

ДЕТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКОВ ДЕТЕКТОРОВ ВНУТРЕННЕГО ТРЕКЕРА ДЛЯ КОНФИГУРАЦИИ ПЕРВОГО ФИЗИЧЕСКОГО СЕАНСА ЭКСПЕРИМЕНТА ВМ@N

*Д. А. Баранов **

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Первый физический сеанс эксперимента ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron), проведенный в начале 2023 г., нацелен на получение определенных результатов, заявленных в научно-исследовательской программе проекта NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility). По причине возросшей множественности в сравнении с предыдущими сеансами алгоритмы моделирования физических событий для детекторов внутренней трековой системы потребовали внесения значительных изменений. Рассматриваются особенности детального моделирования, подразумевающего использование методов Монте-Карло для расчета траекторий пролета заряженных частиц через вещество в совокупности с разработанными алгоритмами формирования сигнальных кластеров на микростриповых плоскостях детекторов внутренней трековой системы.

The first physics run of the ВМ@N (Baryonic Matter at Nuclotron) experiment, conducted at the beginning of 2023, was aimed at obtaining certain scientific results announced in the research program of the NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) project. Due to the increased event multiplicity, in comparison with the previous runs, the event simulation algorithms for the detectors of the inner tracker had required substantial changes. This paper discusses the features of detailed simulation, which includes using the simulation based on Monte Carlo methods in conjunction with algorithms for the signal formation on microstrip readout of the inner tracking detectors.

PACS: 07.05.Tr; 07.05.–t

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений проекта NICA [1] является изучение свойств плотной барионной материи, образуемой в результате столкновения пучка тяжелых ионов с фиксированной мишенью. Реализация научных задач по данному направлению лежит в основе исследовательской программы действующего эксперимента ВМ@N [2], восемь экспериментальных сеансов которого уже проведены. В отличие

* E-mail: dbaranov@jinr.ru

от семи предыдущих сеансов, которые являлись техническими и были направлены на тестирование и отладку компонентов детекторной установки, восьмой сеанс (физический) подразумевает выполнение полноценного анализа физических данных, собранных в ходе проведения эксперимента.

Одна из важнейших задач, направленная на исследование возможных характеристик физических событий, которые могут быть получены с использованием определенной конфигурации экспериментальной установки, заключается в проведении имитационного моделирования. Высокая множественность событий, достигаемая в первом физическом сеансе эксперимента при столкновении ионного пучка ксенона Xe с фиксированной мишенью из йодида цезия CsI при энергии взаимодействия 3,8 ГэВ/нуклон, приводит к значительной загрузке детекторов центральной трековой системы. Разработка эффективных алгоритмов детального моделирования для получения данных, максимально приближенных к экспериментальным, позволяет дать наиболее точную оценку исследуемым характеристикам, которые в дальнейшем используются при проведении процедур реконструкции и анализа физических данных. Базового моделирования на основе методов Монте-Карло, реализованного в транспортной системе Geant4 [3] в пакете VmnRoot [4], являющимся официальным программным обеспечением эксперимента VM@N, зачастую оказывается недостаточно. Необходима разработка специальных алгоритмов реалистичного моделирования, которые учитывают особенности формирования сигнала в определенных типах детекторов. Это позволяет значительно повысить точность моделирования, что является особенно важным в исследованиях физических событий с высокой множественностью.

ВНУТРЕННЯЯ ТРЕКОВАЯ СИСТЕМА

Внутренняя трековая система эксперимента предназначена для регистрации траекторий пролета заряженных частиц, рожденных в результате первичного взаимодействия пучка тяжелых ионов с фиксированной мишенью. Она состоит из высокоточных координатных детекторов с микростриповым съемом информации, которые располагаются в пространстве широкоапертурного анализирующего магнита SP-41, способного создавать магнитное поле с заранее заданными характеристиками. В конфигурации экспериментальной установки для первого физического сеанса внутренний трекер имеет гибридную структуру и состоит из полупроводникового и газового детекторов (рис. 1).

