

АНИЗОТРОПНЫЕ ПОТОКИ И КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФЕМТОСКОПИЯ В Au + Au-СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ 14,5 И 39 ГэВ В МОДЕЛИ EPOS4

А. С. Поваров^{1,*}, Г. А. Нигматкулов²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

² University of Illinois Chicago, Chicago, Illinois, USA

Измерения азимутальной анизотропии второго и третьего порядка чувствительны к начальному состоянию сталкивающихся ядер, а фемтоскопические радиусы несут информацию о пространственно-временных параметрах области испускания частиц, рожденных в столкновении. Работа посвящена исследованию эллиптического и треугольного потоков, а также фемтоскопических радиусов в Au + Au-столкновениях при 14,5 и 39 ГэВ в модели EPOS4.

Second- and third-order azimuthal anisotropy harmonics are sensitive to the initial state of colliding nuclei, and femtoscopic radii carry information about the spatiotemporal parameters of the region of emission of particles produced in the collision. This work is devoted to the study of elliptical and triangular flows, as well as femtoscopic radii in Au + Au collisions at 14.5 and 39 GeV in the EPOS4 model.

PACS: 25.75.-q; 25.75.Ld

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по столкновению тяжелых ионов позволяют создавать в лабораторных условиях сильно сжатую и нагретую ядерную материю. В такой среде кварки и глюоны становятся свободными и больше не удерживаются внутри адронов. Такое состояние ядерной материи называется кварк-глюонной материей (КГМ) [1]. Экспериментальное изучение свойств КГМ может помочь в заполнении пробелов квантовой хромодинамики (КХД) и проверке существующих моделей множественного рождения частиц. Сложность в изучении свойств кварк-глюонной материи состоит в том, что в эксперименте регистрируется конечное состояние сталкивающихся ядер, т. е. рожденные в столкновении частицы.

Азимутальная анизотропия рожденных частиц и фемтоскопические радиусы — одни из наиболее широко исследуемых наблюдаемых величин, которые могут дать информацию о столкновениях ядер.

Азимутальная асимметрия в координатном пространстве столкновения ядер создается на этапах, предшествующих эволюции КГМ. Через

* E-mail: povarovas@gmail.com

взаимодействие партонов асимметрия в координатном пространстве передается в анизотропию импульсного пространства рожденных частиц, которые регистрируются детектором. Импульсную анизотропию частиц можно представить в виде разложения в ряд Фурье одночастичного распределения частиц по азимутальному углу относительно плоскости реакции: $dN/d\phi \approx 1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos(n(\phi - \Psi_n))$, где n — порядок гармоники, ϕ — азимутальный угол частицы и Ψ_n — азимутальный угол плоскости события n -го порядка [2, 3]. Коэффициенты v_n называются коэффициентами анизотропного потока и могут использоваться для количественного описания азимутальной анизотропии. Коэффициенты потока n -го порядка можно вычислить как $v_n = \langle \cos n(\phi - \Psi_n) \rangle$, где усреднение проводится по всем частицам и событиям. Коэффициенты эллиптического (v_2) и треугольного (v_3) потоков являются доминирующими сигналами и были изучены при максимальных энергиях RHIC и LHC [4, 5].

Корреляционная фемтоскопия позволяет оценить пространственно-временные размеры источника испускания частиц при кинетическом замораживании частиц [6].

Данная работа посвящена изучению эллиптических и треугольных потоков, а также размеров области испускания заряженных частиц в столкновениях ядер золота при энергиях 14,5 и 39 ГэВ/нуклон с использованием модели EPOS4.

ВЫБОР МОДЕЛИ

В данной работе используется модель EPOS4 [7, 8], которая позволяет моделировать рассеяния при высоких энергиях от электрон-позитронной аннигиляции до столкновений тяжелых ионов. Модель основана на факте того, что при высоких энергиях первичные нуклонные и партонные рассеяния должны происходить параллельно. Данный подход реализован с помощью теории матриц рассеяния (S-матриц) и современных концепций пертурбативной квантовой хромодинамики. Модель EPOS4 обеспечивает разумное описание многих наблюдаемых для различных сталкивающихся систем в широком диапазоне энергий столкновения.

