

## Распределения заряженных частиц по псевдобыстроте и центральности в столкновениях Pb–Pb при энергии 5.36 ТэВ в генераторе HYDJET++ и их сравнение с данными ЛНС

В.С. Братышев<sup>1,\*</sup>, Д.А. Мягков<sup>1,2</sup>, С.В. Петрушанко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет.  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

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

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

(Поступила в редакцию 25.03.2026; подписана в печать 28.03.2026)

В работе проведено сравнение экспериментальных данных, полученных на установке CMS на коллайдере ЛНС, по распределениям заряженных частиц по псевдобыстроте и центральности в столкновениях Pb–Pb при рекордной энергии 5.36 ТэВ с результатами, полученными моделированием в Монте–Карло генераторе HYDJET++ с использованием его базовых настроек.

PACS: 25.75.-q; 12.38.Mh; 13.75.Cs.

УДК: 539.121.667

Ключевые слова: релятивистские соударения тяжелых ядер, кварк-глюонная плазма, распределения по псевдобыстроте.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение ядерной материи в экстремальных состояниях сверхвысоких температурах и плотностей энергии — одна из самых актуальных задач современной ядерной физики и физики высоких энергий. В условиях, возникающих в ядро-ядерных соударениях сверхвысоких энергий, может происходить деконфайнмент ядерной материи с образованием так называемой «кварк-глюонной плазмы» (КГП), последующая адронизация которой приводит к рождению тысяч и десятков тысяч частиц. Экспериментальный анализ наблюдаемых характеристик множественного рождения частиц и свойств этих многочастичных систем, а также сравнение с результатами теоретического моделирования позволяет глубже понять природу фундаментальных взаимодействий в нашей Вселенной.

Экстремальные условия для образования КГП экспериментально можно достичь при релятивистских столкновениях тяжелых ионов на ускорителях высоких энергий, самым мощным из которых на данный момент времени является Большой адронный коллайдер (ЛНС) в Европейской организации ядерных исследований (CERN) в г. Женева, Швейцария. Детектор CMS [1] — одна из основных экспериментальных установок на коллайдере ЛНС, в числе важнейших целей которой — изучение возникновения и эволюции КГП в ядро-ядерных столкновениях. Коллаборация эксперимента CMS уже накопила обширные экспериментальные данные, подтверждающие образование КГП в столкновениях тяжелых ионов при энергиях ЛНС, с опубликованными статьями этой тематики можно ознакомиться по следующей ссылке [2].

Один из основных способов изучения фундаментальных свойств КГП — это исследование распределений рождающихся частиц по псевдобыстроте:

$$\eta = -\ln \left[ \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) \right],$$

где  $\theta$  — угол между направлением импульса родившейся частицы и осью пучка сталкивающихся ионов.

Также при изучении ядро-ядерных соударений используется величина центральности, которая характеризует объем области перекрытия сталкивающихся ядер и связана с прицельным параметром соударения. 0% центральности означает полностью центральное соударение («лоб-в-лоб»), 100% — предельно периферическое (ядро касаются друг друга лишь по касательной).

### 1. МОНТЕ–КАРЛО ГЕНЕРАТОР HYDJET++

Для понимания и изучения процессов, происходящих при рождении и эволюции КГП, в научном сообществе создан целый ряд Монте–Карло генераторов столкновений тяжелых ионов релятивистских энергий. Один из таких генераторов был создан в НИИЯФ МГУ и широко используется для изучения соударений тяжелых ионов при энергиях современных ускорителей тяжелых ионов, — Монте–Карло генератор HYDJET++ [3]. Он создан на основе предыдущей модели HYDJET [4]. Особенности генератора заключаются в его очень быстрой работе и независимом моделировании мягкой гидродинамической части для частиц с низкой энергией, в то время как жесткая компонента отвечает за рождение высокоэнергичных струй и адронов, учитывая при этом эффект их «гашения»

