

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЯДЕР НА МОДЕЛИРОВАНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ В МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОРЕ HYDJET++

Д. А. Мязгов^{1,}, С. В. Петрушанко^{1,2}*

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,
Москва, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Представлены результаты исследования азимутальной анизотропии в столкновениях Pb–Pb и Xe–Xe при энергиях LHC в генераторе HYDJET++. Проведен анализ зависимостей дифференциальных коэффициентов азимутального потока v_n , зависимостей интегральных коэффициентов потока. Также проведено сравнение с экспериментальными данными коллаборации CMS. Показано, что, хотя HYDJET++ воспроизводит основные тенденции для азимутальных потоков, ряд отклонений указывает на значимость учета начальной геометрии системы. Полученные результаты служат ориентиром для дальнейшего совершенствования гидродинамических моделей.

The paper presents the results of a study of azimuthal anisotropy in Pb–Pb and Xe–Xe collisions at LHC energies in a HYDJET++ generator. The dependences of the differential coefficients of the azimuthal flow v_n and the dependences of the integral coefficients of the flow were analyzed. A comparison was made with experimental data from the CMS collaboration. Although HYDJET++ reproduces the main trends for azimuthal flows, a number of discrepancies indicate the importance of the initial system geometry taking into account. The results obtained serve as a guideline for further improvement of hydrodynamic models.

PACS: 25.75.–q; 12.38.Mh

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня важной задачей физики высоких энергий является изучение кварк-глюонной плазмы (КГП). Такое состояние вещества получается, например, при релятивистских столкновениях тяжелых ионов [1]. Существенную информацию о свойствах КГП несет азимутальная анизотропия вторичных частиц — неравномерность их распределения по углу относительно плоскости реакции после адронизации КГП. Количественно она описывается коэффициентами азимутальных потоков v_n из фурье-

* E-mail: danila.mygakov.msu@mail.ru

разложения распределения частиц [2]. Эти коэффициенты зависят от центральности столкновения, поперечного импульса частиц и начальной геометрии ядро-ядерной системы:

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{d^3 N}{p_T dp_T dy d\phi} = \frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} \frac{1}{2\pi} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos n(\varphi - \Psi_R) \right], \quad (1)$$

где N — общее число рождающихся частиц; E — энергия соударения; p_T — поперечный импульс частицы; φ — азимутальный угол частицы.

В настоящей работе представлены результаты исследования потоков заряженных частиц в столкновениях Xe–Xe и Pb–Pb при энергиях коллайдера LHC с использованием генератора HYDJET++. Особое внимание уделено сравнению с экспериментальными данными коллаборации CMS [3], а также анализу влияния начальной геометрии и деформации ядер на интегральные величины потоков. Здесь под интегральными потоками подразумеваются усредненные по спектру дифференциальные азимутальные потоки. Интегральные потоки являются более надежным источником информации о коллективных свойствах ядро-ядерных систем, так как менее подвержены непотоковым корреляциям.

ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS

Экспериментальная установка, с данными которой будет произведено сравнение, — это детектор CMS на LHC (Большом адронном коллайдере) [3]. Уникальное сочетание высокой статистики данных, стабильность работы детектора, а также свойства трекерной системы и сильное поле соленоида делают детектор CMS одним из лучших инструментов для изучения азимутальной анизотропии.

Данные коллаборации CMS в этой работе можно разделить на две части — данные, полученные во время Run2 и Run3. Экспериментальная работа [2] основана на данных, собранных CMS во время сеансов работы коллайдера LHC со столкновениями Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,44$ ТэВ на пару нуклонов в с.ц.м. с интегральной светимостью $3,42 \text{ мкб}^{-1}$ в 2017 г., и аналогичных данных со столкновениями Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ с интегральной светимостью 26 мкб^{-1} в 2015 г. В обоих случаях использовались только треки с псевдобыстротой $|\eta| < 2,4$ и поперечным импульсом $0,3 < p_T < 10,0$ ГэВ/с. В работе [4], выполненной по результатам, включающим также данные Run3, на которую мы будем опираться и далее, проведен анализ столкновений свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,36$ ТэВ на нуклонную пару и столкновений ксенона при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,44$ ТэВ.

МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОР HYDJET++

Монте-Карло генератор HYDJET++ — это гибридный генератор ядерных соударений, разработанный в НИИЯФ МГУ специально для моделирования релятивистских столкновений тяжелых ионов при энергиях, достигаемых на ускорителях RHIC и LHC [5, 6]. HYDJET++ сочетает в себе описание мягких гидродинамических процессов, ответственных за коллективные эффекты в ядерной материи, и жестких мультипартонных процессов, включающих струи и взаимодействие со средой.

Модель HYDJET++ неоднократно демонстрировала хорошую точность воспроизведения экспериментальных данных. В частности, генератор успешно описывает распределения по псевдобыстроте и множественности в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Одним из ключевых достижений HYDJET++ является успешное моделирование распределений по поперечному импульсу для идентифицированных заряженных частиц, результаты которого согласуются с экспериментом [5].

В прошлом было проведено несколько исследований для выяснения областей удовлетворительного описания генератором HYDJET++ данных столкновений Xe и Pb при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ (для Pb) и $\sqrt{s_{NN}} = 5,44$ ТэВ (для Xe) [7]. Было выяснено, что наилучшую описательную способность генератор демонстрирует в полуцентральных (15–40 %) событиях. Для дальнейшего анализа выделим три принципиальные области центральности: центральные, полуцентральные и периферические события. В этих областях выберем диапазоны центральности 5–10, 20–25 и 40–50 %.

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ГЕНЕРАТОРЕ HYDJET++

Кратко опишем методы вычисления азимутальных потоков, которые были использованы в генераторе HYDJET++, а также коллаборацией CMS. В данной работе использовались метод истинной плоскости реакции и метод кумулянтов двух и четырех частиц [8, 9].

Метод истинной плоскости реакции является стандартным для HYDJET++. Он задается внутренним кодом по умолчанию, вычислить с его помощью коэффициенты потока можно по формуле

$$v_n = \cos[n(\varphi - \Psi_R)], \quad (2)$$

где Ψ_R — угол плоскости реакции; φ — азимутальный угол частицы; v_n — искомые коэффициенты потока.

Более сложные методы, позволяющие минимизировать влияние непотоковых эффектов — методы двух- и четырехчастичных кумулянтов.

Двухчастичный кумулянт для гармоники n определяется как

$$c_n\{2\} = \langle \langle e^{i n (\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle \rangle, \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 — азимутальные углы частиц, одинарные скобки означают усреднение по парам частиц в событии, а двойные — последующее усреднение по множеству событий. Коэффициент потока извлекается как

$$v_2\{n\} = \sqrt{c_n\{2\}}. \quad (4)$$

Такой подход прост и статистически устойчив, однако остается чувствителен к некоторым непотоковым корреляциям (распадам резонансов, джетам и др.), которые могут вносить вклад в $c_n\{2\}$. Для их подавления используется четырехчастичный кумулянт:

$$c_n\{4\} = \langle \langle e^{i n (\varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 - \varphi_4)} \rangle \rangle - 2 \langle \langle e^{i n (\varphi_1 - \varphi_2)} \rangle \rangle^2. \quad (5)$$

Он изолирует истинные многочастичные корреляции, устраняя вклад двухчастичных эффектов. Коэффициент потока в этом случае равен

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}. \quad (6)$$

Таким образом, метод двухчастичных кумулянтов является основным для данной работы. В свою очередь, четырехчастичный кумулянт используется для проверки корректности расчета корреляций, так как позволяет надежно выделять коллективные эффекты и снижать влияние непотоковых явлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕНЕРАЦИИ

Распределения дифференциальных эллиптических потоков представлены на рис. 1 и 2. Генератор HYDJET++ в целом воспроизводит экспериментальные данные CMS из работы [2] для столкновений Pb–Pb и Xe–Xe в области центральных и полужентральных событий. Наилучшее согласие достигается при использовании метода второго кумулянта $v_2\{2\}$. Модель демонстрирует правильный рост коэффициента с увеличением поперечного импульса, а рассчитанное распределение согласуется с экспериментальным как по форме, так и по величине.

