

## РОЖДЕНИЕ ЛЕГКИХ МЕЗОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PHENIX

*Я. А. Бердников*<sup>1</sup>, *А. Я. Бердников*<sup>1</sup>, *С. В. Жарко*<sup>1</sup>,  
*Д. О. Котов*<sup>1,2,\*</sup>, *П. В. Радзевич*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Исследования, проведенные на коллайдере RHIC, позволили сделать вывод об образовании сильновзаимодействующей кварк-глюонной плазмы (КГП) в центральных столкновениях тяжелых ядер. Изучение взаимодействий асимметричных ядер (Cu + Au и U + U) позволяет провести систематическое изучение эффекта гашения струй, который является одной из сигнатур образования КГП. В данной статье представлены факторы ядерной модификации для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов в столкновениях Cu + Au и U + U при энергии 200 ГэВ, измеренные в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC.

Production of Quark–Gluon Plasma (QGP) has been established in central heavy-ion collisions at RHIC energies. Recent RHIC run with asymmetric collision systems (Cu + Au, U + U) provides the means to systematically study suppression pattern of hadrons in different nuclear overlap geometry needed to improve theoretical description of parton energy loss in QGP. The recent results from PHENIX experiment at RHIC on  $\pi^0$ - and  $\eta$ -meson production in Cu + Au and U + U collisions at 200 GeV are presented.

PACS: 12.38; 25.75; 21.65

### ВВЕДЕНИЕ

Квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает, что при достаточно высоких температуре и плотности ядерная материя переходит в состояние со свободными кварками и глюонами и образуется так называемая кварк-глюонная плазма (КГП). Согласно расчетам КХД на решетке, данный фазовый

---

\*E-mail: dmitriy.kotov@gmail.com

переход реализуется при температуре 150–200 МэВ, что соответствует плотности энергии  $\sim 1 \text{ ГэВ/фм}^3$  [1]. Экспериментальное исследование фазового перехода адронной материи в КПП и изучение свойств нового состояния вещества позволяют лучше понять процессы эволюции Вселенной, строение нейтронных звезд, а также проверить основы фундаментальной теории сильных взаимодействий — квантовую хромодинамику. Достигнуть в лабораторных условиях плотностей энергий, достаточных для образования КПП, возможно при изучении взаимодействий тяжелых релятивистских ядер. Для этих целей используют ускорители на встречных пучках. В настоящее время одним из основных ускорителей, предназначенных для изучения взаимодействий тяжелых релятивистских ядер, является ускоритель на встречных пучках RHIC в BNL (США) [2]. Максимальная энергия взаимодействия тяжелых ядер на коллайдере RHIC составляет 200 ГэВ. Несколько лет назад также начал свою работу коллайдер LHC в ЦЕРН (Швейцария), позволивший существенно повысить энергию взаимодействия тяжелых ядер. Исследования, проведенные на коллайдере RHIC и позже на коллайдере LHC, позволили сделать вывод об образовании сильновзаимодействующей КПП в центральных столкновениях тяжелых ядер при высоких энергиях [3].

Согласно современным теоретическим представлениям жесткое рассеяние партонов происходит на самых ранних стадиях взаимодействия ядер. После рассеяния высокоэнергетичные партоны распространяются в плотной и горячей цветовой среде, ассоциируемой с КПП, и при этом теряют существенную часть своей энергии в результате излучения глюонов и многократного перерассеяния. Энергетические потери партонов приводят к уменьшению выхода струй и лидирующих адронов с большими поперечными импульсами. Очевидно, что изучение энергетических потерь партонов и их зависимости от длины пробега в среде позволяет получать новые данные о свойствах КПП, в которой они распространяются. До сих пор эффект гашения струй изучался только в симметричных взаимодействующих системах, таких как взаимодействия  $\text{Cu} + \text{Cu}$ ,  $\text{Au} + \text{Au}$  при энергии 22,4–200 ГэВ на RHIC или во взаимодействиях  $\text{Pb} + \text{Pb}$  при энергии 2,76–5,02 ТэВ на LHC. Новые данные, полученные в эксперименте PHENIX при изучении столкновений  $\text{Cu} + \text{Au}$  и  $\text{U} + \text{U}$  при энергии 200 ГэВ, впервые позволяют изучить эффект гашения струй в асимметричных столкновениях тяжелых ядер. Интерес к подобным взаимодействиям связан с уникальностью конфигурации, возникающей в области взаимодействия сталкивающихся ядер. В случае центральных столкновений  $\text{Cu} + \text{Au}$  меньшее по размерам ядро меди практически полностью поглощается внутри центральной и наиболее плотной части ядра золота. В отличие от взаимодействий одинаковых по размеру тяжелых ядер это позволяет эффективно разделить эффекты, связанные с образованием плотной и горячей среды, от эффектов, присущих обычным нуклон-нуклонным столкновениям. Кроме того, в полцентральных столкновениях  $\text{Cu} + \text{Au}$  область перекрытия

ядер имеет несимметричную форму, тем самым изменяя среднюю длину пробега партона в плотной цветовой среде и, соответственно, его энергетические потери в зависимости от направления его движения.