АНАЛИЗ

Наборы данных, используемые для анализа в работе, получены с помощью модели EPOS4. Расчеты проводились в системе центра масс для двух энергий: 14,5 ($\sim 2,3$ млн событий) и 39 ГэВ ($\sim 1,1$ млн событий). События моделировались с прицельным параметром b в диапазоне от 0 до 13,5 фм. Центральность столкновения определялась диапазоном прицельного параметра. Центральные столкновения соответствуют малому значению b , периферические — большому. Таким образом, процентиль центральности определяется как: 0–3,3 (0–5 % центрально-сти), 3,3–4,7 (5–10 %), 4,7–6,6 (10–20 %), 6,6–8,1 (20–30 %), 8,1–9,4

(30–40 %), 9,4–10,5 (40–50 %), 10,5–11,5 (50–60 %), 11,5–12,4 (60–70 %), 12,4–13,2 (70–80 %) фм.

В анализе использовались заряженные пионы, каоны, а также протоны и антипротоны. Отбор частиц производился по их ID в модели. Импульс частиц должен лежать в диапазоне от 0,15 до 3 ГэВ/с, а псевдобыстрота ограничивать фазовое пространство от -1 до 1 . Для оценки плоскости реакции использовались частицы с поперечным импульсом от 0,15 до 2 ГэВ/с и $|\Delta\eta| < 0,05$. Для измерения потоков применялся метод плоскости события [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первая часть работы посвящена результатам измерения эллиптического и треугольного потоков заряженных частиц, а именно пионов, каонов и (анти)протонов. Зависимость эллиптического потока как функция поперечного импульса для Au + Au-столкновений при энергиях 14,5 (слева) и 39 (справа) ГэВ представлена на рис. 1. Красные кружки соответствуют центральности 0–10 %, а синие квадраты — 10–40 %. Светлые символы соответствуют измерениям эллиптического потока в эксперименте STAR [9]. Из рис. 1 видно, что эллиптический поток сохраняет зависимость от центральности столкновения: из-за более вытянутой формы области перекрытия ядер при среднецентральных столкновениях выход частиц параллельно плоскости реакции увеличивается, поскольку этим частицам требуется пройти меньшее расстояние в горячей сильно взаимодействующей среде.

На рис. 2 представлены результаты измерения треугольного потока как функции поперечного импульса для Au + Au-столкновений при энергиях 14,5 и 39 ГэВ. Видно, что треугольный поток не имеет зависимости от центральности столкновения. Это можно объяснить тем, что источником треугольного потока являются начальные флуктуации нуклонов в сталкивающихся ядрах [10].

Вторая часть работы посвящена измерению области испускания частиц. На рис. 3 представлено распределение X - и Y -координат кинетического фризаута положительно заряженных пионов в столкновениях ядер золота при энергии 14,5 ГэВ для центральных столкновений (0–10 %) для трех интервалов по времени: 0–10 (слева), 10–20 (посередине) и 20–30 (справа) фм/с. На рис. 4 представлена зависимость инвариантного времени $\tau = \sqrt{z^2 - t^2}$ от поперечного радиуса фризаута $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ для той же частицы, энергии и центральности для трех интервалов по поперечному импульсу: 0,15–0,55 (слева), 0,55–0,95 (посередине) и 0,95–1,35 (справа) ГэВ/с. Из данных распределений можно сделать вывод о том, что мягкие частицы излучаются из всего объема. Более быстрые пионы испускаются раньше и ближе к центру, чем мягкие. Средние значения координат кинетического фризаута можно сопоставить с фемтоскопическими радиусами [11].