Полупроводниковый кремниевый детектор FSD (Forward Silicon Detector) представлен набором односенсорных и двухсенсорных модулей размерами 63×93 и 63×126 мм соответственно. Модули объединяются в отдельные станции, каждая из которых образована двумя полуплоскостями: верхней и нижней. В рассматриваемой конфигурации имеются четыре станции по 6, 10, 14 и 18 модулей в каждой. Плоскости

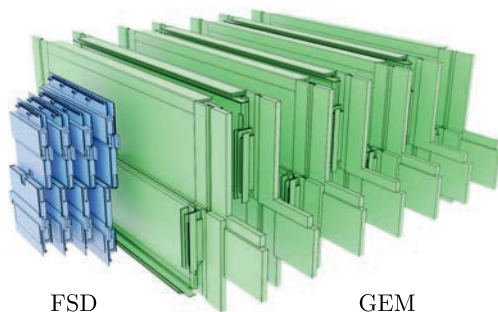


Рис. 1. Конфигурация внутреннего трекера для первого физического сеанса эксперимента VM@N

кремниевые детекторы расположены параллельно друг другу и смещены вдоль оси пучка на определенные расстояния от мишени таким образом, чтобы геометрический аксептанс детекторной установки был оптимальным для регистрации интересующего нас типа физических событий.

GEM (Gas Electron Multiplier) — газовый детектор, представленный набором ионизационных камер, в основе функционирования которых лежит принцип трехкаскадного электронного усиления. Каждая станция данного детектора формируется двумя камерами с чувствительными плоскостями размерами 163×45 и 163×39 см соответственно. Актуальная конфигурация GEM-детектора состоит из семи независимых станций, которые, как и кремниевые плоскости, расположены в пространстве магнита вдоль оси пучка.

ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Моделирование физических событий для координатных детекторов внутренней трековой системы является неотъемлемой частью базовой концепции обработки данных, принятой в среде BmnRoot (рис. 2). Полный цикл детального моделирования подразумевает выполнение нескольких этапов.

Первый этап заключается в применении методов Монте-Карло, реализованных в пакете Geant4, который был имплементирован в программную среду BmnRoot в качестве стандартного инструментария для моделирования прохождения частиц через вещество. Параметры детектора задаются посредством файла ROOT, имеющего специализированный формат описания геометрии, принятый в качестве стандартного в средах, построенных на базе фреймворка FairRoot. Качество моделирования при этом зависит от точности описания геометрии установки. Результат данной процедуры — набор так называемых точек Монте-Карло, каждая из которых содержит информацию о прохождении заряженной частицы

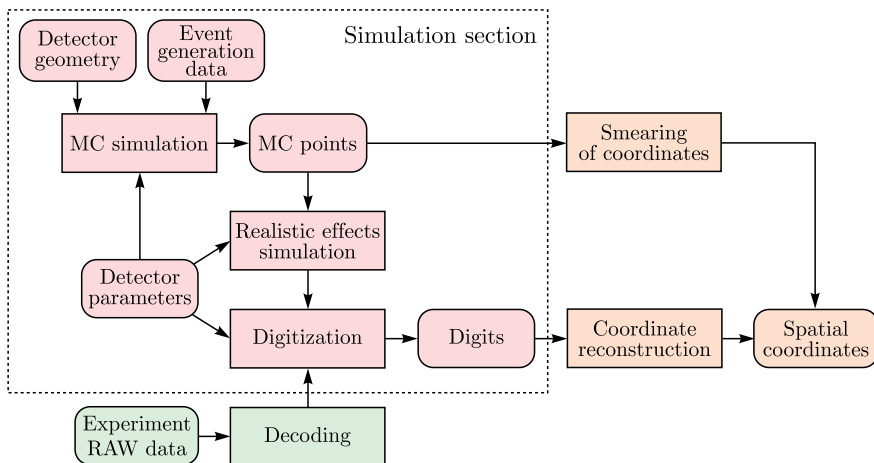


Рис. 2. Концептуальная схема обработки данных в среде BmnRoot

через чувствительный объем трекового детектора (ее тип, пространственные координаты, потеря энергии, момент импульса и др.).

Стандартное моделирование методом Монте-Карло превосходно описывает поведение пролетающих частиц в веществе, но не учитывает специфику формирования откликов на считывающих плоскостях того или иного детектора. Реальные отклики в трековом детекторе представляют собой не готовые координаты, а сигналы, распределенные на его сенсорных элементах. Исходя из этого разработаны алгоритмы реалистичного моделирования откликов, учитывающие особенности физических процессов формирования сигнала, которые зависят от типа детектора. Применение указанных алгоритмов с использованием информации Монте-Карло, полученной на первом этапе, является основой второго этапа детального моделирования.

