

Эллиптический и триангулярный азимутальные потоки частиц в столкновениях ядер Хе–Хе и Рb–Рb в Монте–Карло модели HYDJET++ и эксперименте CMS на коллайдере LHC (CERN)

Д. А. Мягков^{1,*}, С. В. Петрушанко²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

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

(Поступила в редакцию 28.09.2023; подписана в печать 15.10.2023)

С помощью Монте–Карло генератора HYDJET++ была исследована азимутальная анизотропия рождающихся частиц в соударениях Хе–Хе при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ и Рb–Рb с энергией 5.02 ТэВ на пару нуклонов в системе центра масс. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными установки Компактный мюонный соленоид (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC) в Европейском центре ядерных исследований (CERN).

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

УДК: 539.121.667

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

ВВЕДЕНИЕ

Посвящается 270-летию Московского университета

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СОУДАРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР, АЗИМУТАЛЬНАЯ АНИЗОТРОПИЯ

Главная цель экспериментов с использованием релятивистских соударений тяжелых ядер — это изучение адронной материи в экстремальных режимах сверхвысоких температур и плотностей, приводящих к возникновению нового состояния вещества, так называемой «кварк-глюонной плазме» (КГП). Один из методов исследования процессов, связанных с возникновением и эволюцией КГП, — изучение азимутальной анизотропии рождающихся частиц, главными наблюдаемыми для которой являются эллиптический v_2 и триангулярный v_3 азимутальные потоки, которым и посвящено наше исследование.

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. Фурье-разложение азимутального распределения рождающихся в ядро-ядерном соударении частиц может быть записано в таком виде:

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

где N — общее число рождающихся в соударении частиц, φ — азимутальный угол частицы, $dN/d\varphi$ — азимутальная плотность частиц, Ψ_n — азимутальный угол плоскости реакции n -ой гармоники v_n . Вторую гармонику v_2 азимутального Фурье-разложения называют эллиптическим потоком, третью v_3 — триангулярным, четвертую v_4 — квадрупольным и т. д.

Исследование азимутальной анизотропии рождающихся частиц в релятивистских соударениях тяжелых ядер — это один из важнейших способов изучения фундаментальных свойств КГП, пространственно-временной эволюции ядерной материи в экстремальном состоянии, а также флуктуаций ее начального состояния.

Установка Компактный мюонный соленоид (CMS) [1] на Большом адронном коллайдере (LHC) в Европейском центре ядерных исследований (CERN), благодаря своему точному трекерному детектору и мюонным камерам, широкому охвату калориметрических систем и сильному магнитному полю 3.8 Тл — является отличным прибором для экспериментов по тщательному изучению характеристик столкновения тяжелых ионов ультрарелятивистских энергий, в том числе и азимутальной анизотропии рождающихся в них частиц. Проводя экспериментальные исследования с 2010 г., коллаборация CMS опубликовала уже более ста научных статей по физике тяжелых ионов [2], а также представила целый ряд предварительных результатов [3].

1. МОДЕЛИ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЙ, МОНТЕ–КАРЛО ГЕНЕРАТОР HYDJET++

Невозможно переоценить вклад Монте–Карло моделей в развитие современной теории кварк-глюонной

* danila.myagkov.msu@mail.ru

плазмы: самые разные генераторы на основе различных подходов и методов используются для моделирования релятивистских столкновений тяжелых ионов и интерпретации их результатов. Монте-Карло генераторы позволяют уточнить наши знания о свойствах КПП и предсказать результаты экспериментов, которые, в свою очередь, могут быть использованы для проверки теоретических моделей.

Монте-Карло генератор HYDJET++ [4, 5], разработанный в НИИЯФ МГУ, — один из таких генераторов релятивистских соударений тяжелых ионов. Генератор HYDJET++ моделирует столкновения тяжелых ионов как смесь двух независимых компонент: мягкой гидродинамической части и жесткой части с мультипартоными процессами. Он создан на основе своего предшественника — модели HYDJET [6]. Генератор имеет открытый исходный код, который легко может быть адаптирован под различные цели. Пакет программ для моделирования мягкой компоненты реализован на языке C++, а также использует библиотеки программной среды ROOT. Генерация мягкой части события происходит на основе уравнений релятивистской гидродинамики, множественность адронов в событиях определяется распределением Пуассона. Для моделирования жесткой компоненты используется пакет программ PYQUEN [7, 8], написанный на языке Fortran.

