Simulation of Heavy-Ion Collisions for the SPD BBC prototype
Моделирование столкновения тяжёлых ионов для прототипа детектора BBC SPD

K.S. Volkova[1], *I.S. Volkov V.P. Ladygin*

К.С. Волкова[1], *И.С. Волков В.П. Ладыгин*

Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, 141980, Dubna, Moscow region, Russia

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

Изучение столкновений тяжёлых ионов при промежуточных энергиях является ключевым направлением будущей экспериментальной программы на ускорительном комплексе NICA. В рамках мероприятий по вводу коллайдера в эксплуатацию планируется установка прототипа BBC в точке взаимодействия SPD. Для определения предварительных условий работы детектора было выполнено моделирование столкновений ^{124}Xe+W при энергии пучка 3 ГэВ/нуклон с использованием программного пакета Geant4. Использовались различные генераторы событий для оценки систематических неопределённостей и повышения надёжности результатов. Результаты моделирования имеют важное значение для оптимизации конфигурации детектора и интерпретации первых экспериментальных данных.

The study of heavy-ion collisions with intermediate energies is a key direction of the future experimental program at the NICA accelerator complex. Within the scope of the collider commissioning activities, the installation of BBC prototype is planned at the SPD interaction point. To determine the preliminary operation conditions for the detector, the simulation of ^{124}Xe+W collisions at 3 GeV/nucleon was performed using the Geant4 framework. Different event generators were used to assess systematic uncertainties and enhance the reliability of the results. The simulation results are essential for optimizing the detector configuration and interpreting the first experimental data.

PACS: 02.70.−c; 07.05.Tp; 36.40.−c; 07.77.Ka; 05.10.Ln

Введение

Ускорительный комплекс Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) находится в стадии активного строительства и разработки, его запуск позволит создать уникальные условия для исследования спиновой физики и физики тяжёлых ионов [1]. Параллельно с развитием ускорительного комплекса ведётся разработка физических и инженерных решений для различных детекторов. В рамках проекта NICA разрабатывается

[1]E-mail: legostaeva@jinr.ru

[1]E-mail: legostaeva@jinr.ru

установка Spin Physics Detector (SPD) [2], одним из ключевых элементов которого является Beam-Beam Counter (BBC) [3].

На начальном этапе работы коллайдера NICA, так называемой “фазе 0”, предусматривается установка уменьшенной версии BBC в точке пересечения пучков в зоне SPD. Для проведения первых тестовых испытаний детектора в условиях взаимодействия с пучком планируется использовать неподвижную твердотельную мишень, размещённую внутри ионопровода. Этот подход позволит оценить работоспособность разных систем BBC до начала полномасштабных эсперимента на встречных пучках.

Для оценки загрузок и отклика детектора BBC в рамках “фазы 0” было проведено моделирование методом Монте-Карло с использованием пакета Geant4 [4–6]. В качестве генераторов событий использовались Dubna Cascade Model and Statistical Multifragmentation Model (DCM-SMM) [7], Ultra Relativistic Quantum Molecular Dynamics (UrQMD) [8, 9] и Parton-Hadron-Quantum-Molecular Dynamics (PHQMD) [10], включающие в себя алгоритмы кластеризации рождающихся частиц. Это позволяет исследовать динамику взаимодействия ядерных кластеров с детектором. На первом этапе моделирования изучалась работа детектора на уровне генератора событий, в то время как на последующих этапах в модель Geant4 были включены эффекты рассеяния на воздухе и ионопроводе.

Генераторы событий

Исследование процессов образования кластеров и гиперядер в столкновениях тяжёлых ионов представляет собой одну из активно развивающихся областей как экспериментальной, так и теоретической ядерной физики. Образование этих слабосвязанных объектов чрезвычайно чувствительно к динамической эволюции ядерной системы и межчастичным взаимодействиям, что обуславливает сложность их теоретического описания.

В рамках данной работы были сгенерированы столкновения ионов ксенона (^{124}Xe) с ядрами вольфрама (W) при энергии 3 ГэВ/нуклон в режиме неподвижной мишени в лабораторной системе отсчёта. Использовались три генератора событий, которые включают модели кластеризации частиц в конечном состоянии.

