

DOI: 10.5862/JPM.218.11

УДК: 539.126.3

*М.В. Малаев<sup>1,2</sup>, В.Г. Рябов<sup>1,2</sup>, Ю.Г. Рябов<sup>1,2</sup>,  
Я.А. Бердников<sup>2,1</sup>, В.М. Самсонов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ $\phi$ -МЕZOHOV ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРОТОНОВ С ЯДРАМИ СВИНЦА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

В данной статье представлены инвариантные дифференциальные спектры рождения  $\phi$ -мезонов во взаимодействиях протон – ядро свинца ( $p + Pb$ ) при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ при различных центральностях столкновений. На основе полученных результатов были определены факторы ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов в ( $p + Pb$ )-взаимодействиях при энергии, указанной выше. Представлено также сравнение факторов ядерной модификации, полученных для  $\phi$ -мезонов, с аналогичными результатами для других идентифицированных адронов.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, ХОЛОДНАЯ ЯДЕРНАЯ МАТЕРИЯ, ТЯЖЕЛОЕ ЯДРО, ПРОТОН, СВИНЕЦ, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ЭКСПЕРИМЕНТ ALICE.

### Введение

Квантовая хромодинамика (КХД) предсказывает фазовый переход от обычной ядерной материи к состоянию свободных кварков и глюонов, которую принято называть кварк-глюонной плазмой (КГП) [1 – 3]. В лабораторных условиях подобный переход изучают, в основном, путем анализа столкновений релятивистских тяжелых ионов. На это (в том числе) направлены эксперименты на RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider – Релятивистский коллайдер тяжелых ионов) [4] и на LHC (Large Hadron Collider – Большой адронный коллайдер) [5]. Но интерпретация результатов, полученных в столкновениях тяжелых ионов, невозможна без изучения более легких систем, таких как протон-протонные и протон-ядерные. Сравнение результатов, полученных для тяжелых и более легких систем, должно помогать разделению вкладов в полученные результаты от разных эффектов. В частности, на результаты влияют эффекты начального состояния и/или холодной ядерной материи и эффекты, связанные с образованием горячей и плотной материи.

Одним из основных наблюдений, сде-

ланных на RHIC, предопределившим заявление об образовании КГП, было обнаружение подавления выходов адронов при больших значениях поперечного импульса  $p_T$  в столкновениях тяжелых ядер [6, 7]. Такое подавление нельзя было объяснить эффектами холодной ядерной материи, поскольку в результате всех предыдущих измерений ядерных эффектов при больших значениях поперечного импульса ( $p_T > 2$  ГэВ/с) в ( $p + A$ )- и ( $A + A$ )-столкновениях при более низких значениях энергии  $\sqrt{s_{NN}}$  были получены величины сечений даже выше, чем в случае точечного масштабирования [8]. Это явление («эффект Кронина» [9]) объясняется многократным мягким рассеянием налетающих партонов в ядерной среде перед жестким столкновением.

Изучение легких векторных мезонов позволяет более детально понять механизмы образования адронов и исследовать свойства плотной и горячей среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ультрарелятивистских ядер. Одним из наиболее полезных объектов для исследований являются  $\phi$ -мезоны, так как их свойства чувствительны к таким эффектам, как по-

вышенный выход странности, восстановление киральной симметрии, энергетические потери партонов, сопровождающие фазовый переход. Для изучения перечисленных эффектов необходимо измерять рождение мезонов не только в столкновениях тяжелых ядер, но и в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях. Столкновение легких ядер с тяжелыми позволяет оценить эффекты холодной ядерной материи для более точной интерпретации эффектов горячей ядерной среды.

В данной статье представлены инвариантные дифференциальные спектры рождения  $\phi$ -мезонов по поперечному импульсу в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5,02$  ТэВ при различных центральных столкновениях. На основе полученных данных определены факторы ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях.

