

УДК 539.126.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЖДЕНИЯ π^0 И η МЕЗОНОВ В $U + U$ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 192 ГэВ

© 2019 г. А. Я. Бердников¹, Я. А. Бердников¹, С. В. Жарко¹, Д. О. Котов¹, П. В. Радзевич¹, *

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: radzevichp@gmail.com

Поступила в редакцию 04.02.2019 г.

После доработки 15.04.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Исследования столкновений ультрарелятивистских тяжелых ядер на RHIC привели к открытию качественно нового состояния вещества — сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмы, в котором кварки и глюоны не связаны внутри адронов, а движутся свободно в пределах всего объема созданной среды. Система столкновений $U + U$ при энергии 192 ГэВ на RHIC является самой тяжелой системой сталкивающихся ядер, используемой в экспериментах на встречных пучках и позволяющей получить самую большую энергетическую плотность среди прочих систем ультрарелятивистских сталкивающихся ядер. В статье представлены результаты измерения факторов ядерной модификации π^0 - и η -мезонов в $(U + U)$ -столкновениях при энергии 192 ГэВ.

DOI: 10.1134/S0367676519120056

ВВЕДЕНИЕ

Исследование столкновений тяжелых ядер ($A + A$) на коллайдере релятивистских тяжёлых ионов RHIC (Брукхэйвенская национальная лаборатория, США) привело к экспериментальному подтверждению возможности перехода адронного вещества, находящегося при экстремально высоких условиях температуры, в состояние сильно взаимодействующей кварк-глюонной плазмы (сКГП) [1–4] с партонами степенями свободы. С тех пор основное усилие экспериментов на RHIC и Большого адронного коллайдера LHC было направлено на детальное изучение нового состояния вещества.

При прохождении через кварк-глюонную среду быстрые партоны (с поперечным импульсом больше $\sim 4\text{--}5$ ГэВ/с) теряют часть своей энергии, что приводит к уменьшению выхода адронов по сравнению с их выходом в элементарных протон-протонных столкновениях ($p + p$) в рассматриваемом интервале поперечного импульса. Данный эффект называется эффектом гашения адронных струй. Измерение выхода π^0 - и η -мезонов в $A + A$ является мощным инструментом для исследования эффектов сКГП, в том числе эффекта гашения адронных струй, поскольку выходы этих частиц могут быть измерены с относительно высокой точностью в широком диапазоне поперечного импульса.

Анализ данных в разных системах сталкивающихся тяжелых ядер позволяет провести систематическое исследование эффектов сКГП в зависимости от вариации условий, создаваемых в $A + A$. Например, в центральных $(U + U)$ -столкновениях достигается наибольшая энергетическая плотность рождающейся кварк-глюонной среды среди прочих систем сталкивающихся ядер на RHIC. Также в отличие от других ядер, используемых в $(A + A)$ -системах, ядра урана обладают сильной азимутальной асимметрией, приводящей к возможности реализации различной геометрии столкновения (режимы “body-body”, “tip-tip” [5]). Все это делает изучение особенностей рождения π^0 - и η -мезонов в столкновениях ядер $U + U$ необходимой частью систематического изучения сКГП и позволит установить дополнительные ограничения на ряд параметров различных теоретических моделей и подробнее описать механизмы энергетических потерь партонов в кварк-глюонной среде.

Коллективные эффекты, воздействующие на спектры рождения частиц в $(A + A)$ -системах удобно описывать при помощи фактора ядерной модификации R_{AA} :

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{\text{столкн}} \rangle} \frac{dN_{AA}}{dN_{pp}}, \quad (1)$$

где dN_{AA} (dN_{pp}) – выходы адронов в $A + A$ ($p + p$) в заданном интервале поперечного импульса, $\langle N_{\text{столкн}} \rangle$ – число парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений. Величины, приведенные в выражении (1), измеряются в определенных группах по центральности, которая выражает степень перекрытия взаимодействующих ядер и измеряется в процентах. Центральность 0% соответствует полному перекрытию ядер. Величины $\langle N_{\text{столкн}} \rangle$ определяются в выбранных группах по центральности с помощью метода Монте-Карло по теории Глаубера [6]. Если фактор ядерной модификации равен единице, то коллективные эффекты взаимодействия в системе сталкивающихся ядер не наблюдаются, то есть $(A + A)$ -взаимодействие может рассматриваться как простая суперпозиция независимых нуклон-нуклонных взаимодействий. Отклонение значений фактора ядерной модификации от единицы свидетельствует о наличии эффектов среды, несводимых к суперпозиции нуклон-нуклонных столкновений.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Выходы π^0 - и η -мезонов измерены в каналах $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ и $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ при использовании спектрометра PHENIX [3] на RHIC. Определение кинематических характеристик γ -квантов (энергия, поперечный импульс) осуществляется при помощи системы электромагнитных калориметров, представленной в спектрометре двумя подсистемами, первая из которых состоит из шести секторов сцинтиляционного сэмплинг-калориметра (PbSc), вторая – из двух секторов калориметра Черенкова (PbGl). Каждый сектор расположен в $|\eta| < 0.35$ области псевдобыстроты и покрывает 22.5° по азимутальному углу. Описание прочих характеристик калориметра представлено в [7].

