

М.В. Малаев^{1,2}, *В.Г. Рябов*^{1,2}, *Ю.Г. Рябов*^{1,2},
Я.А. Бердников^{2,1}, *В.М. Самсонов*^{1,2}

¹ Петербургский институт ядерной физики им Б.П. Константинова

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ФАКТОРЫ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ϕ -МЕЗОНОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР СВИНЦА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

В статье представлены результаты измерения факторов ядерной модификации ϕ -мезонов, а также отношения выходов протонов и ϕ -мезонов в зависимости от поперечного импульса в (Pb + Pb)-взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Результаты основаны на анализе данных, полученных в эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере. Представлено сравнение полученных результатов с факторами ядерной модификации для других идентифицированных адронов.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, МЕЗОН, ТЯЖЕЛОЕ ЯДРО, КВАРК, ГЛЮОН, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР.

Введение

Одной из основных задач современной физики высоких энергий является изучение фазовой диаграммы состояния сильно взаимодействующей материи. Предполагается, что ядерная материя при высокой температуре и/или барионных плотностях испытывает переход от адронных к партонным степеням свободы [1, 2]. Изучение фазового перехода должно давать ключ к пониманию таких аспектов квантовой хромодинамики (КХД), как конфайнмент и нарушение киральной симметрии, не имеющих исчерпывающего объяснения на данный момент.

В лабораторных условиях достижение сверхвысоких плотностей энергии и барионных плотностей возможно только при изучении центральных столкновений релятивистских тяжелых ядер. В таких столкновениях кинетическая энергия налетающих частиц рассеивается в сравнительно большом объеме ядерного вещества, вовлечен-

ном в реакцию. Нагревание и сжатие ядерного вещества может приводить к фазовому переходу материи из состояния бесцветных адронов в состояние свободных кварков и глюонов, получившее название кварк-глюонной плазмы (КГП) [3].

В 2005 году все коллаборации, работающие на релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC – Relativistic Heavy Ion Collider) [4] в Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ, США), сделали заявление об экспериментальном обнаружении нового состояния вещества – сильно взаимодействующей КГП [1, 2]. Обнаруженное вещество вело себя как идеальная жидкость с высокими плотностями энергии и цветовых зарядов, обладающая высокой температурой и партонными степенями свободы.

Вывод об образовании нового состояния ядерного вещества в центральных столкновениях тяжелых ядер при энергиях коллай-

дера RHIC основан на совокупности полученных экспериментальных результатов и их интерпретации в рамках современных представлений КХД. Одним из основных доводов в пользу образования КГП стало обнаружение эффекта подавления выхода адронов в области больших поперечных импульсов, получившего название эффекта гашения струй [5, 6]. Подавление выходов адронов происходит вследствие энергетических потерь высокоэнергетичных партонов при прохождении через цветозаряженную среду, образующуюся при столкновении двух релятивистских ядер [7, 8]. Измерение степени подавления выхода адронов позволяет оценивать энергетические потери партонов в среде и таким образом изучать ее свойства. При этом во взаимодействиях легких и тяжелых ядер не ожидается образования промежуточной среды и эффект гашения струй не проявляется.

Измерения, выполненные для легких адронов в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях коллайдера RHIC, показали, что выход адронов действительно подавлен более чем в пять раз в центральных столкновениях тяжелых ядер золота ($Au + Au$) [6]. При этом эффекта подавления не наблюдали для тех же частиц во взаимодействиях легких и тяжелых ядер ($d + Au$) [9], а также для высокоэнергетичных прямых фотонов, не участвующих в сильных взаимодействиях [10]. Это позволило сделать вывод об экспериментальном обнаружении эффекта гашения струй и получить оценки для плотности цветовых зарядов и плотности энергии в образующейся среде, которую в настоящее время ассоциируют с КГП. Несмотря на то, что на настоящий момент существует большое число теоретических моделей, которые успешно описывают степень подавления выхода легких адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер, они не могут объяснить равную степень подавления выхода адронов, содержащих легкие (u, d)-кварки, и более тяжелых адронов, содержащих (c, b)-кварки. Очевидно, что разрешение данного кризиса требует более углубленного изучения эффекта гашения струй, систематического измерения выходов и степени подавления для большего

числа идентифицированных адронов, расширения исследований на сектор частиц, содержащих в своем составе промежуточные по массе странные кварки.