### Измерение инвариантных спектров рождения $\phi$ -мезонов

Результаты, представленные в данной статье, основаны на анализе данных, полученных экспериментом ALICE на LHC в 2013 году при изучении  $(p + \text{Pb})$ -столкновений при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5,02$  ТэВ. Подробное описание детекторной установки, целей и задач эксперимента ALICE представлены в работе [10].

С целью получения инвариантных спектров рождения  $\phi$ -мезонов в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5,02$  ТэВ было отобрано порядка 100 млн. событий. Каждое из них проверялось на срабатывание триггера (на основе информации с  $\text{V0}$ -детектора), отмечающего факт столкновения. Проведена также проверка возможной записи нескольких событий в качестве одного. Выявленные случаи исключались из анализа. Дополнительным критерием достоверности полученных результатов служило наличие восстановленной вершины взаимодействия в событии. Данная вершина должна была лежать в допустимом диапазоне вдоль оси пучка:  $|Z_{\text{vtx}}| < 10$  см.

Анализ проводился для канала распада  $\phi$ -мезонов на два противоположно заря-

женных каона:  $K^+$ ,  $K^-$ . Треки заряженных частиц восстанавливались в основных трековых детекторах эксперимента ALICE: TPC и ITS. Для анализа были разработаны и оптимизированы критерии отбора треков заряженных частиц (было необходимо отбраковать треки низкого качества и повысить отношение сигнал/фон). В связи с высоким уровнем комбинаторного фона, определяемого большой множественностью рождающихся в событии частиц, выделение сигнала в области малых значений поперечного импульса предполагало максимальное использование ресурсов экспериментальной установки по идентификации частиц. В связи с этим получение результатов было ограничено идентификацией частиц в области поперечных импульсов  $p_T < 3$  ГэВ/с; в области же  $p_T > 3$  ГэВ/с ее не проводили. Проводимое исследование частиц основывалось на информации, получаемой с детекторов TPC (измерение ионизационных потерь) и TOF (измерение времени лета на известной базе).

После отбора треков для анализа, для каждого интервала поперечного импульса строилось распределение инвариантных масс пар противоположно заряженных частиц. Полученное распределение содержало, кроме полезного сигнала, комбинаторный фон. Вычитание последнего основывалось на его оценке методом смешивания событий. Для смешивания выбирались такие события, которые были топологически близки по центральности и вершине взаимодействия. Для измерения выходов  $\phi$ -мезонов распределение, оставшееся после вычитания комбинаторного фона, аппроксимировалось комбинацией функций. В комбинацию входили свертка функций Брейта – Вигнера (для учета сигнала) и функции Гаусса (для учета массового разрешения детектора), а также полином второй степени для учета остаточного коррелированного фона. На рис. 1 представлено распределение инвариантных масс противоположно заряженных треков для одного из анализируемых диапазонов по поперечному импульсу вместе с примером аппроксимации комбинацией функций.