Монте-Карло генератор столкновений тяжёлых ионов DCM-SMM объединяет в себе модель дубненского каскада (DCM-QGSM) и статистическую модель мультифрагментации (SMM) [7]. Этот подход позволяет моделировать широкий спектр продуктов реакций – от легких частиц до ядерных и гиперядерных фрагментов – в столкновениях тяжёлых ионов в диапазоне энергий от сотен МэВ до сотен ГэВ. Модель DCM-SMM включает в себя ряд физических явлений, таких как расширенная коалесценция, мультифрагментация, образование гиперфрагментов, завихренность ядерной материи и поляризация гиперонов.

UrQMD представляет собой транспортный подход, предназначенный для моделирования столкновений тяжёлых ионов в широком диапазоне энергий, от SIS до RHIC [8, 9]. Начиная с версии 4.0, в UrQMD реализована возможность учёта коалесценции, позволяющая формировать различные (анти)ядра и гиперядра, такие как дейтрон, тритон, ядра ^{3}He, ^{4}He, а также гиперядра $^3\Lambda$H, $^4\Lambda$H, $\Lambda\Lambda$, ΞN и ΞNN, на основе подбора оптимальных параметров коалесценции.

Многочастичный динамический транспортный подход PHQMD [10] был разработан для микроскопического описания образования ядерных кластеров и гиперядер, а также общего рождения частиц в релятивистских столкновениях тяжёлых ионов. В отличие от часто используемых моделей коалесценции или статистических подходов, PHQMD динамически моделирует образование кластеров за счёт непосредственно барионных взаимодействий, описываемых в рамках квантовой молекулярной динамики (QMD). Идентификация кластеров осуществляется с использованием алгоритмов Minimum Spanning Tree (MST) или Simulated Annealing Cluster Algorithm (SACA), которые позволяют найти наиболее энергетически выгодные конфигурации нуклонов и кластеров. Моделирование адронных столкновений, образования кварк-глюонной плазмы и партонной динамики в PHQMD реализовано аналогично подходу Parton-Hadron-String Dynamics (PHSD) [11, 12].

Модель детектора в Geant4

Для моделирования детекторной системы, включающей как геометрию, так и физические свойства сцинтилляторов, был задействован программный пакет Geant4 [4–6]. Он зарекомендовал себя как один из наиболее мощных и широко используемых инструментов в области ядерной и адронной физики, позволяющий с высокой точностью моделировать прохождение элементарных частиц через различные среды. Его наиболее важные возможности включают детальное отслеживание траекторий частиц, учёт всех существующих физических взаимодействий, расчёт потерь энергии, а также генерацию вторичных частиц. Это позволяет не только оптимизировать архитектуру детекторных систем до их физической реализации, но и прогнозировать их отклик на различные типы излучения, а также оценивать вклад фоновых процессов и систематических неопределённостей.

Моделируемая детекторная система представляет собой прототип BBC [3], который был размещён на расстоянии 3 метров от точки взаимодействия. Прототип состоит из 5 рядов, содержащих в общей сложности 128 отдельных сцинтилляционных элементов (рис. 1). Такая сегментация обеспечивает необходимую гранулярность для определения угловых распределений и множественности рождающихся частиц. Материалом детектора был выбран полистирол – распространенный пластмассовый сцинтиллятор, который близок по своим свойствам к сцинтиллятору, использованному в прототипе.

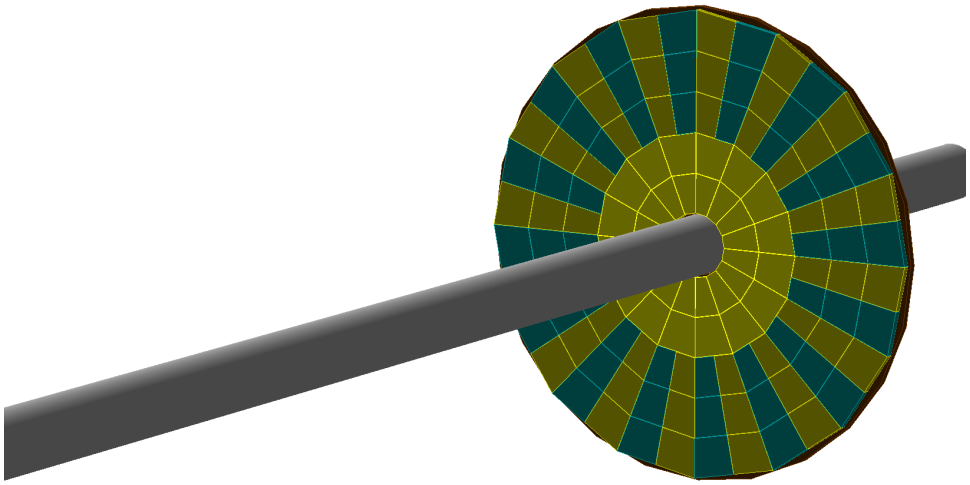


Рис. 1. Визуализация прототипа BBC в Geant4.