\* bratyshev.vs22@physics.msu.ru

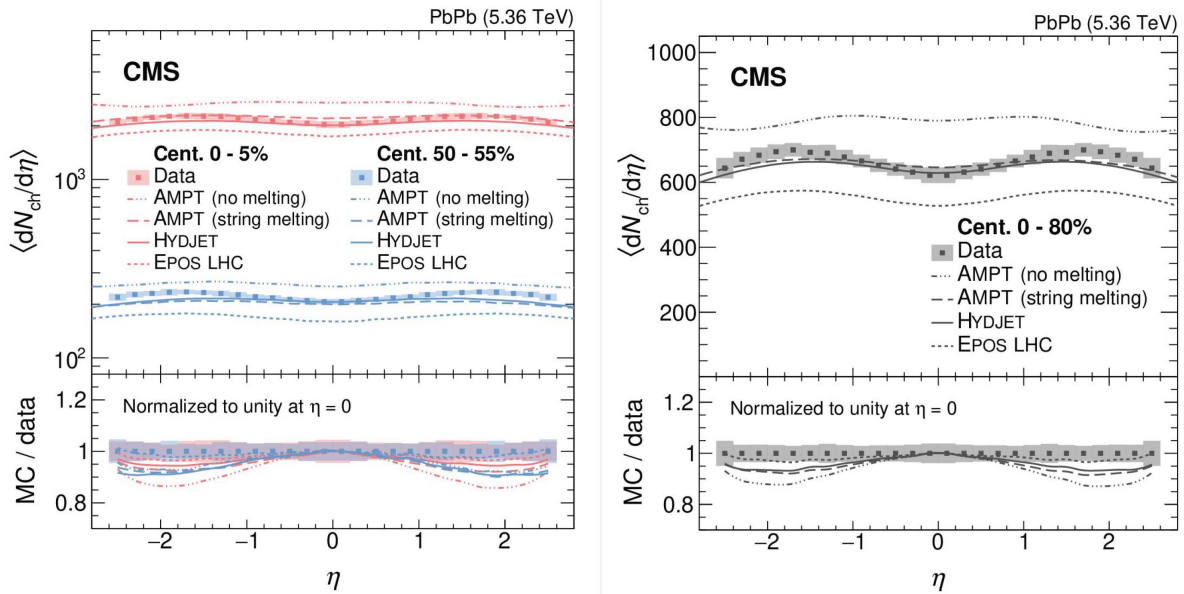


Рис. 1. Распределения заряженных частиц по псевдобыстроте для столкновений Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ для центральностей 0–5%, 50–55% (слева) и 0–80% (справа), полученные в эксперименте CMS и их сравнение с моделированием в различных Монте–Карло генераторах. Рисунки опубликованы в статье [6]

(так называемый jet quenching) из-за потерь энергии в плотной ядерной среде.

Основной блок кода генератора HYDJET++ создан на объектно-ориентированном языке C++ в среде ROOT. Жесткая часть HYDJET++ идентична аналогичной части написанного на языке Фортран генератора HYDJET, она включена в структуру программы в виде отдельного каталога. Гидродинамическая мягкая часть генератора HYDJET++ полностью отличается от гораздо более простой той же части генератора HYDJET и дает возможность более точной настройки характеристик низкоэнергичных частиц.

Данная работа была выполнена в генераторе HYDJET++ последней в данный момент версии 2.4 [5] без дополнительных специальных настроек, использовались базовые параметры для энергий ускорителя LHC.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПСЕВДОБЫСТРОТЕ И ЦЕНТРАЛЬНОСТИ

На основе экспериментальных данных, собранных в конце 2022 г. во время запуска Run3 на ускорителе LHC, коллаборация CMS представила новые результаты по распределениям заряженных частиц по псевдобыстроте и центральности для столкновений свинец-свинец (Pb–Pb) при рекордной энергии в системе центра масс на пару нуклонов  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ [6]. CMS также провела сравнение своих данных с результатами моделирования в различных Монте–Карло генераторах, в частности, в модели HYDJET, предшествующей

ке генератора HYDJET++ — см. распределения заряженных частиц по псевдобыстроте для центральностей 0–5%, 50–55% и 0–80% на рис. 1.

С помощью Монте–Карло генератора HYDJET++ (использовались базовые настройки параметров для энергий ускорителя LHC) авторами данной работы были построены распределениям заряженных частиц по псевдобыстроте для столкновений Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ. Было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными установки CMS — см. рис. 2. Как можно заметить, генератор HYDJET++ хорошо описывает реальные данные, особенно в центральной области. В областях по псевдобыстроте  $1.0 < |\eta| < 2.4$  наблюдается небольшая недооценка числа родившихся частиц генератором, не превышающая 10%. Отметим, что аналогичный характер поведения зависимостей имеется и для генератора HYDJET с настройками от коллаборации CMS [6] — см. красную (слева) и черную (справа) сплошные линии на рис. 1. Отметим, что модели AMPT [7] и EPOS [8] ведут себя аналогичным образом, даже еще сильнее искажая форму распределения по сравнению с экспериментальными данными коллаборации CMS.

