

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА $BM@N$

*Д. Баранов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В настоящее время практически ни один эксперимент, проводимый в области физики высоких энергий, немыслим без использования вычислительных ресурсов, которые необходимы для обработки и анализа экспериментальных данных. По этой причине разработка соответствующего программного обеспечения является ключевым этапом реализации научно-исследовательской программы современного эксперимента. В данной статье описываются основные особенности подготовки программного обеспечения для трековых детекторов эксперимента $BM@N$, в частности затрагиваются особенности реализации алгоритмов реалистичного моделирования Монте-Карло и реконструкции пространственных координат с микростриповых плоскостей, которые используются в данных детекторах.

Nowadays almost any data analysis in High Energy Physics is inconceivable without using computational resources. Therefore, software development plays a key role in modern experiments. This article describes the main features of preparing software for tracking detectors in the $BM@N$ experiment, in particular, the software implementation of algorithms for realistic Monte Carlo simulation and the reconstruction of spatial coordinates from microstrip readout planes, which are used in these detectors.

PACS: 07.05.Bx

ВВЕДЕНИЕ

$BM@N$ (Baryonic Matter at Nuclotron) — это один из первых экспериментов, проводимых на ускорительном комплексе NICA, который располагается на территории Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в городе Дубне Московской области. Данный эксперимент нацелен на изучение свойств плотной барионной материи, которая образуется в результате взаимодействия выведенных из нуклотрона пучков тяжелых ионов с фиксированной мишенью. Наиболее полное описание научно-исследовательской программы эксперимента, а также результаты анализа данных, собранных в ходе первых экспериментальных сеансов, представлены в работе [1].

В статье представлен обзор особенностей программного обеспечения для *детекторов трековой системы*, поэтому необходимо сказать несколько слов о том, что они собой представляют и какие изменения претерпела конфигурация трековой си-

¹E-mail: dbaranov@jinr.ru

стемы при переходе к новому сеансу. Проведение первого физического сеанса эксперимента запланировано на весну 2022 г. Предыдущие сеансы эксперимента, вплоть до последнего (седьмого по счету), являлись техническими и были направлены в первую очередь на тестирование и отладку аппаратных и программных компонентов детекторных подсистем. Конфигурация экспериментальной установки для будущих сеансов имеет достаточно сложную структуру, если сравнивать ее с конфигурациями предыдущих сеансов. Так, в настоящее время трековая система состоит из трех типов детекторов, а не одного, как это было в самых первых сеансах, и включает в себя такие детекторы, как Forward Silicon (детектор на основе кремниевых модулей), GEM (Gas Electron Multipliers, детектор на основе газовых электронных умножителей) и CSC (Cathode Strip Chambers, детектор на основе газовых катодно-стриповых камер). Данные детекторы предназначены для «отслеживания» траекторий заряженных частиц путем регистрации точек их пролета (хитов), которые фиксируются в виде сигнальных откликов на чувствительных элементах. Все перечисленные компоненты трековой системы эксперимента VM@N в новой конфигурации имеют единый тип съема информации — микростриповый, поэтому для нахождения координат хитов был разработан универсальный алгоритм реконструкции пространственных координат, описание которого приведено в работе [2].

Программное обеспечение, разрабатываемое для поддержки эксперимента VM@N, базируется на основе фреймворка VmnRoot, который имеет мощную библиотеку инструментов для реализации процедур моделирования, реконструкции и анализа экспериментальных данных. Полный цикл обработки данных для трековых детекторов (рис. 1) соответствует общей концепции обработки данных, принятой в VmnRoot, и состоит из этапов, приведенных ниже.