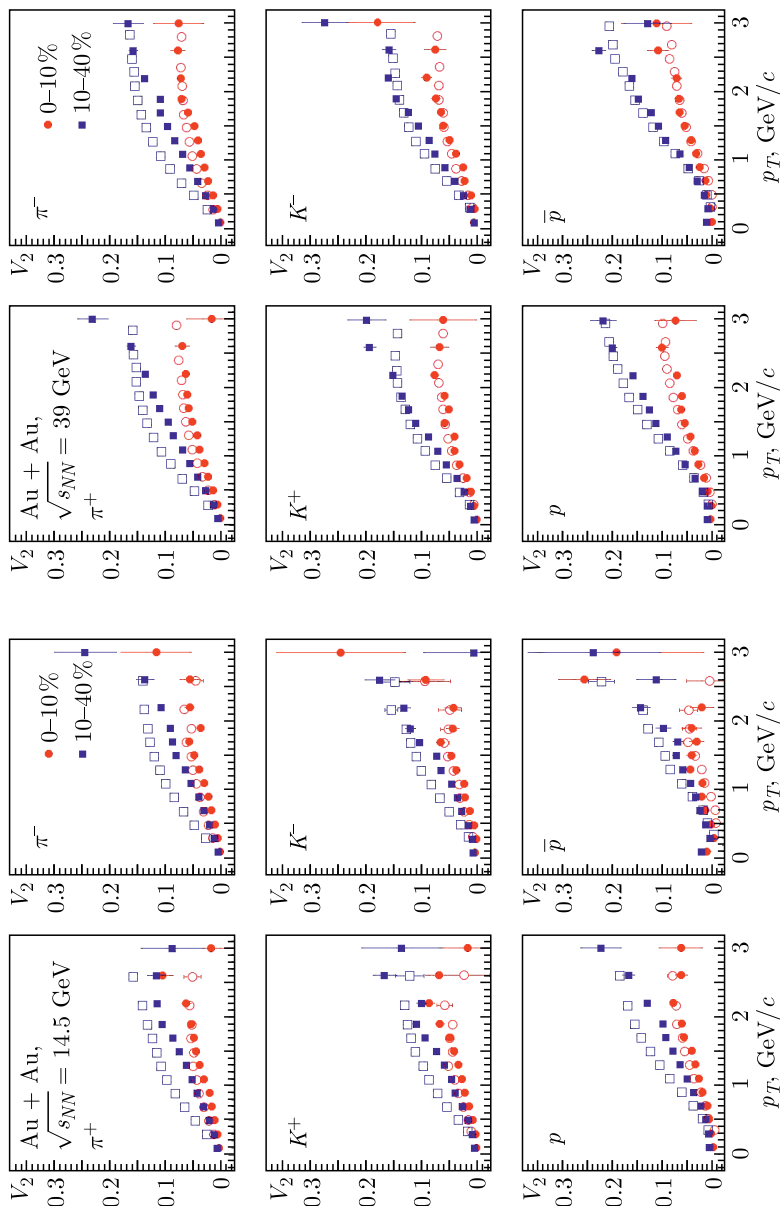


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Зависимость эллиптического потока заряженных частиц как функция поперечного импульса для столкновений ядер золота при энергиях 14,5 (слева) и 39 (справа) ГэВ

