

Эллиптический и триангулярный потоки заряженных частиц в релятивистских столкновениях ядер Xe и Pb в модели HYDJET++ и эксперименте CMS (LHC)

Д. А. Мягков^{1,*}, С. В. Петрушанко²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра квантовой теории и физики высоких энергий. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 12.04.2023; подписана в печать 14.04.2023)

В работе описано моделирование рождения частиц в соударениях Pb–Pb и Xe–Xe при энергиях Большого адронного коллайдера (LHC) с помощью Монте–Карло генератора HYDJET++. Изучено распределений эллиптического v_2 и триангулярного v_3 потоков заряженных частиц в двух типах соударений, а также проведено качественное сравнение результатов генератора HYDJET++ с экспериментальными данными установки Компактный мюонный соленоид (CMS).

PACS: 25.75.-q, 21.65.Qr, 12.38.Mh, 24.85.+r

УДК: 539.121.667

Ключевые слова: Релятивистские соударения тяжелых ядер, кварк-глюонная плазма, азимутальная анизотропия, эллиптический поток.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из актуальнейших задач ядерной физики и физики высоких энергий является исследование ядерной материи в экстремальных условиях, т. е. при сверхвысоких температурах и плотностях энергии. В подобных условиях возможен деконфайнмент ядерной материи и образование кварк-глюонной плазмы (КГП), последующая адронизация которой порождает тысячи и даже десятки тысяч элементарных частиц. Изучая различные характеристики множественного рождения частиц, а также свойства этих многочастичных систем, мы можем достигнуть большего понимания природы фундаментальных взаимодействий нашей Вселенной.

Экстремальные условия для образования КГП экспериментально можно достичь при релятивистских столкновениях тяжелых ионов на ускорителях высоких энергий, таких как Большой адронный коллайдер (LHC) в Европейской организации ядерных исследований (CERN). Установка CMS [1] на коллайдере LHC — один из экспериментальных детекторов, который позволяет изучать рождение и эволюцию КГП в ядро-ядерных соударениях. К настоящему моменту коллаборацией эксперимента CMS получено множество интересных данных, позволяющих подтвердить факт рождения КГП в столкновениях тяжелых ионов при энергиях LHC. Со всеми опубликованными статьями коллаборации эксперимента CMS по изучению столкновений тяжелых ионов можно свободно ознакомиться по ссылке [2].

В случае нецентрального ядро-ядерного столкновения сечение перекрытия ядер образует эллиптический

объем КГП, который затем неоднородно расширяется во все стороны в процессе своей эволюции. Неоднородность хорошо видна при рассмотрении вылетающих из этого объема частиц в азимутальной плоскости.

Азимутальные потоки могут быть охарактеризованы коэффициентами Фурье-разложения азимутального распределения частиц:

$$\frac{2\pi}{N} \frac{dN}{d\varphi} = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\varphi - \Psi_n)],$$

где N — общее число рождающихся частиц, φ — азимутальный угол частицы, $dN/d\varphi$ — азимутальная плотность частиц, Ψ_n — азимутальный угол плоскости реакции n -ой гармоники v_n .

Один из основных способов изучения фундаментальных свойств КГП, а также пространственно-временной эволюции ядерной материи и флуктуаций ее начального состояния, — это исследование азимутальной анизотропии рождающихся частиц. В данном методе важнейшими наблюдаемыми величинами являются эллиптический v_2 и триангулярный v_3 азимутальные потоки. Изучая их, мы можем определить свойства начального состояния КГП и особенности ее эволюции.

1. МОНТЕ–КАРЛО ГЕНЕРАТОР HYDJET++

Для лучшего понимания процессов рождения и эволюции КГП создано множество Монте–Карло генераторов столкновений тяжелых ионов релятивистских энергий. Один из таких генераторов, созданный в НИИЯФ МГУ и широко применяемый для изучения релятивистских соударений тяжелых ионов при энергиях ускорителя LHC, — Монте–Карло генератор HYDJET++ [3]. Этот генератор создан на основе своего предшественника — генератора событий HYDJET, моделирующего столкновения тяжелых

* miagkov.da19@physics.msu.ru

ионов как смесь двух независимых компонент: мягкой гидродинамической части и жесткой части с мультипартонными процессами.