Также с помощью Монте–Карло генератора HYDJET++ (те же базовые параметры для энергий коллайдера LHC) получены распределения зависимости среднего числа заряженных частиц на единицу псевдобыстроты в области  $|\eta| < 0.5$  от центральности соударения в диапазоне от 0 до 80% (с шагом 5%) для столкновений Pb–Pb при той же энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ (рис. 3). Видна хорошая

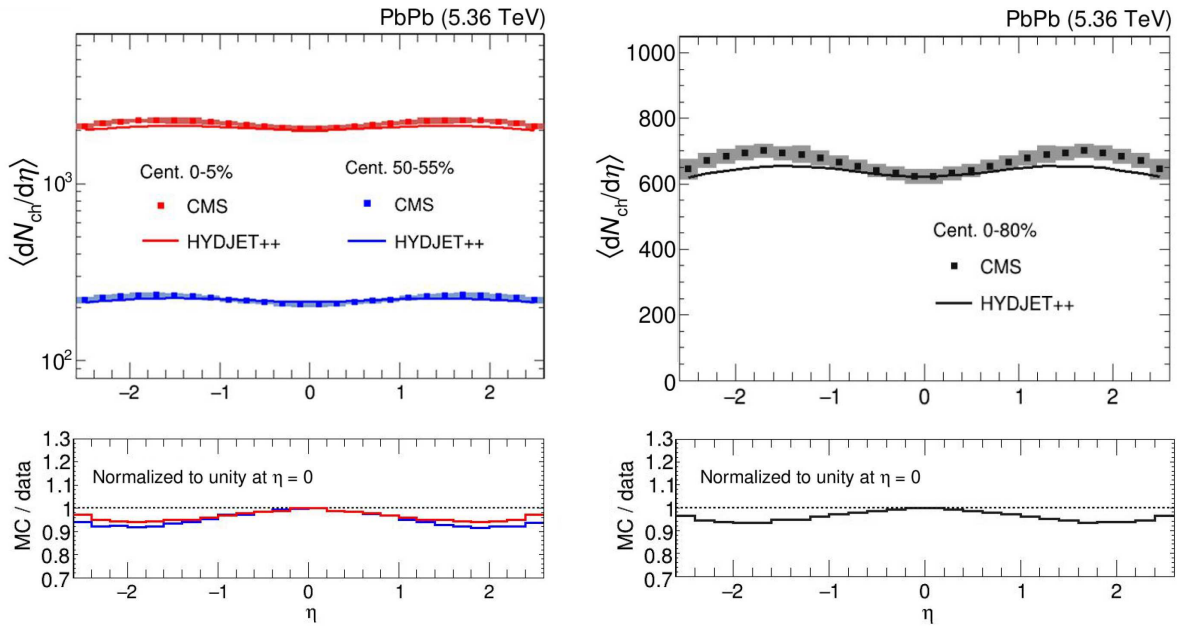


Рис. 2. Распределения заряженных частиц по псевдобыстроте для столкновений Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ для центральностей 0–5%, 50–55% (слева) и 0–80% (справа), полученные с помощью генератора HYDJET++ [3] и в эксперименте CMS [6]