Определение выхода π^0 - и η -мезонов происходит следующим образом. Зарегистрированные в калориметре электромагнитные кластеры подвергаются отбору по энергии, форме и пространственному расположению. Отобранные кластеры обозначаются как γ -кванты и объединяются в пары ($\gamma\gamma$) в пределах одного акта $(U + U)$ -столкновения. Отдельно для выбранного интервала поперечного импульса, центральности столкновений и подсистемы электромагнитного калориметра формируются распределения $\gamma\gamma$ по их эффективной массе. Распределения содержат сигналы π^0 - и η -мезонов в областях 0.1–0.2 и 0.4–0.7 МэВ/ c^2 соответственно, загрязненные фоном комбинаторной природы. Условно источники фона можно разделить на две группы: коррелированные и некоррелированные внутри одного события столкновения ядер. Фон, порожденный некоррелиро-

ванными источниками, может быть оценен при помощи техники смешивания событий: при формировании $\gamma\gamma$ -пары каждому γ -кванту подбирается партнер из другого события, в результате чего распределение по инвариантным массам таких пар будет представлять собой исключительно некоррелированную часть фона, далее вычитаемую из реальных распределений, содержащих сигнал. Итоговые распределения аппроксимируются суммой функций Гаусса и полинома первой или второй степени (для сигналов π^0 - и η -мезонов соответственно), описывающих сигнал и остаточный коррелированный фон. Выход мезонов измеряется как интеграл под функцией Гаусса.

Измеренные значения выходов нормируются на количество событий в выбранном интервале центральности столкновений и корректируются при помощи эффективности регистрации, оцениваемой при помощи Монте-Карло моделирования процессов рождения π^0 - и η -мезонов и их дальнейшей регистрации в установке, для учета конечной геометрии детектора и происходящих в нем эффектов, искажающих реальное количество мезонов, рожденных в вершине.

Спектры π^0 - и η -мезонов, измеренные в разных подсистемах электромагнитного калориметра, усредняются с использованием взвешивающих коэффициентов, обратно пропорциональных величинам погрешностей измерений. Систематические погрешности измерения выхода π^0 - и η -мезонов учитывают возможные промахи в отборе данных, анализе распределений по инвариантной массе и построении модели Монте-Карло и оцениваются путем сравнения спектров, полученных с использованием различных режимов в обозначенных выше этапах анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 изображены зависимости факторов ядерной модификации π^0 - и η -мезонов от их поперечного импульса, измеренных в четырёх различных классах центральности в $(U + U)$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ. Значения факторов ядерной модификации представлены для набора значений $N_{\text{столкн}}$, опубликованных в [8]. В центральных $(U + U)$ -столкновениях наблюдается пятикратное уменьшение выхода мезонов по сравнению с их выходом в $p + p$. Во всех диапазонах по центральности значения факторов ядерной модификации π^0 - и η -мезонов совпадают в пределах погрешности измерений, что указывает на независимость потерь энергии партонов в кварк-глюонной среде от характеристик мезонов в конечном состоянии.