Процесс преобразования исходных данных, будь то «сырые» данные (raw data), получаемые с реальных детекторных установок в эксперименте после процедуры декодирования, или данные, получаемые в результате моделирования методом Монте-Карло с учетом особенностей формирования реалистичных откликов, в дискретные сигналы на считывающих элементах детектора принято называть «дигитизацией» (digitization). Результат — это набор так называемых дигитов (digits), которые в случае детекторов с микростриповым съемом информации представляют собой стрипы с ненулевым уровнем сигнала. Такой унифицированный формат представления информации дает возможность использовать единый алгоритм реконструкции координат пролета заряженных частиц как для экспериментальных, так и для моделированных данных.

Как уже было упомянуто, детальное моделирование напрямую зависит от типа детекторной установки. Несмотря на то, что в основе обоих детекторов внутренней трековой системы лежит принцип ударной ионизации, имеются определенные отличия в процессах формирования сигнала, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов получения реалистичных откликов этих детекторов.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ НА МИКРОСТРИПОВЫХ ПЛОСКОСТЯХ

В результате ударной ионизации, когда пролетающая с высоким импульсом частица соударяется с атомами вещества, происходит образование носителей положительных и отрицательных зарядов, которые, двигаясь в сторону заряженных электродов, формируют сигналы на сенсорных элементах детектора.

Считывающая плоскость, фиксирующая сигнал от пролетевшей частицы, имеет два слоя, каждый из которых содержит независимый набор стрипов. При этом один слой ориентирован относительно другого на определенный стереоугол. Такая ориентация позволяет восстанавливать координаты пролета частиц, оставивших отклики на плоскости детектора, путем нахождения стриповых пересечений. Сигнал от пролетевшей частицы распределяется на смежных стрипах в виде одномерной кластерной структуры.

На рис. 3 приводятся схемы формирования сигнальных откликов на считывающих элементах детекторов FSD (слева) и GEM (справа). В слу-

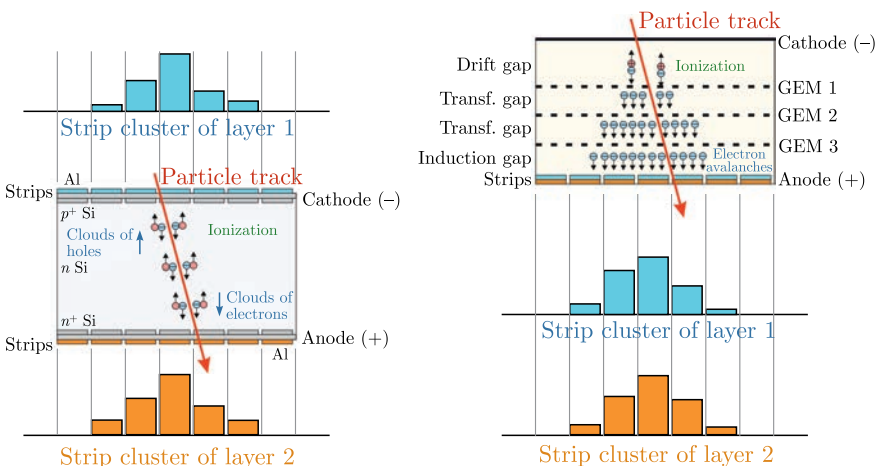


Рис. 3. Формирование сигнала от пролетевшей частицы в микростриповых детекторах FSD (слева) и GEM (справа)

чае полупроводникового детектора в качестве носителей заряда, формирующих сигнал на стрипах, выступают электронно-дырочные пары, рожденные в результате многочисленных актов ударной ионизации. Регистрируемый сигнал в GEM-детекторе на базе трехкаскадного газового электронного умножителя имеет более сложную природу формирования за счет вторичной ионизации в усиливающих промежутках, что приводит к рождению огромного числа дополнительных электронов (электронных лавин) [5].