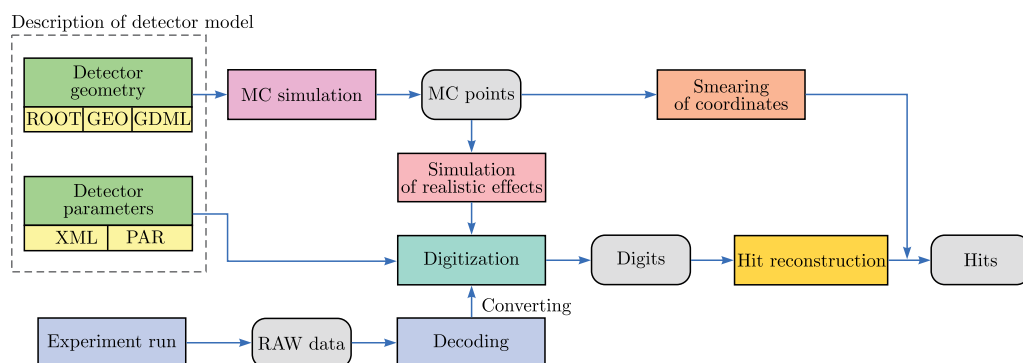


Рис. 1. Цикл обработки данных для трековых детекторов в VmnRoot

Программное описание модели детектора. До реализации процедур моделирования и реконструкции необходимо определить *программную модель детектора*. Она включает в себя описание геометрии детектора и его параметров. Геометрическая модель, реализованная в среде VmnRoot в формате ROOT-файлов, в дальнейшем используется для моделирования пролета частиц через вещество детектора. Для хранения параметров, которые также необходимы для процедур моделирования и реконструкции, используются файлы в формате XML.

Моделирование Монте-Карло. С использованием одной из транспортных систем, таких как Geant3, Geant4 и FLUKA, встроенных в BmnRoot в качестве инструмента для моделирования прохождения частиц через вещество на основе методов Монте-Карло, получается набор так называемых точек Монте-Карло (пространственных координат), которые используются в дальнейших процедурах реконструкции и анализа данных. Помимо этого, для достижения максимального соответствия между модельными и экспериментальными данными применяются разработанные автором алгоритмы реалистичного моделирования, которые учитывают особенности формирования сигналов в конкретном типе детекторов.

Реконструкция хитов. Имеется два способа получения хитов. Первый, упрощенный, заключается в применении процедуры «размытия» координат точек Монте-Карло согласно заданным параметрам какого-либо распределения. Второй способ — применение процедуры дигитизации, которая следует за процедурой реалистичного моделирования Монте-Карло. Она позволяет преобразовывать координаты точек Монте-Карло в так называемые дигиты, т. е. базовые элементы считывающей плоскости детектора. Что представляет собой конкретный дигит, зависит от типа детектора. В случае плоскостей с микростриповым съемом информации базовым элементом является микрострип, который имеет порядковый номер, и зарегистрированный им сигнал. В случае обработки экспериментальных данных для получения дигитов применяется соответствующее преобразование необработанных данных с электроники детектора в принятый формат описания микрострипов.

ДЕТЕКТОРЫ ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА VM@N

В этой работе рассматривается конфигурация трековой системы эксперимента VM@N для первого физического сеанса, планируемого в 2022 г. Согласно данной конфигурации трековая система подразделяется на *внутренний и внешний треке-ры*. Внутренний трекер состоит из детекторов, которые расположены в пространстве широкоапертурного дипольного магнита SP-41, предназначенного для задания фиксированных величин магнитного поля с целью анализа траекторий заряженных частиц. Таким образом, детекторы Forward Silicon и GEM относятся к внутренней трековой системе. Внешний трекер представлен CSC-детектором, который размещается непосредственно за магнитом и служит для повышения точности описания траекторий пролета частиц за счет увеличения количества точек, формирующих треки. Ниже дается краткое описание трековых детекторов.

Детектор Forward Silicon. Является высокоточным координатным детектором, построенным на базе полупроводниковых кремниевых модулей с двухсторонним расположением микростриповых считывающих электродов. Данные модули объединяются в полуплоскости, каждая из которых помещается в индивидуальный корпус с воздушным охлаждением. Для формирования полуплоскостей используются два типа модулей: *стандартный* и *удлиненный* с размерами сенсорных областей $63 \times 126 \text{ мм}^2$ и $63 \times 186 \text{ мм}^2$ соответственно. Толщина кремниевого сенсора составляет 300 мкм. С каждой стороны сенсора имеются микрострипы, ширина которых соответствует примерно 100 мкм. Стерео-угол между микрострипами двух электродов равен $2,5^\circ$.

