DOI: 10.18721/JPM.12209 УДК 539.126.3

ПОДАВЛЕНИЕ ВЫХОДОВ АДРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР УРАНА ПРИ РАЗЛИЧНОМ КВАРКОВОМ СОСТАВЕ РОЖДАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

П.В. Радзевич, А.Я. Бердников, Я.А. Бердников С.В. Жарко, Д.О. Котов

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

В статье представлены экспериментальные инвариантные спектры рождения, факторы ядерной модификации и отношения интенсивностей спектров легких мезонов, полученные в столкновении тяжелых ядер урана при энергии 192 ГэВ. Данные характеристики частично отражают свойства кварк-глюонной плазмы (КГП), рождающейся в столкновении тяжелых ядер урана при различном размере взаимодействующей системы и кварковом составе рождающихся частиц. Приведенные данные представлены в зависимости от поперечного импульса, среднего числа нуклоннуклонных столкновений, среднего числа участников столкновения и класса по центральности. Предполагалось опытным путем дискриминировать эффекты горячей и плотной материи в зависимости от геометрических характеристик сталкивающихся тяжелых ядер из-за сферической несимметричности ядер урана. Анализ полученных данных привел к выводам о независимости фрагментации жестких партонов от массы и состава кварков легких мезонов и об отсутствии влияния геометрической формы сталкивающихся ядер на проявление эффекта гашения адронных струй.

Ключевые слова: кварк-глюонная плазма, легкий мезон, фактор ядерной модификации, столкновение тяжелых ядер

Ссылка при цитировании: Радзевич П.В., Бердников А.Я., Бердников Я.А., Жарко С.В., Котов Д.О. Подавление выходов адронов в столкновениях ядер урана при различном кварковом составе рождающихся частиц // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 111–120. DOI: 10.18721/JPM.12209

SUPPRESSION OF THE HADRONIC YIELDS IN THE URANIUM NUCLEI COLLISIONS AT THE DIFFERENT QUARK'S COMPOSITION OF THE PRODUCED PARTICLES

P.V. Radzevich, A.Ya. Berdnikov, Ya.A. Berdnikov S.V. Zharko, D.O. Kotov

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

This paper presents invariant spectra, nuclear modification factors and ratio of invariant spectra of light mesons, obtained in collisions of heavy uranium nuclei at 192 GeV. These values are studied with respect to transverse momenta, numbers of nucleon-nucleon collisions, numbers of participants and centrality. Light mesons production measurements are important in the study of heavy ion collisions, serving as hard probes of the quark gluon plasma (QGP). The research of light mesons in U + U collisions at 192 GeV allows discriminating the effects of hot matter depending on the geometric characteristics of the colliding heavy nuclei. The obtained results showed independence of the fragmentation of hard partons on the mass and composition of quarks and the absence of the influence of the geometric form of the colliding nuclei on the jet-quenching effect.

Keywords: quark-gluon plasma, light meson, nuclear modification factor, collision of heavy nuclei

Citation: Radzevich P.V., Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Zharko S.V., Kotov D.O.,

Suppression of the hadronic yields in the uranium nuclei collisions at the different quark's composition of the produced particles, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 111–120. DOI: 10.18721/JPM.12209

Введение

Согласно общепринятой терминологии, кварк-глюонная плазма — это состояние вещества, в котором степенями свободы являются кварки и глюоны, обладающие цветовым зарядом. Систематическое наблюдение формирования кварк-глюонной плазмы в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер (A + A) впервые было получено на Коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC) при энергиях столкновения $\sqrt{S_{NN}} = 130$ и 200 ГэВ (в пересчете на один нуклон) [1 – 4] и позже на Большом адронном коллайдере (LHC) в столкновениях ядер свинца при $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ [5].

