



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 ФАКТОРОВ ЯДЕРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ ПОЛУЛЕПТОННЫХ РАСПАДОВ ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ

*A.Ya. Berdnikov¹, A.V. Golovin¹, D.A. Ivanishchev²,
D.O. Kotov¹, V.G. Ryabov², Yu.G. Ryabov²*

¹ St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

² B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia

NUCLEAR MODIFICATION FACTORS FOR ELECTRONS FROM DECAYS OF PARTICLES CONTAINING HEAVY QUARKS

Представлены результаты измерения факторов ядерной модификации для электронов от полулептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки. Использовались измерения, проведенные на спектрометре ФЕНИКС ускорителя RHIC в столкновениях протонов и ядер золота при энергии 200 ГэВ. Приведены сравнения полученных результатов с расчетами известных теоретических моделей.

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

The nuclear modification factors for electrons from semi-leptonic decays of particles containing heavy quarks are presented. The results obtained in the PHENIX experiment at RHIC in $p + p$ and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. The comparison of the results with the calculations of the known theoretical models is shown.

QUARK-GLUON PLASMA, MESON, HEAVY QUARKS, ANALYSIS.

Исследование столкновений тяжелых релятивистских ядер относится к одному из приоритетных направлений в физике высоких энергий [1]. Квантовая хромодинамика – фундаментальная теория сильных взаимодействий предсказывает, что при температуре взаимодействующей системы около 170 МэВ должен происходить фазовый переход адронной материи в состояние со «свободными» кварками и глюонами. Подобное состояние материи принято называть кварк-глюонной плазмой. Условие экстремально высокой температуры взаимодействующей системы реализуется в столкновениях тяжелых ядер, обладающих большой энергией.

Основной целью программы исследований таких столкновений является поиск и изучение свойств нового состояния материи – кварк-глюонной плазмы.

Одним из наиболее выдающихся результатов, полученных всеми экспериментами на коллайдере RHIC, является наблюдение подавления выхода легких адронов с большим поперечным импульсом в центральных столкновениях ядер золота [2]. Поэтому исследование рождения тяжелых адронов, содержащих тяжелые кварки (b и c) служит важным инструментом для систематического изучения свойств кварк-глюонной плазмы. Практически все теоретические

модели предсказывали, что степень подавления выхода частиц, содержащих в своем составе тяжелые кварки, должна быть меньшей, по сравнению с легкими адронами. 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 полулептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки.

Данная работа посвящена изучению факторов ядерной модификации 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 [4].

Факторы ядерной модификации

В основе результатов, представленных в данной статье, лежат измерения выходов нефотонных электронов, полученных ранее для $(p + p)$ - [5] и $(Au + Au)$ - [6] столкновений при энергии 200 ГэВ.

Жесткие рассеяния являются точечными процессами с характерным масштабом расстояний порядка $1/p_T$. Поэтому можно

предположить, что выход частицы в столкновениях ядер есть величина, пропорциональная произведению выхода частицы в $(p + p)$ -столкновениях и среднего числа парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений $\langle N_{\text{столкн}} \rangle$. Коллективные ядерные эффекты в начальном или конечном состояниях могут нарушать данную пропорциональность. Обычно подобные нарушения изучаются с помощью параметра R_{AB} , получившего название фактора ядерной модификации и равного

$$R_{AB}(p_T, y) = \frac{1}{N_{\text{соб}}} \frac{d^2 N^{AB}}{dp_T dy} \frac{\langle N_{\text{столкн}} \rangle}{\sigma_{\text{неупр}}^{NN}} \frac{d^2 \sigma^{NN}}{dp_T dy},$$

где $\frac{1}{\sigma_{\text{неупр}}^{NN}} \frac{d^2 \sigma^{NN}}{dp_T dy}$, $\frac{d^2 N^{AB}}{dp_T dy}$ — выходы частиц, измеренные в элементарных нуклон-нуклонных и $(A + B)$ -взаимодействиях.