В то же время расчеты, проведенные методом четырехчастичного кумулянта $v_2\{4\}$, демонстрируют результат систематически ниже $v_2\{2\}$, что соответствует ожидаемому подавлению непотоковых эффектов и служит независимой валидацией результата. Существенные расхождения наблюдаются в периферийных событиях, где гидродинамическое описание перестает быть применимым, а также в центральной области, где, как полагается, важную роль играет деформация исходных ядер.

Интегральные значения коэффициентов потока демонстрируют более хорошее согласие с экспериментом, что представлено на рис. 3 и 4. Для обеих систем (Pb–Pb и Xe–Xe) наблюдается совпадение с данными CMS вплоть до центральных порядков 30–35 %. В более периферийных событиях отклонения становятся значительными, что объясняется ограниченностью гидродинамического описания.

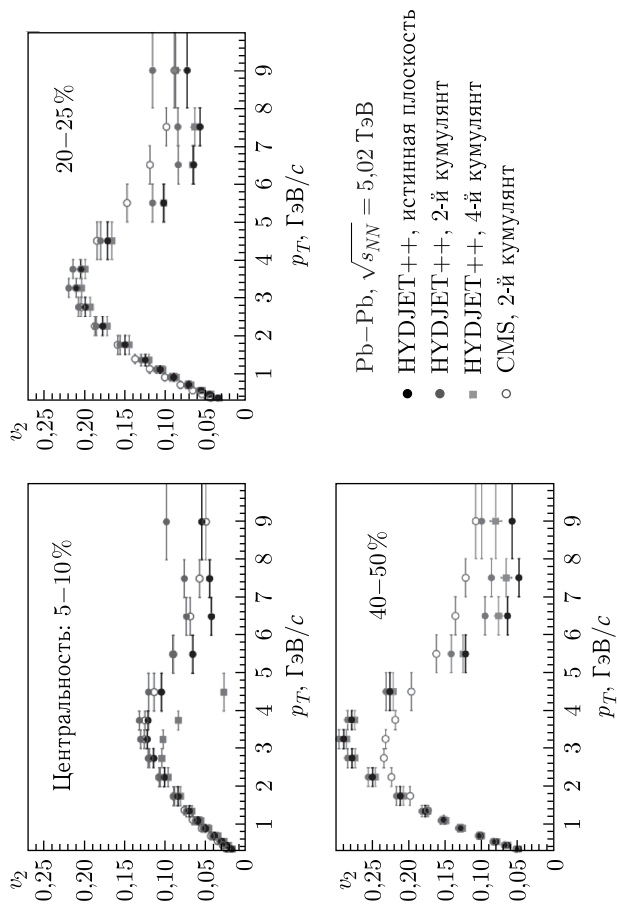


Рис. 1. Зависимость эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T от рождающихся частиц в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ

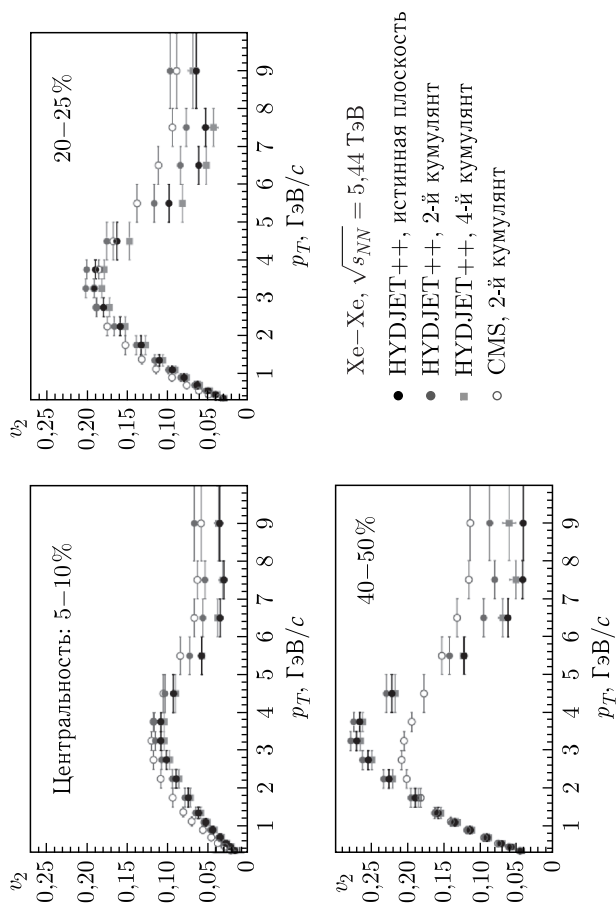


Рис. 2. Зависимость эллиптического потока v_2 от поперечного импульса p_T рождающихся частиц в столкновениях Xe-Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ

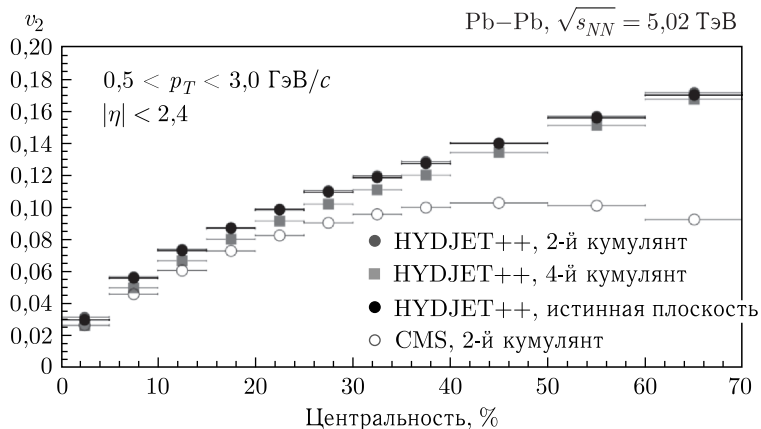


Рис. 3. Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 в зависимости от центральности в столкновениях Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ

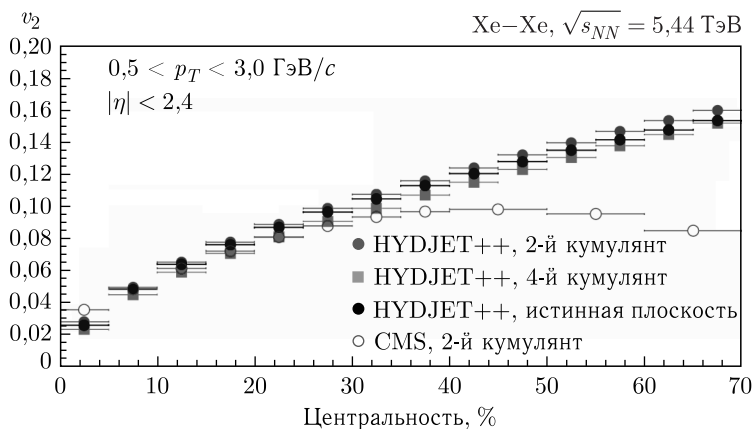


Рис. 4. Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 в зависимости от центральности в столкновениях Xe-Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5,44$ ТэВ

Ключевым результатом работы является сравнение интегральных коэффициентов для свинца и ксенона в полуженеральной области (рис. 5). При детальном сравнении с данными эксперимента CMS из работы [4] видно, что генератор удовлетворительно описывает величины потоков, но не описывает взаимное расположение распределений. В работе [4] такая особенность в поведении распределений (переход к преобладанию величин для столкновений Pb в области 20%) интерпретируется через начальную геометрию ядерной системы Xe-Xe. Деформация ксенона усиливает анизотропию в центральных столкновениях. Таким образом,

