонов в данной материи путем исследования рождения адронов. Потери энергии партонов 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 φ -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 φ -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 φ -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 φ -мезон представляет собой наиболее легкое связанное состояние s - и \bar{s} -кварков и может быть измерен в области больших поперечных импульсов [5]. Также масса φ -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 π^0 -, φ -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 η — 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 φ -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 φ -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 φ -мезонов были определены с помощью полного моделирования детектора PHENIX в программном пакете Geant [12] с нулевой шириной $\varphi \rightarrow K^+K^-$, в котором φ -мезон имеет бесконечное время жизни. Выходы φ -мезонов были получены путем интегрирования распределения по инвариантной массе в интервале $\pm 9 \text{ МэВ} \cdot \text{с}^{-2}$ вблизи массы φ -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]) φ -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 φ -мезонов используются для расчета факторов ядерной модификации [13].

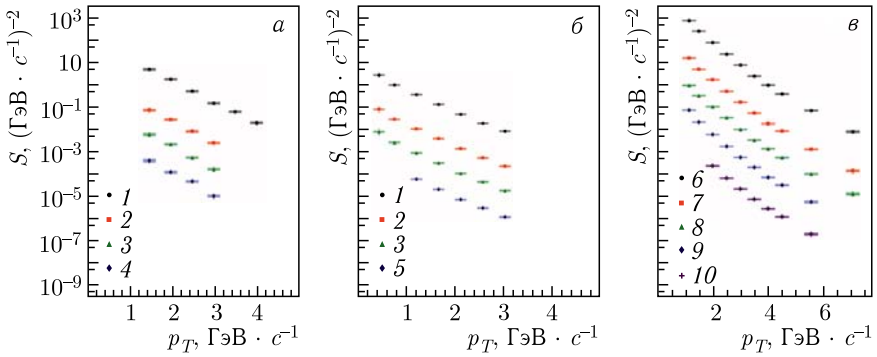


Рис. 1. Инвариантные спектры по поперечному импульсу S , измеренные для φ -мезонов во взаимодействиях $p + \text{Al}$ (а), $p + \text{Au}$ (б) и ${}^3\text{He} + \text{Au}$ (в) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области малых быстрот. Измерения проведены для различных классов событий по центральности: 1 — $(0-72(84)\%) \cdot 10^4$; 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 φ -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} φ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерений.

На рис. 3, а и в приведены для сравнения факторы ядерной модификации φ -мезонов и π^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} φ - и π^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} φ - и π^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 φ - и π^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 φ - и π^0 -мезонов. Различие зна-