В условиях отсутствия коллективных эффектов $(A + A)$ -взаимодействия представляют собой суперпозицию нуклон-нуклонных столкновений и параметр R_{AB} равен единице. Основными эффектами начального состояния являются эффект Кренина и модификации функций распределе-

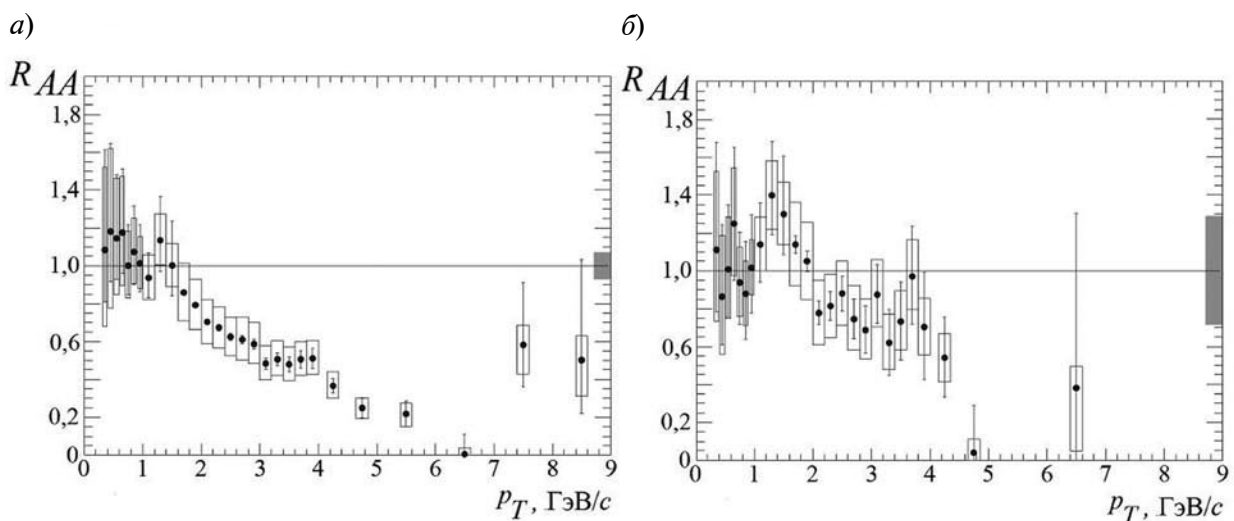


Рис. 1. Зависимости от поперечного импульса измеренных факторов ядерной модификации для электронов, образованных в результате полулептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, для двух центральностей столкновений ядер золота: 0 – 10 % (а) и 60 – 92 % (б). Вертикальные «усы» и прямоугольники вокруг символов соответствуют статистическим и систематическим ошибкам измерений

ния партонов в ядре. Возможные эффекты конечного состояния могут быть связаны с образованием определенной среды в столкновениях тяжелых релятивистских ядер.

На рис. 1 представлены результаты измерения факторов ядерной модификации для электронов от полупертоновых распадов частиц, содержащих тяжелые кварки. Результаты показаны для двух классов событий по центральности.

В случае периферийных (Au + Au)-взаимодействий фактор близок к единице (рис. 1, б), свидетельствуя об отсутствии сильных коллективных эффектов, оказывающих влияние на рождение частиц. В центральных (Au + Au)-столкновениях выход электронов подавлен в 2 – 5 раз (рис. 1, а), что говорит об очень большой плотности среды, созданной в этих столкновениях. Полученные результаты не согласуются с теоретическими предсказаниями, согласно которым основные потери энергии тяжелых кварков в новой среде будут определяться излучением глюонов (тормозное излучение). На рис. 2, а показано сравнение измеренного фактора ядерной модификации

с предсказаниями, сделанными в статье [7] для электронов, образовавшихся в результате распада *B* и *D*-мезонов (затухающая область 1 на рис. 2). Хорошо наблюдается несоответствие между теоретическими и экспериментальными результатами. Толстой пунктирной линией 3 показаны расчеты, учитывающие не только радиационные потери энергии, но и потери на рассеяние [8]. Тонкая пунктирная линия 4 соответствует электронам, образовавшимся в результате распада *D*-мезона. Модели с учетом потерь энергии на рассеяние демонстрируют более хорошее согласие с экспериментальными данными (в пределах ошибок измерений).