В данной работе использовался Монте-Карло генератор HYDJET++ последней имеющейся версии 2.4.3, с которым также был использован комплект специальных настроек от коллаборации эксперимента CMS (для адаптации под экспериментальные данные при энергиях коллайдера LHC). Получение статистики ядро-ядерных соударений для анализа проводилось с помощью компьютерной системы распределенных вычислений HTCondor на серверах LXPLUS в ЦЕРНе (с применением GRID-технологий). Полная статистика для генератора HYDJET++ составила по 1 млн. событий для каждой из 11-ти центральных областей двух типов ядер.

$$v_2 = \begin{cases} \sqrt{\langle \cos [2(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle} & \sum_{i=2}^N \cos [2(\varphi_1 - \varphi_i)] \geq 0 \\ (-1.) \times \sqrt{|\langle \cos [2(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle|} & \sum_{i=2}^N \cos [2(\varphi_1 - \varphi_i)] < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Коллаборация CMS в статьях [13, 14], с результатами которых пойдет дальнейшее сравнение наших результатов, для вычисления азимутальных потоков использовала метод двухчастичных корреляций на основе куммулянтов, детали которого подробно описаны в работе [11].

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ, РОЖДАЮЩИХСЯ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ

Существует целый ряд методов вычисления гармоник азимутальных потоков в экспериментальной физике высоких энергий: метод с использованием плоскости реакции [9] (истинной или вычисленной), метод попарных корреляций [10], метод куммулянтов различного порядка [11], метод «нулей» Ли-Янг [12] и т.п.

В данной работе методом вычисления эллиптического v_2 и треугольного v_3 потоков для модели HYDJET++ является метод расчета этих величин относительно истинной плоскости реакции. В генераторе азимутальные углы плоскости реакции для v_2 и v_3 известны заранее — они задаются самим генератором, независимо друг от друга. Т.е. вычислить азимутальные потоки рождающихся частиц возможно сразу же с помощью формулы:

$$v_n = \cos n(\varphi - \Psi_n^{true}), \quad (2)$$

где Ψ_n^{true} — азимутальный угол истинной плоскости реакции n -ой гармоники (в генераторе HYDJET++ — второй для четных и третьей для нечетных гармоник).

Расчеты потоков для генератора HYDJET++ методом попарных корреляций [10], который также использовался в данной работе, могут быть представлены общей формулой:

$$v_n^2 = \langle \cos [n(\varphi_1 - \varphi_2)] \rangle, \quad (3)$$

где φ_1 и φ_2 — это азимутальные углы для первой (основной) и второй (референтной) частицы, соответственно. Усреднение ведется по всем референтным частицам. Из-за несовершенства оригинального метода попарных корреляций в расчетах с помощью формулы (3) для частиц с отрицательным эллиптическим потоком появляются отрицательные суммы, которые вызывают очевидные ошибки при извлечении корня. Поэтому, если сумма для частицы отрицательна, то следует взять корень из модуля этой суммы, а результат умножить на $-1.$, т.е. для эллиптического потока, который изучался этим методом в данной работе, расчёт выполнялся по формуле (4):

3. РЕЗУЛЬТАТЫ: ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ v_2 , ТРИАНГУЛЯРНЫЙ v_3 И КВАДРУПОЛЬНЫЙ v_4 АЗИМУТАЛЬНЫЕ ПОТОКИ В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ В МОДЕЛИ HYDJET++ И В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS

В работах [13, 14] коллаборацией эксперимента CMS было проведено тщательное исследование азиму-