Рождение адронов в столкновениях ультрарелятивистских ионов при больших значениях поперечного импульса, $p_T > 5 \ \Gamma \Rightarrow B/c$, обусловлено процессами фрагментации жестких партонов, рожденных в результате процессов глубоконеупругих столкновений. Сечения рождения адронов в элементарных столкновениях протонов (*p* + *p*) хорошо описываются с помощью формализма пертурбативной квантовой хромодинамики с учетом следующего лидирующего порядка (next-to-leading-order perturbative quantum chromodynamics - NLO pOCD) [6]. Рождение адронов в столкновениях А + А подвергается влиянию кварк-глюонной среды: при прохождении сквозь нее жесткие партоны теряют часть своей энергии, что приводит к подавлению выхода адронов фрагментации (по сравнению с их выходом в элементарных протон-протонных столкновениях). Данный эффект называется эффектом гашения адронных струй [6, 7]. Изучение особенностей рождения легких мезонов различного типа (например, π^0 , η , K_s) в (А + А)-столкновениях позволяет провести систематическое исследование эффектов кварк-глюонной плазмы и, в частности, эффекта гашения адронных струй в зависимости от основных характеристик, таких как масса и кварковый состав этих частиц.

Количественная оценка эффекта гашения струй производится с помощью вычисления фактора ядерной модификации, определяемого в зависимости от поперечного импульса и центральности согласно выражению:

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

где dN_{AA} , dN_{pp} – выходы адронов в (A + A)-и (p + p)-столкновениях, соответственно; $\langle N_{coll} \rangle$ – среднее число парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений в данном классе центральности (A + A)-взаимодействий.

Выход частиц в (A + A)-столкновениях обычно измеряется в виде зависимости от их поперечного импульса и центральности столкновений. Центральность измеряется в процентах и определяет прицельный параметр и степень перекрытия налетающих друг на друга ядер [8]. Столкновения с малым прицельным параметром и центральностью в диапазоне 0 – 20 % характеризуются большой множественностью частиц и называются центральными столкновениях с центральностью в интервале 60 – 80 % участвует лишь малая часть нуклонов взаимодействующих ядер.

Измерение выхода K_s -мезонов проводится в канале $K_s \to \pi^0 \pi^0$. Дочерние частицы распада K_s -мезонов (π^0 -мезоны) измерены ранее в работе [9]. В состав K_s -мезонов входят странные кварки, что позволяет изучать особенности рождения легких мезонов в зависимости от кваркового состава исследуемых частиц при сравнении факторов ядерной модификации K_s -, π^0 - и η-мезонов [9]. Различие масс K_s -, π^0 - и η-мезонов [9] позволяет изучать эффект гашения струй в зависимости от массовой составляющей исследуемых частиц.

Система сталкивающихся ядер урана-238 (U + U) при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ представляет особый интерес для исследования эффекта гашения адронных струй. Ядра урана обладают ярко выраженной сферической асимметрией, в результате чего в столкновениях этих ядер реализуется особая геометрия столкновений, отличная от таковой для симметричных ядер (например, ядер золота или меди). Кроме того, ядра урана являются самыми тяжелыми среди используемых в экспериментах на коллайдерах: в их столкновениях реализуется самая большая плотность энергии и, как следствие,

самая высокая множественность частиц среди всех (A + A)-систем в данном диапазоне энергий [10]. Таким образом, исследование особенностей рождения нейтральных легких мезонов в (U + U)-столкновениях при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ является важной частью систематического изучения эффекта гашения адронных струй и позволит провести дополнительную дискриминацию свободных параметров различных моделей, описывающих потери энергии жестких партонов в кварк-глюонной плазме.

В настоящей статье представлены результаты изучения эффекта гашения струй при рождении π^0 -, η -, K_s -мезонов в столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192 \Gamma$ эВ.