В статье [9] была специально разработана теоретическая транспортная модель для тяжелых кварков, которая описывает экспериментальную степень подавления выхода электронов (см. рис. 2, б, пунктирные линии). Но, как оказалось, эта модель не может описать эллиптический поток для таких электронов (рис. 2, в, пунктирные линии). На той же основе была построена еще одна теоретическая модель [10, 11],

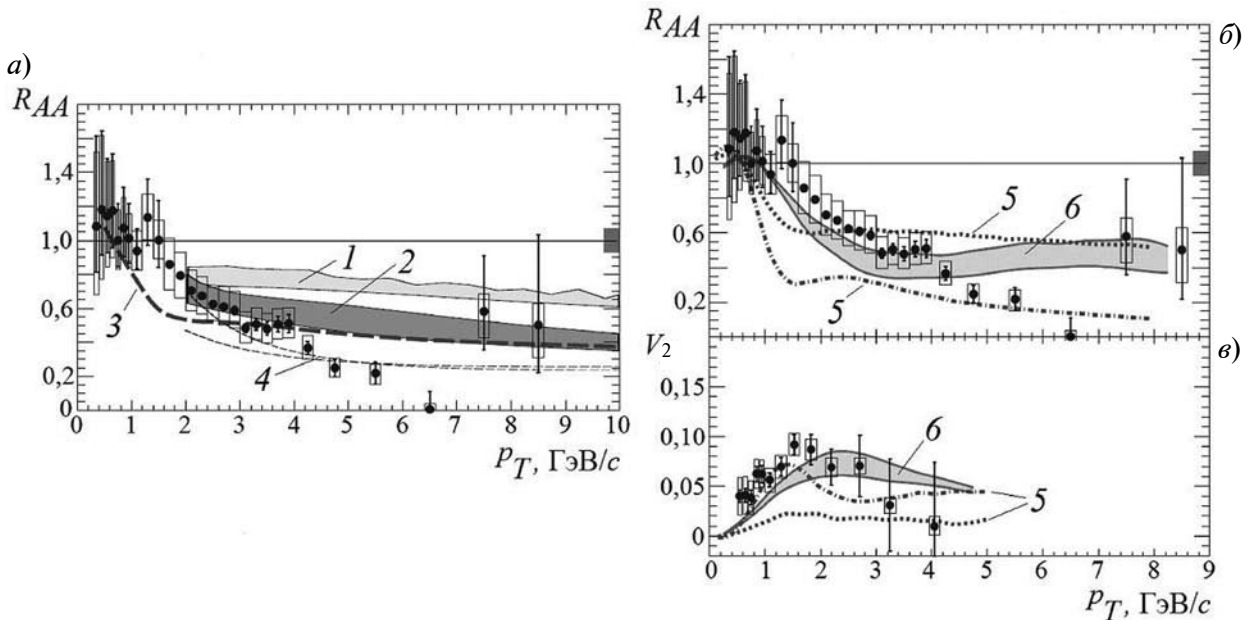


Рис. 2. Сравнение измеренных (символы) и теоретически предсказанных с помощью разных моделей (линии и затухающие области) зависимостей от поперечного импульса факторов ядерной модификации (а, б) и эллиптического потока (в) для электронов, образованных от распада полупертоновых частиц, содержащих тяжелые кварки. Энергия взаимодействия ядер золота – 200 ГэВ. Линии и области 1 – 5 соответствуют расчетам, опубликованным в работах [7 – 9], 6 – в работах [10, 11] (см. пояснения в тексте)

согласно которой для упругого рассеяния учтено резонансное возбужденное состояние тяжелых кварков в среде. Вычисления на решетке дают теоретические свидетельства существования такого возбужденного состояния. Вычисления в рамках этой модели смогли описать как эффект сильного подавления выхода электронов, так и азимутальную анизотропию (см. рис. 2, б, в, затухающие области).