Для ближайшего экспериментального сеанса в 2022 г. было разработано две конфигурации детектора Forward Silicon. Первая конфигурация состоит из 6 полуплос-

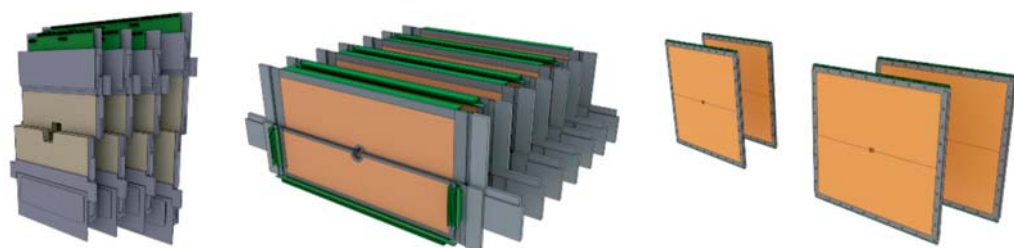


Рис. 2. Детекторы трековой системы эксперимента BM@N для первого физического сеанса в 2022 г.: Forward Silicon (слева), GEM (по центру) и CSC (справа)

костей, объединенных в 3 станции (42 модуля), вторая представлена 4 станциями (64 модуля) (рис. 2, слева). Для обеих конфигураций было подготовлено программное обеспечение. Какая именно конфигурация будет использоваться в первом сеансе эксперимента, зависит от степени готовности четвертой станции, которая на момент написания данной публикации находится в стадии сборки.

GEM-детектор. Данный детектор состоит из набора камер, построенных на базе трехкаскадных газовых электронных умножителей. Впервые трековая система, как одна из подсистем детекторной установки BM@N, появилась в одном из технических сеансов эксперимента в июне 2016 г. и состояла из единственного GEM-детектора. Подробное описание его конфигурации, а также первые результаты, которые были получены из анализа экспериментальных данных, собранных в ходе сеансов по изучению взаимодействия пучков дейтерия с фиксированной мишенью, представлены в работе [1]. В последующих сеансах эксперимента конфигурация GEM-детектора неоднократно модифицировалась: менялись размеры камер, увеличивалось количество плоскостей. На данный момент GEM-детектор состоит из 7 станций, расположенных в пространстве магнита вдоль оси пучка (рис. 2, по центру). Каждая станция комплектуется из двух полуплоскостей (верхней и нижней), которые представляют собой камеры, заполненные газовой смесью определенного состава.

Чувствительные области камер имеют размеры $163 \times 45 \text{ см}^2$ для верхних полуплоскостей и $163 \times 39 \text{ см}^2$ — для нижних. Тип считывания информации с камер — микростриповый. Ширина микрострипа (pitch) соответствует 800 мкм, а стерео-угол поворота микрострипов одного слоя относительно другого составляет 15° .

CSC-детектор. Третий тип трекового детектора собран на базе катодно-стриповых камер. Являясь неотъемлемой частью трековой системы для предстоящих сеансов, данный детектор призван улучшить точность процедуры трекинга (поиска траекторий частиц) за счет увеличения количества регистрируемых точек, описывающих траекторию движения той или иной частицы. На данный момент конфигурация CSC-детектора представлена четырьмя камерами с размерами чувствительной области $1129 \times 1065 \text{ мм}^2$ (рис. 2, справа).

Так же как и в GEM-детекторе, чувствительная область катодной камеры заполняется газовой смесью. С двух сторон этой области располагаются электроды, которые представляют собой считывающие плоскости, образованные набором микрострипов, ширина и стерео-угол которых соответственно равны 2,5 мм и 15° .

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

В данной статье не приводится подробное описание алгоритмов, лежащих в основе моделирования Монте-Карло и реконструкции хитов. Ссылки на соответствующие работы, в которых освещаются указанные процедуры, будут даны далее в тексте.

Программное обеспечение для трековых детекторов разработано на основе цикла обработки данных, этапы которого представлены во введении. Описание первого этапа, относящегося к подготовке геометрических моделей детекторов внутренней трековой системы, приведено в работе [3]. Помимо «геометрии», которая используется транспортной системой в среде *VmnRoot* для моделирования прохождения частиц через вещество, написан код реализации программной модели детектора, которая определяет его структуру и функциональность. Так как все модули обработки данных в *VmnRoot* реализованы в виде классов на языке C++, то согласно используемой концепции объектно-ориентированного программирования программная модель любого трекового детектора определяется набором соответствующих классов (рис. 3). Важно отметить, что данная структура программного обеспечения едина для всех микростриповых детекторов, что позволяет осуществлять его поддержку, включающую модификацию, обновление и оптимизацию более эффективно.