Взаимодействия ядер урана представляют большой интерес, так как форма его ядер не является сферически симметричной. В результате чего становятся возможны для изучения новые различные конфигурации ядер, в том числе такие, в которых достижимая плотность энергии оказывается выше, чем в центральных столкновениях  $Au + Au$ .

Новые экспериментальные результаты, ожидаемые при изучении эффекта гашения струй в столкновениях  $Cu + Au$  и  $U + U$ , позволят проверить многочисленные теоретические модели, описывающие энергетические потери партонов, улучшить общее понимание происходящих процессов и получить качественно новые и более точные данные о свойствах образующейся в столкновениях тяжелых ядер среды (КПП). В данной статье представлены результаты измерения выходов и факторов ядерной модификации для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов в столкновениях  $Cu + Au$  и  $U + U$  при энергии 200 ГэВ в зависимости от поперечного импульса и центральности ядерных столкновений.

## ЭКСПЕРИМЕНТ PHENIX И МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

Эксперимент PHENIX является одним из двух основных экспериментов на коллайдере RHIC. Установка состоит из трех магнитов, двух центральных (восточный и западный), двух мюонных (северный и южный) спектрометров. В состав центральных спектрометров, охватывающих  $90^\circ$  по азимутальному углу и 0,7 единиц по псевдобыстроте, входят: дрейфовые и падовые камеры, измеряющие импульсы заряженных частиц и их координаты, черенковский детектор кругового действия, идентифицирующий электроны и позитроны, времяпролетная система для идентификации адронов в области малых поперечных импульсов и электромагнитный калориметр, состоящий из восьми секторов приблизительно одинакового размера и измеряющий энергию и координаты фотонов и электронов, вылетающих из области взаимодействия. Два мюонных спектрометра, охватывающих  $360^\circ$  по азимутальному углу и область  $1,15 < \eta < 2,35$  по псевдобыстроте, предназначены для измерения импульсов заряженных частиц в радиальном магнитном поле мюонных магнитов и идентификации мюонов. В состав каждого из спектрометров входят три слоя трековых станций и пять плоскостей газовых трубок, предназначенных для идентификации мюонов и отбора редких событий. В эксперименте PHENIX также имеется высокоскоростная система сбора данных, а для отбора редких событий, представляющих физический интерес, используются триггеры различного уровня. Все это позволяет изучать характеристики за-

раженных и нейтральных частиц в широком динамическом диапазоне. Более подробно установка PHENIX описана в [4].

Выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов измеряются при помощи электромагнитного калориметра в доминирующих каналах распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  и  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ . Благодаря уверенному отношению сигнала к фону выходы представленных мезонов могут быть измерены с высокой точностью в широком диапазоне поперечного импульса. Для уменьшения систематической погрешности измерения выходов частиц требуется, чтобы оба  $\gamma$ -кванта попадали в один и тот же сектор калориметра. Распределение по эффективной массе двух  $\gamma$ -квантов строится в зависимости от поперечного импульса мезона (суммарного поперечного импульса двух  $\gamma$ -квантов), а также от класса центральности столкновений. Полученное распределение аппроксимируется функцией, представляющей собой сумму функции Гаусса для описания сигнала от восстановленных  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов и линейной функции, описывающей фоновые вклады. Выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов определяются путем подсчета числа отсчетов вблизи области их масс и вычитания интеграла под линейной функцией в данном промежутке, описывающего фоновые вклады. Интервалы, в которых производилась аппроксимация, и степень полинома, описывающего фон, варьируются для оценки систематической погрешности определения выходов частиц.

## ФАКТОРЫ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ

Отличие ядро-ядерных взаимодействий от нуклон-нуклонных столкновений заключается в присутствии коллективных эффектов. Данные эффекты часто изучаются с помощью так называемого фактора ядерной модификации, определяемого как отношение выхода частиц в ядро-ядерных и протон-протонных взаимодействиях, отнесенных к соответствующему числу парных нуклон-нуклонных столкновений  $N_{\text{столкн}}$ :  $R_{AA} = (dN_{AA}) / (N_{\text{столкн}} \times dN_{pp})$ . Здесь  $dN_{AA}$  и  $dN_{pp}$  — выход частиц в ядро-ядерных и протон-протонных столкновениях в заданном интервале по поперечному импульсу.