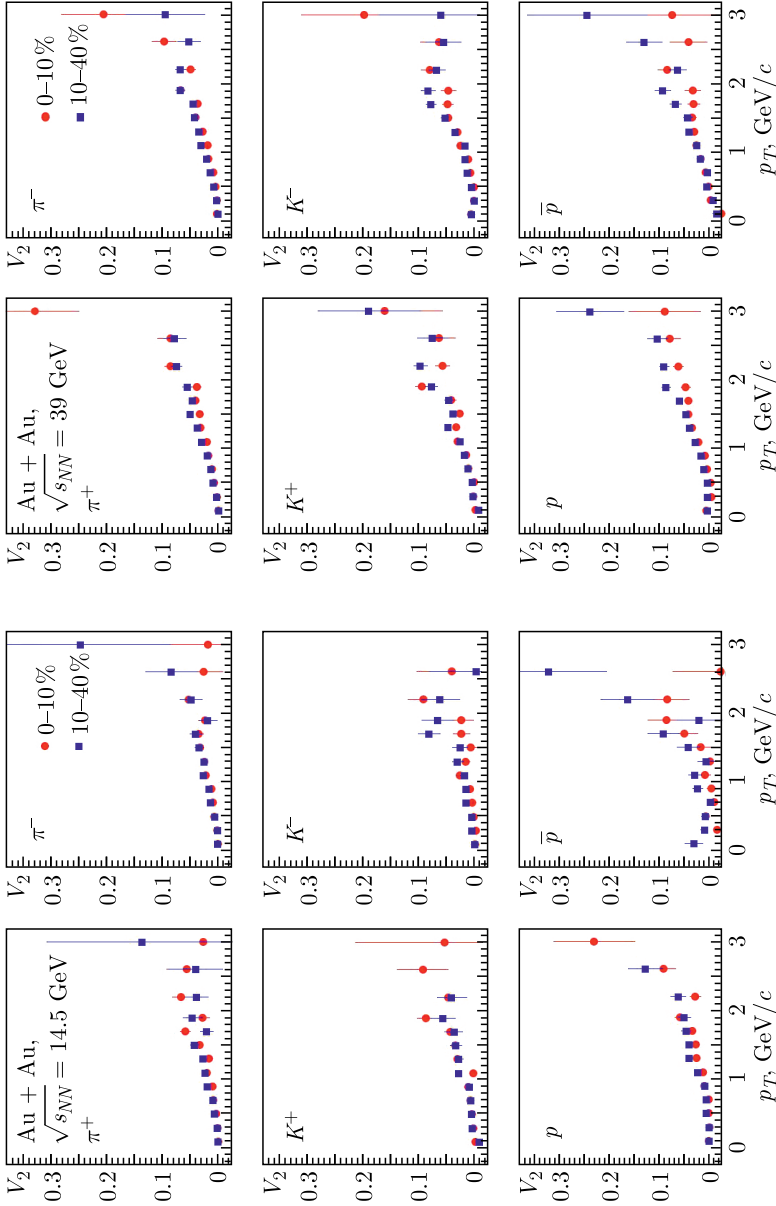


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Зависимость треугольного потока заряженных частиц как функция поперечного импульса для столкновений ядер золота при энергиях 14,5 (слева) и 39 (справа) ГэВ

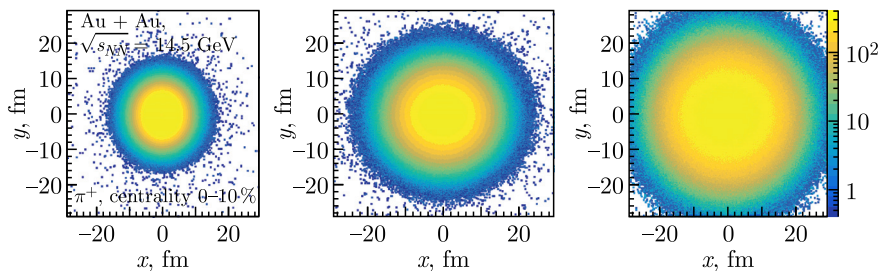


Рис. 3. X - и Y -координаты кинетического фризаута π^+ в столкновениях $\text{Au} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 14,5$ ГэВ при центральности 0–10% для трех интервалов по времени: 0–10 (слева), 10–20 (посередине) и 20–30 (справа) фм/с

