

О ПРИМЕНЕНИИ ГЕНЕРАТОРОВ EPOS4, UrQMD (LHC) И PHQMD ДЛЯ АНАЛИЗА СОБЫТИЙ В ФИЗИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

К. В. Размыслов^{1,}, В. В. Монахов¹, Ф. Ф. Валиев¹,
М. А. Жаров¹, К. А. Галактионов¹*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведено сравнение результатов работы генераторов событий EPOS4, UrQMD 3.4 (LHC) и PHQMD на примере моделирования pp -столкновений при сверхвысоких энергиях (7 ТэВ) и UrQMD и PHQMD на примере Xe–W-столкновений. Показано нарушение в EPOS4 законов сохранения энергии, барионного и электрического зарядов. Показано, что, несмотря на выполнение рассмотренных законов в PHQMD для pp -столкновений, наблюдается невыполнение закона сохранения энергии для ион-ионных столкновений в области шириной 10% от рассмотренной энергии столкновения. Осуществлено сравнение с экспериментальными данными, и изучено влияние фильтраций событий на процесс выполнения рассмотренных законов сохранения.

A comparison of the results obtained from event generators EPOS4, UrQMD 3.4 (LHC), and PHQMD is performed using the example of simulating pp collisions at ultra-high energies (7 TeV), as well as UrQMD and PHQMD for Xe–W collisions. Violations of energy, baryon, and electric charge conservation laws in EPOS4 are demonstrated. It is shown that, despite the fulfillment of these laws in PHQMD for pp collisions, the energy conservation law is violated for ion–ion collisions within a range of 10% of the considered collision energy. A comparison with experimental data is carried out, and the influence of event filtering based on the fulfillment of the considered conservation laws is studied.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа экспериментов в области сверхвысоких энергий на LHC и NICA требуется сравнение с результатами теоретического моделирования, проводимого с помощью генераторов событий столкновения частиц. Примерами актуальных генераторов событий являются EPOS4.0.0 [1, 2], UrQMD 3.4 (LHC) [3] и PHQMD [4], они и использовались в работе. Корректное моделирование должно обеспечивать выполнение законов сохранения энергии, электрического, барионного и лептонного зарядов.

* E-mail: st097914@student.spbu.ru

В дополнение к предыдущей работе [5] мы провели изучение законов сохранения для генератора RHQMD и рассмотрели Xe–W-столкновения для проведения аналогичных проверок в ион-ионных взаимодействиях. Выбор столкновений пучка Xe с мишенью W с энергией 2,5 ГэВ/нуклон Xe в лабораторной системе обусловлен ожиданием таких пучков для калибровки экспериментов MPD и SPD на NICA [6].

Протон-протонные столкновения вручную задавались с нулевым прицельным параметром. Для Xe–W параметр брался случайным образом от нуля до усредненного радиуса ядра.

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЗАРЯДОВ

Для протон-протонных столкновений была проведена проверка сохранения барионного (B), лептонного (L) и электрического (Q) зарядов для генератора RHQMD. Так, поведение генератора схоже с поведением UrQMD, а именно наблюдается выполнение законов сохранения зарядов в системе для pp -столкновений при $\sqrt{S_{nn}} = 7$ ТэВ (рис. 1), в противовес