Еще одним важным открытием, сделанным на RHIC, стало обнаружение избыточного выхода барионов по отношению к мезонам в области промежуточных поперечных импульсов в центральных столкновениях тяжелых ядер [11]. Отношение выходов протонов и пионов (p/π), измеренное в столкновениях тяжелых ионов в диапазоне поперечных импульсов $2 - 5$ ГэВ/с, оказалось в несколько раз большим аналогичного отношения, измеренного в протон-протонных взаимодействиях при той же энергии. Для объяснения экспериментально обнаруженного эффекта, получившего название «барионная аномалия» [12], требуется привлечение механизмов рождения адронов, отличных от фрагментации. Существует ряд моделей [13, 14], которые пытаются описать избыточный выход барионов через рекомбинацию структурных кварков, при которой барионы, состоящие из трех кварков, получают большую прибавку к поперечному импульсу по сравнению с мезонами, состоящими только из двух кварков, что и приводит к появлению барионной аномалии. Рекомбинационные сценарии предполагают образование теплового источника партонов, что может означать образование КГП. Необходимо отметить, что альтернативные модели [15 – 17], отдающие предпочтение гидродинамическим эффектам и развитию потоков для описания барионной аномалии, также имеют право на существование. В последнем случае различие в поведении барионов и мезонов определяется в основном различием в массах частиц. Очевидно, что для дискриминации тех или иных предположений о доминирующих механизмах рождения адронов необходимо провести систематическое измерение свойств различных идентифицированных адронов в области промежуточных поперечных импульсов. При этом основной акцент должен делаться на измерение выходов барионов и мезонов, обладающих сходными массами.

В 2010 году началась реализация программы по изучению взаимодействий релятивистских тяжелых ядер на LHC [18] в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария). Все открытия, сделанные на RHIC, были подтверждены экспериментами на LHC.

В данной работе в качестве инструмента для изучения свойств плотной и горячей среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ядер на LHC, используются ϕ -мезоны. Данные частицы как по массе, так и по кварковому составу занимают промежуточное положение между более легкими (u , d) и более тяжелыми (c , b) частицами. Измерение выхода ϕ -мезонов в центральных столкновениях тяжелых ядер и степени его подавления в области больших поперечных импульсов позволит дополнить существующую картину и провести систематическое изучение эффекта гашения струй. Помимо этого, ϕ -мезон, обладающий массой, близкой к массе протона, можно рассматривать как идеального кандидата для изучения барионной аномалии.

В данной статье представлены результаты измерения инвариантных спектров рождения ϕ -мезонов в $(p + p)$ -столкновениях при энергии $\sqrt{S} = 2,76$ ТэВ и в $(Pb + Pb)$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Результаты измерений используются для определения факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов в $(Pb + Pb)$ -столкновениях при различных центральных столкновениях. Обсуждается значение полученных результатов для определения свойств плотной и горячей среды, образующейся в центральных столкновениях тяжелых ядер, а также доминирующих механизмов рождения адронов в различных диапазонах по поперечному импульсу (p_T).

Измерение инвариантных спектров рождения ϕ -мезонов

Результаты, представленные в данной статье, были получены при анализе данных эксперимента ALICE на LHC. Детальное описание детекторной установки, а также цели и задачи эксперимента описаны в статье [19].

Восстановление ϕ -мезонов производилось в канале распада на два заряженных каона: $\phi \rightarrow K^+ K^-$. Треки заряженных частиц восстанавливались с использованием двух основных трековых детекторов эксперимента ALICE, а именно TPC (Time Projection Chamber – время-проекционная камера) и ITS (Inner Tracking System – внутренняя трековая система). В связи с большой множественностью частиц, образующихся в центральных столкновениях релятивистских тяжелых ядер при энергиях LHC, выделение сигнала в области малых значений поперечного импульса без использования идентификации частиц невозможно из-за высокого уровня комбинаторного фона. В то же время в области больших поперечных импульсов целесообразность использования идентификации частиц пропадает. В связи с этим все результаты, представленные в данной работе, были получены с использованием идентификации частиц для $p_T < 3$ ГэВ/с и без использования области $p_T > 3$ ГэВ/с. Идентификация частиц производилась с использованием детекторов TPC, где она осуществляется через измерение ионизационных потерь заряженной частицы, и TOF (Time Of Flight – время-пролетный детектор), в котором масса частицы определяется через измерения времени пролета и импульса частицы. Для улучшения отношения сигнал/фон были разработаны и оптимизированы следующие критерии отбора треков заряженных частиц:

допустимый диапазон значений по псевдобыстроте трека должен быть $|\eta| < 0,8$, что гарантирует нахождение трека в акцептансе детектора TPC);