Методика исследования

Сбор первичных данных о столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{S_{_{NN}}} = 192 \ \Gamma \Rightarrow B$ осуществлен с помощью спектрометра PHENIX на коллайдере RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США) в 2012 году. Значения центральности и координаты вершины вдоль оси движения пучков (z_{vert}) для каждого взаимодействия ядер урана определяются с помощью системы счетчиков ядро-ядерных столкновений (BBC – beam-beam counter) [11]. Счетчики BBC определяют триггер Minimum Bias (МВ), отбирающий все события ядро-ядерных столкновений, в которых произошло хотя бы одно неупругое нуклон-нуклонное взаимодействие. При этом координата z_{vert} лежит в диапазоне: $|z_{vert}| < 20$ см. Отклик BBC в совокупности с моделированием работы спектрометра методом Монте-Карло по теории Глаубера [12] используется для определения среднего числа столкновений *N_{coll}* и среднего числа нуклонов-участников

^{сон} ядро-ядерного взаимодействия $\langle N_{part} \rangle$. Легкие K_{s}^{-}, π^{0} -и η -мезонырегистрируются в каналах $K_{s} \to \pi^{0}\pi^{0}$ (BR = 30,69 ± 0,05 %), $\pi^{0} \to \gamma\gamma$ (BR = 98,82 ± 0,03 %) и $\eta \to \gamma\gamma$ (BR = 72,12 ± 0,34 %) [10] в системе электромагнитных калориметров спектрометра PHENIX, описание геометрии и характеристик которой представлены в работе [13]. Для улучшения отношения уровня сигнала к фону используется ряд кинематических ограничений. В частности, ограничения на минимальную энергию E_{γ} и асимметрию энергии фотонов, соответственно, составляют

$$E_{\gamma} > 400$$
 МэВ и $\frac{\left|E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}\right|}{E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}} < 0, 8.$

Методика измерения выхода π^{0} - и η-мезонов в столкновении ядер урана при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ описана в работах [8, 14].

Для формирования частиц-кандидатов на роль π^{0} -мезонов (далее π^{0} -кандидатов) в распаде $K_{s} \rightarrow \pi^{0}\pi^{0}$ инвариантная масса пары γ -квантов должна находиться в диапазоне 1,5 σ (σ – среднеквадратичное отклонение) от измеренных значений массы π^{0} -мезонов в зависимости от их поперечного импульса, а также в одном и том же плече спектрометра PHENIX. Пара γ -квантов должна иметь суммарный импульс в диапазонах

$$2 < p_{_T} < 11$$
 и $2 < p_{_T} < 14$ ГэВ/с

в подсистемах PbSc и PbGl [13] электромагнитного калориметра, соответственно. Для всех пар γ -квантов, отобранных в качестве π^0 -кандидатов, применяется дополнительная коррекция для приведения массы π^0 -кандидата к табличному значению $m_{tabl.} = 134,977$ МэВ, что позволяет значительно увеличить отношение уровня сигнала к фону в распределениях по инвариантной массе пар $\pi^0\pi^0$.

Распределения по инвариантной массе пар π^0 -кандидатов, используемые для определения выхода K_s -мезонов, формируются в различных диапазонах поперечного импульса и классах центральности и аппроксимируются суммой функции Гаусса (описывает сигнал со стороны K_s -мезонов) и параболы (описывает фон). Значение выхода K_s -мезонов определяется площадью под кривой функции Гаусса.

Для учета ограниченности аксептанса детекторной установки, эффектов ее работы и используемых в анализе кинематических ограничений, значения выходов K_s -мезонов корректируются с помощью величины эффективности регистрации. Вычисление этой величины для K_s -мезонов производится с помощью моделирования установки методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT 3 [15].

Измерение инвариантных выходов K_{S} -мезонов в столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ в различных диапазонах поперечного импульса и классах центральности производится с помощью формулы, используемой при исследовании рождения π^0 -мезонов [8].