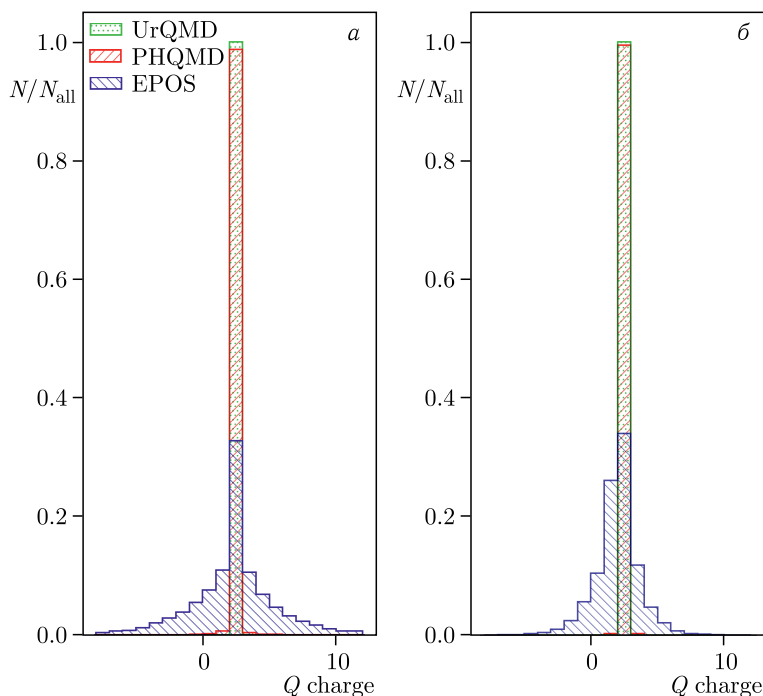


Рис. 1. Распределения финальных электрических и барионных зарядов системы для трех генераторов для pp -столкновений

EPOS4, который, как было показано ранее [5], демонстрирует нарушение сохранения барионного и электрического зарядов при запуске с рекомендованными авторами настройками [1] (см. рис. 1).

В Xe–W-событиях RHQMD показал выполнение сохранения зарядов в системе, аналогичное pp -событиям.

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В дополнение к прошлой работе [5], мы подробнее изучили форму распределения pp -столкновений при 7 ТэВ, получаемого из данных EPOS4: в пике находится порядка 13 % событий, тогда как остальные находятся в хвостах (рис. 2). Мы считаем важным обратить внимание, что пик сам по себе действительно узкий, однако хвосты уходят далеко от него в обе стороны. UrQMD показал 75 % в пике, а RHQMD — лучший результат в 98 %. Несовпадение положения пика RHQMD и остальных генераторов на рисунке объясняется особенностью задания начальных условий в лабораторной системе отсчета.

В результате анализа распределений конечных энергий системы было показано, что для pp -столкновений RHQMD дает высокую точность

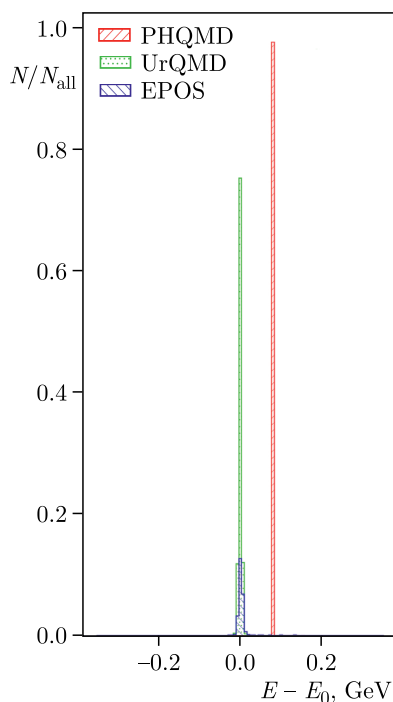


Рис. 2. Распределения итоговых энергий системы для трех генераторов

аналогично UrQMD. Однако при рассмотрении в RHQMD столкновений Xe–W (рис. 3) мы наблюдаем значительное уширение распределения (порядка 10% от значения) и его двугорбую форму. На данный момент не установлены причины такой формы распределения. Для уточнения такого результата и выявления его причин мы планируем рассмотреть другие генераторы и моделирование иных ион-ионных столкновений.