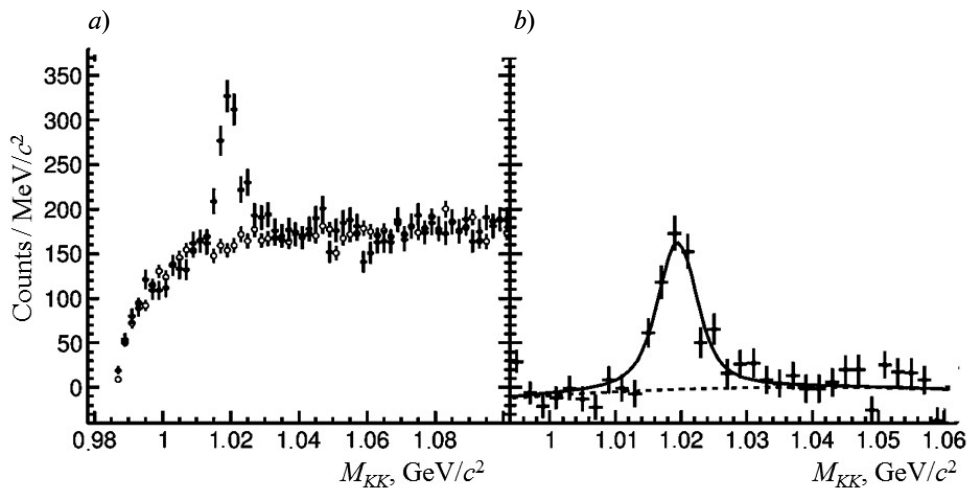


Рис. 1. Распределение инвариантных масс пар противоположно заряженных каонов в  $(p + Pb)$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ до (a) и после (b) вычета комбинаторного фона.

Черные точки – эксперимент; открытыми маркерами обозначен комбинаторный фон, оцененный методом смешивания событий (a); сплошная линия – аппроксимация распределения сложной функции, прерывистая – часть функции, отвечающая за остаточный коррелированный фон (b)

Для определения эффективности реконструкции  $\phi$ -мезонов в эксперименте ALICE, а также для оценки массового разрешения детекторной установки использовалось моделирование Монте-Карло. В качестве генератора событий использовалась программа DPMJET. Детекторная установка и процессы прохождения частиц через вещество моделировались с использованием программного пакета GEANT. Эффективность быстро возрастала с увеличением поперечного импульса частиц и насыщалась в области импульсов  $p_T > 6$  ГэВ/с. Таким образом, диапазон измерения выходов  $\phi$ -мезонов в области малых поперечных импульсов ограничен быстро уменьшающейся эффективностью восстановления частиц, а в области больших поперечных импульсов – интегральной светимостью накопленных экспериментальных данных.

Инвариантные дифференциальные спектры рождения  $\phi$ -мезонов были получены с использованием формулы:

$$\frac{1}{2\pi N p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{1}{2\pi} \frac{\varepsilon_{trig}}{N_{ev}} \frac{1}{p_T} \frac{1}{eff \cdot BR} \frac{N_\phi}{\Delta y \Delta p_T},$$

где  $N_{ev}$  – количество событий, используемых для анализа;  $p_T$  – центр исследуемого диапазона по поперечному импульсу;  $BR$  –

вероятность распада  $\phi$ -мезона на два заряженных каона (48,9 % [11]);  $N_\phi$  – измеренное значение выхода  $\phi$ -мезонов в определенном диапазоне по быстрой и поперечному импульсу;  $eff$  – поправка, учитывающая ограниченность акцептанса и эффективность реконструкции детектора;  $\varepsilon_{trig}$  – поправка на эффективность триггера.

Систематическая погрешность измерений составила 7 – 13 % и зависела от значения поперечного импульса. К наиболее значимым источникам систематической погрешности необходимо отнести следующие неопределенности:

в эффективности восстановления треков заряженных частиц в детекторах TPC и ITS (3 % для одного трека и 6 % для  $\phi$ -мезонов) [12];

в определении выходов  $\phi$ -мезонов путем аппроксимации измеренных распределений инвариантных масс пар противоположно заряженных треков (3 – 11 % в зависимости от значения поперечного импульса).

### Результаты измерений в эксперименте ALICE

Инвариантные дифференциальные спектры рождения  $\phi$ -мезонов были измерены в  $(p + Pb)$ -взаимодействиях при

