

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 ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПОТОКА ЧАСТИЦ, СОДЕРЖАЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ, В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР ЗОЛОТА ПРИ ЭНЕРГИИ 200 ГЭВ**

*A.Ya. Berdnikov<sup>1</sup>, A.V. Golovin<sup>2</sup>, D.A. Ivanishchev<sup>3</sup>,  
D.O. Kotov<sup>4</sup>, V.G. Riabov<sup>5</sup>, Yu.G. Riabov<sup>6</sup>*

<sup>1, 2, 4</sup> St. Petersburg State Polytechnical University,  
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

<sup>3, 5, 6</sup> B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute,  
Orlova Roscha, Gatchina, 188300, Russia.

## **ELLIPTIC FLOW MEASUREMENT OF PARTICLES CONTAINING HEAVY QUARKS IN Au+Au COLLISIONS AT 200 GeV**

Представлены результаты измерения величины эллиптического потока для частиц, содержащих тяжелые кварки, в столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ. Обсуждаются попытки теоретического описания ненулевой величины эллиптического потока для частиц, содержащих тяжелые кварки.

КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА. ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ПОТОК. ТЯЖЕЛЫЕ КВАРКИ. АНАЛИЗ.

Elliptic flow results measured in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV for heavy flavour electrons have been presented for different centralities of interaction. Few theoretical approaches to explain non-zero value of elliptic flow for heavy quarks have been discussed.

QUARK-GLUON PLASMA. ELLIPTIC FLOW. HEAVY QUARKS. ANALYSIS.

Экспериментальные результаты, полученные на релятивистском коллайдере тяжелых ионов RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) к настоящему времени, указывают на образование плотной и горячей партонной материи в центральных столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ [1, 2]. Под давлением выходов легких адронов в области больших поперечных импульсов  $p_t$  указывает на то, что партоны, проходя через плотную среду, теряют в ней часть своей энергии, а наличие эллиптического потока ( $v_2$ ) говорит о том, что коллективное движение партонов развивается на самых ранних стадиях взаимодействия. Данное наблюдение находится в согласии с расчетами гидро-

динамических моделей. Сравнение величины  $v_2$  с теоретическими предсказаниями говорит о том, что вещество, полученное на коллайдере RHIC, представляет собой практически идеальную жидкость, которая обладает предельно малым отношением вязкости к плотности энтропии [3].

Дальнейшее развитие научных исследований в данной области может быть связано с измерением выходов частиц, содержащих в себе тяжелые кварки ( $c$  или  $b$ ). Согласно эффекту «мертвого конуса» [4] считается, что величина энергетических потерь тяжелых кварков должна быть меньше, чем для легких. В связи с этим ожидается уменьшение как степени подавления выходов

частиц, содержащих тяжелые кварки, так и эллиптических потоков тяжелых кварков по сравнению с легкими.

В настоящей статье представлены результаты измерений эллиптического потока для электронов от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, во взаимодействиях ядер золота при энергии 200 ГэВ. Увеличение объема данных более чем в 10 раз, по сравнению с ранее доступными результатами [5], позволило значительно увеличить диапазон измерения величины эллиптического потока  $v_2$  по поперечному импульсу  $p_T$ . Все измерения выполнены на экспериментальной установке ФЕНИКС [6], расположенной на коллайдере RHIC [7].

### Методика измерений

Изучение процессов рождения тяжелых кварков можно проводить через прямые измерения выходов  $D$ - и  $B$ -мезонов в каналах распада ( $K + \pi$ ) и ( $J/\psi + K$ ) соответственно. К сожалению, данный подход невозможно использовать в эксперименте ФЕНИКС, который не способен определять координаты точки распада долгоживущих  $D$ - и  $B$ -мезонов. Процессы рождения тяжелых кварков изучаются путем измерения выходов лептонов от полулептонных распадов частиц, содержащих в себе указанные кварки. Вероятности этих распадов достаточно велики (составляют около 10 %), что позволяет проводить высокоточные измерения выходов лептонов. Нужно отметить, что при изучении взаимодействий тяжелых ядер подобный подход выигрывает перед прямым измерением выходов  $D$ - и  $B$ -мезонов, при использовании которого неизбежно требовалось бы работать с высокими уровнями комбинаторных фонов.

Состав и основные характеристики установки ФЕНИКС описаны в работе [6]. Треки заряженных частиц восстанавливаются с помощью дрейфовых и падочных камер. Характерное импульсное разрешение детектора составляет (в процентах)

$$\delta p/p = 0,7 + 1,1(p/p_0),$$

где  $p_0 = 1,0$  ГэВ/с.

Для идентификации электронов (или позитронов) используется черенковский

детектор кругового действия (RICH) и электромагнитный калориметр (ЕМС). Для эффективной регистрации электронов необходимо разделять электроны и адроны на уровне  $10^{-4}$  в области поперечных импульсов  $0,2 < p_T$  (ГэВ/с)  $< 4$ .