Для RHQMD был получен сходный результат и для событий столкновений Au–Au с начальной энергией 11 ГэВ/нуклон в системе центра масс, а именно, наличие уширения и двугорбой формы пика (рис. 4). Так как моделирование Xe–W и Au–Au проводилось двумя разными

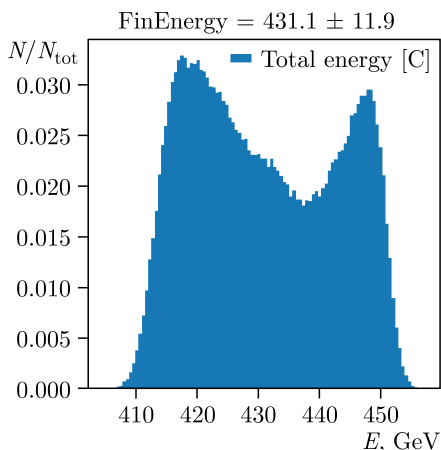


Рис. 3. Распределение финальной энергии для Xe–W-событий в RHQMD

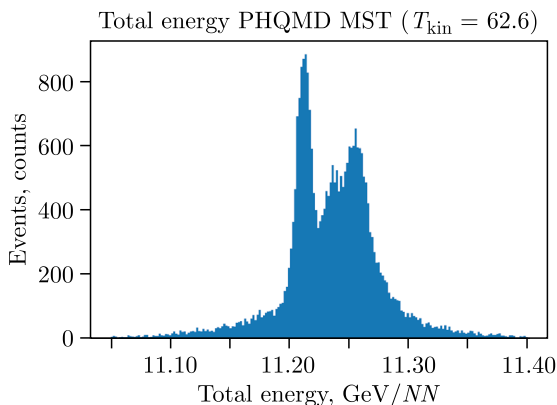


Рис. 4. Распределение финальной энергии на нуклон для Au–Au-событий в RHQMD

авторами работы независимо, с независимым написанием программного кода, наличие таких схожих распределений подтверждает, что это не ошибка в формуле или коде программы анализа, а особенность генератора PHQMD. Причина подобного нарушения закона сохранения энергии при моделировании ион-ионных столкновений требует дальнейшего изучения.

РАССМОТРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ЧАСТИЦ

В работе [5] мы сравнивали результаты моделирования множественности рождения заряженных частиц с экспериментальными данными ALICE [7]. Мы дополнили данное исследование и получили, что в области нуля PHQMD ведет себя похоже на UrQMD (рис. 5).

Как и UrQMD, PHQMD имеет худшее совпадение с экспериментальными данными по множественности заряженных частиц по сравнению с EPOS4. Зависимость имеет правильный вид, однако существует выброс в нуле, а горб распределения сдвинут.

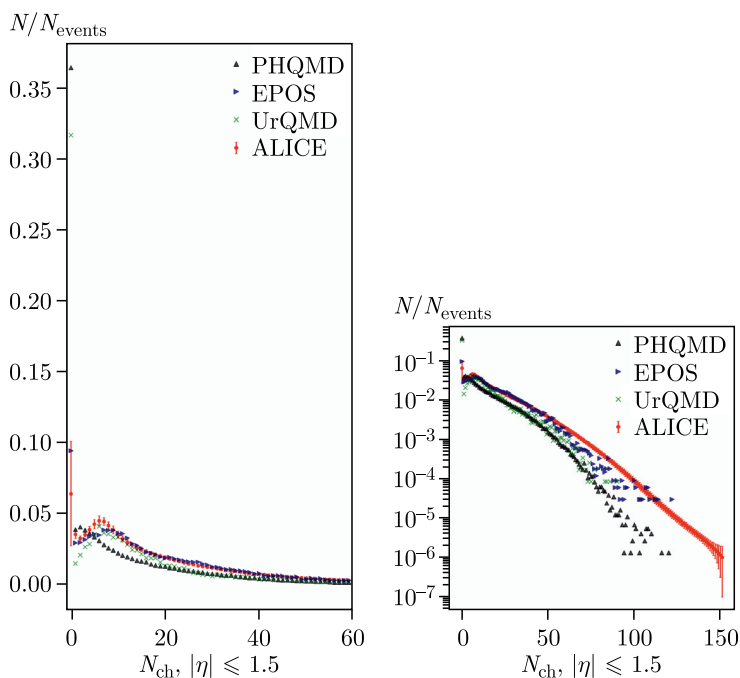


Рис. 5. Распределение событий по множественности рожденных заряженных частиц в диапазоне псевдобыстрот $|\eta| \leq 1,5$

Для Xe–W было проведено сравнение по угловым распределениям отдельных сортов частиц с данными авторов генератора RHQMD и иными моделями и наблюдениями [4, 8, 9]. Мы получили сходные результаты, что говорит о корректности постановки моделирования и требует детального изучения вышеуказанного распределения событий по конечной энергии.