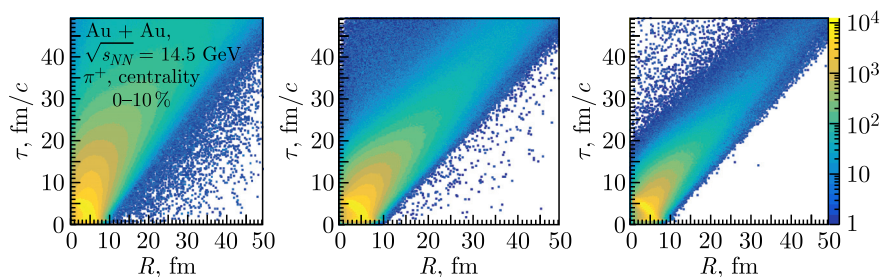


Рис. 4. Зависимость τ от R для π^+ в столкновениях $\text{Au} + \text{Au}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 14,5$ ГэВ при центральности 0–10% для трех интервалов по p_T : 0,15–0,55 (слева), 0,55–0,95 (посередине) и 0,95–1,35 (справа) ГэВ/с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен расчет эллиптического и треугольного потоков, а также пространственно-временных параметров области испускания заряженных частиц в столкновениях $\text{Au} + \text{Au}$ при энергиях 14,5 и 39 ГэВ/нуклон с использованием модели EPOS4. Измерения эллиптических и треугольных потоков представлены как функция поперечного импульса для двух центральностей столкновения ядер: 0–10% и 10–40%. Значения эллиптического потока согласуются с данными эксперимента STAR: эллиптический поток имеет зависимость от центральности, в то время как треугольный нет. Были исследованы параметры кинетического фризаута — время и координаты замораживания. Мягкие пионы излучаются со всего объема, а более быстрые — раньше и ближе к центру столкновения ядер.

Финансирование. Данное исследование было выполнено при поддержке Программы развития НИЯУ МИФИ в рамках программы «Приоритет-2030» и поддержано Министерством науки и высшего образования РФ, проект «Новые явления в физике элементарных частиц и ранней Вселенной» № FSWU-2023-0073.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shuryak E. V.* Quark-Gluon Plasma and Hadronic Production of Leptons, Photons and Pions // *Phys. Lett. B.* 1978. V. 78. P. 150.
2. *Voloshin S., Zhang Y.* Flow Study in Relativistic Nuclear Collisions by Fourier Expansion of Azimuthal Particle Distributions // *Z. Phys. C.* 1996. V. 70. P. 665–671.
3. *Poskanzer A. M., Voloshin S. A.* Methods for Analyzing Anisotropic Flow in Relativistic Nuclear Collisions // *Phys. Rev. C.* 1998. V. 58, No. 3. P. 1671–1678.
4. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.).* Azimuthal Anisotropy in Cu + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 98. P. 014915.
5. *Adam J. et al. (ALICE Collab.).* Higher Harmonic Flow Coefficients of Identified Hadrons in Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *JHEP.* 2016. V. 09. P. 164.
6. *Kopylov G. I., Podgoretsky M. I.* Correlations of Identical Particles Emitted by Highly Excited Nuclei // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1972. V. 15. P. 219–223.
7. *Werner K.* Revealing a Deep Connection between Factorization and Saturation: New Insight into Modeling High-Energy Proton–Proton and Nucleus–Nucleus Scattering in the EPOS4 Framework // *Phys. Rev. C.* 2023. V. 108. P. 064903.
8. *Werner K.* Parallel Scattering, Saturation, and Generalized Abramovskii–Gribov–Kancheli (AGK) Theorem in the EPOS4 Framework, with Applications for Heavy-Ion Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ of 5.02 TeV and 200 GeV // *Phys. Rev. C.* 2024. V. 109. P. 034918.
9. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.).* Centrality Dependence of Identified Particle Elliptic Flow in Relativistic Heavy Ion Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7–62.4$ GeV // *Phys. Rev. C.* 2016. V. 93. P. 014907.
10. *Alver B., Roland G.* Collision-Geometry Fluctuations and Triangular Flow in Heavy-Ion Collisions // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81. P. 054905.
11. *Kravchenko Y. V., Khyzhniak Y. V., Bravina L. V., Nigmatkulov G. A., Sinyukov Y. M., Zabrodin E. E.* Space-Time Structure of the Pion Emission in Central Au + Au Collisions at RHIC Energies // *Phys. Scripta.* 2021. V. 96, No. 10. P. 104002.