Основной систематической погрешностью при измерении выхода K_s -мезонов, рожденных в столкновении ядер U + U, является погрешность, связанная с выбором параметров аппроксимации распределений по инвариантной массе: определением диапазона аппроксимации, диапазона интегрирования сигнала и степени полинома при аппроксимации. Погрешность составляет 15,0 – 22,5 % в разных интервалах поперечного импульса и в разных классах центральности столкновений. Также существенный вклад в систематическую погрешность измерений вносят процессы конверсии γ -квантов в материалах детектора (10,4 %).

Результаты и их обсуждение

Инвариантные спектры рождения K_s -мезонов по поперечному импульсу в столкновениях ядер урана (U + U) при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ представлены на рис. 1. Спектры измерены в четырех классах центральности и в широком диапазоне поперечного импульса: до 11 ГэВ/с в центральных столкновениях.

Сравнение факторов ядерной модификации K_s -мезонов, рожденных в столкновении ядер урана (U + U) при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192 \ \Gamma \Rightarrow B$, золота (Au + Au) [16] и меди (Cu + Cu) [17] при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 200 \ \Gamma \Rightarrow B$, при равном числе парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений $\langle N_{coll} \rangle$ показаны на рис. 2. Значения $\langle N_{coll} \rangle$ для каждой системы сталкивающихся ядер и каждого класса центральности приведены в таблице. Факторы ядерной модификации K_s -мезонов вычислены в соответствии с формулой (1).

При всех рассматриваемых значениях $\langle N_{coll} \rangle$ значения фактора ядерной модификации K_s-мезонов, измеренных в столкновениях ядер урана, золота и меди (U + U, Au + Au и Cu + Cu) при энергиях $\sqrt{S_{_{NN}}} = 192$ и 200 ГэВ, совпадают в пределах погрешности измерений. Подобное поведение факторов ядерной модификации наблюдалось при исследовании выходов частиц (π^0 -мезонов), в состав которых не входил *s*-кварк [9], что свидетельствует о независимости проявления эффекта гашения струй от геометрической формы сталкивающихся ядер и кваркового состава исследуемых легких мезонов среди (U + U)-, (Au + Au)-<u>и</u>(Cu + Cu)-столкновений при энергиях $\sqrt{S_{NN}} = 192$ и 200 ГэВ.



Рис. 1. Инвариантные спектры рождения K_s -мезонов по поперечному импульсу, измеренные в столкновении ядер урана при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192 \ \Gamma$ эВ для различных классов центральности, %: $0 - 80 \ (I), \ 0 - 20 \ (2), \ 20 - 40 \ (3), \ 40 - 80 \ (4).$

Здесь и далее условные обозначения на точках в виде вертикальных «усов» и серых горизонтальных «прямоугольников» отвечают статистическим и систематическим погрешностям измерений соответственно



Рис. 2. Зависимости величины фактора ядерной модификации R_{AA} от поперечного импульса p_T для K_s -мезонов в (U + U)-взаимодействиях (закрашенные круглые маркеры), (Au+Au)-взаимодействиях (закрашенные квадратные маркеры) и (Cu + Cu)-взаимодействиях (ромбовидные маркеры) [16, 17] при значениях энергии 192 и 200 ГэВ соответственно (см. таблицу).

Прямоугольники против пунктирных линий указывают величину систематической погрешности N_{coll}

Таблица

Значения числа столкновений N_{coll} в зависимости от их центральности для различных типов взаимодействий (см. рис. 2)[16, 17, 19]

Центральность, %	N _{coll}	Рис.2
Au + Au, 200 ГэВ		
0 - 20	$783,2 \pm 71,4$	<i>a</i>)
20 - 60	$300,8 \pm 32,6$	<i>b</i>)
60 - 93	$14,5 \pm 2,5$	<i>c</i>)
Си + Си, 200 ГэВ		
0 - 20	151,8± 16,1	<i>b</i>)
20 - 60	42,0± 3,5	<i>c</i>)
U + U, 192 ГэВ		
0 - 20	$934,5 \pm 97,5$	<i>a</i>)
20 - 40	335,0 ± 33,0	<i>b</i>)
40 - 80	$56,7 \pm 5,0$	<i>c</i>)

На рис. 3 представлены сравнения факторов ядерной модификации π^{0} -, η - и K_{s} -мезонов, измеренных в столкновениях ядер U + U при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192 \ \Gamma \Rightarrow B$, в различных классах по центральности.