Основная программа генератора HYDJET++ написана на объектно-ориентированном языке C++ в среде ROOT. Жесткая часть HYDJET++ идентична аналогичной части написанного на языке Fortran генератора HYDJET и включена в структуру программы в виде отдельного каталога. Гидродинамическая мягкая часть генератора HYDJET++ полностью отличается от гораздо более простой мягкой части генератора HYDJET. В новой мягкой части «термальное» адронное состояние генерируется на гиперповерхностях химического и термического вымораживания, полученных в результате параметризации релятивистской гидродинамики с заданными условиями. Эта часть включает в себя эффекты продольного, радиального, эллиптического и треугольного потоков и распада адронных резонансов.

Данная работа была выполнена в генераторе HYDJET++ последней на момент подготовки этой статьи версии 2.4.3 [4] с комплектом специальных настроек под энергии ускорителя LHC, разработанных и применяемых в коллаборации эксперимента CMS. Генерация полной статистики событий для данной работы проводилась с помощью «батч»-системы распределенных вычислений HTCondor на серверах LXBATCN в ЦЕРНе (с применением GRID-технологий).

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО И ТРИАНГУЛЯРНОГО ПОТОКОВ

В экспериментальной физике высоких энергий существует целый ряд методов вычисления азимутальных потоков: метод с использованием плоскости реакции, метод многочастичных корреляций, метод кумулянтов различного порядка, метод «нулей» Ли-Янг и т.п.

В данной работе способом вычисления эллиптического и треугольного потоков в генераторе HYDJET++ является метод расчета этих величин относительно истинной плоскости реакции. Азимутальный угол плоскости реакции для эллиптического и треугольного потоков нам известен заранее — он задается внутренним кодом генератора HYDJET++. Таким образом, вычислить Фурье-коэффициенты рождающихся частиц возможно сразу с помощью формулы:

$$v_n = \cos n(\varphi - \Psi_n^{true}),$$

где Ψ_n^{true} — азимутальный угол истинной плоскости реакции n -й гармоники.

В экспериментальных работах [5, 6], с результатами которых пойдет дальнейшее сравнение наших расчетов, для вычисления эллиптического и треугольного потоков использовался метод двухчастичных (парных) корреляций. Идея метода состоит в том, что, если частицы коррелированы с плоскостью реакции,

то между ними также существуют корреляции. Этот метод подробно описывается в работе [5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ: ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ И ТРИАНГУЛЯРНЫЙ ПОТОКИ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИЯХ УСКОРИТЕЛЯ LHC

Коллаборацией эксперимента CMS было проведено тщательное исследование анизотропии рождающихся частиц в соударениях Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ и Pb–Pb с энергией 5.02 ТэВ на пару нуклонов в системе центра масс [5, 6]. Целью нашей работы было сравнение полученных в эксперименте CMS данных для этих двух типов ядер с результатами моделирования в генераторе HYDJET++.

Одна из важных характеристик свойств азимутальных потоков — зависимость эллиптического v_2 и треугольного v_3 потоков от поперечного импульса p_T . На рис. 6 и 7 экспериментальной работы [5] приведено сравнение такого рода зависимостей для столкновений ядер Xe–Xe и Pb–Pb близкой энергии в 11 областях центральности, также выявлены интересные особенности этих распределений. Нами было проведено моделирование в генераторе HYDJET++ столкновений Xe–Xe и Pb–Pb аналогичной энергии (статистика составила по 1 млн. событий для каждой центральности двух типов ядер) и построены такие же зависимости.

На рис. 1 представлены распределения эллиптического потока v_2 от величины поперечного импульса p_T в модели HYDJET++ для различных центральностей: от 0–5% до 60–70% для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ и Pb–Pb 5.02 ТэВ на пару нуклонов в системе центра масс.