На начальном этапе моделирования, с целью выделения ключевых физических эффектов, были приняты следующие упрощения: сцинтилляция в детекторе была искусственно отключена (для фокусировки на трекинге частиц без учёта световыхода), окружающая среда была задана как вакуум, а конструктивные элементы, такие как вакуумная труба пучка и подложка детектора, были исключены из геометрического описания.

Дальнейшее развитие модели привело к созданию более реалистичной версии, которая учитывает важные для экспериментальной физики эффекты рассеяния частиц и их взаимодействия с окружающими материалами. Эта модель включает в себя рассеяние на воздухе, на ионопроводе и на подложке прототипа. Включение этих эффектов рассеяния в модель повышает ее реалистичность, что является важным для точного предсказания отклика детектора.

Результаты

Представленные результаты получены в ходе моделирования взаимодействия пучка ксенона (^{124}Xe) с неподвижной вольфрамовой (W) мишенью в рамках “фазы 0” с использованием различных генераторов событий. Особое внимание уделялось распределениям по загрузке детектора, множественности, количеству сработавших элементов, импульсу и времени пролета.

Все исследованные генераторы событий приводят с существенно разным распределениям по множественности ячеек детектора, сработавших в одном событии (рис. 2). В обновленной модели, учитывающей рассеяние на вспомогательных элементах установки, наблюдается небольшой рост среднего числа сработавших сцинтилляционных ячеек, составляющий около 5%.

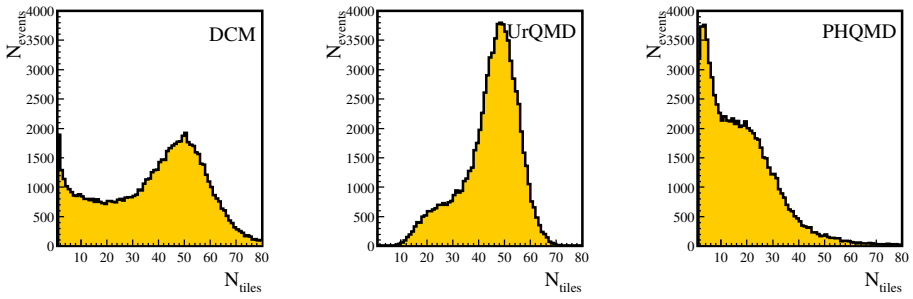


Рис. 2. Гистограммы числа сработавших элементов детектора в одном событии для различных генераторов событий.

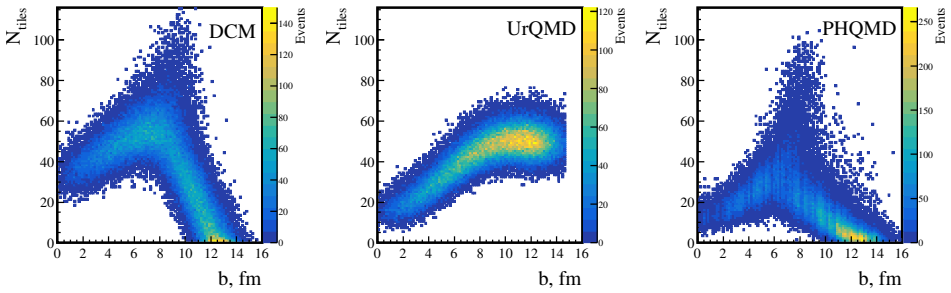


Рис. 3. Распределения зависимости множественности сработавших элементов детектора от прицельного параметра для различных генераторов событий.

Исследование распределений числа сработавших элементов детектора в зависимости от прицельного параметра выявило значительные различия между используемыми генераторами событий (рис. 3). Генератор UrQMD имеет ограниченную способность к кластеризации, тогда как другие генераторы более эффективно формируют ядерные кластеры, что может объяснить имеющееся качественное отличие.