Факторы ядерной модификации π^{0-} , η и K_{s} -мезонов, измеренных в столкновениях ядер U + U при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ, совпадают в пределах погрешности во всем диапазоне поперечного импульса и во всех классах центральности.

Отношение выходов η - и π^0 -мезонов (η/π^0), K_s - и π^0 -мезонов (K_s/π^0), измеренных в столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ, в различных классах центральности показаны на рис. 4.

Поведение отношений η/π^0 и K_s/π^0 , измеренных в столкновениях ядер U + U при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ, не зависит от центральности и поперечного импульса в пределах систематических погрешностей. Величины отношений η/π^0 и K_s/π^0 для спектров совпадают в пределах статистической и систематической погрешностей с ранее измеренными отношениями [17, 18]. Независимость отношений η/π^0 и K_s/π^0 от системы столкновений говорит о независимости фрагментации жестких партонов от массы и кваркового состава π^0 -, η - и K_s -мезонов.

На рис. 5 показаны интегральные факторы ядерной модификации π^{0} -, η - и K_s -мезонов, рожденных в столкновении ядер урана, золота и меди при энергиях $\sqrt{S_{NN}} = 192$ и 200 ГэВ [8, 14, 16 – 18]. Поведение зависимостей интегральных факторов ядерной модификации π^{0} -, η - и K_s -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U + U, от $\langle N_{part} \rangle$, не отличается, в пределах систематической погрешности, от поведения интегральных факторов ядерной модификации π^{0} -, η - и K_s -мезонов, рожденных в столкновени-



Рис. 3. Зависимости величины фактора ядерной модификации R_{AA} от поперечного импульса p_T для π^0 -мезонов (квадратные маркеры), η-мезонов (ромбовидные маркеры) и K_s -мезонов (круглые маркеры) в (U + U)-взаимодействиях при значениях энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ для различных классов по центральности %:

0-80 (*a*), 0-20 (*b*), 20-40 (*c*), 60-80 для π^0 - и η -мезонов и 40-80 для K_s -мезонов (*d*). Прямоугольники против пунктирных линий указывают величину систематической погрешности N_{coll}



Рис. 4. Зависимости отношений спектров рождения η -мезонов к спектрам рождения π^0 -мезонов (*a*) и спектров рождения K_s -мезонов к спектрам рождения π^0 -мезонов (*b*), измеренных в столкновении ядер U + U при энергии $\sqrt{s_{_{NN}}} = 192$ ГэВ, от поперечного импульса для различных классов по центральности, %:

0 - 80 (1), 0 - 20 (2), 20 - 40 (3), 40 - 60 для η/π⁰ и 40 - 80 для K_s/π⁰ (4), 60 - 80 (5)



Рис. 5. Зависимости интегральных факторов ядерной модификации π^0 -, η - и K_s -мезонов в столкновениях ядер U + U, Au + Au и Cu + Cu [16, 17, 19] при энергиях $\sqrt{s_{_{NN}}} = 192$ и 200 ГэВ от среднего числа участников столкновения $\langle N_{_{narr}} \rangle$

Заключение

В настоящей работе представлены результаты измерения инвариантных спектров рождения K_s -мезонов по поперечному импульсу в четырех классах центральности, и факторов ядерной модификации K_s -мезонов в трех классах центральности в стол-кновениях ядер урана (U + U) при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192 \ \Gamma$ эВ.

Совпадение факторов ядерной модификации K_{s} -мезонов, рожденных в столкновении ядер урана при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 192$ ГэВ, золота и меди при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 200$ ГэВ, при равном числе средних парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений во всем измеренном диапазоне поперечного импульса во всех классах по центральности говорит об отсутствии зависимости эффекта гашения адронных струй от формы сталкивающихся ядер. Подобное поведение факторов ядерной модификации наблюдается при изучении частиц с отличным кварковым составом (π^0 - и η- мезоны) [8].