Как в экспериментальной работе [5] коллаборации CMS, так и на распределениях, полученных в генераторе HYDJET++, видно, что массовое число ядра практически не влияет на порядок величины потока v_2 . Кроме того, для разных массовых чисел сохраняется и форма распределения для всего исследуемого диапазона поперечного импульса $0 < p_T < 10$ ГэВ/с. Сравнивая результаты моделирования в генераторе со схожими экспериментальными данными, можно сделать вывод о том, что для эллиптического потока модель хорошо описывает все распределения, кроме самых центральных — от 0% до 10% центральности. Возможная причина отличия данных генератора от эксперимента для наиболее центральных столкновений — наличие большей флуктуационной компоненты начальных условий образования КПП в более легкой системе ксенона по сравнению с более тяжелым свинцом [7, 8].

Еще один фактор, который также может играть важную роль, — отклонение формы ядра ксенона от идеальной сферической формы, в отличие от практически «круглой» азимутальной проекции ядра свинца. Влияние несферичности тяжелых ядер на азимутальную анизотропию отмечено еще при анализе экспериментальных данных на ускорителе RHIC — была выявлена

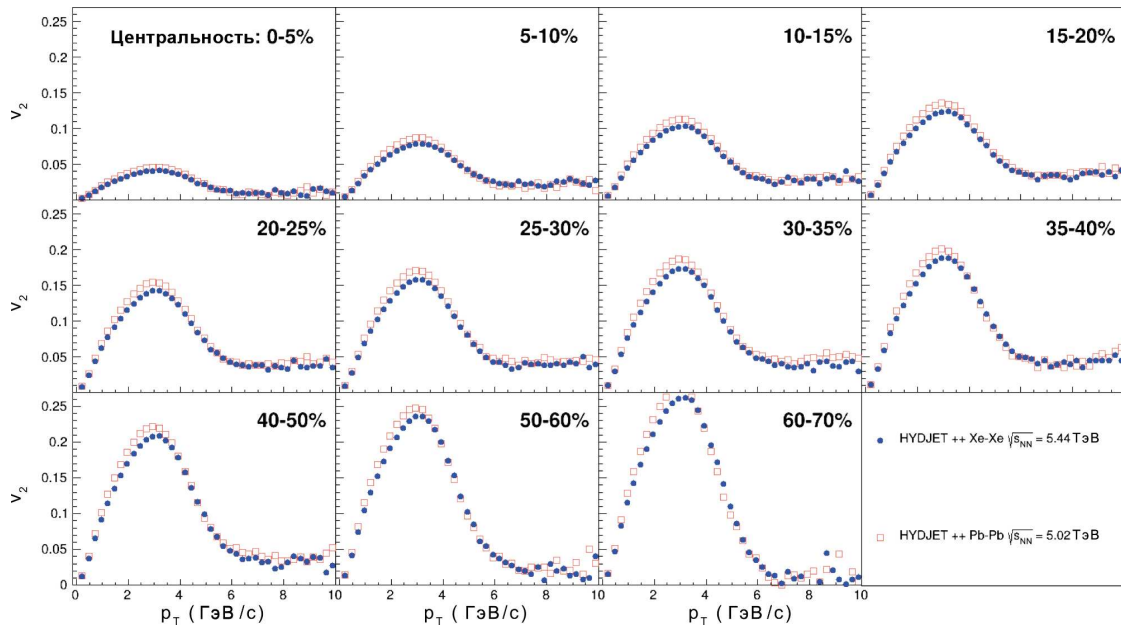


Рис. 1. Сравнение эллиптического потока v_2 , измеренного методом истинной плоскости реакции, для столкновений Хе–Хе при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (кружки) и Рb–Рb 5.02 ТэВ (квадраты) в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5% до 60–70%) в Монте–Карло генераторе HYDJET++