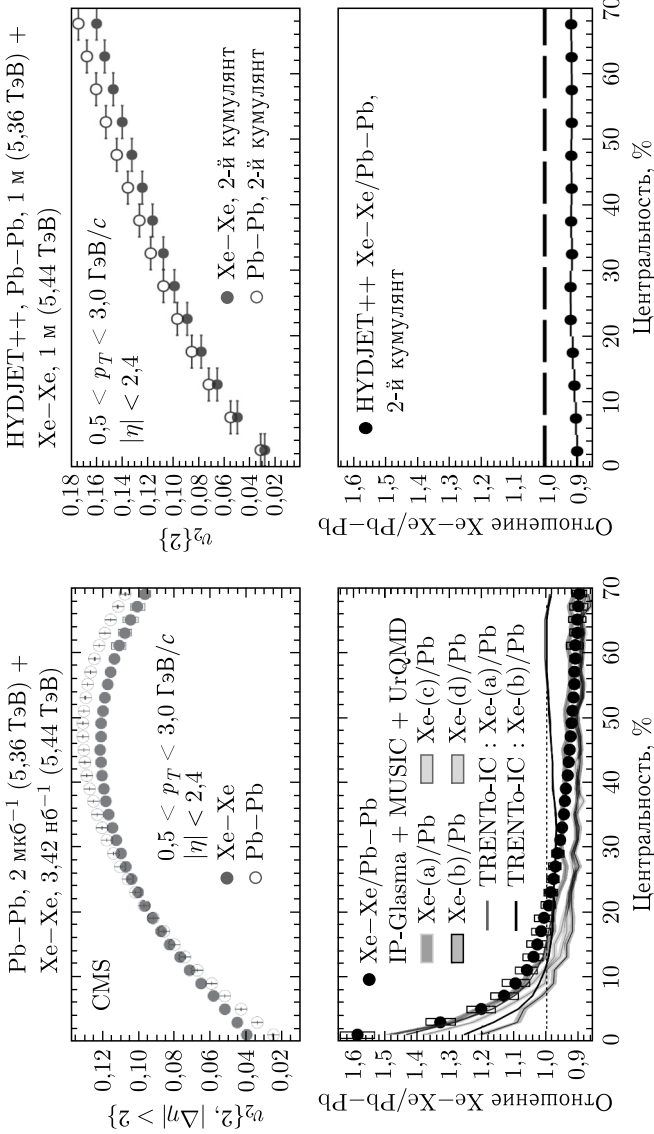


Рис. 5. Интегральные распределения эллиптических потоков v_2 в столкновениях Xe-Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ и Pb-Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$ ТэВ

результаты подчеркивают необходимость включения ядерной деформации в гидродинамические и гибридные модели для корректного описания экспериментальных данных.

Благодарности. Авторы работы выражают благодарность оргкомитету конференции «Ядро-2025» за возможность подготовить работу и коллективу Лаборатории сильных взаимодействий НИИЯФ МГУ за полезные советы во время анализа данных. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М. В. Ломоносова.

Конфликт интересов. Авторы работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shuryak E.* Quantum Chromodynamics and the Theory of Superdense Matter // Phys. Rep. 1980. V. 61, No. 2. P. 71–158.
2. *Sirunyan A. et al.* Charged-Particle Angular Correlations in XeXe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV // Phys. Rev. C. 2019. V. 100, No. 4. P. 044902; arXiv:1901.07997.
3. The CMS Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3, No. 08. P. S08004–S08004.
4. *Hayrapetyan A. et al.* Characterizing the Initial State in XeXe and PbPb Collisions Using Multiparticle Cumulants. CMS-PAS-HIN-24-004. 2025; <https://cds.cern.ch/record/2925389>.
5. *Lokhtin I. P., Belyaev A. V., Malinina L. V., Petrushanko S. V., Rogochaya E. P., Snigirev A. M.* Hadron Spectra, Flow and Correlations in PbPb Collisions at the LHC: Interplay between Soft and Hard Physics // Eur. Phys. J. C. 2012. V. 72, No. 6; arXiv:1204.4820 [hep-ph].
6. HYDJET++ Event Generator. <http://lav01.sinp.msu.ru/igor/hydjet++/>.
7. *Myagkov D. A., Petrushanko S. V.* Azimuthal Anisotropy in Xe–Xe and Pb–Pb Collisions with the Monte Carlo Model HYDJET++ and the CMS Detector at Energies of the LHC // Moscow Univ. Bull. Phys. 2024. V. 79, Suppl. 1. P. S81–S84.
8. *Borghini N., Dinh P. M., Ollitrault J. Y.* Flow Analysis from Multiparticle Azimuthal Correlations // Phys. Rev. C. 2001. V. 64, No. 5; arXiv:nucl-th/0105040.
9. *Bilandzic A., Snellings R., Voloshin S.* Flow Analysis with Cumulants: Direct Calculations // Phys. Rev. C. 2011. V. 83, No. 4; arXiv:1010.0233 [nucl-ex].