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПРОЛЕТА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Моделирование прохождения заряженных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло на базе программного пакета Geant4 подразумевает наличие соответствующей геометрии, реализованной в формате ROOT [6]. По этой причине для актуальных конфигураций трековых детекторов было подготовлено два варианта геометрических моделей: базовый, содержащий только сенсорные элементы, и детальный, который полностью описывает конструкцию детекторных установок, включая пассивные элементы, такие как рамки, электронные платы и другие компоненты, влияющие на точность моделирования методом Монте-Карло.

Выбор определенной модели генератора физических событий зависит от целей исследования. В настоящее время в программной среде VmnRoot имеется широкий спектр различных моделей, таких как UqQMD [7], QGSM [8], DCM-SMM [9] и др., каждая из которых делает акцент на определенных типах взаимодействий.

По причине большого числа параметров, описывающих конкретный детектор, которые необходимо учитывать на различных этапах обработки данных, было решено отказаться от стандартных PAR-файлов, являющихся неформатированным текстом, и заменить их на файлы XML-формата. Такое нововведение позволило значительно упростить работу с параметрами.

Данные, полученные в результате моделирования методом Монте-Карло, представляют собой набор точек, с помощью которого полностью описываются траектории пролета заряженных частиц через плоскости трековых детекторов для каждого разыгранного события.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛИСТИЧНЫХ ОТКЛИКОВ

Разработанные алгоритмы моделирования откликов на считывающих элементах микростриповых детекторов позволяют получать данные, максимально приближенные к экспериментальным, которые приводят-

ся к единому формату после процедур декодирования и дигитизации. Это дает возможность получить оценочные характеристики детекторов, включающие оценку эффективности их использования при проведении тех или иных физических исследований. Более того, наличие реалистичных откликов является основой для тестирования, отладки и оценки качества разрабатываемых алгоритмов реконструкции. Хорошо отлаженные на моделированных данных алгоритмы показывают высокую эффективность в задачах обработки экспериментальных данных.

В основе разработанных алгоритмов моделирования реалистичных откликов для рассматриваемых детекторов находятся особенности физических процессов, ответственных за формирование сигнала. В качестве исходных данных выступает информация, полученная на этапе моделирования методом Монте-Карло. Выходные данные представляют собой одномерные кластеры на стриповых слоях, являющиеся откликами детектора на пролетевшие через него высокоимпульсные частицы.

Алгоритм моделирования кластеров в полупроводниковом FSD-детекторе состоит из следующих шагов (рис. 4).

1. Извлечение необходимой информации из данных Монте-Карло: координаты точек входа (In) и выхода (Out) частицы в активной области детектора, а также ее ионизационные потери энергии.

2. Определение траектории пролета частицы через активную область детектора.

3. Задание точек взаимодействия частицы с веществом вдоль траектории ее пролета. Для упрощения выбирается фиксированная величина шага: в нашем случае в интервале от 1 до 10 мкм. Суммарная величина потери энергии частицей распределяется поровну между взаимодействиями и учитывается на следующем шаге при распределении заряда на стрипах.

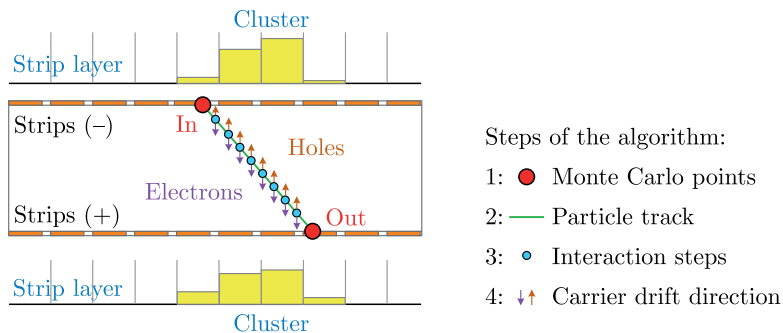


Рис. 4. Этапы алгоритма моделирования кластеров в полупроводниковом FSD-детекторе

4. Проецирование носителей заряда из точек взаимодействия на стриповые слои как результат имитации их дрейфа в продольном направлении и распределение их попаданий («размазка») для учета поперечного дрейфа. В случае магнитного поля добавляется смещение в поперечном направлении (как результат влияния силы Лоренца), которое зависит от величин магнитного и электрического полей, а также типа носителя заряда (электрона или дырки).