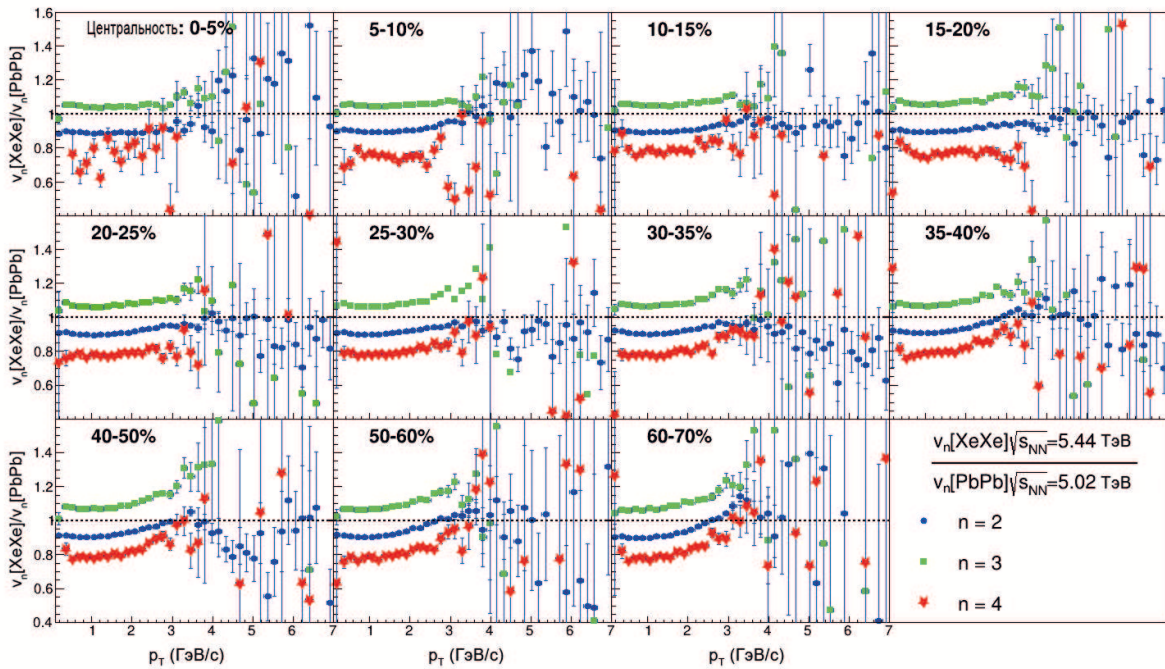


Рис. 1. Сравнение отношений эллиптического v_2 (круги), треугольного v_3 (квадраты) и квадрупольного v_4 (звезды) потоков для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ к аналогичным потокам для столкновений Pb–Pb 5.02 ТэВ в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5 до 60–70%) в Монте-Карло генераторе HYDJET++

тальной 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.

Целью нашей работы было сравнение полученных в эксперименте CMS данных для двух типов ядер с результатами моделирования в Монте-Карло генераторе HYDJET++. В нашей предыдущей работе [15] мы провели только качественное сравнение результатов. В данной статье мы представляем новые количественные данные и их детальную интерпретацию.

Одна из важных характеристик свойств азимутальных потоков — зависимость эллиптического v_2 и треугольного v_3 потоков от поперечного импульса p_T . Для более детального изучения поведения азимутальных компонент при различных диапазонах центральности были рассчитаны отношения эллиптического, треугольного и квадрупольного потоков: $\frac{v_n[\text{XeXe}]}{v_n[\text{PbPb}]}$, а также построены распределения этих отношений в зависимости от поперечного импульса p_T .

На рис. 1 представлены отношения эллиптического v_2 (синие кружки), треугольного v_3 (зеленые квадраты) и квадрупольного v_4 (красные звезды) азимутальных потоков в соударениях Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ к соответствующим потокам в соударениях Pb–Pb 5.02 ТэВ в зависимости от поперечного импульса рождающихся заряженных частиц в диапазоне $0 < p_T < 7$ ГэВ/с для 11 областей центральности

столкновений (от 0–5 до 60–70%), полученные в Монте-Карло генераторе HYDJET++.

Отметим некоторые общие характерные черты, заметные на этом рисунке. Во-первых, для всех гармоник форма зависимости выглядит похожей и сохраняется для различных центральностей. Во-вторых, во всех диапазонах центральностей взаимное расположение распределений сохраняется. Можно видеть, что отношение эллиптических потоков всегда оказывается меньше отношения треугольных. В то же время, отношения квадрупольного потока ниже остальных двух.

Теперь рассмотрим более детально отношение каждой компоненты азимутального потока и сравним их с результатами эксперимента коллаборации CMS.