минимальное число точек, измеренных вдоль сегмента трека заряженной частицы, восстановленного в TPC, должно быть равно 70;

каждый трек, восстановленный в TPC, должен быть ассоциирован с сегментом трека, восстановленным во внутреннем трекере ITS. Использование в анализе гибридных треков, восстановленных как в TPC, так и в ITS, позволяет улучшить импульсное разрешение и подавить вклады в комбинаторный фон от частиц, рождаю-

щихся не в первичной вершине взаимодействия ядер;

ограничение на минимальное значение поперечного импульса для отбираемых треков. В связи со значительным увеличением множественности рождающихся частиц в событии, для случая столкновения тяжелых ядер применялся более жесткий критерий, чем для случая столкновения легких. Анализ без идентификации частиц для наиболее центральных (Pb + Pb)-столкновений проводился для частиц при условии $p_T > 0,75$ ГэВ/с. Для остальных центральных использовали отбор $p_T > 0,50$ ГэВ/с. Анализ с использованием идентификации частиц для всех центральных требовал выполнения условия $p_T > 0,15$ ГэВ/с.

Для измерения сигнала от распада ϕ -мезонов строили распределение инвариантных масс пар треков противополож-

ного знака — K^+K^- . Полученное распределение пар отобранных для анализа треков противоположного знака содержало, помимо полезного сигнала, комбинаторный фон. Для оценки формы и величины некоррелированного фона от случайных пар треков использовался метод смешивания событий. Для смешивания отбирались однотипные события, имеющие одинаковые центральности столкновения ($|\Delta C| < 10\%$) и z -координаты вершины взаимодействия ядер ($|\Delta z| < 2$ см). После вычитания некоррелированного фона итоговое распределение инвариантных масс пар треков аппроксимировалось сложной функцией, которая включала в себя свертку функций Брейта — Вигнера (для учета сигнала) и функции Гаусса (для учета массового разрешения детектора). Кроме того, функция содержала полином второй степени для описания оста-

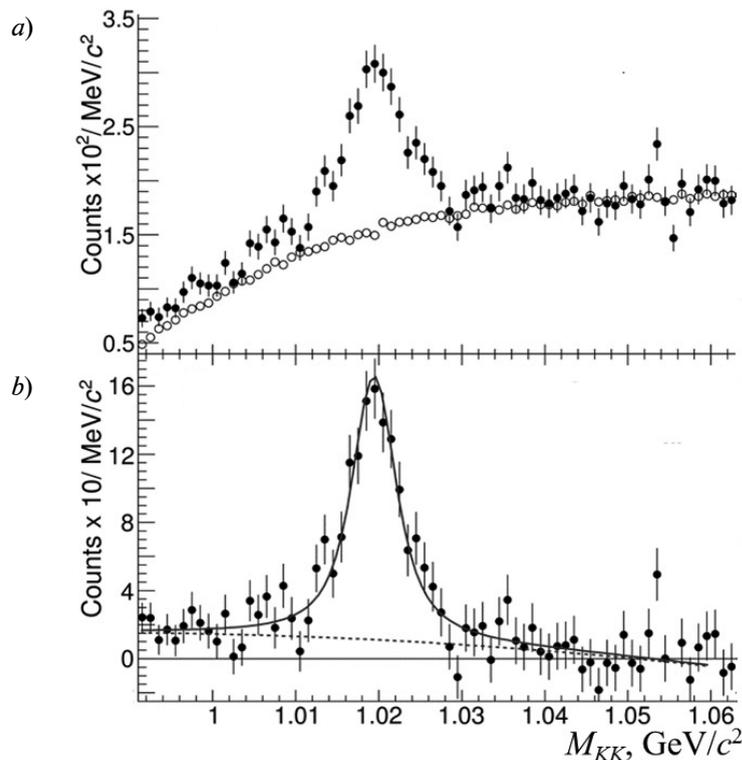


Рис. 1. Распределение инвариантных масс пар противоположно заряженных каонов в (Pb + Pb)-взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ до (a) и после (b) вычета комбинаторного фона.

Черные точки — эксперимент; открытыми маркерами обозначен комбинаторный фон, оцененный методом смешивания событий; сплошная линия — аппроксимация распределения сложной функцией, прерывистая — часть функции, отвечающая за остаточный коррелированный фон

точного фона. На рис. 1 представлены примеры распределений инвариантных масс пар треков противоположного знака до и после вычитания комбинаторного фона.