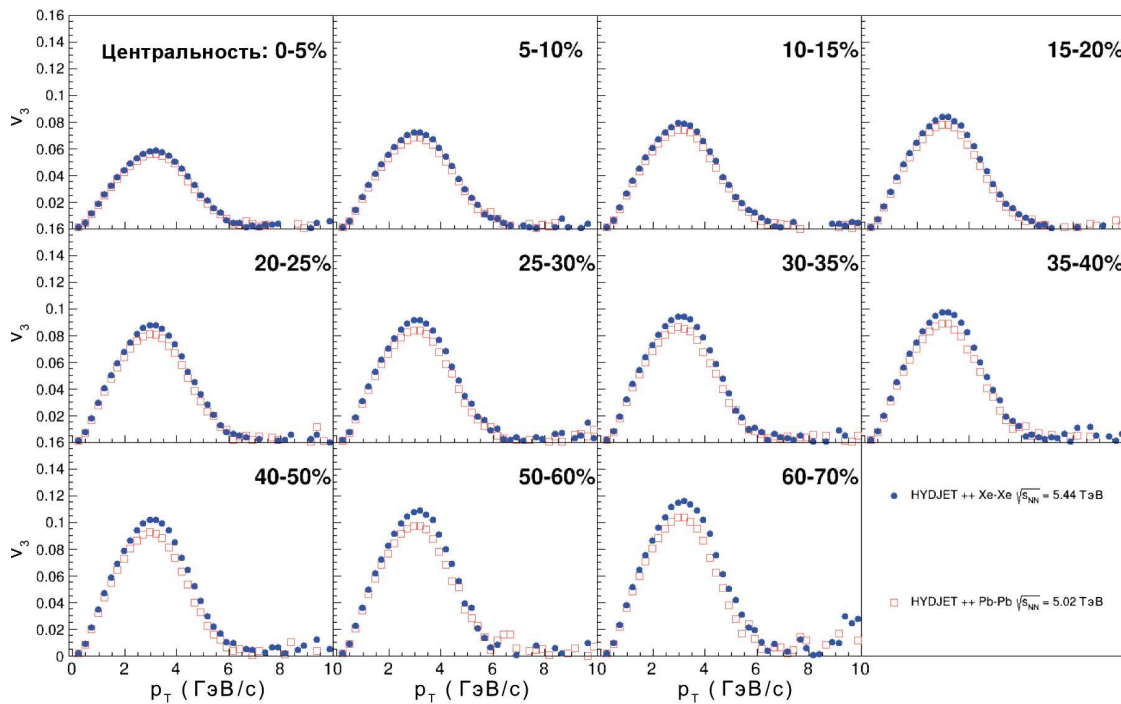


Рис. 2. Сравнение триангулярного потока v_3 , измеренного методом истинной плоскости реакции, для столкновений Хе–Хе при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ (кружки) и Рb–Рb 5.02 ТэВ (квадраты) в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5% до 60–70%) в Монте–Карло генераторе HYDJET++

зависимость результатов от взаимной геометрической конфигурации ядер урана в момент столкновения [9]. Исследование, проведенное с помощью модифицированной версии генератора HYDJET++, в которой была учтена несферичность ядер ксенона в столкновениях при энергии ускорителя LHC, также подтверждает возможное влияние геометрической конфигурации ядер на азимутальные потоки [10, 11].

Стоит также отметить, что эксперименте CMS получены более высокие значения эллиптического потока по сравнению с генератором HYDJET++, что, по-видимому, связано с недостаточным отсечением непотоковых вкладов в методе двухчастичных корреляций в эксперименте, в котором неизвестен азимутальный угол истинной плоскости реакции — см, например, сравнение результатов для v_2 метода двухчастичных корреляций с другими способами вычисления этих коэффициентов на рис. 1 в [5].

Также был изучен треугольный поток v_3 двух типов ядро-ядерных столкновений в генераторе HYDJET++ — см. рис. 2. В эксперименте CMS для соударений с области центральностей 0–30% зависимость v_3 для столкновений Xe–Xe выше, чем для Pb–Pb, что хорошо воспроизводится в генераторе HYDJET++. Однако, для больших центральностей в эксперименте ситуация меняется, что расходится с предсказаниями генератора.

Следует также отметить: генератор HYDJET++ не предназначен для описаний периферических ядро-ядерных столкновений (выше 50% центральности), что связано с особенностями использования гидродинамической модели для описания эволюции ядерной материи.

