



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*

ВЫХОД ЭЛЕКТРОНОВ ОТ ПОЛУЛЕПТОННЫХ РАСПАДОВ ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ, В ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГэВ

*A.Ya. Berdnikov¹, A.V. Golovin², D.A. Ivanishchev³,
D.O. Kotov⁴, V.G. Riabov⁵, Yu.G. Riabov⁶*

^{1, 2, 4} St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
^{3, 5, 6} B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia

YIELD OF ELECTRONS FROM SEMILEPTONIC DECAYS OF CHARM AND BOTTOM HADRONS IN PROTON-PROTON COLLISIONS AT 200 GeV

В статье представлен результат измерения инвариантного спектра по поперечному импульсу электронов от распадов мезонов, содержащих тяжелые кварки, в протон-протонных столкновениях при энергии 200 ГэВ. Произведено сравнение полученного спектра с теоретическими предсказаниями.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА. ЛЕПТОНЫ. РОЖДЕНИЕ. ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ. АНАЛИЗ.

The invariant transverse momentum spectrum of electrons from charm and bottom mesons decays in proton-proton collisions at 200 GeV is presented. The spectrum is compared with theoretical predictions.

QUARK-GLUON PLASMA. LEPTONS. PRODUCTION. HEAVY QUARKS. ANALYSIS.

Столкновение тяжелых ядер при больших энергиях взаимодействия обеспечивает уникальные возможности для создания и изучения кварк-глюонной плазмы (КГП) в лабораторных условиях. При экстремально больших значениях плотности энергии и температуры ($\epsilon \approx 1$ ГэВ/фм³, $T \approx 170$ МэВ) расчеты квантовой хромодинамики (КХД) на решетке предсказывают фазовый переход бесцветной адронной материи в состояние КГП. Экспериментальное наблюдение КГП имеет большое значение для развития КХД и космологии. Считается, что в первые микросекунды после Большого взрыва Вселенная находилась в состоянии КГП.

Уже первые эксперименты на коллайдере RHIC [1] показали, что плотность энергии, достигаемая в столкновениях тяжелых ядер при

максимальной энергии коллайдера RHIC и равная 200 ГэВ, превышает величину, необходимую для фазового перехода. Одним из признаков образования КГП на RHIC стало обнаружение сильного подавления выхода адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер. Данный эффект получил название эффекта гашения струй и впервые был обнаружен в центральных (Au + Au)-столкновениях при энергии 130 ГэВ [2]. Выходы π^0 -мезонов, состоящих из легких u - и d -кварков, в области больших поперечных импульсов ($p_T > 5$ ГэВ/с) оказались пятикратно подавленными по сравнению с элементарными протон-протонными ($p + p$)-столкновениями.

Большой интерес представляет изучение эффекта подавления выхода для тяжелых (c - и b -) кварков. В силу ряда обстоятельств (кон-

струкции 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 $(p + p)$ -столкновениях при энергии взаимодействия 200 ГэВ. Все результаты, представленные в настоящей статье, получены в эксперименте ФЕНИКС [3] на коллайдере RHIC.

Измерение инвариантных спектров рождения по поперечному импульсу электронов от полуплептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки

Установка ФЕНИКС детально описана в статье [3]. На первом этапе работ был получен инклюзивный спектр рождения электронов в столкновениях протонов при энергии 200 ГэВ. 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, образующихся в результате Далиц-распадов и конверсий, а также фонового вклада от полуплептонных распадов K -мезонов ($K \rightarrow e\nu$) и диэлектронных распадов легких мезонов ($\omega, \phi, \rho \rightarrow e^+e^-$). Решение данной задачи предполагает проведение расчета «коктейля» – спектра электронов от диэлектронных распадов легких мезонов и полуплептонных распадов K -мезонов. Также необходимо оценить эффективность регистрации электронов в экспериментальной установке и систематические неопределенности, возникающие при использовании детекторных подсистем.