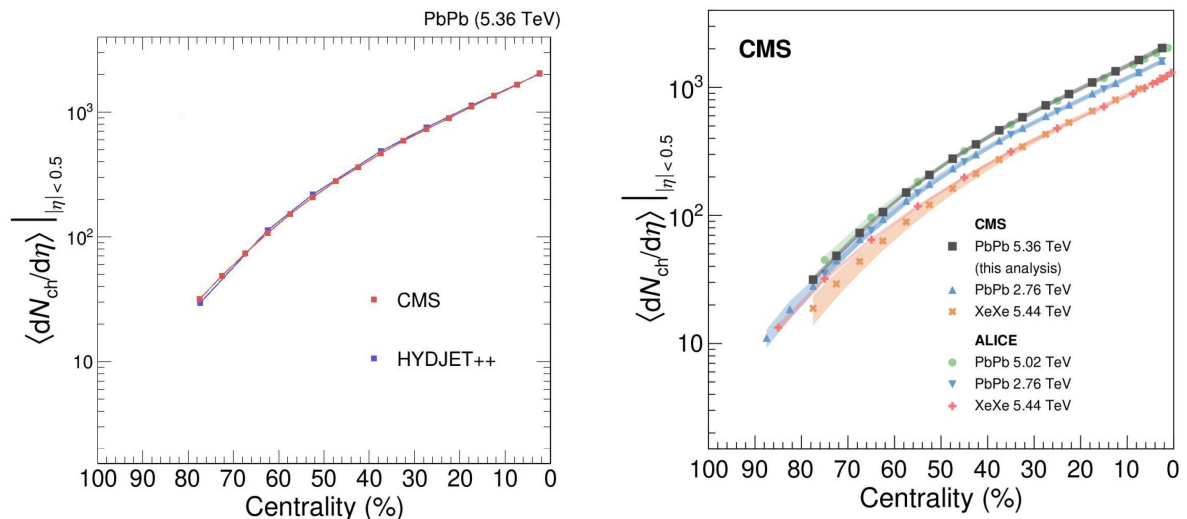


Рис. 3. Зависимости среднего числа заряженных частиц на единицу псевдобыстроты в области  $|\eta| < 0.5$  от центральности в диапазоне от 0 до 80% (с шагом 5%) для столкновений Pb–Pb при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ, полученные с помощью генератора HYDJET++ [3] и в эксперименте CMS [6]. Рисунок справа опубликован в статье [6]

корреляция между распределениями экспериментальных данных CMS и полученными в генераторе HYDJET++ результатами моделирования.

На следующем этапе нашей работы планируется получение распределений для псевдобыстроты и центральности заряженных частиц с помощью Монте-Карло генератора HYDJET++ с параметрами, использованными коллаборацией CMS для генератора HYDJET для уточнения применимости и качества подобной настройки. Также будет проведена дальнейшая детальная настройка параметров модели HYDJET++

с целью получения распределений и других глобальных физических наблюдаемых (таких как распределение заряженных частиц по поперечному импульсу, импульсные зависимости коэффициентов анизотропного потока и др), максимально близких к экспериментальным данным при энергиях коллайдера LHC.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается проведенное с помощью Монте-Карло генератора HYDJET++ моделирование

рождения частиц в соударениях Pb–Pb при рекордной энергии взаимодействия в системе центра масс на пару нуклонов  $\sqrt{s_{NN}} = 5.36$  ТэВ. Проведено сравнение результатов генерации моделью HYDJET++ распределений по псевдобыстроте и центральности с аналогичными экспериментальными данными коллаборации CMS на коллайдере LHC, полученными во время запуска Run3. Показано, что генератор HYDJET++ даже без дополнительной настройки хорошо описывает полученные распределения. Дальнейшая работа по настройке параметров модели позволит достичь еще более точного описания данных.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность Организаторам XXVI межвузовской молодежной

научной школы-конференции имени Б. С. Ишханова за возможность представить устный доклад. Большое спасибо авторам Монте–Карло генератора HYDJET++ за предоставленный компьютерный код и помощь с его запуском, 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 данные, полученные на ускорителе LHC.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

- 
- [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., Snigirev A.M. // Eur. Phys. J. C.* **45**, 211 (2006).  
[5] <http://lav01.sinp.msu.ru/igor/hydjet++/>  
[6] *Hayrapetyan A. et al. (CMS Collaboration) // Phys. Lett. B.* **861**, 139279 (2025).  
[7] *Lin Z.-W., Ko C.M., Li B.-A. et al. // Phys. Rev. C.* **72**, 064901 (2005).  
[8] *Drescher H.J., Hladik M., Ostapchenko S. et al. // Phys. Rept.* **350**, 93 (2001).

## Charged-particle pseudorapidity and centrality distributions in Pb–Pb collisions at 5.36 TeV in the HYDJET++ model and comparison with LHC data

V. S. Bratyshev<sup>1,a</sup>, D. A. Miagkov<sup>1,2</sup>, S. V. Petrushanko<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>3</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia*  
E-mail: <sup>a</sup>bratyshev.vs22@physics.msu.ru

This work presents a comparison of the CMS experimental data on charged-particle pseudorapidity and centrality distributions in Pb–Pb collisions at record energy 5.36 TeV at the LHC with the results obtained from the HYDJET++ Monte Carlo generator using simulation with its default settings.

PACS: 25.75.-q; 12.38.Mh; 13.75.Cs.

*Keywords:* relativistic heavy-ion collision, quark-gluon plasma, pseudorapidity distributions

*Received 25 March 2026.*

### Сведения об авторах

1. Братышев Владислав Сергеевич — студент; e-mail: bratyshev.vs22@physics.msu.ru.
2. Мягков Данила Александрович — аспирант; e-mail: miagkov.da19@physics.msu.ru.
3. Петрушанко Сергей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, тел.: (495) 939-12-57, e-mail: petrushankosv@my.msu.ru.