Для оценки эффективности восстановления ϕ -мезонов в экспериментальной установке и массового разрешения трековой системы применялась симуляция Монте-Карло. В качестве генераторов событий использовались программы Pythia для $(p + p)$ -столкновений и HIJING для $(Pb + Pb)$. Прохождение сгенерированных частиц через экспериментальную установку моделировалось с использованием программного пакета GEANT3.

Оценка массового разрешения производилась путем сравнения по поперечному импульсу сгенерированных и восстановленных масс ϕ -мезона для каждого из изучаемых промежутков. Полученные распределения с разницей масс аппроксимировались функцией Гаусса, а значение ширины распределения Гаусса, полученное из аппроксимации, принималось равным разрешению по массе.

Эффективность восстановления ϕ -мезонов для каждого анализируемого промежутка по поперечному импульсу определялась как отношение N_{rec}/N_{gen} . В этом отношении N_{gen} — число сгенерированных ϕ -мезонов в данном промежутке по поперечному импульсу в изучаемом диапазоне значений быстрот, а N_{rec} — число восстановленных ϕ -мезонов после прохождения всех критериев отбора. Полученная таким образом эффективность демонстрирует быстрый рост с увеличением поперечного импульса частиц. В области $p_T > 8$ ГэВ/с она выходит на насыщение и значение эффективности восстановления ($\sim 0,45$) уже не зависит от поперечного импульса.

Инвариантные дифференциальные спектры рождения ϕ -мезонов были получены с использованием следующей 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 ϕ -мезона на два

заряженных каона (принята равной 48,9 % [20]); N_ϕ — измеренное значение выхода ϕ -мезонов в определенном диапазоне по быстрой и поперечному импульсу; eff — поправка, учитывающая ограниченность аксептанса и эффективность реконструкции детектора; ε_{trig} — поправка на эффективность триггера.

Основной вклад в систематическую погрешность измерений вносит неопределенность в эффективности восстановления треков заряженных частиц детекторами TPC и ITS. Данная неопределенность была оценена равной 5 % для каждого трека и 10 % для ϕ -мезона. Также большой вклад в систематическую ошибку измерений вносит неопределенность в определении выходов ϕ -мезонов из аппроксимации измеренных спектров инвариантной массы двух каонов. Данная погрешность оценивалась путем варьирования промежутка аппроксимации и использования различных функций для описания фона; она составила 4 — 12 % (в зависимости от значения поперечного импульса ϕ -мезонов). Общая систематическая ошибка измерений лежит в диапазоне от 12 до 17 % и определяется центральностью столкновений, при слабой зависимости от поперечного импульса ϕ -мезонов.

Результаты измерений

Инвариантные дифференциальные спектры рождения ϕ -мезонов были измерены в $(p + p)$ - и в $(Pb + Pb)$ -взаимодействиях при различных центральностях столкновения при энергиях $\sqrt{S} = \sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Результаты измерений для второго случая представлены на рис. 2. Измерения выполнены в широком диапазоне поперечных импульсов (вплоть до 21 ГэВ/с) для случаев $(p + p)$ - и (полу)центральных $(Pb + Pb)$ -столкновений и в диапазоне до 6 ГэВ/с для случая периферийных $(Pb + Pb)$ -столкновений. На рис. 2 и всех последующих статистические ошибки измерений показаны в виде «усов», систематические ошибки показаны с помощью прямоугольников. Для наглядности спектры для разных центральностей столкновения были помножены на масштабирующие коэффициенты (кратные 10).