Инвариантные выходы частиц определяются следующей формулой:

$$\frac{1}{2\pi p_T} \frac{d^2 N}{dp_T dy} = \frac{N_{\text{перв}}(p_T) \cdot CF(p_T) \cdot \varepsilon_{\text{триг}}(p_T)}{2\pi p_T \cdot N_{\text{соб}} \cdot \Delta p_T},$$

где p_T – поперечный импульс; y – быстрота; $N_{\text{перв}}$ – первичный выход электронов; CF –

функция коррекции, связанная с геометрией и разрешением спектрометра; $N_{\text{соб}}$ – число анализируемых событий; Δp_T – ширина промежутка по поперечному импульсу, в котором подсчитывается предварительный выход частиц; $\varepsilon_{\text{триг}}(p_T)$ – эффективность гамма-триггера (в случае анализа данных, накопленных без использования гамма-триггера, $\varepsilon_{\text{триг}} = 1$).

Для измерения выходов электронов был проведен целый комплекс исследований: анализ качества экспериментальных данных, определение характеристик детекторных подсистем, исключение неактивных или нестабильных областей и оптимизация критериев отбора частиц, зарегистрированных в детекторе.

Средняя продолжительность одного цикла работы коллайдера RHIC составляет около полугода. На протяжении данного промежутка времени практически невозможно обеспечить абсолютную стабильность характеристик всех детекторных подсистем установки ФЕНИКС. Основная цель анализа качества экспериментальных данных заключается в отборе той их порции, в которой детекторы, участвующие в анализе, обладают стабильными характеристиками.

Основными детекторами, участвующими в физическом анализе, являются дрейфовая камера (DC) [4, 5], первый и третий слои падовых камер (PC1, PC3) [4], электромагнитный калориметр (EMC) [6] и детектор черенковского света RICH [7]. По результатам контроля качества удалось отобрать данные, обладающие однородным (по времени) поведением детекторов, участвующих в анализе.

Для измерения выходов электронов необходимо рассчитать функции коррекции (CF) и величину эффективности гамма-триггера для фотонов или электронов $\varepsilon_{\text{триг}}(p_T)$. Основным инструментом для вычисления данных параметров является программный продукт PISA (PHENIX Integrated Simulation Application) [8], созданный на базе GEANT3 [9]. В задачи PISA входит моделирование прохождения частиц и всех продуктов их распада и/или взаимодействий через экспериментальную установку, генерирование откликов детекторов на уровне отдельных каналов электроники и создание файлов данных, имеющих такую же структуру, как и в реальных событиях. Это позволяет использовать при анализе смоделированных



данных те же алгоритмы, что использовались при анализе реальных данных.

Система сбора данных эксперимента ФЕНИКС способна работать с частотой 5 – 6 кГц [10, 11]. Но даже такая высокая продуктивность системы не позволяет записывать все происходящие столкновения, частота которых может достигать 10^5 с^{-1} в $(p + p)$ -столкновениях. Поэтому в случае $(p + p)$ -столкновений в эксперименте ФЕНИКС использовался дополнительный гамма-триггер, работающий в режиме реального времени и отбирающий редкие события, содержащие хотя бы один гамма-квант (или электрон) с большой энергией. Использование данного триггера позволяет значительно повысить статистическую значимость измерений в области больших поперечных импульсов.

Эффективность триггера измерялась отдельно для каждого сектора калориметра и определялась как отношение энергетических спектров γ -квантов (электронов), измеренных как с использованием гамма-триггера (гамма), так и без его использования. На рис. 1,а показаны два энергетических спектра γ -квантов (электронов), измеренные в одном из секторов калориметра в $(p + p)$ -взаимодействиях. Серая полоса (рис. 1,б) соответствует ошибке измерения эффективности триггера, обусловленной статистической обеспеченностью измерений и степенью стабильности работы триггера во времени.

Функции коррекции для электронов, рассчитанные с использованием различных параметров по отбору частиц, представлены на рис. 2,а. Для трех различных промежутков по поперечному импульсу используются различные условия отбора, поэтому приведены три кривые, соответствующие трем анализам для трех промежутков по поперечному импульсу электрон-позитронных пар.