При отсутствии коллективных эффектов фактор ядерной модификации равен единице. Факторы ядерной модификации измеряются в зависимости от центральности и энергии взаимодействия ядер, что позволяет изучать коллективные эффекты в зависимости от размера сталкивающейся системы и энергии взаимодействия. При этом значение центральности 0–10% говорит о центральных взаимодействиях, а 90–100% указывает на периферийные взаимодействия.

На рис. 1 представлены значения факторов ядерной модификации для  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, измеренные в столкновениях ядер золота и меди при энергии 200 ГэВ. Результаты измерений приведены для центральных и периферийных столкновений. Значения факторов ядерной модификации измерены в широком диапазоне по поперечному импульсу вплоть до 20 ГэВ/с. В централь-

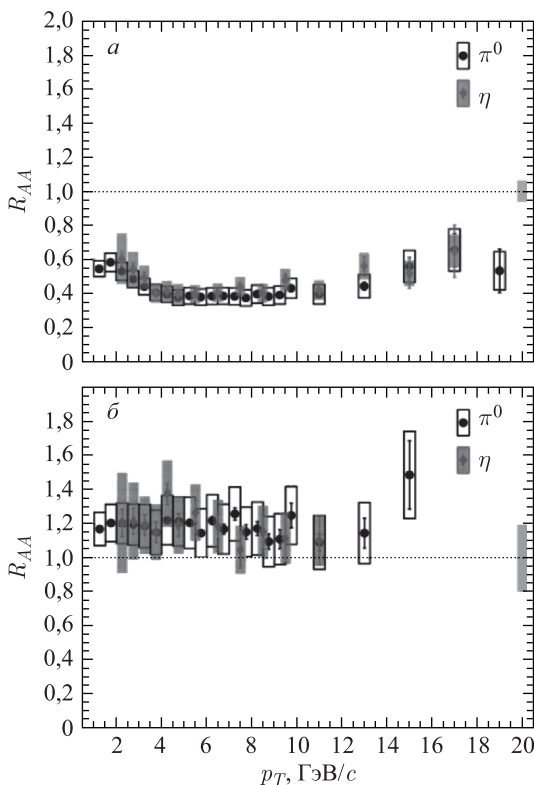


Рис. 1. Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  от поперечного импульса  $p_T$  для  $\pi^0$ - (кружки) и  $\eta$ -мезонов (ромбы): *a*) в центральных (0–10%,  $N_{\text{уч}} = 177$ ) взаимодействиях Cu + Au; *б*) в периферийных (60–90%,  $N_{\text{уч}} = 9$ ) взаимодействиях Cu + Au при энергии 200 ГэВ. Здесь и в дальнейшем условные обозначения на точках в виде вертикальных «усов» и серых горизонтальных «прямоугольников» отвечают статистическим и систематическим погрешностям измерений соответственно. Вертикальные «прямоугольники» вблизи оси ординат соответствуют неопределенности  $N_{\text{столкн}}$

ных (0–20%) столкновениях выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов подавлены, степень подавления уменьшается с центральностью столкновений, и в периферийных взаимодействиях наблюдается ненулевой избыточный выход  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов. Стоит отметить, что при данной точности измерений не наблюдается различия в степени подавления  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, несмотря на то, что  $\eta$ -мезоны представляют собой мезоны со скрытой странностью.

На рис.2 приведены зависимости факторов ядерной модификации  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов от числа нуклонов  $N_{\text{уч}}$ , участвующих во взаимодействии, для

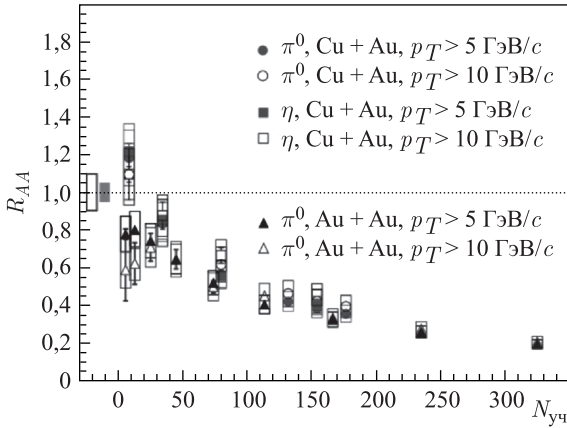


Рис. 2. Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  от числа нуклонов  $N_{\text{уч}}$ , участвующих во взаимодействии, для  $\pi^0$ - (кружки) и  $\eta$ -мезонов (квадраты) в Cu + Au-взаимодействиях и  $\pi^0$ -мезонов (треугольники) в Au + Au-взаимодействиях при энергии 200 ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5$  ГэВ/с и  $p_T > 10$  ГэВ/с)