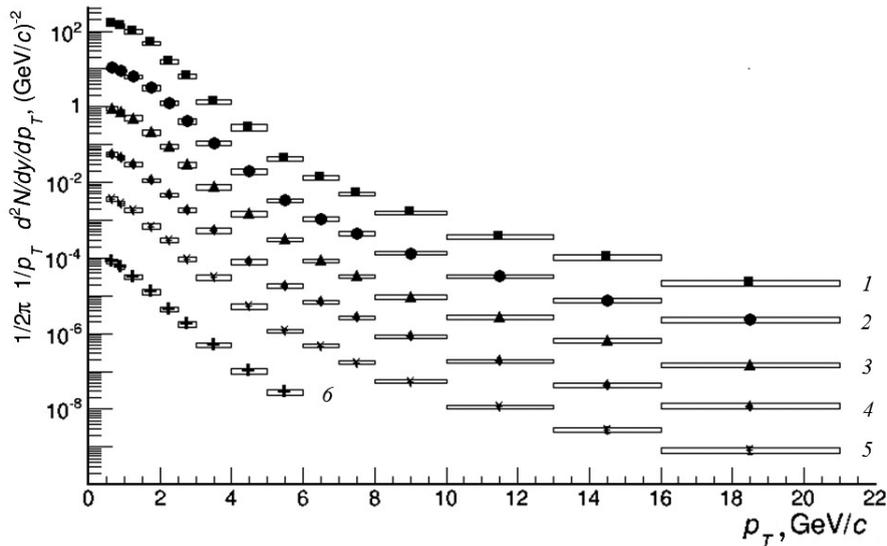


Рис. 2. Инвариантные дифференциальные спектры рождения ϕ -мезонов, измеренные в (Pb + Pb)-взаимодействиях при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ при центральностях столкновений 0 – 5 % (1), 10 – 20 % (2), 20 – 30 % (3), 30 – 40 % (4), 40 – 50 % (5), 60 – 80 % (6).

Спектры для разных центральностей столкновения помножены на масштабирующие коэффициенты: 10^2 (1), 10^1 (2), 10^0 (3), 10^{-1} (4), 10^{-2} (5), 10^{-3} (6). Вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – статистические ошибки измерений

Результаты измерений были использованы для определения факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов в (Pb + Pb)-взаимодействиях при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ для различных центральностей столкновений. 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 [21], получаемые с использованием модели Глаубера.

Факторы ядерной модификации для ϕ -мезонов в (Pb + Pb)-взаимодействиях представлены на рис. 3.

В центральных (Pb + Pb)-соударениях при больших значениях поперечного импульса выход ϕ -мезонов испытывает сильное подавление по отношению к (p + p)-взаимодействиям. Степень подавления совпадает с таковой для других идентифицированных адронов. При переходе от наи-

более центральных столкновений к периферийным значения R_{AA} приближаются к единице. В области промежуточных величин поперечного импульса факторы ядерной модификации для ϕ -мезонов занимают промежуточное значение между этими факторами для протонов и каонов. В наиболее центральных (Pb + Pb)-столкновениях факторы ядерной модификации для ϕ -мезонов располагаются ближе к таковым для легких мезонов (K, π). В периферийных же столкновениях они расположены ближе к этим факторам для протонов.

На рис. 4 представлено отношение выходов p/ϕ для различных центральностей (Pb + Pb)-столкновений при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ в зависимости от поперечного импульса. Результаты, полученные в периферийных (Pb + Pb)-столкновениях, в пределах неопределенностей измерений совпадают с результатами в (p + p)-столкновениях. В наиболее центральных (Pb + Pb)-столкновениях в диапазоне значений поперечного импульса $p_T < 4$ ГэВ/с отношение p/ϕ не зависит от величины поперечного импульса p_T .