Инклюзивный спектр рождения электронов состоит из трех компонентов: 1) электроны от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки (искомый спектр); 2) фотонные электроны (электроны, образующиеся в результате Далиц-распадов и конверсий, в основном на материале пучковой трубы); 3) электроны от полулептонных распадов K -мезонов ($K \rightarrow e\bar{\nu}$) и диэлектронных распадов легких мезонов ($\omega, \phi, \rho \rightarrow e^+e^-$).

Вклад каждого из компонентов фона оценивался с помощью полного Монте-Карло-

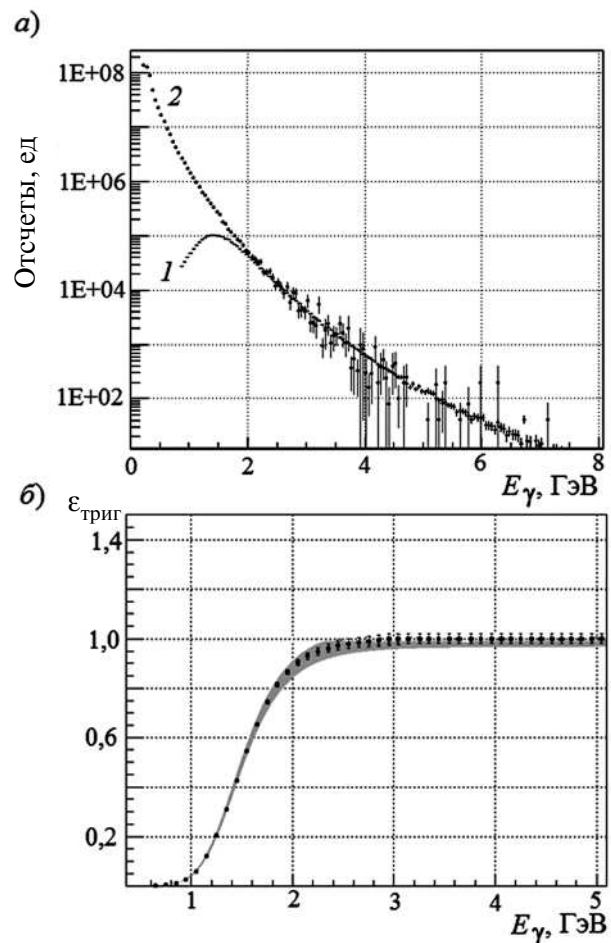


Рис. 1. Энергетические спектры γ -квантов (а), измеренные в одном из секторов калориметра в $(p + p)$ -взаимодействиях с использованием (1) и без использования (2) гамма-триггера, а также эффективность гамма-триггера (б) как функция энергии γ -квантов или электронов E_γ

моделирования прохождения 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 моделирования. На рис. 2,б представлены результаты вычисления вклада фона в инклюзивный спектр.