На рис. 2 приведено сравнение отношений эллиптических потоков v_2 для столкновений Xe–Xe и для Pb–Pb в Монте-Карло генераторе HYDJET++ и в эксперименте CMS [13]. Диапазоны центральностей, а также энергии соударяющихся систем — те же, что и указывались выше.

Видно, что генератор HYDJET++ хорошо описывает отношения эллиптических потоков v_2 для столкновений Xe–Xe и для Pb–Pb в диапазоне 10–35% по центральности, однако недостаточно хорошо в области самых центральных соударений от 0 до 10%. В эксперименте при таких центральностях отмечено существенное превышение значений этого отношения по сравнению с менее центральными соударениями. Для объяснения расхождения результатов гене-

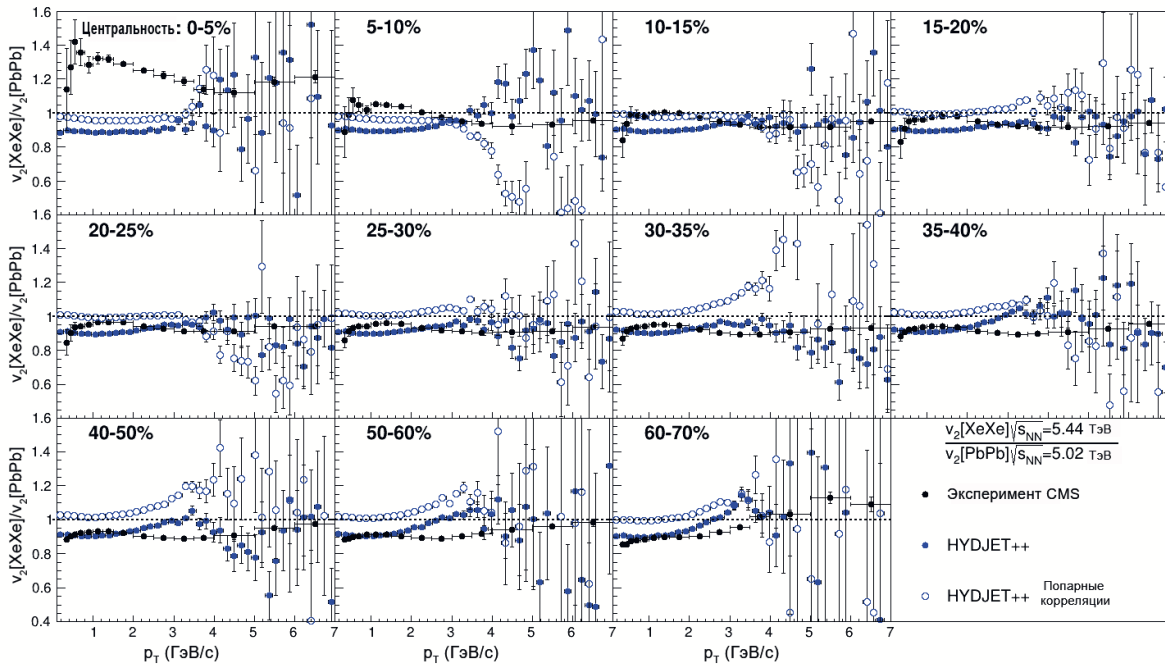


Рис. 2. Сравнение отношений эллиптических потоков v_2 для столкновений Xe–Xe при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ к аналогичной величине для столкновений Pb–Pb 5.02 ТэВ в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5 до 60–70%) в Монте–Карло генераторе HYDJET++ (пустые круги) и в эксперименте CMS [13] (заполненные круги)

ратора HYDJET++ с экспериментальными данными в этой области можно привести три причины. Первая из них — это наличие большей флуктуационной компоненты начальных условий образования КПП в более легкой системе ксенона по сравнению с более тяжелым свинцом, что ранее уже было отмечено [16, 17]. Другой фактор, который может оказывать влияние на поведение распределений в самых центральных столкновениях, — несферичность ядра ксенона, что также исследовалось ранее [18, 19]. Напомним, что ядро свинца, будучи дважды магическим, имеет сферическую форму в отличие от ядра ксенона. Третья возможная причина возникновения этого расхождения — достаточно большая систематическая погрешность эксперимента, которая особенно сильно заметна для частиц с малыми поперечными импульсами, что отмечено в самой работе коллаборации CMS [13].