Поведение отношений η/π^0 и K_s/π^0 и интегральных факторов ядерной модификации π^0 -, η - и K_s -мезонов говорит о независимости фрагментации жестких партонов от массы и состава кварков π^0 -, η - и K_s -мезонов, рождающихся в столкновениях ядер U + U при энергии $\sqrt{S_{_{NN}}} = 192$ ГэВ.

Результаты измерений, выполненных в рамках исследования (U + U)-столкновений при энергии $\sqrt{S_{_{NN}}} = 192$ ГэВ для π^{0} -, η - и $K_{_S}$ -мезонов, говорят об отсутствии влияния геометрической формы сталкива-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arsene I., Dearden I.G., Beavis D., et al. Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 1–27.

2. Back B.B., Baker M.D., Ballintijn M., et al. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 28–101.

3. 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 // Nucl. Phys. A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 184–283.

4. Adams J., Aggarwal M.M., Ahammed Z., et al. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: the STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 184–283.

5. **Sultanov R.** Jet mesurements by ALICE at LHC// Physics of Atomic Nuclei. 2015. Vol. 78. No.14. Pp. 1587–1590.

6. **Tarasov A.** Jet quenching as a probe of the phases of QCD in relativistic nuclear collisions // Phys. Rev. C. 2007. Vol. 76. No. 5. P. 054902.

7. **Betz B.** Jet quenching in relativistic heavy ion collisions // B. Eur. Phys. J.A. 2012. Vol. 48. No. 164. Pp. 1434–6001.

8. Бердников А.Я., Бердников Я.А., Жарко С.В., Котов Д.О., Радзевич П.В. Экспериментальные исследования рождения π-мезонов в (U + U)-взаимодействиях при энергии 192 Гэв // Известия РАН. Сер. физическая. 2018. Т. 82. № 10. С. 1391–1394.

9. Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K., et al. Review of particle physics // Physical Review. D. 2018. Vol. 98. No. 3. P. 030001.

10. **Iordanova A.** U+U and Cu+Au results from PHENIX // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 458. P. 012004.

11. Allen M., Bennett M. J., Bobrek M., et al. PHENIX inner detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and ющихся ядер на проявление эффекта гашения адронных струй.

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

Associated Equipment. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 549–559.

12. Miller M.L., Reygers, K., Sanders S. J., et al. Glauber modeling in high-energy nuclear collisions // Annual Review of Nuclear and Particle Science. 2007. Vol. 57. Pp. 205–243.

13. Aphecetche L., Awes T.C., Banning J., et al. PHENIX calorimeter // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 521–536.

14. Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Kotov D.O., Radzevich P.V., Zharko S.V. Nuclear modification factors of π^0 and η mesons in U+U collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 192$ GeV // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135. P. 012046.

15. Adler S.S. Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). PHENIX on-line and off-line computing // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 593–602.

16. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). Production of ω mesons in p + p, d + Au, Cu + Cu and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 200 \text{ GeV}$ // Physical Review. C. 2011. Vol. 84. No. 4. P. 044902.

17. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration). Measurement of K_{s0} and K_{*0} in p + p, d + Au, and Cu + Cu collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV // Physical Review. C. 2014. Vol. 90. No. 5. P. 054905.

18. Adler S.S., et al. (PHENIX Collaboration). High transverse momentum η meson production in p + p, d + Au and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 200 \text{ GeV}$ // Phys. Rev. C. 2007. Vol. 75. No. 2. P. 024909.

19. Adare A., Aidala C., Ajitanand N.N., et al. (PHENIX Collaboration). Forward J/ψ production in U+U collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 193$ GeV. Physical Review. C. 2016. Vol. 93. No. 3 P. 034903.