Распределения по времени пролета демонстрируют, что почти все попадания от фрагментов ядра снаряда (^{124}Xe) регистрируются в течение первых 3 наносекунд. В обновлённой модели наблюдается расширение распределений по времени пролета (time-of-flight, TOF) для относительно тяжёлых фрагментов, начиная с ядер ^{4}He. При этом для более лёгких фрагментов (протонов, дейтронов, тритонов, ядер ^{3}He) подобного эффекта не наблюдается.

Заключение

Проведённое моделирование взаимодействия пучка ксенона (^{124}Xe) с неподвижной вольфрамовой (W) мишенью в рамках “фазы 0” с использованием различных генераторов событий позволило получить важные распределения, характеризующие загрузку детектора и количество сработавших сцинтилляционных элементов. Моделирование выявило чувствительность детектора к кластерам, а также продемонстрировало вли-

яние рассеяния на воздухе и ионопроводе на характеристики детектора, особенно для тяжёлых частиц.

Дальнейшие шаги в развитии моделирования будут сосредоточены на расширении его функциональных возможностей и повышении реалистичности. Это включает в себя моделирование рассеяния тяжёлых ионов с использованием различных типов мишеней для детального изучения влияния их состава на характеристики регистрируемых сигналов. Кроме того, детектор будет устанавливаться на разных расстояниях от точки взаимодействия вдоль трубы ускорителя. Такой подход позволит определить точные пространственные профили выходящих частиц, исследовать динамику их распространения, эффективно оценивать фоновые составляющие. Важным аспектом является также учёт реалистичных временных и энергетических разрешений детектора, что позволит повысить точность предсказаний. Также планируется исследование возможных многочастичных корреляций между отдельными элементами детектора и проведение моделирований столкновений в режиме коллайдера для изучения процессов при более высоких энергиях. Наконец, предполагается добавление второго прототипа BBC, что позволит исследовать пространственные и/или угловые корреляции между удаленными детекторами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного Института Ядерных Исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

1. *Kekelidze V.D., Lednicky R., Matveev V.A., Meshkov I.N., Sorin A.S., Trubnikov G.V.* Three stages of the NICA accelerator complex // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52, no. 8. P. 211.

2. *Abazov V. et al.* [SPD Collaboration] Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Sci. Rev. 2024. V. 1. P. 1.

3. *Tishevsky A.V., Dubinin F.A., Isupov A.Y., Ladygin V.P., Nigmatkulov G.A., Reznikov S.G., Teterin P.E., Volkov I.S., Zakharov A.M., Zhurkina A.O.* Development of the SPD Beam–Beam Counter Scintillation Detector Prototype with FERS-5200 Front-End Readout System // Phys. Atom. Nucl. 2024. V. 87, no. 4. P. 451–458.

4. *Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytracek R., Cooperman G., Cosmo G., Degtyarenko P., Dell'Acqua A., Depaola G., Dietrich D., Enami R., Feliciello A., Ferguson C., Fesefeldt H., Folger G., Foppiano F., Forti A., Garelli S., Giani S., Giannitrapani R., Gibin D., Gómez Cadenas J., González I., Gracia Abril G., Greeniaus G., Greiner W., Grichine V., Grossheim A., Guatelli S., Gumplinger P., Hamatsu R., Hashimoto K., Hasui H., Heikkinen A., Howard A., Ivanchenko V., Johnson A., Jones F., Kallenbach J., Kanaya N., Kawabata M., Kawabata Y., Kawaguti M., Kelner S., Kent P., Kimura A., Kodama T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lamanna E., Lampén T., Lara V., Lefebure V., Lei F., Liendl M., Lockman W., Longo F., Magni S., Maire M., Medernach E., Minamimoto K., Mora de Freitas P., Morita Y., Murakami K., Nagamatu M., Nartallo R., Nieminen P., Nishimura T., Ohtsubo K., Okamura M., O'Neale S., Oohata Y., Paech K., Perl J., Pfeiffer A., Pia M., Ranjard F., Rybin A., Sadilov S., Di Salvo E., Santin G., Sasaki T., Savvas N., Sawada Y., Scherer S., Sei S., Sirotenko V., Smith D., Starkov N., Stoecker H., Sulkimo J., Takahata M., Tanaka S., Tcherniaev E., Safai Tehrani E., Tropeano M., Truscott P., Uno H., Urban L., Urban P., Verderi M., Walkden A., Wander W., Weber H., Wellisch J., Wenaus T., Williams D., Wright D., Yamada T., Yoshida H., Zschiesche D.* Geant4—a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 506, no. 3. P. 250–303.

