



УДК 539.125.17; 539.126.17

А.Я. Бердников, А.В. Головин, Д.А. Иванищев,
Д.О. Котов, В.Г. Рябов, Ю.Г. Рябов

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ, В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ

A.Ya. Berdnikov¹, A.V. Golovin², D.A. Ivanishchev³,
D.O. Kotov⁴, V.G. Ryabov⁵, Yu.G. Ryabov⁶

^{1,2,4} St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

^{3,5,6} B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia

THE YIELDS MEASUREMENT OF PARTICLES CONTAINING HEAVY QUARKS IN Au+Au COLLISIONS AT 200 GeV

Представлены результаты измерения спектров рождения электронов от полулептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, во взаимодействиях ядер золота при энергии 200 ГэВ для различных центральностей столкновений. Описана методика вычисления «коктейля» – теоретически рассчитанного спектра инвариантной массы диэлектронных пар от известных источников фонового излучения.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА. МЕЗОНЫ. ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ. АНАЛИЗ.

Electron spectra from semileptonic decays of particles containing heavy quarks have been presented for different centralities of Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. The method for calculating ‘cocktail’ spectra has also been presented and discussed.

QUARK-GLUON PLASMA. MESONS. HEAVY QUARKS. ANALYSIS.

В настоящее время свойства ядерной материи в условиях высоких температур и/или барионных плотностей определены только из расчетов квантовой хромодинамики на решетке, предсказывающих фазовый переход из обычной ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП) при температуре $T \approx 170$ МэВ $\approx 10^{12}$ К для различного числа ароматов кварков, учитываемых в расчете. Температура фазового перехода соответствует плотности энергии $\varepsilon \approx 1$ ГэВ/фм³, $T \approx 170$ МэВ, что приблизительно на порядок больше величины плотности энергии в нормальной ядерной материи (примерно 0,15 ГэВ/фм³). Единственным способом, которым в лабораторных условиях могут быть достигнуты условия, необходимые для фазового перехода, является изучение центральных

столкновений тяжелых ядер. При этом кварк-глюонная плазма, образующаяся в ограниченном микрообъеме, будет расширяться и охлаждаться независимо от ее природы и свойств. Как результат, в какой-то момент произойдет фазовый переход взаимодействующей системы из состояния плазмы в состояние обычной, но очень горячей и плотной ядерной материи. Изучение этих фундаментальных явлений на всех стадиях процесса возможно через детектирование различных частиц, излучаемых из области взаимодействия.

В течение последних десяти лет основной прогресс в данной области исследований связан с запуском в эксплуатацию в 2000 г. и успешной работой первого в мире коллайдера тяжелых ионов – RHIC [1]. Комплекс позволяет накапливать, ускорять и сталки-

вать пучки любых ионов в любой комбинации, начиная с протонов и заканчивая ядрами золота. Эксперимент ФЕНИКС [2, 3] является одной из двух основных установок на коллайдере RHIC, предназначенной для измерения характеристик фотонов, лептонов и адронов, вылетающих из области взаимодействия тяжелых ионов.

Тяжелые адроны, содержащие тяжелые кварки (b и c), являются важным инструментом для систематического изучения свойств среды, образующейся в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер. Механизм взаимодействия со средой для тяжелых кварков должен отличаться от случая легких кварков в силу существенной разности масс. В частности, практически все теоретические модели предсказывают, что степень подавления выхода частиц, содержащих в своем составе тяжелые кварки, должна быть меньшей по сравнению с легкими адронами. Сложность описания результатов связана с невозможностью в рамках имеющейся экспериментальной установки разделить вклады от c - и b -кварков в суммарный измеренный спектр электронов. При этом теоретически предсказанные свойства частиц, содержащих c - или b -кварки, существенно различаются. В силу ряда обстоятельств (конструкции спектрометров, недостаточные объемы накопленных данных и т. п.) эксперименты на коллайдере RHIC не позволяют выполнять прямые измерения рождения тяжелых кварков. Поэтому был предложен вариант косвенных измерений — через выходы электронов от полуплептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки. Данная работа посвящена изучению рождения подобных электронов в столкновениях ядер золота при энергии взаимодействия 200 ГэВ. Все результаты, представленные в настоящей статье, получены в эксперименте ФЕНИКС [3] на коллайдере RHIC.