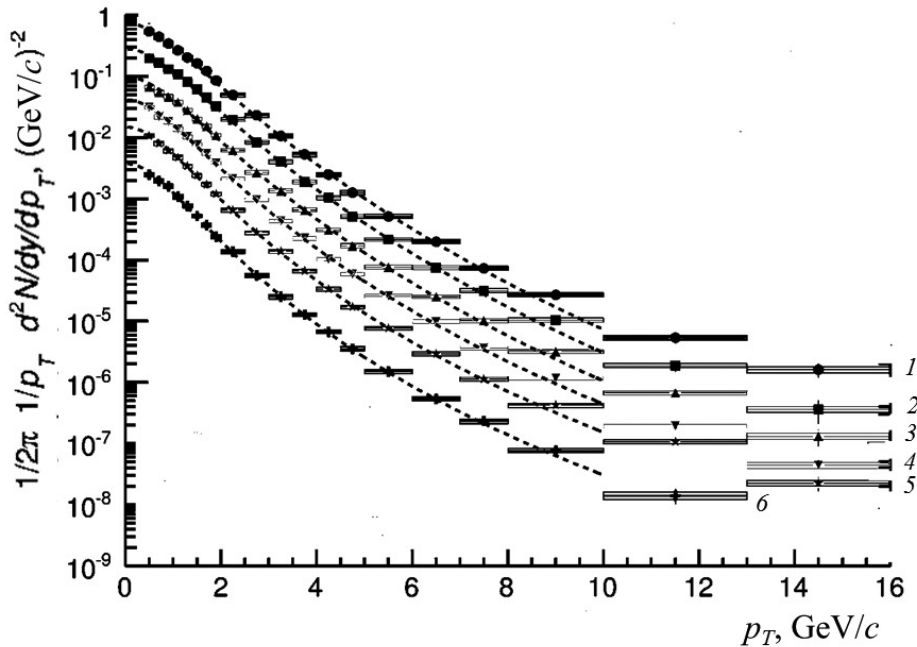


Рис. 2. Инвариантные дифференциальные спектры рождения  $\phi$ -мезонов, измеренные в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ при центральных столкновениях: 0 – 5 % (1), 5–10 % (2), 10–20 % (3), 20 – 40 % (4), 40 – 60 % (5), 60 – 80 % (6). Спектры для разных центральных столкновения помножены на масштабирующие коэффициенты: 10 (1), 5 (2), 2 (3), 1(4), 0,5 (5), 0,2 (6). Вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – статистические ошибки измерений

энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ при различных центральных столкновениях. При центральных 0 – 100 % результаты были получены в области поперечных импульсов до 21 ГэВ/с. В случае анализа узких интервалов по центральности столкновений результаты были получены в диапазоне до 16 ГэВ/с для всех центральных столкновений, за исключением наиболее периферийных столкновений, в которых измерения были выполнены только до 13 ГэВ/с. Все спектры были измерены в области центральных быстрот ( $-0,5 < y_{cms} < 0$ ). Полученные результаты представлены на рис. 2. Спектры для разных центральных столкновений были помножены на масштабирующие коэффициенты для наглядности представления данных.

Поскольку на ЛНС на данный момент не было проведено цикла набора по изучению  $(p + p)$ -столкновений при энергии  $\sqrt{s} = 5,02$  ТэВ, для получения референсного спектра для определения факторов ядерной модификации  $\phi$ -мезонов в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях были ис-

пользованы инвариантные спектры рождения  $\phi$ -мезонов, полученные в  $(p + p)$ -взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s} = 2,76$  и 7,00 ТэВ.

Для измерения инвариантного сечения рождения  $\phi$ -мезонов в протон-протонных взаимодействиях при энергии  $\sqrt{s} = 5,02$  ТэВ была использована интерполяция между полученными значениями для случаев протон-протонных взаимодействий при энергиях  $\sqrt{s} = 2,76$  и 7,00 ТэВ. Данная интерполяция производилась отдельно для каждого исследуемого промежутка по поперечному импульсу и основывалась на предположении о степенной зависимости сечения рождения частиц от энергии сталкивающихся ядер в системе центра масс. Статистическая ошибка определялась в процессе интерполяции, а в качестве относительной систематической ошибки выбиралась наибольшая относительная ошибка, полученная для сечений рождения  $\phi$ -мезонов в  $(p + p)$ -взаимодействиях при энергиях  $\sqrt{s} = 2,76$  и 7,00 ТэВ.