5. *Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce Dubois P., Asai M., Barrand G., Capra R., Chauvie S., Chytracek R., Cirrone G., Cooperman G., Cosmo G., Cuttone G., Daquino G., Donszelmann M., Dressel M., Folger G., Foppiano F., Generowicz J., Grichine V., Guatelli S., Gumplinger P., Heikkinen A., Hrivnacova I., Howard A., Incerti S., Ivanchenko V., Johnson T., Jones F., Koi T., Kokoulin R., Kossov M., Kurashige H., Lara V., Larsson S., Lei F., Link O., Longo F., Maire M., Mantero A., Mascialino B., McLaren I., Mendez Lorenzo P., Minamimoto K., Murakami K., Nieminen P., Pandola L., Parlati S., Peralta L., Perl J., Pfeiffer A., Pia M., Ribon A., Rodrigues P., Russo G., Sadilov S., Santin G., Sasaki T., Smith D., Starkov N., Tanaka S., Tcherniaev E., Tome B., Trindade A., Truscott P., Urban L., Verderi M., Walkden A., Wellisch J., Williams D., Wright D., Yoshida H.* Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. V. 53, no. 1. P. 270–278.

6. *Allison J., Amako K., Apostolakis J., Arce P., Asai M., Aso T., Bagli E., Bagulya A., Banerjee S., Barrand G., Beck B., Bogdanov A., Brandt D., Brown J., Burkhardt H., Canal P., Cano-Ott D., Chauvie S., Cho*

K., Cirrone G., Cooperman G., Cortés-Giraldo M., Cosmo G., Cuttone G., Depaola G., Desorgher L., Dong X., Dotti A., Elvira V., Folger G., Francis Z., Galoyan A., Garnier L., Gayer M., Genser K., Grichine V., Guatelli S., Guèye P., Gumplinger P., Howard A., Hřivnáčová I., Hwang S., Incerti S., Ivanchenko A., Ivanchenko V., Jones F., Jun S., Kaitaniemi P., Karakatsanis N., Karamitros M., Kelsey M., Kimura A., Koi T., Kurashige H., Lechner A., Lee S., Longo F., Maire M., Mancusi D., Mantero A., Mendoza E., Morgan B., Murakami K., Nikitina T., Pandola L., Paprocki P., Perl J., Petrović I., Pia M., Pokorski W., Quesada J., Raine M., Reis M., Ribon A., Ristić Fira A., Romano F., Russo G., Santin G., Sasaki T., Sawkey D., Shin J., Strakovsky I., Taborda A., Tanaka S., Tomé B., Toshito T., Tran H., Truscott P., Urban L., Uzhinsky V., Verbeke J., Verderi M., Wendt B., Wenzel H., Wright D., Wright D., Yamashita T., Yarba J., Yoshida H. Recent developments in Geant4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 835. P. 186–225.

7. *Baznat M., Botvina A., Musulmanbekov G., Toneev V., Zhezher V.* Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, no. 3. P. 303–324. arXiv:1912.09277.

8. *Bass S., Belkacem M., Bleicher M., Brandstetter M., Bravina L., Ernst C., Gerland L., Hofmann M., Hofmann S., Konopka J., Mao G., Neise L., Soff S., Spieles C., Weber H., Winckelmann L., Stöcker H., Greiner W., Hartnack C., Aichelin J., Amelin N.* Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions // Progress in Particle and Nuclear Physics. 1998. V. 41. P. 255–369.

9. *Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C., Bass S.A., Ernst C., Soff S., Bravina L., Belkacem M., Weber H., Stöcker H., Greiner W.* Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. 1999. sep. V. 25, no. 9. P. 1859.

10. *Aichelin J., Bratkovskaya E., Le Fèvre A., Kireyeu V., Kolesnikov V., Leifels Y., Voronyuk V., Coci G.* Parton-hadron-quantum-molecular dynamics: 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. arXiv:1907.03860.

11. *Cassing W., Bratkovskaya E.L.* Parton transport and hadronization from the dynamical quasiparticle point of view // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 034919. arXiv:0808.0022 [hep-ph].

12. *Cassing W., Bratkovskaya E.L.* Parton-Hadron-String Dynamics: an off-shell transport approach for relativistic energies // Nucl. Phys. A. 2009. V. 831. P. 215–242. arXiv:0907.5331 [nucl-th].