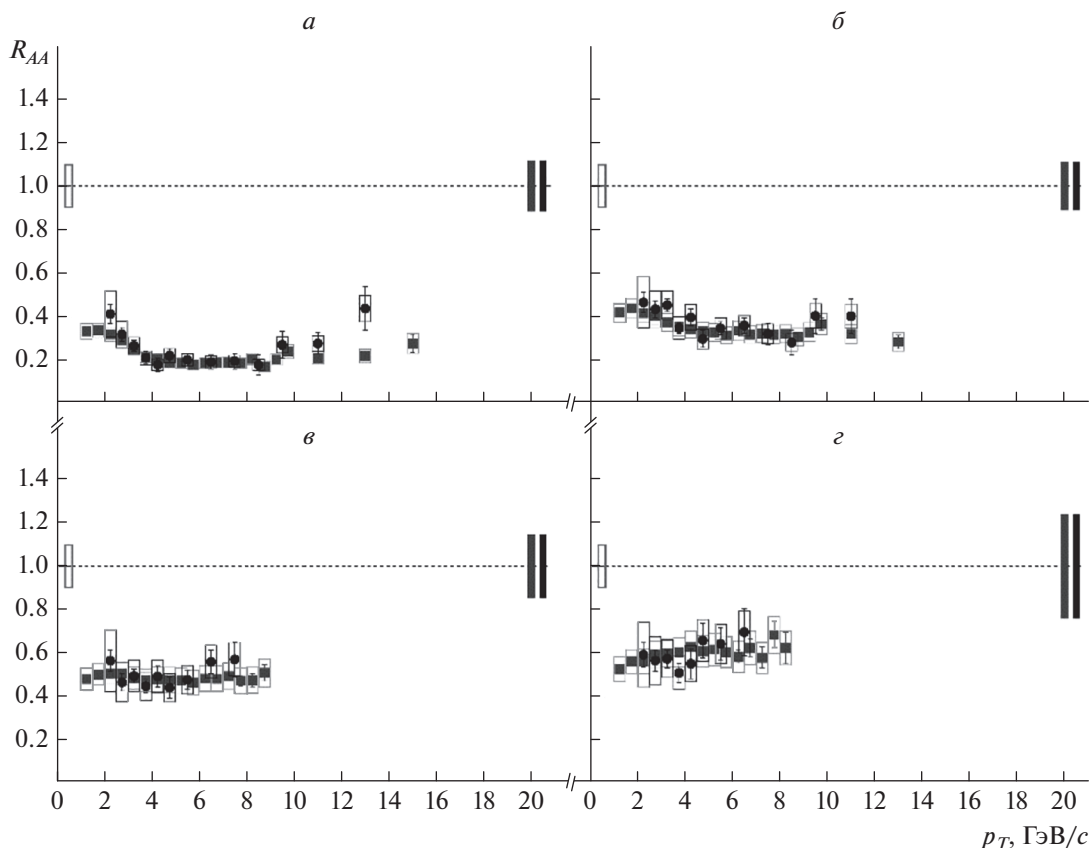


Рис. 1. Зависимость величины фактора ядерной модификации R_{AA} от поперечного импульса p_T для нейтральных пионов (квадратные маркеры) и η -мезонов (круглые маркеры) в $(U + U)$ -столкновениях при энергии 192 ГэВ: *a* – в центральных (0–20%), *б* – в полужентральных (20–40%), *в* – в полужентральных (40–60%), *з* – в периферийных (60–80%). Условные обозначения на точках в виде вертикальных “усов” и горизонтальных “прямоугольников” отвечают статистическим и систематическим погрешностям измерений соответственно.

На рис. 2 изображены сравнения зависимостей факторов ядерной модификации η -мезонов от поперечного импульса, измеренных в $(U + U)$ - и $(Au + Au)$ -столкновениях [10, 11] при энергии 192 и 200 ГэВ в диапазонах по центральности с близкими значениями $N_{\text{столкн}}$. Факторы ядерной модификации η -мезонов представлены для двух различных наборов $N_{\text{столкн}}$ [8, 9]. При больших значениях $N_{\text{столкн}}$ факторы ядерной модификации, измеренные в разных сталкивающихся системах, совпадают в пределах погрешности измерений, что указывает на независимость степени подавления η -мезонов от геометрии начального состояния, реализующегося в $(A + A)$ -системах. При малых значениях $N_{\text{столкн}}$ наблюдается незначительное различие в величинах факторов ядерной модификации, полученных в столкновениях ядер $U + U$ и $Au + Au$, хотя можно утверждать, что значения факторов ядерной модификации совпадают в пределах погрешности измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа результатов измерения факторов ядерной модификации π^0 - и η -мезонов в $(U + U)$ -столкновениях при энергии 192 ГэВ в эксперименте PHENIX можно сделать следующие выводы. Факторы ядерной модификации π^0 - и η -мезонов подавлены в одинаковой степени, что указывает на независимость степени подавления от аромата и массы исследуемых частиц. Выходы η -мезонов, измеренные в $(U + U)$ - и $(Au + Au)$ -столкновениях при энергии 192 и 200 ГэВ подавлены одинаково при $N_{\text{столкн}} > 90$ (в центральных и полужентральных столкновениях), что указывает на независимость степени подавления от формы области перекрытия сталкивающихся ядер.