Измерение инвариантных спектров рождения нефотонных электронов в столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ

Измерения инвариантных спектров можно разбить на несколько этапов. На первом из них мы измеряем инклюзивный спектр рождения электронов в столкновениях ядер

золота. На втором этапе необходимо выделить из инклюзивного спектра электронов так называемые нефотонные электроны, т. е. электроны от полуплептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки. Для этого необходимо оценить фоновый вклад фотонных электронов (они образуются в результате Далиц-распадов и конверсии, в основном, на материале пучковой трубы) и вклад нефотонного фона, причем оба вклада — от полуплептонных распадов K -мезонов ($K \rightarrow e\mu\nu$) и диэлектронных распадов легких мезонов ($\omega, \phi, \rho \rightarrow e^+e^-$). Решение данной задачи предполагает разработку уникальных методик анализа экспериментальных данных, в частности тщательного расчета так называемого «коктейля» — спектра электронов от диэлектронных распадов легких мезонов и полуплептонных распадов K -мезонов, учитывающего как уже полученные данные измерений сечений рождения частиц, так и расчетные параметры. Далее необходимо оценить эффективность регистрации электронов в экспериментальной установке и соответствующих систематических неопределенностей при использовании большого числа детекторных подсистем. В случае столкновений ядер золота также необходимо учитывать потерю в эффективности восстановления частиц вследствие высокой множественности вторичных частиц.

Задача по измерению инклюзивных выходов является нетривиальной, так как электроны представляют собой мизерную часть от всех рождающихся в столкновениях заряженных частиц — в основном, пионов. Решение этой задачи требует очень тщательной калибровки детекторов, участвующих в идентификации электронов (трековые детекторы (дрейфовые камеры) [4, 5], калориметр [6], черенковский детектор кругового действия [7]), оптимизации критериев отбора частиц и разработки уникальных методик анализа экспериментальных данных. Задача включает в себя следующие этапы:

анализ качества экспериментальных данных; определение средних характеристик детекторных подсистем, таких как эффективность, энергетическое, импульсное и пространственное разрешения, активная площадь; отбор данных, с одинаковыми характеристиками детекторных подсистем;

оптимизация критериев отбора электронов, зарегистрированных в различных детекторных подсистемах;

измерение выходов частиц, не поправленных на эффективность их регистрации в экспериментальной установке;

определение эффективности регистрации электронов на основе Монте-Карло-моделирования взаимодействия частиц с экспериментальной установкой;

восстановление инклюзивных спектров рождения адронов по поперечному импульсу;

оценка систематических неопределенностей измерений.

Для регистрации электронов используются дрейфовая камера (DC) [4, 5], первый и третий слой падовых камер (PC1, PC3) [4], электромагнитный калориметр (EMC) [6] и детектор черенковского света RICH [7]. Анализ качества данных производился после окончания всех процедур, связанных с

калибровкой детекторных подсистем. Методика анализа качества экспериментальных данных основана на сравнении характеристик детекторов, определенных для каждого отдельного сегмента данных, с референсными значениями. Сами референсные значения получаются из анализа одного сегмента данных, отобранного специалистами, обеспечивающими экспертную поддержку детекторных подсистем. В результате контроля качества удается отобрать данные, обладающие однородным (во времени) поведением детекторов, участвующих в анализе. Как правило, подобный анализ уменьшает статистическую обеспеченность измерений на 10 – 30 %. Тем не менее, данная процедура является совершенно необходимой и позволяет минимизировать систематические ошибки измерений, связанные с неопределенностью эффективности регистрации частиц в экспериментальной установке.