Как можно видеть из диаграммы классов (см. рис. 3), программная модель трекового детектора построена на базе концепции композиции классов, в которой объекты более высокого уровня включают в себя объекты более низкого. Например, конкретный детектор — это набор станций, каждая из которых в свою очередь состоит из набора модулей, а модули — из слоев и т. д.

Моделирование Монте-Карло реализовано во внешних классах, которые являются базовой частью фреймворка *VmnRoot* и поэтому не приведены на представленной диаграмме. Естественно, что для взаимодействия с внешними инструментами необходимо иметь класс, который будет обращаться к внешним классам посредством их интерфейсов. Таким образом, для взаимодействия с инструментами, ответственными за моделирование Монте-Карло, реализованы классы *Detector* и *Point*, описывающие спецификацию точек Монте-Карло для конкретного детектора. Для учета особенностей формирования реального сигнала в конкретном детекторе был добавлен класс

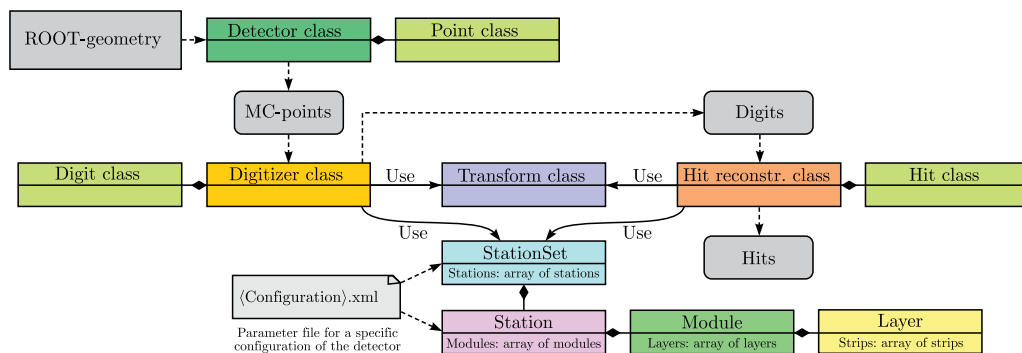


Рис. 3. Диаграмма классов: реализация обработки данных для трековых детекторов

Digitizer. В нем реализованы методы Монте-Карло преобразования точек в дигиты (в нашем случае — микроstriпы) на основе алгоритмов реалистичного моделирования, зависящих от типа детектора. Один из данных алгоритмов для GEM-детектора описан в работе [2].

Основное назначение процедуры реконструкции хитов заключается в получении пространственных координат точек пролета частиц на основе имеющегося набора дигитов. Так как все трековые детекторы имеют микроstriповый съём информации, используется единый алгоритм реконструкции координат, основанный на нахождении пересечений активных стрипов одного слоя со стрипами другого. Ознакомиться с данным алгоритмом можно в работе [4].

В отличие от моделирования Монте-Карло, которое использует стандартные алгоритмы, встроенные в библиотеку *VmnRoot*, за исключением алгоритмов моделирования реалистичных эффектов, процедура реконструкции хитов полностью определяется в пользовательских классах, которые интегрируются в общий цикл обработки данных. Исходя из этого был создан класс *Hit Reconstruction*, реализующий соответствующие алгоритмы, а также вспомогательный класс *Hit*, который описывает параметры определенного хита. Полученный в результате работы алгоритма набор пространственных координат точек пролета частиц используется в дальнейших процедурах реконструкции и анализа физических событий.

Благодарности. Данная работа частично поддержана грантом РФФИ № 18-02-40102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baranov D. et al. (BM@N Collab.)* First Results from BM@N Technical Run with Deuteron Beam // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 2. P. 148–156.
2. *Baranov D., Rogachevsky O.* Simulation of the GEM Detector for BM@N Experiment // *Eur. Phys. J. Web of Conf.* 2017. V. 138. P. 11004.
3. *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.
4. *Batyuk P., Baranov D., Merts S., Rogachevskiy O.* Event Reconstruction in the BM@N Experiment // *Eur. Phys. J. Web of Conf.* 2019. V. 204. P. 07012.

Получено 26 января 2022 г.