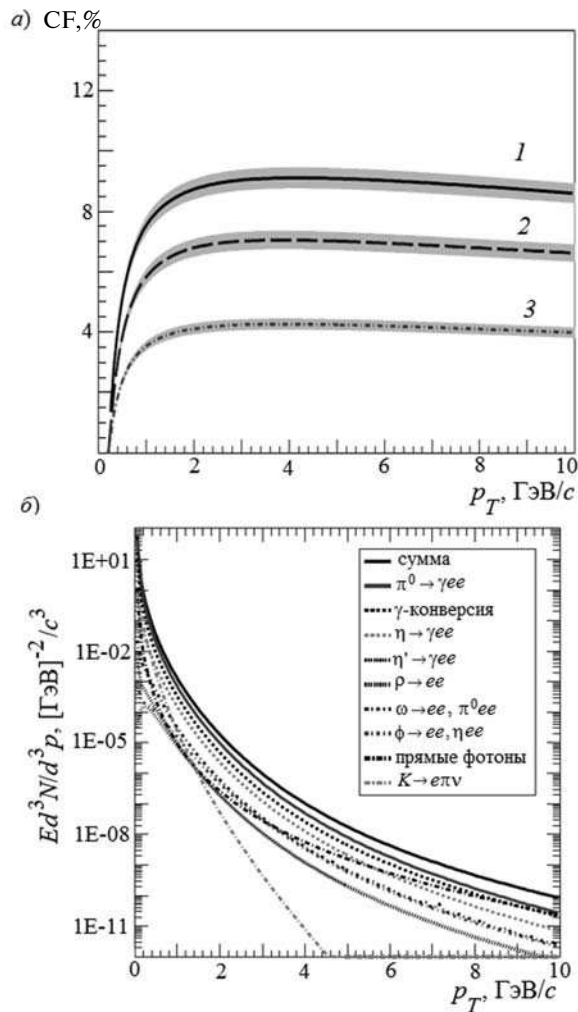


Рис. 2. Функции коррекции для электронов (а), рассчитанные с использованием различных критериев отбора электронов для промежутков по поперечному импульсу $0,3 < p_T < 5$ ГэВ/с (1), $5 < p_T < 7$ ГэВ/с (2), $7 < p_T < 9$ ГэВ/с (3), и результаты расчета фоновых вкладов (б) от частиц различного типа

Результаты

На рис. 3 представлены результирующий спектр электронов после вычитания рассчитанных фонов и сравнение измеренных точек с теоретическими предсказаниями (FNOLL) [13]. Экспериментальные точки находятся в

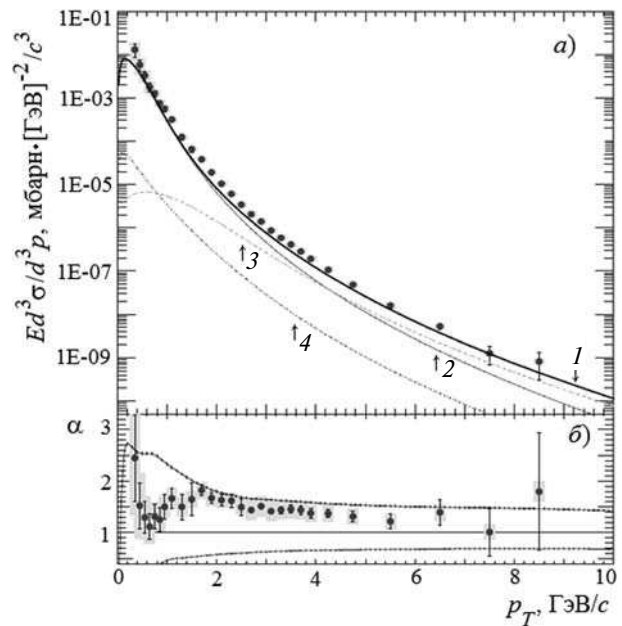


Рис. 3. Инвариантные спектры по поперечному импульсу электронов от распадов мезонов, содержащих тяжелые кварки, в $(p + p)$ -столкновениях при энергии 200 ГэВ, измеренные в настоящей работе (\bullet) и рассчитанные в рамках модели FONLL (1) для мезонов, содержащих только c - (2) или b - (3) кварки и одновременно c - и b -кварки (4) (а). Отношение измеренного спектра к рассчитанному α (б)

согласии с теоретическими предсказаниями в пределах ошибок.

Результаты, представленные в настоящей статье, послужат базой для изучения подавления выхода 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.В37.21.1300.

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. Berdnikov, [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. **Aphcetchche, L.** PHENIX calorimeter [Text] / L. Aphcetchche, T. C. Awes [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 [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 [et al.] // Preprint CERN. — 1978. — Vol. CERN-DD-78-2-REV. — P. 1 — 220.
10. **Adler, S.** PHENIX on-line systems [Text] / S.S. Adler, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2003. — Vol. 499. — P. 560 — 592.
11. **Adler, S.** PHENIX on-line and off-line computing [Text] / S.S. Adler, V. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. — 2003. — Vol. 499. — P. 593 — 602.
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.
13. **Cacciari, M.** QCD predictions for charm and bottom production at RHIC [Text] / M. Cacciari, P. Nason, R. Vogt // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 95. — P. 122001 — 122023.

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

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 роша
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 роша
riabovvg@gmail.com

РЯБОВ Юрий Германович — доктор 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 роша
yuriy.riabov@gmail.com