Полученные таким образом наборы кластеров имитируют реальные отклики на считывающих элементах детектора. Задание и подбор конкретных значений параметров алгоритма осуществлялись на основании данных, которые были собраны в ходе эксперимента, а также характеристик детектора, актуальных для проведенного физического сеанса.

Алгоритм моделирования кластеров в GEM-детекторе имеет некоторые отличия от предыдущего алгоритма за счет более сложной природы формирования сигнала в трехкаскадных газовых электронных умножителях. Для нахождения необходимых параметров, которые учитываются в алгоритме, был использован ряд дополнительных утилит, с помощью которых были проведены соответствующие расчеты. Детальная карта электрического поля была получена посредством инструментов GMSH [10] и ELMER [11], на ее основании было выполнено детальное моделирование физических процессов в среде Garfield++ [12]. В результате этих процедур были определены необходимые зависимости и распределения, которые приводятся в работе [13]. Использование указанной информации позволило разработать алгоритм моделирования кластеров с учетом особенностей формирования сигнала, что дает возможность получения результатов, имеющих максимальное сходство с данными, собранными в ходе эксперимента. Ниже приводятся этапы алгоритма моделирования кластеров в GEM-детекторе (рис. 5).

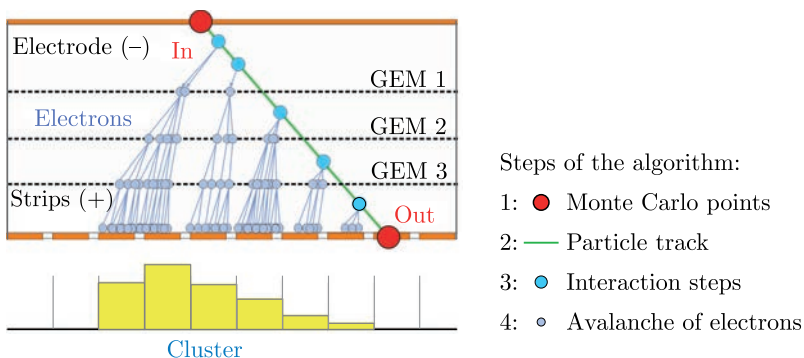


Рис. 5. Этапы алгоритма моделирования кластеров в GEM-детекторе

1. Извлечение информации из данных Монте-Карло: координаты точек входа (In) и выхода (Out) частицы в активной области детектора, а также ее тип, импульс и энергетические потери.

2. Определение траектории пролета частицы через активную область детектора.

3. Разыгрывание точек взаимодействия частицы с веществом вдоль траектории ее пролета, которые определяются исходя из средней длины свободного пробега определенного типа частицы на основании экспоненциального распределения, полученного с помощью Garfield++ для газовой смеси $\text{ArC}_4\text{H}_{10}$ в соотношении 80:20, актуальной для конфигурации первого физического сеанса. На данном этапе учитываются тип частицы и ее импульс, которые определяют среднюю длину свободного пробега.

4. Моделирование рождения вторичных электронов (электронных лавин) в усиливающих каскадах камеры (GEM1, GEM2 и GEM3), а также моделирование их дрейфа на основании полученных в пакете Garfield++ зависимостей и распределений для актуальной конфигурации детектора первого физического сеанса эксперимента. Описание данной процедуры приводится в работах [13, 14]. Важно отметить, что информация о потерях энергии пролетевшей частицы не используется для определения уровня сигнала на стрипах на данном этапе, так как основной вклад в его формирование вносят вторичные электроны, количество которых зависит от коэффициента усиления камеры (10^4 – 10^5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы моделирования реалистичных откликов детекторов внутреннего трекера позволяют получать данные, которые учитывают факторы, влияющие на распределение сигналов на микростриповых плоскостях. Используемые ранее упрощенные алгоритмы, основанные на «размазке» координат точек моделирования методом Монте-Карло в соответствии с нормальным распределением, очень приближенно описывали экспериментальные данные. Не учитывались особенности формирования сигналов в конкретных типах детекторов, углы пролета частиц к детектирующей плоскости, появление ложных пересечений, образуемых в результате реконструкции, и др.

Добавление реалистичного моделирования в дополнение к стандартному моделированию методом Монте-Карло позволило получить достоверные оценки распределений отклонения реконструированных координат для детекторов внутреннего трекера. В качестве примера приводятся распределения отклонений восстановленных координат кластера от их известных значений, а также распределения количества стрипов в кластере для детекторов FSD (рис. 6) и GEM (рис. 7).