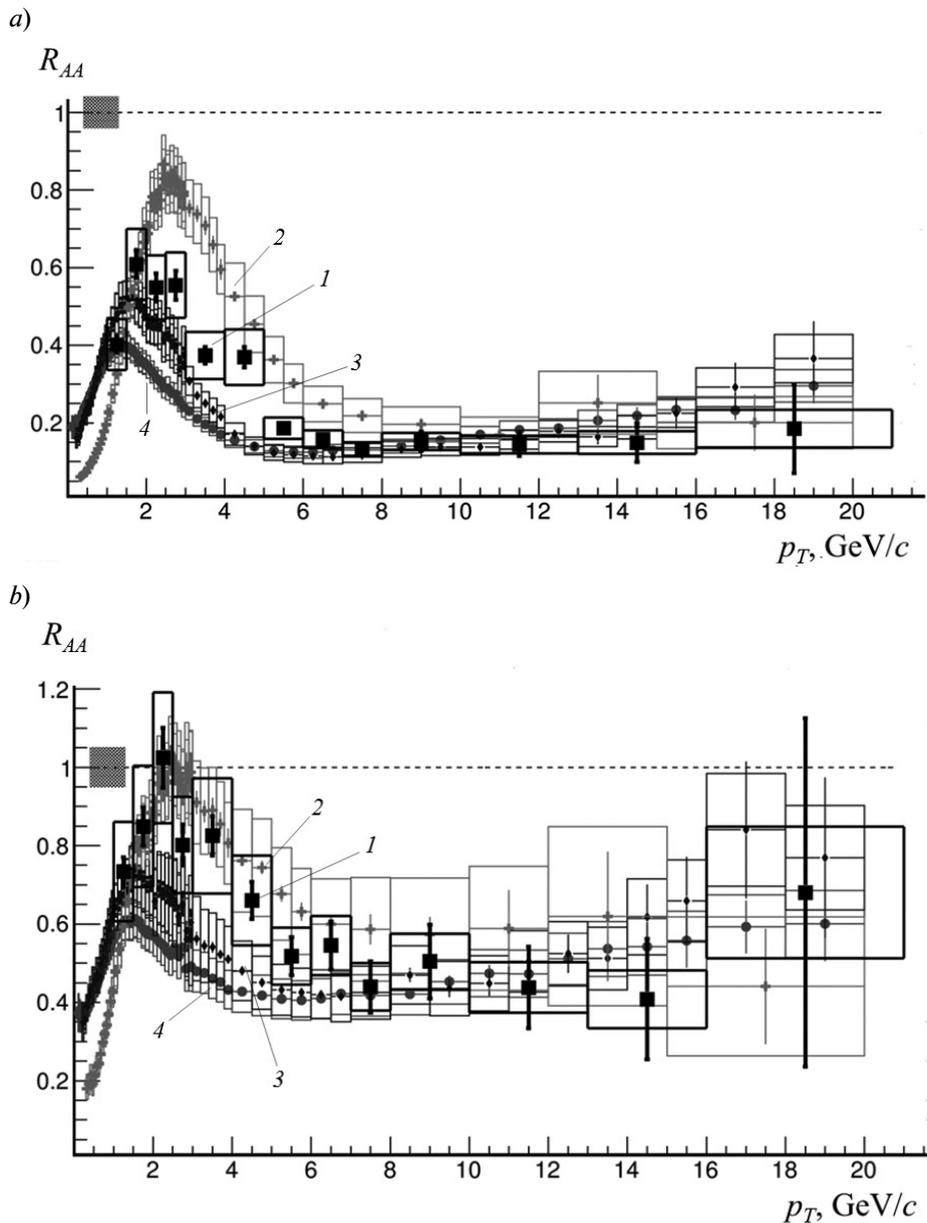


Рис. 3. Зависимость факторов ядерной модификации для ϕ -мезонов (1) от поперечного импульса в сравнении с другими адронами (2 – протоны; 3, 4 – заряженные каоны и пионы) в (Pb + Pb)-взаимодействиях при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2,76$ ТэВ для центральностей столкновения 0 – 5 % (a) и 40 – 50% (b).

Вертикальными «усами» обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – статистические ошибки измерений

Заключение

Анализ полученных результатов показал, что в области больших поперечных импульсов выход ϕ -мезонов испытывает сильное подавление в (полу)центральных (Pb + Pb)-взаимодействиях. Степень пода-

вления для ϕ -мезонов в пределах неопределенностей измерений оказывается такой же, как и для остальных адронов (π , K , p). Данное подавление не может быть объяснено эффектами холодной ядерной материи или эффектами начального состояния

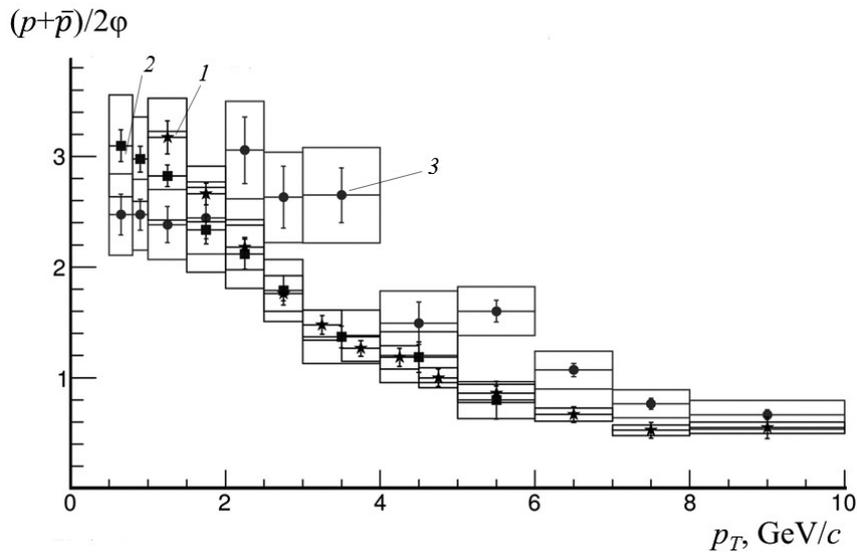


Рис. 4. Зависимость отношения выходов протонов и ϕ -мезонов от поперечного импульса при $(p + p)$ -(1) и $(Pb + Pb)$ -(2, 3) взаимодействиях с энергией $\sqrt{S} = 2,76$ ТэВ. Центральности столкновений ядер 60 – 80 % (2) и 0 – 5 % (3). Вертикальными усами обозначены статистические ошибки, прямоугольниками – статистические ошибки измерений

и может свидетельствовать об образовании кварк-глюонной плазмы.