Статья поступила в редакцию 20.03.2019, принята к публикации 01.04.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РАДЗЕВИЧ Павел Владиславович — аспирант кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 radzevichp@gmail.com

БЕРДНИКОВ Александр Ярославич — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 alexber@phmf.spbstu.ru

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 berdnikov@spbstu.ru

ЖАРКО Сергей Вячеславович — ассистент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 zharkosergey94@gmail.com

КОТОВ Дмитрий Олегович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики 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. Arsene I., Dearden I.G., Beavis D., et al., Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment, Nuclear Physics. A. 757 (1–2) (2005) 1-27.

2. Back B.B., Baker M.D., Ballintijn M., et al., The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC, Nuclear Physics. A. 757 (1-2) (2005) 28-101.

3. 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.

4. Adams J., Aggarwal M.M., Ahammed Z., et al., Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: the STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions, Nuclear Physics.

A. 757 (1-2) (2005) 184-283.

5. **Sultanov R.,** Jet measurements by ALICE at LHC, Physics of Atomic Nuclei. 78 (14) (2015) 1587–1590.

6. **Tarasov A.,** Jet quenching as a probe of the phases of QCD in relativistic nuclear collisions, Phys. Rev. C. 76 (5) (2007) 054902.

7. Betz B., Jet quenching in relativistic heavy ion collisions, B. Eur. Phys. J.A. Ser. 48 (164) (2012) 1434–6001.

8. Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Zharko S.V., et al., Experimental study of pion production in U + U interactions at 192 GeV, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 82 (10) (2018) 1262–1265.

9. Tanabashi M., Hagiwara K., Hikasa K., et al., Review of particle physics, Physical Review, D. 98 (3) (2018) 030001.

10. Iordanova A., U+U and Cu+Au results

from PHENIX, Journal of Physics: Conference Series. 458 (Aug) (2013) 012004.

11. Allen M., Bennett M. J., Bobrek M., et al., PHENIX inner detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 499 (2–3) (2003) 549– 559.

12. Miller M.L., Reygers K., Sanders S.J., et al., Glauber modeling in high-energy nuclear collisions, Annual Review of Nuclear and Particle Science. 57 (2007) 205–243.

13. Aphecetche L., Awes T.C., Banning J., et al., PHENIX calorimeter, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 499 (2–3) (2003) 521–536.

14. Berdnikov A.Ya., Berdnikov Ya.A., Kotov D.O., et al., Nuclear modification factors of π^0 and η mesons in U + U collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 192$ GeV, Journal of Physics: Conference Series. 1135 (2018) 012046.

15. Adler S.S. Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), PHENIX on-line

Received 20.03.2019, accepted 01.04.2019.

THE AUTHORS

RADZEVICH Pavel V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation radzevichp@gmail.com

BERDNIKOV Alexander Ya.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation alexber@phmf.spbstu.ru

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation berdnikov@spbstu.ru

ZHARKO Sergei V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation zharkosergey94@gmail.com

KOTOV Dmitry O.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation dmitriy.kotov@gmail.com

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

and off-line computing, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 499 (2–3) (2003) 593– 602.

16. Adare A. Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Production of ω mesons in p+p, d + Au, Cu + Cu and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 200$ GeV, Physical Review. C. 84 (4) (2011) 044902.

17. Adare A., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), Measurement of K_{s0} and K_{*0} in p + p, d + Au, and Cu + Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Physical Review. C. 90 (5) (2014) 054905.

18. Adler S.S., Afanasiev S., Aidala C., et al. (PHENIX Collaboration), High transverse momentum η meson production in p + p, d + Au, and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, Physical Review, C. 75 (2) (2007) 024909.

19. Adare A., Aidala C., Ajitanand N.N., et al. (PHENIX Collaboration), Forward J/ψ production in U+U collisions at $\sqrt{s_{_{NN}}} = 193$ GeV, Physical Review. C. 93 (3) (2016) 034903.