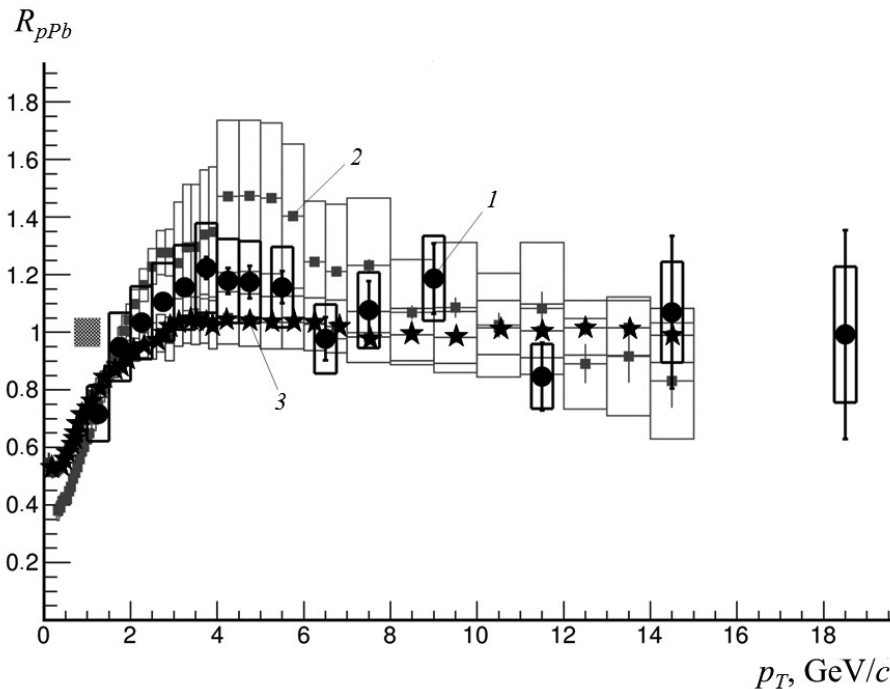


Рис. 3. Зависимость факторов ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов (1) от поперечного импульса в сравнении с другими адронами (2 – протоны, 3 – заряженные пионы) в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5,02$  ТэВ. Вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – статистические ошибки измерений

На основе результатов для  $(p + p)$ - и  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействий при указанных выше значениях энергии были определены факторы ядерной модификации для  $\phi$ -мезонов в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях при энергии  $\sqrt{S_{NN}} = 5,02$  ТэВ. Фактор ядерной модификации  $R_{AB}$  определяется как

$$R_{AB} = \frac{dN_{AB}^p}{(T_{AB}) \times d\sigma_{NN}^p},$$

где  $dN_{AB}^p$  – дифференциальный выход частицы в  $(A + B)$ -взаимодействиях,  $d\sigma_{NN}^p$  – сечение рождения частицы в  $(p + p)$ -столкновениях,  $T_{AB}$  – функции перекрытия ядер [13].

На рис. 3 представлены полученные факторы для  $\phi$ -мезонов в сравнении с другими идентифицированными адронами для случая центральности 0–100 %. Видно, что при больших значениях поперечного импульса выход  $\phi$ -мезонов (а также других адронов) не испытывает подавления в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях, так как значения

факторов ядерной модификации совпадают с единицей в пределах ошибок измерений. В области промежуточных значений поперечного импульса наблюдается повышенный выход адронов в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях в сравнении с элементарными  $(p + p)$ -столкновениями. Данное превышение выходов слабо выражено для мезонов и более существенно – для барионов.

### Заключение

Представленные результаты демонстрируют, что в области больших поперечных импульсов выходы  $\phi$ -мезонов, как и других адронов, не испытывают подавления в  $(p + \text{Pb})$ -взаимодействиях, по сравнению с результатами, полученными в  $(p + p)$ -столкновениях. Этот факт подтверждает выдвинутую гипотезу, что подавление выходов адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер, наблюдаемое на ЛНС, нельзя объяснить эффектами холодной ядерной материи, и таким образом

может служить признаком образования КПП.