Тот экспериментальный факт, что отношение p/ϕ в наиболее центральных $(Pb + Pb)$ -взаимодействиях в области промежуточных значений поперечного импульса (вплоть до 4 ГэВ/с) остается постоянной величиной (см. рис. 4), приводит к заключению, что форма спектров рождения адронов в таких взаимодействиях определяется массой частицы. Это согласуется с предсказаниями гидродинамических моделей и не требует привлечения рекомби-

национных моделей. Различное поведение факторов ядерной модификации, измеренных для ϕ -мезонов и протонов в наиболее центральных $(Pb + Pb)$ -взаимодействиях, можно объяснить разницей между референсными спектрами рождения этих частиц в $(p + p)$ -взаимодействиях.

Представленные в данной статье результаты могут быть использованы при изучении признаков и свойств горячей и плотной ядерной материи, образующейся в столкновениях релятивистских тяжелых ионов.

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] 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.
- [6] Adler S.S., Afanasiev S., Aidala C., et al. Suppressed pion 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.
- [7] Gyulassy M. Gluon shadowing and jet

quenching in A + A collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. No. 10. Pp. 1480–1483.

[8] **Baier R., Schiff D., Zakharov B.G.** Energy loss in perturbative QCD // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2000. Vol. 50. Pp. 37–69.

[9] **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.

[10] **Arleo F.** Hard pion and prompt photon at RHIC, from single to double inclusive production // JHEP. 2006. Vol. 06. No. 9. Pp. 15–46.

[11] **Adler S.S., Afanasiev S., Aidala C., et al.** Scaling properties of proton and anti-proton production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. No. 17. Pp. 172301–172307.

[12] **Velkovska J.** Can phi meson give an answer to the baryon puzzle at RHIC? // Eur. Phys. J. C. 2005. Vol. 43. No. 1–4. Pp. 317–322.

[13] **Hwa R., Yang C.** Recombination of shower partons at high p_T in heavy-ion collisions // Phys. Rev. C. 2004. Vol. 70. No. 2. Pp. 024905–024916.

[14] **Greco V., Ko C., Levai P.** Parton coalescence and the antiproton/pion anomaly at RHIC // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90. No. 20.

Pp. 202302–202306.

[15] **Qiu Z., Shen C., Heinz U.** Hydrodynamic elliptic and triangular flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV // Phys. Lett. B. 2012. Vol. 707. No. 1. Pp. 151–155.

[16] **Shen C., Heinz U., Huovinen P., Song H.** Radial and elliptic flow in Pb+Pb collisions at the Large Hadron Collider from viscous hydrodynamics // Phys. Rev. C. 2011. Vol. 84. No. 4. Pp. 044903–044915.

[17] **Bozek P., Wyskiel-Piekarska I.** Particle spectra in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Phys. Rev. C. 2012. Vol. 85. No. 6. Pp. 064915–064921.

[18] **Evans L., Bryant P.** LHC Machine // JINST. 2008. Vol. 3. No. 8. Pp. S08002.

[19] **Aamodt K., Abrahantes Quintana A., Achenbach R., et al.** The ALICE experiment at the CERN LHC // JINST. 2008. Vol. 3. No. 8. S08002.

[20] **Beringer J., Arguin J.F., Barnett R.M., et al.** Review of Particle Physics // Phys. Rev. D. 2012. Vol. 86. No. 1. Pp. 1–1528.

[21] **Abelev B., Adam J., Adamova D., et al.** Centrality determination of Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with ALICE // Phys. Rev. C. 2013. Vol. 88. No. 4. Pp. 044909–044931.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАЛАЕВ Михаил Владимирович – младший научный сотрудник 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
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mmalayev@gmail.com

РЯБОВ Виктор Германович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник 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
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
riabovvg@gmail.com

РЯБОВ Юрий Германович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник 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
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
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 Петербургского института ядерной физики им Б.П. Константинова.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
188300, Российская Федерация, Ленинградская область, Гатчина, Орлова Роцца
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
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
samsonov@pnpi.spb.ru

Malaev M.V., Riabov V.G., Ryabov Yu.G., Berdnikov Ya.A., Samsonov V.M. PHI MESON NUCLEAR MODIFICATION FACTORS AT THE LEAD NUCLEI COLLISIONS IN THE ALICE EXPERIMENT AT THE LHC.