Проведенное нами исследование показало диапазон применимости генератора HYDJET++ для взаимного описания азимутальных потоков различных типов ядер в релятивистских соударениях при энергиях LHC. Благодаря нашей работе также может быть запланировано внесение в генератор дополнительных улучшений для более надежного описания азимутальных потоков, что является крайне важным в связи с началом третьего этапа (Run 3) работы ускорителя LHC,

в процессе которого предполагается использование в ядро-ядерных столкновениях новых типов ядер (например, ядер кислорода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается проведенное в рамках Монте–Карло генератора HYDJET++ моделирование рождения частиц в соударениях Xe–Xe и Pb–Pb при энергиях ускорителя LHC. Проведено качественное сравнение результатов генератора HYDJET++ по зависимости эллиптического v_2 и треугольного v_3 потоков от поперечного импульса p_T с аналогичными экспериментальными данными коллаборации CMS. Показано, что генератор HYDJET++ описывает отличия потоков Xe–Xe и Pb–Pb в диапазонах центральностей 10–50% для v_2 и 0–30% для v_3 и форму распределений. Также было отмечено, что необходима дополнительная настройка модели HYDJET++ для более точного описания особенностей поведения коэффициентов азимутальной анизотропии.

На следующем этапе нашей работы планируется построение отношений $v_n[\text{Xe–Xe}]/v_n[\text{Pb–Pb}]$ по данным генератора HYDJET++ и сравнение их с аналогичными экспериментальными данными установки CMS, а также применение схожего с экспериментом метода вычисления азимутальных потоков.

Благодарности

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Организаторам XXIII межвузовской молодежной научной школы-конференции имени Б. С. Ишханова 2022 года за возможность представить доклад. Большое спасибо авторам Монте–Карло генератора HYDJET++ за предоставленный программный код и помощь с настройками модели, сотрудникам Лаборатории сильных взаимодействий Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ за обсуждение результатов и ценные советы, а также участникам международной коллаборации эксперимента CMS за экспериментальные результаты по азимутальной анизотропии, полученные на ускорителе LHC.

[1] Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // *J. Instrum.* **3**. S08004. (2008).
[2] CMS Collaboration // <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN/>
[3] Lokhtin I.P., Malinina L.V., Petrushanko S.V. et al. // *Comput. Phys. Commun.* **180**. 779. (2009).
[4] Lokhtin I.P., Malinina L.V., Petrushanko S.V. et al. // <http://lokhtin.web.cern.ch/lokhtin/hydjet++>
[5] Sirunyan S.M. et al. (CMS Collaboration) // *Phys. Rev. C.* **100**. 044902. (2019).

[6] Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // *Phys. Rev. C.* **89**. 044906. (2013).
[7] Giacalone G., Noronha-Hostler J., Luzum M., Ollitrault J.-Y. // *Phys. Rev. C.* **97**. 034904. (2018).
[8] Eyyubova G., Korotkikh V., Snigirev A., Zabrodin E. // *J. of Phys. G.* **48**, N 9. 095101. (2021).
[9] Rihan Haque Md., Lin Z.-W., Mohanty B. // *Phys. Rev. C.* **85**. 034905. (2012).
[10] Pandey S., Singh B.K. // arXiv:2107.01880. 2021.
[11] Pandey S., Singh B.K. // arXiv:2210.08527. 2022.

Elliptical and triangular flows of charged particles in relativistic collisions of Xe and Pb nucleus in the HYDJET++ model and experiment CMS (LHC)

D. A. Miagkov^{1,a}, S. V. Petrushanko²

¹*Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^amiagkov.da19@physics.msu.ru

This paper describes the simulation of particle production in Pb–Pb and Xe–Xe collisions at the energies of the Large Hadron Collider (LHC) using the HYDJET++ Monte Carlo generator. The distributions of elliptical v_2 and triangular v_3 flows of charged particles in two types of collisions are studied. The results of the HYDJET++ generator simulation are qualitatively compared with the experimental data of the Compact Muon Solenoid (CMS) detector. PACS: 25.75.-q, 21.65.Qr, 12.38.Mh, 24.85.+p.

Keywords: relativistic heavy-ion collision, quark-gluon plasma, azimuthal anisotropy, elliptical flow.

Received 12 April 2023.

Сведения об авторах

1. Мягков Данила Александрович — студент; тел.: (929) 274-09-55, e-mail: miagkov.da19@physics.msu.ru.
2. Петрушанко Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: Serguei.Petrouchanko@cern.ch.