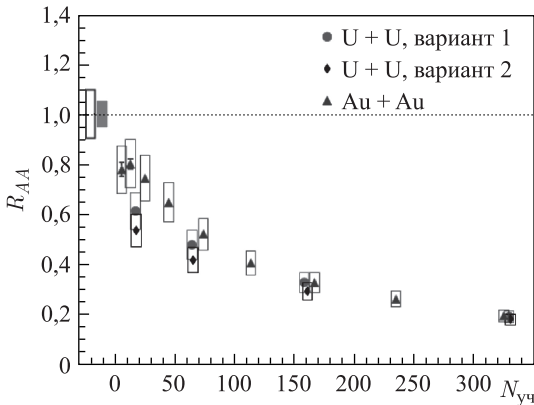


Рис. 3. Зависимости факторов ядерной модификации  $R_{AA}$  от числа нуклонов  $N_{\text{уч}}$ , участвующих во взаимодействии, для  $\pi^0$ - (кружки и ромбы) в U + U-взаимодействиях и  $\pi^0$ -мезонов (треугольники) в Au + Au-взаимодействиях при энергии 200 ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5$  ГэВ/с)

столкновений Cu + Au и Au + Au при энергии 200 ГэВ в области больших поперечных импульсов ( $p_T > 5$  ГэВ/с и  $p_T > 10$  ГэВ/с). При  $N_{\text{уч}} > 100$  результаты столкновений Cu + Au и Au + Au согласуются друг с другом, в то время как при  $N_{\text{уч}} \sim 10$  выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов в столкновениях Au + Au подавлены сильнее.

На рис. 3 представлены зависимости факторов ядерной модификации  $\pi^0$ -мезонов от числа нуклонов  $N_{\text{уч}}$ , участвующих во взаимодействии, для столкновений  $U + U$  и  $Au + Au$  при энергии 200 ГэВ в области поперечных импульсов  $p_T > 5$  ГэВ/с. Факторы ядерной модификации для взаимодействий  $U + U$  были вычислены с использованием двух различных наборов числа нуклонов  $N_{\text{столкн}}$ , участвующих во взаимодействиях. Использование двух различных наборов  $N_{\text{столкн}}$  обусловлено различной степенью деформации ядра урана при вычислении  $N_{\text{столкн}}$  в модели Глаубера [5]. При  $N_{\text{уч}} > 100$  результаты столкновений  $U + U$  и  $Au + Au$  согласуются друг с другом, в то время как при меньших значениях  $N_{\text{уч}} \sim 10$  выходы  $\pi^0$ -мезонов в столкновениях  $U + U$  подавлены сильнее.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены факторы ядерной модификации  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, измеренные в столкновениях  $Cu + Au$  и  $U + U$  при энергии 200 ГэВ в эксперименте PHENIX на коллайдере RHIC.

Выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов, измеренные в столкновениях  $Cu + Au$ ,  $Au + Au$  и  $U + U$  при энергии 200 ГэВ, подавлены одинаково при больших значениях числа нуклонов, участвующих во взаимодействии ( $N_{\text{уч}} > 100$ ). Данный факт позволяет говорить о том, что величина подавления в основном определяется числом нуклонов, участвующих во взаимодействии, и практически не зависит от геометрии перекрытия ядер.

В области  $N_{\text{уч}} > 100$  значения факторов ядерной модификации, полученные в периферийных  $Cu + Au$ -столкновениях, обнаруживают ненулевое превышение выходов  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов над результатами, полученными в элементарных протон-протонных столкновениях, в то время как в столкновениях  $U + U$  выходы  $\pi^0$ - и  $\eta$ -мезонов подавлены сильнее, чем в столкновениях  $Au + Au$ , при одинаковой энергии взаимодействия.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adcox K. et al. (PHENIX Collab.) // Nucl. Phys. A. 2005. V. 757, No. 1–2. P. 184–283.
2. Baym G. // Nucl. Phys. A. 2002. V. 698, No. 1–4. P. 23–32.
3. Adcox K. et al. (PHENIX Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 88, No. 2. P. 022301.
4. Adcox K. et al. (PHENIX Collab.) // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 499. P. 469–479.
5. Adare A. et al. (PHENIX Collab.) // Phys. Rev. C. 2016. V. 93, No. 3. P. 034903.