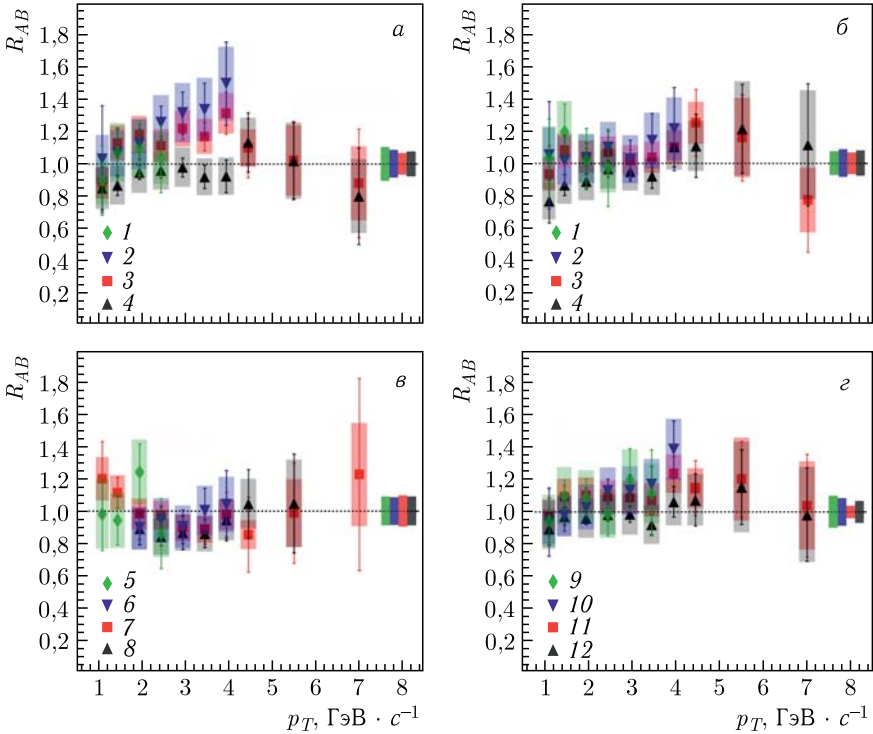


Рис. 2. Факторы ядерной модификации φ -мезонов во взаимодействиях (1 — $p + \text{Al}$; 2 — $p + \text{Au}$; 3 — $d + \text{Au}$ и 4 — ${}^3\text{He} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ) для четырех классов событий по центральности (0–20% (а); 20–40% (б); 5 — 40–72% $p + \text{Al}$; 6 — 40–84% $p + \text{Au}$; 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 φ -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 π^0 -мезонов подавлены в большей степени, чем выходы φ -мезонов [9].

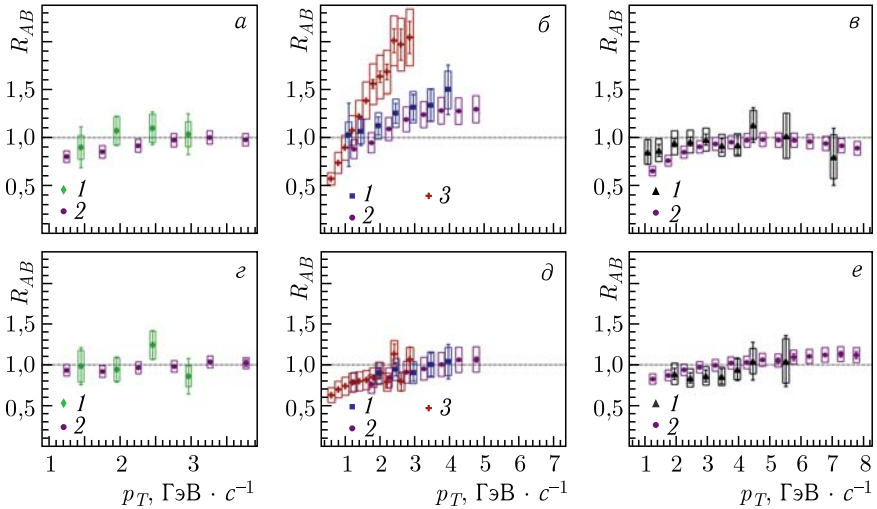


Рис. 3. Факторы ядерной модификации φ -мезона (1) и π^0 -мезона (2) во взаимодействиях $p + \text{Al}$ (а) и ${}^3\text{He} + \text{Au}$ (в) и φ -мезона (1), π^0 -мезона (2) и $(p + \bar{p})/2$ (3) во взаимодействиях $p + \text{Au}$ (б) при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области малых быстрот

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены инвариантные спектры по поперечному импульсу и факторы ядерной модификации φ -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 φ -мезонов равны единице в пределах неопределенностей измерений. Совпадение значений факторов ядерной модификации φ - и π^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 φ - и π^0 -мезонов в столкновениях тяжелых ионов. Факторы ядерной модификации $(p + \bar{p})/2$ принимают значения большие, чем значения факторов ядерной модификации φ - и π^0 -мезонов. Различие значений выходов φ -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 φ -мезонов в асимметричных малых системах на RHIC, и

дополняет исследования рождения φ -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.* φ -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)*. φ (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 φ -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.* φ -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 φ -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 φ -мезона в $p + Au$ и ${}^3He + Au$ столкновениях при энергии 200 ГэВ // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2020. Т. 84, № 12. С. 1796–1799.