При промежуточных значениях поперечного импульса наблюдается повышенный выход  $\phi$ -мезонов. Такой результат можно качественно объяснить эффектом Кронины, ранее наблюдавшимся на RHIC [14]. В то же время следует отметить, что указанный эффект оказывается более вы-

раженным при энергиях RHIC, чем LHC (разные коллайдеры).

Результаты, представленные в данной статье, могут быть использованы для оценки вкладов в процессы рождения частиц от эффектов холодной ядерной материи, что необходимо для интерпретации результатов, полученных в столкновениях релятивистских тяжелых ядер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] 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.
- [2] Wang Z.M., 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 // Nucl. Phys. A. 2005. Vol. 757. No. 1-2. Pp. 102–183.
- [3] Shuryak E.V. Quantum chromodynamics and the theory of superdense matter // Phys. Rept. 1980. Vol. 61. No. 2. Pp. 71–158.
- [4] Baym G. RHIC: From dreams to beams in two decades // Nucl. Phys. A. 2002. Vol. 698. No. 1-4. Pp. 23–32.
- [5] Evans L., Bryant P. LHC Machine // JINST. 2008. Vol. 3. No. 8. Pp. S08002.
- [6] Adcox K., Adler S.S., Ajitanand N.N., et al. Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 88. No. 2. Pp. 022301–022307.
- [7] Adler S.S., Afanasiev S., Aidala C., et al. Suppressed  $\pi^0$  production at large transverse momentum in central Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. No. 7. Pp. 072301–072307.
- [8] Adler S.S., Afanasiev S., Aidala C., et al. Nuclear effects on hadron production in d+Au and p+p collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Phys. Rev. C. 2006. Vol. 74. No. 2. Pp. 024904–024917.
- [9] Cronin J. Production of hadrons at large transverse momentum at 200, 300 and 400 GeV // Phys. Rev. D. 1975. Vol. 11. Pp. 3105–3123.
- [10] Aamodt K., Abrahantes Quintana A., Achenbach R., et al. The ALICE experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. Vol. 3. No. 8. S08002.
- [11] Beringer J., Arguin J.F., Barnett R.M., et al. Review of particle physics // Phys. Rev. D. 2012. Vol. 86. No. 1. P. 010001.
- [12] Abelev B., Adam J., Adamova D., et al. Transverse momentum distribution and nuclear modification factor of charged particles in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110. No. 8. P. 082302.
- [13] Toia A. ALICE measurements in p-Pb collisions: Charged particle multiplicity, centrality determination and implications for binary scaling // Nucl. Phys. A. 2014. Vol. 926. Pp. 78–84.
- [14] Adare A., Afanasiev A., Aidala C., et al. Nuclear modification factors of  $\phi$  mesons in d+Au, Cu+Cu and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 83. No. 2. P. 024909.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАЛАЕВ Михаил Владимирович** – младший научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова, ассистент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роцца  
mmalaye@gmail.com

**РЯБОВ Виктор Германович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роцца  
riabovvg@gmail.com

**РЯБОВ Юрий Германович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роцца  
yuriy.riabov@gmail.com

**БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, старший научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова.

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

**САМСОНОВ Владимир Михайлович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией релятивистской ядерной физики Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова, профессор кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роцца  
samsonov@npfi.spb.ru

*Malaev M.V., Riabov V.G., Ryabov Yu.G., Berdnikov Ya.A., Samsonov V.M.*  
DETERMINATION OF PHI MESON NUCLEAR MODIFICATION FACTORS IN THE PROTON – LEAD NUCLEOUS INTERACTIONS IN THE ALICE EXPERIMENT AT THE LHC.