Представленные графики актуальны для конфигурации детекторов внутренней трековой системы первого физического сеанса эксперимен-

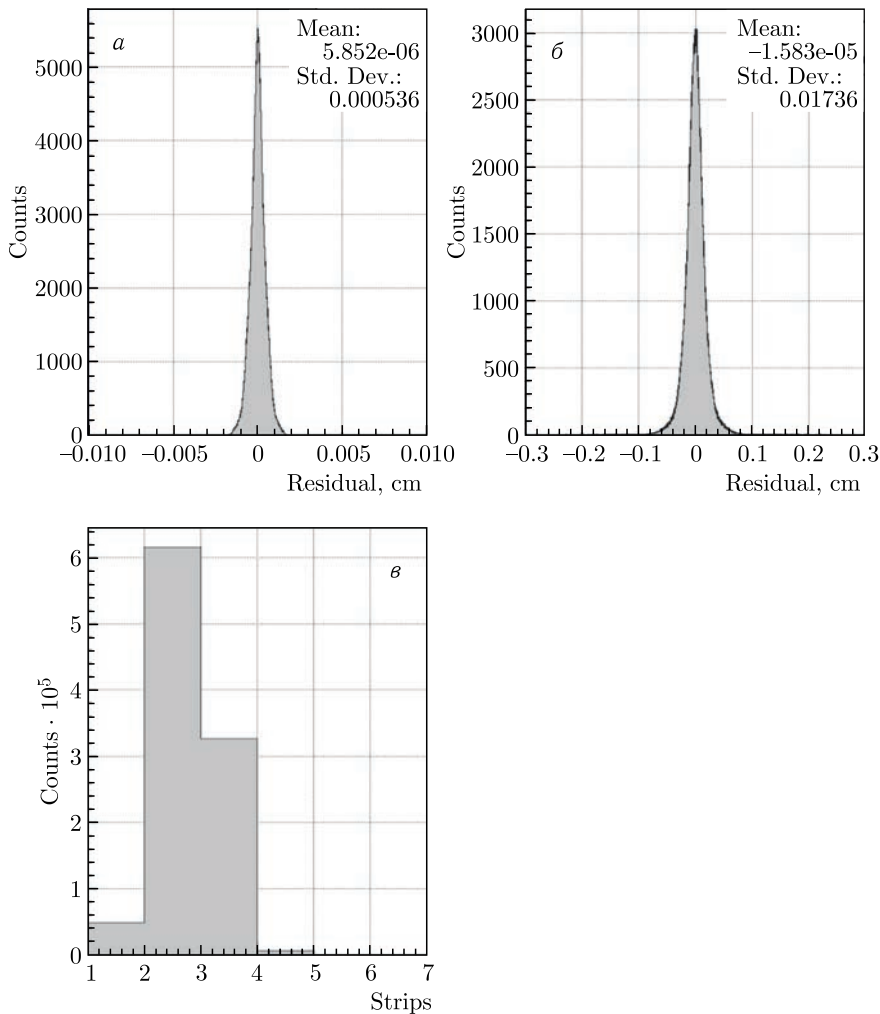


Рис. 6. Распределения отклонений восстановленных кластерных координат X (*a*) и Y (*б*), распределение количества стрипов в кластере (*в*) для ближайшей к мишени плоскости детектора FSD

та $VM@N$, проведенного в начале 2023 г. Конкретные распределения получены на основе моделированных реалистичных откликов от частиц с углами разлета, соответствующими геометрическому акцептансу первым (ближайшим к мишени) плоскостям детекторов FSD и GEM.