Подобные же выводы можно сделать касательно распределений отношений триангулярных потоков, v_3 , для столкновений Xe–Xe и для Pb–Pb в Монте–Карло генераторе HYDJET++ и в эксперименте CMS, которые представлены на рис. 3. Здесь, как и в случае с отношением для эллиптических потоков, наблюдается расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования в области наиболее центральных соударений. С другой стороны, достаточно хорошо согласуются данные, полученные в областях центральности 10–30%. В отличие от отношений эллиптических потоков, для триангулярных наблюдается серьезное рас-

хождение результатов модели HYDJET++ и экспериментальных данных в областях периферических столкновений (50–70%), что является наглядной демонстрацией плохой применимости гидродинамических моделей для описания эволюции ядерной материи в такой области центральности ядро-ядерных соударений (выше 50%).

Нами также был использован метод попарных корреляций [10] для изучения эллиптических потоков v_2 для столкновений Xe–Xe и для Pb–Pb в генераторе HYDJET++. Напомним, что коллаборация CMS в работах [13, 14], с результатами которых идет сравнение наших результатов, для вычисления v_2 и v_3 использовала метод двухчастичных корреляций на основе куммулянтов [11]. Несмотря на отличия метода попарных корреляций от метода двухчастичных корреляций, он все же позволяет сделать некоторые качественные выводы для нашей работы.

Распределения отношений эллиптических потоков в соударениях Xe–Xe к потокам в соударениях Pb–Pb, посчитанные двумя методами в генераторе HYDJET++, и данные эксперимента CMS приведены на рис. 4. Метод попарных корреляций неплохо описывает поведение отношений, а в области центральности 5–25% он дает лучшее согласие с экспериментом, чем метод истинной плоскости реакции.

Суммируя, можно отметить, что наше исследование показало возможность использования Монте–Карло генератора HYDJET++ для описания азимутальных

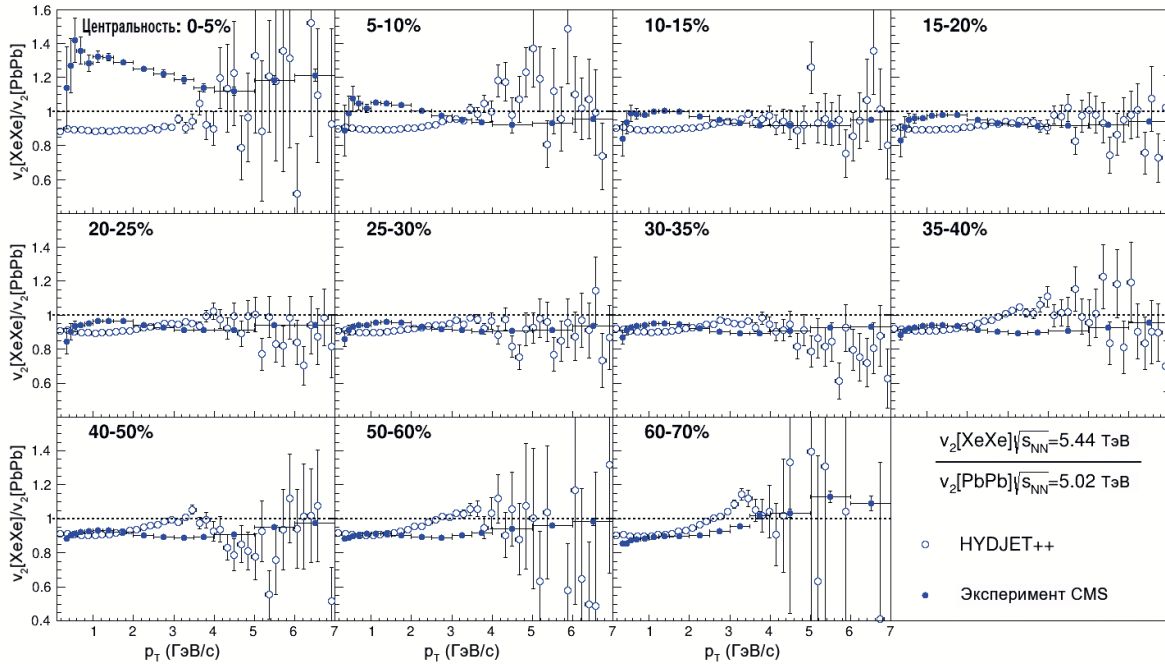


Рис. 3. Сравнение отношений триангулярных потоков v_3 для столкновений Хе–Хе при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ к аналогичной величине для столкновений Рб–Рб 5.02 ТэВ в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5 до 60–70%) в Монте–Карло генераторе HYDJET++ (пустые круги) и в эксперименте CMS [13] (заполненные круги)