Таким образом, результаты, представленные в настоящей статье, дают воз-

можность детально изучить явление подавления тяжелых кварков в центральных столкновениях тяжелых ядер при энергии 200 ГэВ и позволяют 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.В37.21.1300.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration // Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. P. 184–310.
2. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV // Physical Review Letters. 2002. Vol. 88. P. 022301–022307.
3. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). PHENIX detector overview // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 499. P. 469–479.
4. Barton D.S. Heavy ion program at BNL: AGS, RHIC // Preprint BNL.1987. Vol. 39493. P. 10–20.
5. Бердников А.Я., Головин А.В., Иванищев Д.А., Котов Д.О., Рябов В.Г., Рябов Ю.Г. Выход электронов от полупертоновых распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, в протон-протонных столкновениях при энергии 200 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 1 (165). С. 159–163.
6. Бердников А.Я., Головин А.В., Иванищев Д.А., Котов Д.О., Рябов В.Г., Рябов Ю.Г. Измерение выходов частиц, содержащих тяжелые кварки, в столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 2 (170). С. 171–175.
7. Wicks S., Horowitz W., Djorjevic M., Gyulassy M. Elastic, inelastic and path length fluctuations in jet tomography // Nuclear Physics A. 2007. Vol. 784. P. 426–442.
8. Armesto N., Cacciari M., Dainese A., Salgato C.A., Wiedemann U.A. How sensitive are high- p_T electron spectra at RHIC to heavy quark energy loss? // Physics Letter B. 2006. Vol. 637. P. 362–366.
9. Moore G.D., Teaney D. How much do heavy quarks thermalize in a heavy ion collision? // Physical Review C. 2005. Vol. 71. P. 064904–064938.
10. van Hees H., Greco V., Rapp R. Heavy-quark probes of the quark-gluon plasma and interpretation of recent data taken at the BNL Relativistic heavy ion collider // Physical Review C. 2006. Vol. 73. P. 034913–034917.
11. van Hees H., Mannarelli M., Greco V., Rapp R. Nonperturbative heavy-quark diffusion in the quark-gluon plasma // Physical Review Letters. 2008. Vol. 100. P. 192301–192305.

REFERENCES

1. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. Nuclear Physics A. 2005. Vol. 757. P. 184–310.
2. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV. Physical Review Letters. 2002. Vol. 88. P. 022301–022307.
3. Adcox K., Aidala C., Riabov V., Riabov Y., Berdnikov Y. et al. (Phenix Collaboration). PHENIX detector overview. Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. Vol. 499. P. 469–479.
4. Barton D.S. Heavy ion program at BNL: AGS, RHIC. Preprint BNL.1987. Vol. 39493. P. 10–20.
5. Berdnikov A.Ya., Golovin A.V., Ivanishchev D.A., Kotov D.O., Riabov V.G., Riabov Yu.G. Vыход электронов от полупертоновых распадов



chastits, sodержashchikh tiazhelye kvarki, v proton-protonnykh stolknoveniiakh pri energii 200 GeV. St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2013, No. 1(165), pp. 159–163. (rus)

6. **Berdnikov A.Ya., Golovin A.V., Ivanishchev D.A., Kotov D.O., Riabov V.G., Riabov Yu.G.** Izmerenie vykhodov chastits, sodержashchikh tiazhelye kvarki, v stolknoveniiakh iader zolota pri energii 200 GeV. St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2013. No. 2 (170), pp. 171–175. (rus)

7. **Wicks S., Horowitz W., Djorjevic M., Gyulassy M.** Elastic, inelastic and path length fluctuations in jet tomography. Nuclear Physics A. 2007. Vol. 784. P. 426–442.

8. **Armesto N., Cacciari M., Dainese A., Salgato C.A., Wiedemann U.A.** How sensitive are high- p_T electron spectra at RHIC to heavy quark energy loss?. Physics Letter B. 2006. Vol. 637. P. 362–366.

9. **Moore G.D., Teaney D.** How much do heavy quarks thermalize in a heavy ion collision? Physical Review C. 2005. Vol. 71. P. 064904–064938.

10. **van Hees H., Greco V., Rapp R.** Heavy-quark probes of the quark-gluon plasma and interpretation of recent data taken at the BNL Relativistic heavy ion collider. Physical Review C. 2006. Vol. 73. P. 034913–034917.

11. **van Hees H., Mannarelli M., Greco V., Rapp R.** Nonperturbative heavy-quark diffusion in the quark-gluon plasma. Physical Review Letters. 2008. Vol. 100. P. 192301–192305.

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
riabovyg@mail.pnpi.spb.ru