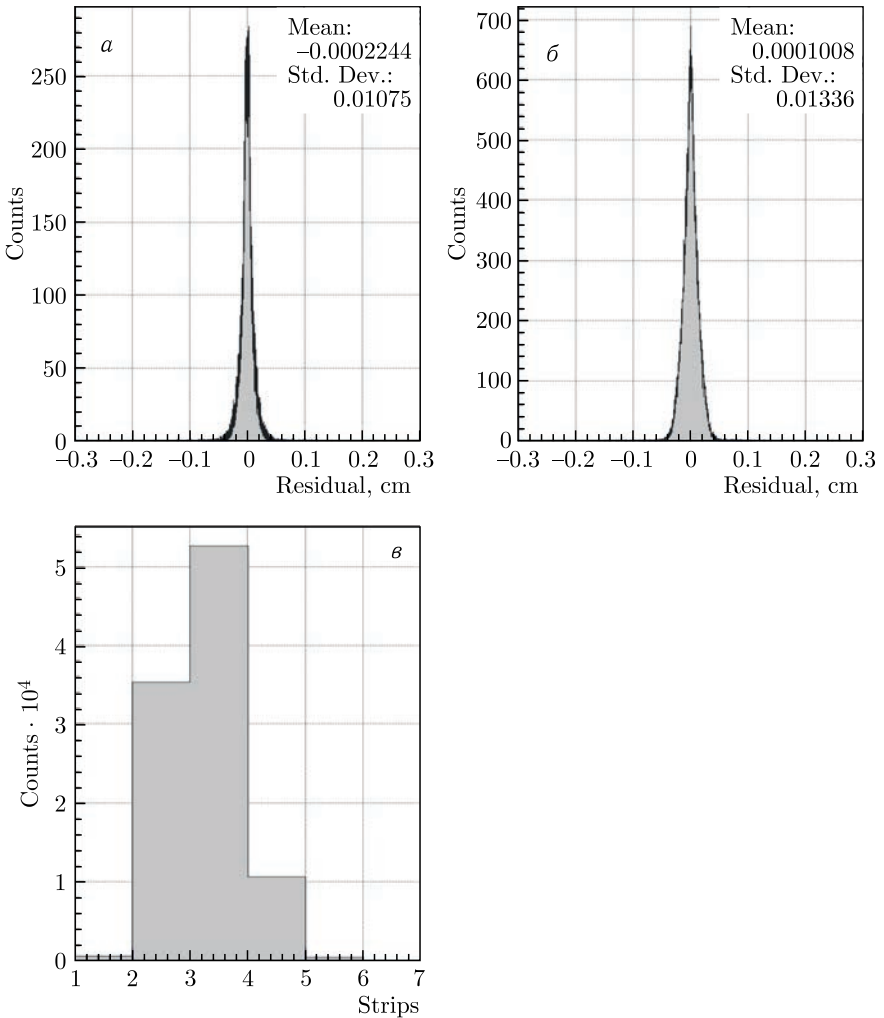


Рис. 7. Распределения отклонений восстановленных кластерных координат X (а) и Y (б), распределение количества стрипов в кластере (в) для ближайшей к мишени плоскости детектора GEM

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. NICA Project. <https://nica.jinr.ru> (accessed 30.10.2023).
2. *Kapishin M. N.* Studies of Baryonic Matter at the BM@N Experiment (JINR) // Nucl. Phys. A. 2019. V. 982. P. 967–970.
3. Geant4. <https://geant4.web.cern.ch> (accessed 30.10.2023).

4. *Batyuk P. N., Gertsenberger K. V., Merts S. P., Rogachevsky O. V.* The BrnRoot Framework for Experimental Data Processing in the BM@N Experiment at NICA // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 214. P. 05027.
5. *Sauli F.* The Gas Electron Multiplier (GEM): Operating Principles and Applications // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 805. P. 2–24.
6. *Baranov D.* Development of Detailed ROOT Geometry for the Inner Tracker Detectors in the BM@N Experiment // *AIP Conf. Proc.* 2021. V. 2377. P. 060002.
7. UrQMD. <https://urqmd.org> (accessed 30.10.2023).
8. *Baznat M. I., Chigrinov S. E., Gudima K. K.* QGSM Development for Spallation Reactions Modeling // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2012. V. 38. P. 17003.
9. *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.
10. GMSH. <https://gmsh.info> (accessed 30.10.2023).
11. ELMER. <http://www.elmerfem.org> (accessed 30.10.2023).
12. Garfield++. <https://gitlab.cern.ch/garfield> (accessed 30.10.2023).
13. *Баранов Д. А.* Моделирование трекового детектора на основе трехкаскадного газового электронного умножителя для конфигурации первого физического сеанса эксперимента BM@N // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2023. Т. 87, № 8. С. 1146–1150.
14. *Baranov D., Rogachevsky O.* Simulation of the GEM Detector for BM@N Experiment // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2017. V. 138. P. 11004.