Hadron spectra measurements in proton-proton and nucleus-nucleus collisions at the LHC provide the means to study the mechanisms of particle production and properties of the medium formed in relativistic heavy ion collisions. Phi meson is a very rich probe since it is sensitive to several aspects of the collision such as strangeness enhancement, chiral symmetry restoration and parton energy loss. Due to its small inelastic cross-section, phi meson is not strongly affected by the late hadronic rescattering and is sensitive to the initial evolution of the system. With a mass similar to that of the proton, it is interesting to see how the phi meson fits within the meson/baryon pattern of observables. Being a pure $s\bar{s}$ state, it further constrains the energy loss and recombination pictures. This article presents recent results on phi meson invariant yields and nuclear modification factors measured in a wide range of transverse momentum up to 21 GeV/ c^2 in ($p + p$) and (Pb + Pb) collisions at different centralities. The proton-to-(phi meson) yield (p/ϕ) ratio as a function of transverse momentum in (Pb + Pb) collisions at an energy of $\sqrt{S_{NN}} = 2.76$ TeV is also presented.

NUCLEAR MODIFICATION FACTOR, QUARK-GLUON PLAZMA, MESON, HEAVY NUCLEOUS, PROTON, ALICE, LHC.

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] **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
- [6] **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.
- [7] **M. Gyulassy**, Gluon shadowing and jet quenching in A +A collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV, Phys. Rev. Lett., 68 (1992) 1480–1483.
- [8] **R. Baier, D. Schiff, B.G. Zakharov**, Energy loss in perturbative QCD, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 50 (2000) 37–69.
- [9] **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.
- [10] **F. Arleo**, Hard pion and prompt photon at RHIC, from single to double inclusive production, JHEP, 0609 (2006) 15–46
- [11] **S. Adler, S. Afanasiev, C. Aidala, et al.**, Scaling properties of proton and anti-proton production in $\sqrt{S_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions, Phys. Rev. Lett., 91 (2003) 172301–172307.
- [12] **J. Velkovska**, Can phi meson give an answer to the baryon puzzle at RHIC?, Eur. Phys. J. C., 43 (2005) 317–322.
- [13] **R. Hwa, C. Yang**, Recombination of shower partons at high pT in heavy-ion collisions, Phys. Rev. C., 70 (2004) 024905-024916.
- [14] **V. Greco, C. Ko, P. Levai**, Parton Coalescence and the Antiproton/Pion Anomaly at RHIC, Phys. Rev. Lett., 90 (2003) 202302–202306.
- [15] **Z. Qiu, C. Shen U. Heinz**, Hydrodynamic elliptic and triangular flow in Pb-Pb collisions at



$\sqrt{S} = 2.76$ ATeV, Phys. Lett. B, 707 (2012) 151–155.

[16] C. Shen, U. Heinz, P. Huovinen, H. Song, Radial and elliptic flow in Pb+Pb collisions at the Large Hadron Collider from viscous hydrodynamics, Phys. Rev. C, 84 (2011) 044903.

[17] P. Bozek, I. Wyskiel-Piekarska, Particle spectra in Pb-Pb collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 2.76$ TeV, Phys. Rev. C, 85 (2012) 064915.

[18] L. Evans, P. Bryant, LHC Machine, JINST, 3 (2008) S08001.

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

[20] J. Beringer, J.F. Arguin, R.M. Barnett, et al., Review of Particle Physics, Phys. Rev. D, 86 (2012) 010001.

[21] B. Abelev, J. Adam, D. Adamova, et. al., Centrality determination of Pb-Pb collisions at $\sqrt{S_{NN}} = 2.76$ TeV with ALICE, Phys. Rev. C, 88 (2013) 4, 044909.

THE AUTHORS

MALAEV Mikhail V.

Petersburg Nuclear Physics Institute

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russia

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

mmalayev@gmail.com

RIABOV Victor G.

Petersburg Nuclear Physics Institute

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russia

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

riabovvg@gmail.com

RYABOV Yuri G.

Petersburg Nuclear Physics Institute

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russia

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

yuriy.riabov@gmail.com

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Petersburg Nuclear Physics Institute

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russia

berdnikov@spbstu.ru

SAMSONOV Vladimir M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

Petersburg Nuclear Physics Institute

Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Leningrad Oblast, Russia

vladimir.samsonov@cern.ch