Hadronic resonances are among the most interesting probes of the hot and dense matter created in Pb + Pb collisions. Due to their short lifetime, they are sensitive to the anticipated chiral symmetry restoration as well as to suppression and regeneration due to hadronic interactions in the final state. At intermediate and high transverse momenta ( $p_T$ ) resonances which cover the range of masses between the light pions and heavier protons contribute in systematic study of the baryon puzzle and parton energy loss in the dense medium. Studies in  $p + Pb$  collisions are important for the interpretation of heavy ion results as they allow to decouple and understand the cold nuclear matter effects from final state effects.

The systematic study of the phi (1020) meson production at mid-rapidity in  $p + Pb$  collisions at LHC energies has been performed. In this article the most recent results of these studies including  $p_T$  spectra and nuclear modification factor distributions in  $p + Pb$  collisions at an energy of  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV are presented.

QUARK-GLUON PLAZMA, COLD NUCLEAR MATTER, HEAVY NUCLEOUS, PROTON, LEAD, LARGE HADRON COLLIDER, ALICE EXPERIMENT.

#### REFERENCES

- [1] **K. Adcox, S.S. Adler, S. Afanasiev, et al.**, Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration, Nucl. Phys. A., 757 (2005) 184–283
- [2] **Z.M. Wang, M.M. Aggarwal, Z. Ahammed, 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, Nucl. Phys. A., 757 (2005)102–183
- [3] **E.V. Shuryak**, Quantum chromodynamics and the theory of superdense matter, Phys. Rept., 61(1980) 71–158
- [4] **G. Baym**, RHIC: From dreams to beams in two decades, Nucl. Phys. A., 698 (2002) 23–32
- [5] **L. Evans, P. Bryant**, LHC Machine, JINST, 3 (2008) S08001
- [6] **K. Adcox, S.S. Adler, N.N. Ajitanand, et al.**, Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV, Phys. Rev. Lett., 88 (2001) 022301–022307
- [7] **S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, et al.**, Suppressed pion production at large transverse



momentum in central Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys. Rev. Lett., 91 (2003) 072301–072307

[8] **S.S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, et al.**, Nuclear effects on hadron production in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV revealed by comparison with p+p data, Phys. Rev. C., 74 (2006) 024904–024917

[9] **J. Cronin**, Production of hadrons at large transverse momentum at 200, 300 and 400 GeV, Phys. Rev. D., 11 (1975) 3105–3123

[10] **K. Aamodt, A. Abrahantes Quintana, R. Achenbach, et al.**, The ALICE experiment at the CERN LHC, JINST, 3 (2008) S08002

[11] **J. Beringer, J.F. Arguin, R.M. Barnett,**

**et al.**, Review of Particle Physics, Phys. Rev. D, 86 (2012) 010001

[12] **B. Abelev, J. Adam, D. Adamova, et al.**, Transverse momentum distribution and nuclear modification factor of charged particles in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Phys. Rev. Lett., 110 (2013) 8, 082302

[13] **A. Toia**, ALICE Measurements in p-Pb Collisions: Charged Particle Multiplicity, Centrality Determination and implications for Binary Scaling, Nucl. Phys. A., 926 (2014) 78–84

[14] **A. Adare, A. Afanasiev, C. Aidala, et al.**, Nuclear modification factors of  $\phi$  mesons in d+Au, Cu+Cu and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, Phys. Rev. C., 83 (2011) 024909

#### THE AUTHORS

##### **MALAEV Mikhail V.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute*

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

mmalayev@gmail.com

##### **RIABOV Victor G.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute*

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

riabovvg@gmail.com

##### **RYABOV Yuri G.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute*

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

yuriy.riabov@gmail.com

##### **BERDNIKOV Yaroslav A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

*Petersburg Nuclear Physics Institute*

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation

berdnikov@spbstu.ru

##### **SAMSONOV Vladimir M.**

*Petersburg Nuclear Physics Institute*

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russian Federation

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

vladimir.samsonov@cern.ch