ФИЛЬТРАЦИЯ СОБЫТИЙ

В отличие от EPOS, фильтрация *pp*-событий UrQMD и RHQMD возможна, так как число событий, в которых законы сохранения нарушаются, не так велико. Неприменимость фильтрации для EPOS4 для распределений множественности заряженных частиц была показана в прошлой работе [5]. Дополнительно нами было выявлено, что для EPOS4 практически нет корреляций между несохранением различных величин, которые мы рассматривали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дополнение к результатам работы [5] о невыполнении законов сохранения энергии, барионных и электрических зарядов при моделировании *pp*-столкновений в EPOS4 и их выполнении в UrQMD было показано выполнение законов сохранения в RHQMD. Однако было выявлено, что выполнение с высокой точностью законов сохранения в *pp*-столкновениях не гарантирует сохранения энергии при моделировании ион-ионных столкновений. Были уточнены ширины и формы распределений рассмотренных величин. Для протон-протонных событий RHQMD показал наилучшие результаты. Для них же возможно исключение тех немногих событий, в которых законы все же не выполняются. В свою очередь, значительное уширение распределения по энергии для ион-ионных событий, полученных при помощи RHQMD, требует дальнейшего изучения.

В дальнейшем планируется осуществление поиска этапов моделирования, которые приводят в генераторах событий к нарушениям законов сохранения.

Доклад по теме работы был представлен на международной конференции «Ядро-2025» в Санкт-Петербурге.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке СПбГУ (проект 103821868).

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Werner K. EPOS4: A Monte Carlo Tool for Simulating High-Energy Scatterings. <https://klaus.pages.in2p3.fr/epos4>. 2022.
2. 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, No. 6. P. 064903.
3. *Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C., Bass S. A., Ernst C., Soff S., Bravina L., Belkacem M., Weber H., Stocker H., Greiner W.* Relativistic Hadron–Hadron Collisions in the Ultra-Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model // *J. Phys. G*. 1999. V. 25, No. 9. P. 1859.
 4. *Aichelin J., Bratkovskaya E., Le Fevre A., Kireyeu V., Kolesnikov V., Leifels Y., Voronyuk V., Coci G.* Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics (PHQMD) — A Novel Microscopic N -Body Transport Approach for Heavy-Ion Collisions, Dynamical Cluster Formation and Hypernuclei Production // *Phys. Rev. C*. 2020. V. 101, No. 4. P. 044905.
 5. *Razmyslov K. V., Monachov V. V., Valiev F. F., Zharov M. A.* On the Applicability of the EPOS4 and UrQMD (LHC) Generators for the Analysis of 7 TeV pp Collisions // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2025. V. 89, No. 8. P. 1343–1346.
 6. *NICA Collab.* NICA Project Facility. <https://nica.jinr.ru>. 2025.
 7. *Adam J., Adamová J. et al. (ALICE Collab.).* Charged-Particle Multiplicities in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ to 8 TeV // *Eur. Phys. J. C*. 2017. V. 77, No. 1. P. 1–39.
 8. *Jiang Z., Zhang Y., Zhang H., Deng H.* A Description of the Pseudorapidity Distributions in Heavy Ion Collisions at RHIC and LHC Energies // *Nucl. Phys. A*. 2015. V. 941. P. 188–200.
 9. *NA49 Collab.* Energy Dependence of Pion and Kaon Production in Central Pb + Pb Collisions // *Phys. Rev. C*. 2002. V. 66. P. 054902.