При значениях $N_{\text{столкн}} \sim 20$ (в периферийных столкновениях) в $U + U$ наблюдается более сильное подавление выхода η -мезонов, чем в $Au + Au$. При данной точности измерений уверенно разделить результаты, полученные в периферийных

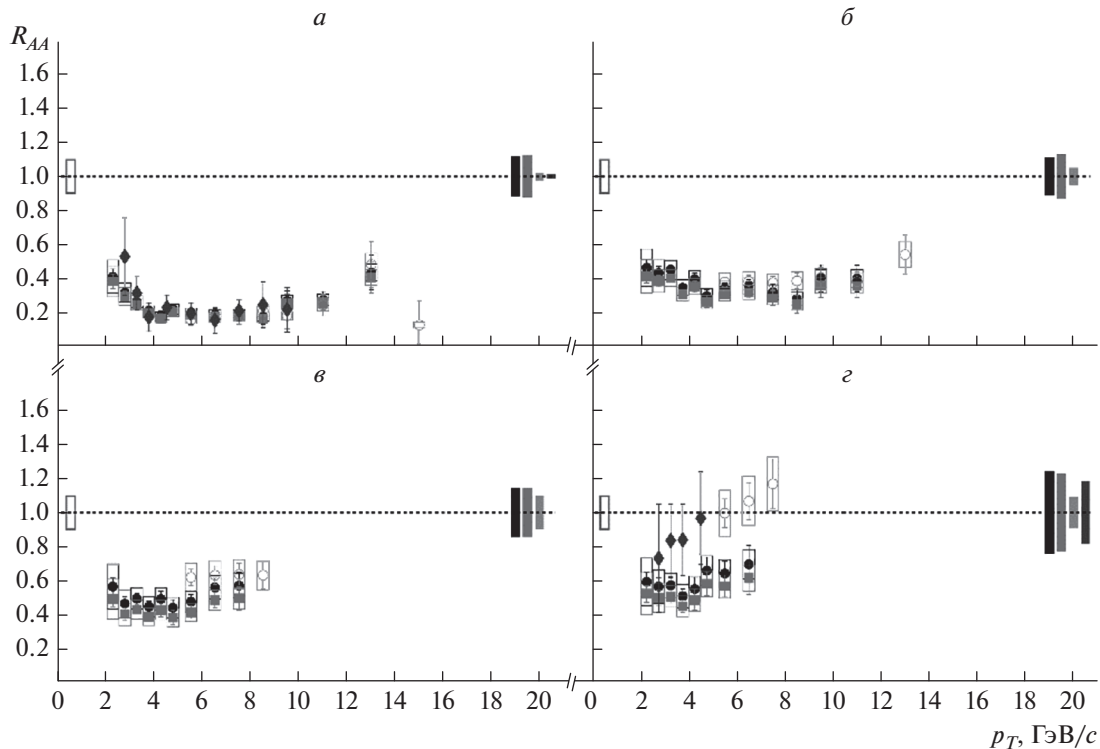


Рис. 2. Зависимость величины фактора ядерной модификации R_{AA} от поперечного импульса p_T для η -мезонов в (U + U)-взаимодействиях (круглые и квадратные маркеры – для значений $N_{\text{столкн}}$ из [8] и [9], соответственно) и (Au + Au)-взаимодействиях [5, 6] (круглые и ромбовидные маркеры для наборов данных, полученных в 2003 и 2007 гг. соответственно) при энергии 192 и 200 ГэВ: *a* – в центральных (0–20%) (U + U)-взаимодействиях и центральных (0–5%) (Au + Au)-взаимодействиях; *б* – в полусредних (20–40%) (U + U)-взаимодействиях и (20–40%) (Au + Au)-взаимодействиях; *в* – в полупериферийных (40–60%) (U + U)-взаимодействиях и (40–50%) (Au + Au)-взаимодействиях; *г* – в периферийных (60–80%) (U + U)-взаимодействиях, (60–92%) (Au + Au)-взаимодействиях при энергии 192 и 200 ГэВ соответственно. Условные обозначения на точках в виде вертикальных “усов” и серых горизонтальных “прямоугольников” отвечают статистическим и систематическим погрешностям измерений соответственно.

(U + U)- и (Au + Au)-столкновениях, не представляется возможным.

Результаты настоящей работы получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 3.1498.2017/4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Back B. et al. (PHENIX Collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 28.
2. *Adams J. et al. (PHENIX Collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 102.
3. *Adcox K. et al. (PHENIX Collaboration)* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757. P. 184.
4. *Wang H.* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 931. P. 293.
5. *Miller M.L., Reyers K., Sanders S.J., Steinberg P.* // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2007. V. 57. P. 205.
6. *Aphcetcher L., Awes T.C., Banning J. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 499. P. 521.
7. *Masui H., Mohanty B., Xu N.* // Phys. Lett. B. 2009. V. 679. P. 440.
8. *Shou Q.Y., Ma Y.G., Sorensen P.* // Phys. Lett. B. 2015. V. 749. P. 215.
9. *Adler S.S. et al. (PHENIX Collaboration)* // Phys. Rev. C. 2007. V. 75. Art. № 024909.
10. *Adare A. et al. (PHENIX Collaboration)* // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. Art. № 011902.