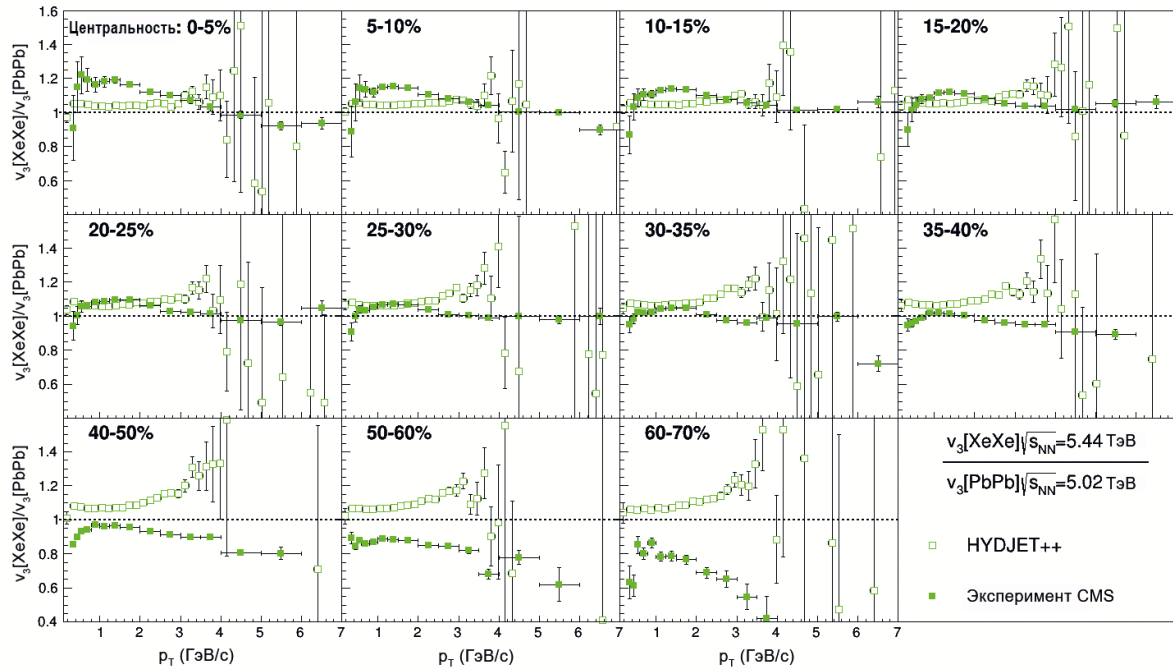


Рис. 4. Сравнение отношений эллиптических потоков v_2 для столкновений Хе–Хе при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ к аналогичной величине для столкновений Рб–Рб 5.02 ТэВ в зависимости от поперечного импульса p_T рождающихся заряженных частиц для 11 областей центральности столкновений (от 0–5 до 60–70%), измеренных методами истинной плоскости реакции (синие заполненные круги) и попарных корреляций (синие пустые круги) в Монте–Карло генераторе HYDJET++, а также методом двухчастичных корреляций (черные круги) в эксперименте CMS [13]

потоков различных типов ядер в столкновениях при энергиях ЛНС. Мы надеемся, что дальнейшая более тщательная количественная настройка, а также качественное развитие модели позволит улучшить ее способность предсказывать и интерпретировать экспериментальные данные в этой области физики высоких энергий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках Монте–Карло генератора HYDJET++ было проведено моделирование азимутального распределения заряженных частиц в соударениях Xe–Xe и Pb–Pb при энергиях коллайдера ЛНС. Проведено сравнение отношения эллиптических и триангулярных потоков $v_n[\text{Xe–Xe}]/v_n[\text{Pb–Pb}]$ для столкновений двух указанных типов ядер с экспериментальными данными установки Компактный мюонный соленоид (CMS). На основе сравнения было дано подтверждение хорошего количественного описания данных эксперимента генератором HYDJET++ в диапазонах центральностей 10–35% для эллиптического и 0–30% для триангулярного потоков. Также был применен метод попарных корреляций для качественной оценки влияния экспериментальных методов вычисления азимутальных потоков на результат. Выяснено, что необходима даль-

нейшая количественная настройка и качественное развитие Монте–Карло генератора HYDJET++ для расширения его возможностей описания экспериментальных данных.