Условия отбора частиц оптимизируют-

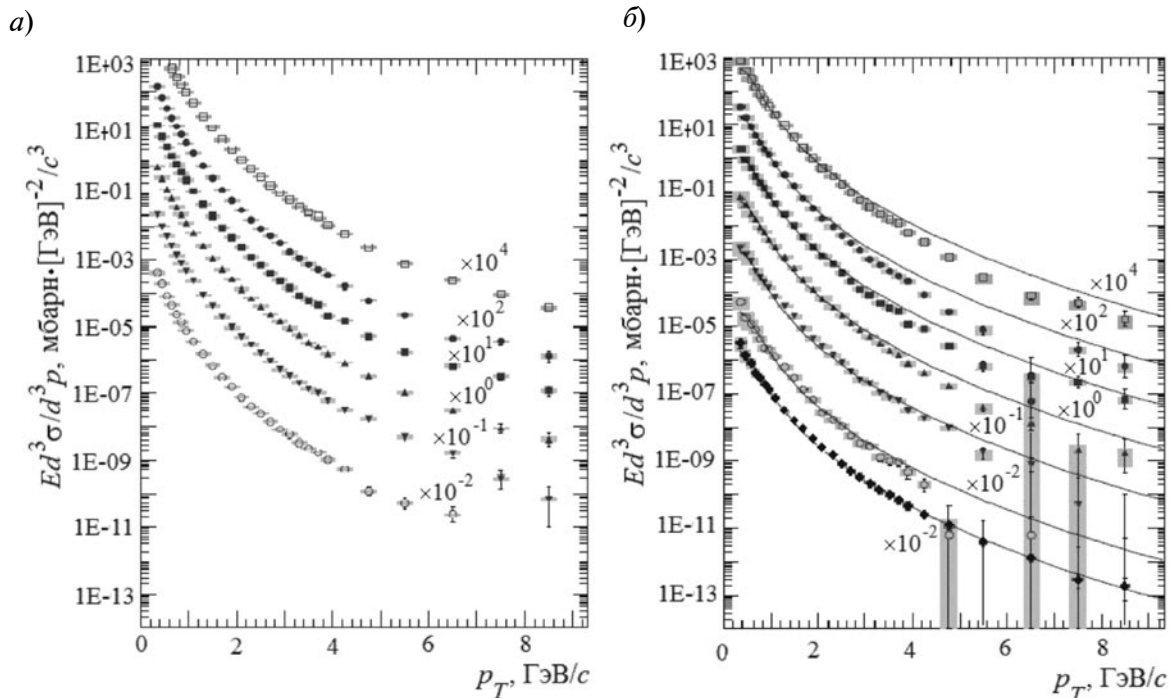


Рис. 1. Инклюзивные (а) и от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки (б), инвариантные спектры рождения электронов по поперечному импульсу, измеренные в столкновениях ядер золота при различных центральных столкновениях, %: 0 – 92 (□); 0 – 10 (●); 10 – 20 (■); 20 – 40 (▲); 40 – 60 (▼); 60 – 92 (○); спектр рождения в протонных столкновениях при той же энергии (◆).

Сплошные линии – аппроксимация спектра рождения в протонных столкновениях, умноженная на соответствующее число парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений. Вертикальные «усы» и прямоугольники вокруг символов соответствуют статистическим и систематическим ошибкам измерений

ся таким образом, чтобы максимально подавить комбинаторный и коррелированный фоны (физический и аппаратный), сопровождающие измерения выходов частиц, при сохранении максимальной доли полезного сигнала. Критерии отбора частиц, использованные в физическом анализе, зависят от множественности рождающихся частиц, вероятности выхода изучаемой частицы.

В качестве основного инструмента для расчета эффективности регистрации электронов используется программа PISA (Phenix Integrated Simulation Application) [8], созданная на базе пакета GEANT 3.21 [9]. Программа PISA специально разработана для корректного описания геометрии, разрешения, эффективности и материалов экспериментальной установки ФЕНИКС. Входными параметрами для PISA являются характеристики начальных частиц, такие как координаты точки рождения, полный импульс, заряд, масса, каналы распада и т. п. Выборка частиц создается с помощью Монте-Карло-генератора частиц Exodus. В задачи программы PISA входит моделирование распада частиц и их взаимодействия с экспериментальной установкой ФЕНИКС, моделирование откликов детекторов на уровне отдельных каналов электроники. На выходе программного пакета PISA получаются файлы, аналогичные по структуре файлам с экспериментальными данными, что позволяет использовать при модельном расчете те же коды и алгоритмы, что и при экспериментальном анализе. При вычислении инвариантных спектров рождения использовалась функция коррекции, рассчитанная ранее в работе [10].