Основной вклад в идентификацию электронов вносит RICH в области импульсов ниже порога черенковского излучения для  $\pi$ -мезонов, составляющего около 4 ГэВ/с в рабочем газе детектора (углекислый газ). Конструкция подсистемы RICH состоит из 48 панелей композитных зеркал, образующих две пересекающиеся сферические поверхности с общей площадью, равной 20 м<sup>2</sup> [8]. Сферические зеркала фокусируют черенковский свет на два массива фотумножителей (1280 штук, HAMAMATSU H3171S), расположенных за пределами активного объема центральных спектрометров.

Сравнение энергий и импульсов электронов, измеренных в ЕМС и центральной трековой системе, позволяет подавить около 90 % всех адронов в области поперечных импульсов  $p_T > 1$  ГэВ/с.

На рис. 1 схематически представлено взаимодействие двух тяжелых ядер. Первоначальная область перекрытия ядер при ненулевом прицельном параметре имеет эллиптическую форму. В процессе термализации рожденного вещества из-за про-

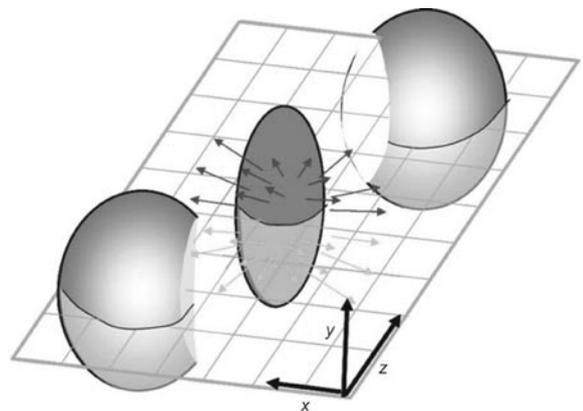


Рис. 1. Схематичное изображение нецентрального взаимодействия двух тяжелых ядер. Область перекрытия (в центре) обладает миндалевидной формой, в которой формируются градиенты давления

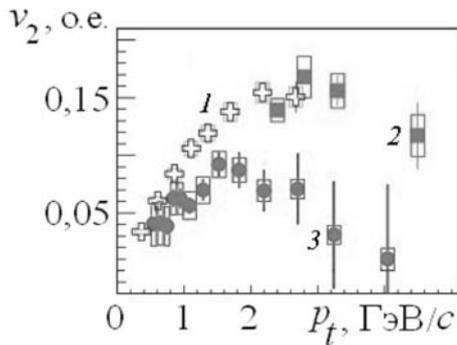


Рис. 2. Зависимость величины эллиптического потока  $v_2$  от поперечного импульса  $p_T$  заряженных (1) и нейтральных (2)  $\pi$ -мезонов, а также электронов от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки (3)

странственной анизотропии системы создаются градиенты давления: максимального вдоль меньшей оси эллипса и минимального вдоль его большей оси. В результате азимутальное импульсное распределение частиц становится анизотропным. Количество эллиптический поток  $v_2$  характеризуется вторым коэффициентом в разложении в ряд Фурье распределения частиц по азимутальному углу относительно плоскости реакции.

Величина эллиптического потока  $v_2$  для частиц, содержащих тяжелые кварки, вычисляется путем измерения инклюзивного эллиптического потока  $v_2$  для всех электронов, вылетающих из области взаимодействия ядер, и последующего вычитания из полученного значения  $v_2$  теоретически рассчитанных фоновых вкладов от Далиц-распадов, конверсий на материале пучковой трубы, полулептонных распадов  $K$ -мезонов и диэлектронных распадов легких мезонов.

### Результаты

На рис. 2 представлена зависимость величины  $v_2$  от поперечного импульса  $p_T$ , полученная для заряженных и нейтральных  $\pi$ -мезонов и электронов от полулептонных распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, в центральных взаимодействиях ядер золота при энергии 200 ГэВ.

Тяжелые кварки также участвуют в коллективном движении и обладают ненулевой

величиной эллиптического потока в области малых поперечных импульсов. Величина эллиптического потока для тяжелых кварков оказалась сопоставима с потоком для частиц, которые состоят из легких.

В работе [9] показано, что возможно количественное описание большой величины эллиптического потока  $v_2$  для электронов от распадов частиц, содержащих тяжелые кварки, при помощи модифицированного уравнения Ланжевена. Согласно предложенной модели, тяжелые нерелятивистские кварки находятся в тепловой среде, в которой их перемещения описываются как некоррелированные акты упругого рассеяния. Основным параметром модели является коэффициент диффузии тяжелых кварков. Еще одна модель, основанная на уравнении Ланжевена [10], вводит связь между упругим рассеянием тяжелых кварков и возбужденными состояниями  $D$ - и  $B$ -мезонов в партонной среде. На присутствие этих состояний указывают расчеты квантовой хромодинамики (КХД) на решетке. На рис. 3 представлены теоретические описания наблюдаемых результатов.