Благодарности

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Организаторам XXX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2023» (Секция «Физика») за возможность представить доклад и опубликовать статью в данном журнале. Спасибо авторам Монте–Карло генератора HYDJET++ за программный код и помощь с настройками, сотрудникам Лаборатории сильных взаимодействий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ за ценные советы и наставления, а также участникам международной коллаборации эксперимента Компактный мюонный соленоид (CMS) за предоставленные экспериментальные результаты. Отдельная благодарность Милану Стояновичу (Milan Stojanovic) из коллаборации CMS за важные уточнения и помощь в работе с экспериментальными данными.

-
- [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] CMS Collaboration // <https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/preliminary-results/HIN/>
 - [4] Lokhtin I.P., Malinina L.V., Petrushanko S.V., Snigirev A.M., Arsene I., Tywoniuk K. // Comput. Phys. Commun. **180**. 779. (2009).
 - [5] Lokhtin I.P., Malinina L.V., Petrushanko S.V., Snigirev A.M., Arsene I., Tywoniuk K. // <http://lokhtin.web.cern.ch/lokhtin/hydjet++>
 - [6] Lokhtin I.P., Snigirev A.M. // <https://lokhtin.web.cern.ch/lokhtin/hydro/hydjet.html>
 - [7] Lokhtin I.P., Snigirev A.M. // Eur. Phys. J. C. **46**. 211. (2006).
 - [8] Lokhtin I.P., Snigirev A.M. // <https://lokhtin.web.cern.ch/lokhtin/pyquen/>
 - [9] Voloshin S., Zhang Y. // Z. Phys. C. **70**. 665. (1996).
 - [10] Wang S. et al. // Phys. Rev. C. **44**. 109. (1991).
 - [11] Borghini N., Dinh P. M., Ollitrault J.-Y. // Phys. Rev. C. **64**. 054901. (2001).
 - [12] Bhalerao R.S., Borghini N., Ollitrault J.-Y. // Nucl. Phys. A. **727**. 373. (2003).
 - [13] Sirunyan S.M. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. C. **100**. 044902. (2019).
 - [14] Chatrchyan S. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Rev. C. **89**. 044906. (2013).
 - [15] Мягков Д.А., Петрушанко С.В. // Учен. зап. физ. факта Моск. ун-та. № 3. 2330205. (2023).
 - [16] Giacalone G., Noronha-Hostler J., Luzum M., Ollitrault J.-Y. // Phys. Rev. C. **97**. 034904. (2018).
 - [17] Eyyubova G., Korotkikh V., Snigirev A., Zabrodin E. // J. of Phys. G. **48**. N 9. 095101. (2021).
 - [18] Pandey S., Singh B.K. // arXiv:2107.01880. (2021).
 - [19] Pandey S., Singh B.K. // arXiv:2210.08527. (2022).

Elliptical and triangular azimuthal particle flows in Xe–Xe and Pb–Pb collisions with the Monte Carlo model HYDJET++ and the CMS experiment at the LHC (CERN)

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

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

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

E-mail: ^adanila.myagkov.msu@mail.ru

Monte Carlo generator HYDJET++ was used to study the azimuthal anisotropy of particles produced in Xe–Xe collisions at an energy of $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV and Pb–Pb at an energy of 5.02 TeV per nucleon pair in the center mass frame. Obtained results are compared with the experimental data of the Compact Muon Solenoid (CMS) at the Large Hadron Collider (LHC) in European Council for Nuclear Research (CERN).

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, triangular flow.

Received 28 September 2023.

Сведения об авторах

1. Мягков Данила Александрович — студент; e-mail: danila.myagkov.msu@mail.ru.
2. Петрушанко Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-12-57, e-mail: Serguei.Petrouchanko@cern.ch.