Инклюзивные спектры рождения электронов в столкновениях ядер золота для различных центральностей столкновений [11] представлены на рис. 1, *a*. Спектры состоят из трех компонент по признаку их происхождения:

во-первых, электроны, образованные от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки (искомый спектр);

во-вторых, электроны, образующиеся в результате Далиц-распадов и конверсий, в основном, на материале пучковой трубы (фотонные электроны);

в-третьих, электроны от полулептонных распадов K -мезонов ($K \rightarrow e\nu$) и диэлектронных распадов легких мезонов ($\omega, \phi, \rho \rightarrow e^+e^-$).

Вклад каждой из компонент фона оценивался с помощью расчета методом Монте-Карло взаимодействия и регистрации распадных частиц экспериментальной установкой. Электроны, возникающие в результате Далиц-распадов нейтральных пионов, вносят основной вклад в спектр в области малых масс. Эксперимент ФЕНИКС позволил измерить спектры рождения заряженных и нейтральных пионов в столкновениях протонов при энергии 200 ГэВ [12]. Функция, полученная в результате аппроксимации данных измерений, использовалась в качестве входного спектра пионов по поперечному импульсу при проведении модельного расчета. Результаты расчета вклада фона в инклюзивный спектр представлены в работе [10].

Результаты

На рис. 1, *b* приведен результирующий спектр электронов после вычитания рассчитанных фонов. Данные показаны для различных центральностей столкновений [11].

Результаты, представленные в настоящей статье, позволят детально изучить явление подавления тяжелых кварков в центральных столкновениях тяжелых ядер при энергии 200 ГэВ и позволят продолжить изучение фундаментальных свойств ядерной материи в условиях экстремально высоких плотностей энергии, превышающих критическую плотность перехода в кварк-глюонную плазму.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение 14.B37.21.1300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baym, G.** RHIC: From dreams to beams in two decades [Text] / G. Baym // Nucl. Phys. A. — 2002. — Vol. 698. — P. 23–32.
 2. **Adcox, K.** Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berd-

nikov [et al.] // Nucl. Phys. A. — 2005. — Vol. 757. — P. 184–283.
 3. **Adcox, K.** PHENIX detector overview [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 499. — P. 469–479.



4. **Adcox, K.** PHENIX central arm tracking detectors [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2003. – Vol. 499. – P. 489–507.

5. **Riabov, V.** Drift chambers for the PHENIX central tracking system [Text] / V. Riabov // Nucl. Instrum. Meth. – 1998. – Vol. 419. – P. 363–369.

6. **Aphcetché, L.** PHENIX calorimeter [Text] / L. Aphcetché, T.C. Awes, J. Banning [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. – 2003. – Vol. 499. – P. 521–536.

7. **Akiba, Y.** PHENIX central arm particle ID detectors [Text] / Y. Akiba, M. Aizawa, R. Begay [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. – 2003. – Vol. 499. – P. 508–520.

8. **Adcox, K.** A primer manual for the PHENIX simulation code [Электронный ресурс] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // http://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/simulation/primer4/seq_primer.html

9. **Brun, R.** Geant: Simulation program for

particle physics experiments [Text] / R. Brun, R. Hagelberg, M. Hansroul [et al.] // Preprint CERN. – 1978. – Vol. CERN-DD-78-2-REV. – P. 1–220.

10. **Бердников, А.Я.** Выход электронов от полуплептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, в протон-протонных столкновениях при энергии 200 ГэВ [Текст] / А.Я. Бердников, А.В. Головин, Д.А. Иванищев [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – № 1(165). – С. 159–163.

11. **Adcox, K.** Centrality dependence of charged particle multiplicity in Au-Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 86. – P. 3500–3505.

12. **Adare A.** Measurement of neutral mesons in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV and scaling properties of hadron production PHENIX [Text] / A. Adare, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Phys. Rev. D. – 2011. – Vol. 83. – P. 052004–052030.

БЕРДНИКОВ Александр Ярославич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
berdnikov@spbstu.ru

ГОЛОВИН Алексей Владиславович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
algol61@mail.ru

ИВАНИЩЕВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова. 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща
ivanishchev@gmail.com

КОТОВ Дмитрий Олегович – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
dm_kotov@phmf.spbstu.ru

РЯБОВ Виктор Германович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова. 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща
riabovvg@mail.pnpi.spb.ru

РЯБОВ Юрий Германович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории релятивистской ядерной физики отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова. 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща
riabovvg@mail.pnpi.spb.ru