Расчеты, представленные авторами [11], указывают на возможность описать ненулевую величину эллиптического потока, наблюдаемую для тяжелых кварков, через процесс диссоциации  $D$ - и  $B$ -мезонов в партонной среде. При этом энергетические потери тяжелых кварков в результате этой

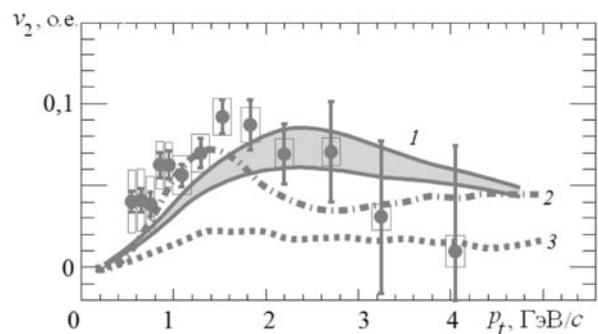


Рис. 3. Результаты расчетов зависимости от поперечного импульса эллиптического потока  $v_2$  для частиц, содержащих тяжелые кварки, во взаимодействиях ядер золота при энергии 200 ГэВ.

Использованы модели из работ [10] (1) и [9] (2, 3)



диссоциации становятся чувствительными как ко времени формирования партонной материи, так и к динамике расширения горячего партонного вещества в целом.

Сложности в данной области связаны, в частности, и с тем, что все измерения эксперимента ФЕНИКС представляют собой смесь электронов от распадов  $D$ - и  $B$ -мезонов. Известно, что масса  $c$ -кварка меньше массы  $b$ -кварка и, следовательно, стоит ожидать различного поведения для этих двух типов элементарных частиц. Разделить вклады от  $c$ - и  $b$ -кварков можно, если использовать различные времена жизни  $D$ - и  $B$ -мезонов и измерять координату точки распада. Для этого в эксперимент ФЕНИКС была имплементирована новая детекторная подсистема VTX [12], с которой уже начинают поступать первые результаты.

В настоящей статье представлены результаты измерения величины эллиптического потока для частиц, содержащих

тяжелые кварки, во взаимодействиях ядер золота при энергии 200 ГэВ.

Для частиц, содержащих в своем составе тяжелые  $c$ - и  $b$ -кварки, обнаружена ненулевая величина эллиптического потока  $v_2$ , которая количественно согласуется с поведением величины  $v_2$  для частиц, состоящих из легких кварков. Теоретические модели, базирующиеся на уравнении Ланжевена, позволяющие описать наблюдаемую зависимость величины эллиптического потока от поперечного импульса частиц, варьируя значение параметра модели — коэффициента диффузии тяжелых кварков.

Существенное улучшение точности измерений ожидается в результате имплементации дополнительной детекторной подсистемы VTX, которая позволит определять координату вершины распада долгоживущих  $D$ - и  $B$ -мезонов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1300.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Adcox, K.** Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Phys. A. — 2005. — Vol. 757. — P. 184–283.
2. **Adcox, K.** Suppression of hadrons with large transverse momentum in central Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 130$  GeV [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2001. — Vol. 88. — P. 022301–022307.
3. **Kovtun, P.K.** Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics [Text] / P.K. Kovtun, D.T. Son, A.O. Starinets // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 94. — P. 111601–111610.
4. **Dokshitzer, Y.L.** Heavy quark colorimetry of QCD matter. [Text] / Y.L. Dokshitzer, D.E. Kharzeev // Phys. Lett. B. — 2001. — Vol. 519. — P. 119–134.
5. **Adler, S.S.** Centrality dependence of charm production from single electrons in Au+Au collisions at 200 GeV [Text] // S.S. Adler, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 94. — P. 082301–082305.
6. **Adcox, K.** PHENIX detector overview [Text] / K. Adcox, V. Riabov, Y. Riabov, Y. Berdnikov [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 499. — P. 469–479.
7. **Baym, G.** RHIC: From dreams to beams in two decades [Text] / G. Baym // Nucl. Phys. A. — 2002. — Vol. 698. — P. 23–32.
8. **Aizawa, M.** PHENIX central arm particle I.D. detectors [Text] / M. Aizawa, Y. Akiba, R. Begay [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Vol. 499. — P. 508–520.
9. **Moore, G.D.** How much do heavy quarks thermalize in a heavy ion collision? [Text] / G.D. Moore, D. Teaney // Phys. Rev. C. — 2005. — Vol. 71. — P. 064904–064938.
10. **Rapp, R.** Heavy-quark probes of the quark-gluon plasma and interpretation of recent data taken at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider [Text] / R. Rapp, H. Hees, V. Greco // Phys. Rev. C. — 2006. — Vol. 73. — P. 034913–034917.
11. **Adil, A.** Collisional dissociation of heavy mesons in dense QCD matter [Text] / A. Adil, I. Vitev // Phys. Lett. B. — 2007. — Vol. 649. — P. 139–146.
12. **Akiba, Y.** Status and performance of new silicon stripixel detector for the PHENIX experiment at RHIC: Beta source, cosmic-rays and proton beam at 120 GeV [Text] / Y. Akiba, R. Noucier, K. Boyle [et al.] // J. of instrumentation. — 2009. — Vol. 4. — P. 04011–04024.

**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 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@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 роща  
yuriy.riabov@gmail.com