Моделирование геометрии детектора TPC для эксперимента MPD

A.B. Bychkov[a,1], *O.V. Rogachevsky*[a], *S. Hnatic*[a]

А.В. Бычков[a,1], *О.В. Рогачевский*[a], *С. Гнатич*[a]

[a] JINR

[a] ОИЯИ

Эксперимент NICA MPD, как и все современные физические эксперименты, основывается на данных моделирования. Подробная геометрия, содержащая информацию не только о размерах и материалах элементов конструкции самого детектора, но и информацию о его внутренних объемах, является необходимой составляющей большинства этапов физического моделирования. В отдельных случаях также могут использоваться другие специализированные геометрии. Статья посвящена геометриям MPD TPC (Time Projection Chamber, время-проекционная камера) для программных пакетов MpdRoot и ACTS.

Modern experiments in physics are impossible without computer simulations. The NICA MPD experiment also includes this stage. The key element for accurate simulation is a detailed detector geometry. Geometry for physical modeling must contain information not only about the physical dimensions and materials of individual elements, but also information about the volumes formed in the detector. In addition special geometries that describes some features of the detector could be used. This article is review about implementations of MPD TPC (Time Projection Chamber) geometry for MpdRoot and ACTS software.

PACS: 07.05.Tp; 29.40.Gx; 07.77.−n

Введение

Эксперименты в физике высоких энергий требуют предварительного моделирования детекторов установки для изучения ее возможностей к получению правильных данных для проведения физического анализа. Для этой цели в физике высоких энергий были разработаны комплексы программ для геометрического описания детекторов с моделированием прохождения частиц через материалы установки.

Для успеха эксперимента важно обеспечить соответствующее описание детектора для применения в области моделирования, реконструкции и анализа данных. Описание детектора включает описание геометрии всей установки включая материалы как для детектирующих элементов, так и для различных несущих и обеспечивающих функционирование детектора конструкций для последующего учета потерь энергии при прохождении частиц через установку. Также описание детектора включает в себя методы детектирования частиц, зависимость параметров функционирования от внешних условий, различные методы юстирования и

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

калибровок, связанные с неидеальностью самой установки или ограничениями вызванными конструктивными особенностями.

Цель полного описания детектора дать количественные оценки и предоставить всю информацию, необходимую для интерпретации данных эксперимента. Из прошлого опыта можно установить, что всеобъемлющий взгляд, не ограничивающийся только геометрией, необходим для построения полного набора инструментов, направленных на интерпретацию данных. Однако геометрическое описание детектора является небходимой основой обеспечивающей как разработку алгоритмов и программных кодов, необходимых для функционирования и интерпретации данных детектора, так и для проверки через моделирование используемых подходов и технических решений.

1. Подходы к описанию геометрии детекторов в ФВЭ

Классификация методов описания геометрии, пригодной для использования в компьютерных вычислениях опирается на способ описания сплошного объема. Наиболее распространенными методами являются конструктивная блочная геометрия (Constructive Solid Geometry, CSG) и граничное представление (Boundary Representation, B-rep or BREP). CSG геометрия описывает объект с помощью простейших примитивов (куб, цилиндр, призма, пирамида, сфера, конус и т.п.) путем применения к ним булевых (двоичных) операций (объединение, разность, пересечение и т.п.). BREP представление, наиболее типичное для САПР (Системы автоматизированного проектирования), основывается на описании тела совокупностью поверхностей - границ между телом и окружающим пространством.

Геометрия для моделирования конкретного физического эксперимента, создается отдельно с полным соответствием геометрическим размерам и необходимым уровнем детализации всех детекторов моделируемой установки. Необходимость создания отдельных геометрий вызвана принципиальными отличиями в построении геометрии в САПР и геометрии для моделирования физического эксперимента. Стандартным пакетом программного обеспечения для моделирования физического эксперимента является Geant4 [2]. Интеграция пакета моделирования Geant4 со средой ROOT [3] осуществляется с помощью пакета Geant4 Virtual Monte Carlo (Geant4 VMC), а для согласования используемых геометрических моделей применяется специализированный интерфейс, связывающий ядро Geant4 с менеджером геометрии TGeoManager в CERN ROOT.

1.1. Описание геометрии детекторов в пакете ROOT

Описание геометрии, создаваемое в ROOT, разрабатывается по принципам оптимизации траектории прохождения частиц через объемы детекторов и согласованности с программным пакетом Geant4. Основным

элементом и понятием в геометрии ROOT является "объем". Объем описывает отдельные, еще не размещенные в пространстве элементы геометрии. В свою очередь, взаимоотношение между объемами определяется не соседними объемами, а вложенностью объемов, т. о. геометрия определяется как иерархия вложенности объемов. Каждый внешний объем является упорядоченным хранилищем содержащихся в нем объемов, в свою очередь также хранящих еще более маленькие объемы. Самый крупный объем, содержащий в себе все остальные, определяет окружающее пространство модели или геометрии. Данная система имеет название "Master Reference System"(MARS). Благодаря такой структуре, каждый из объемов представляет из себя окружающее пространство для всех содержащихся в нем объемов. Такая структура очень близка к способу представления CSG и геометриям для Geant4. Традиционным способом создания ROOT-совместимых геометрий является их генерация с помощью кода.

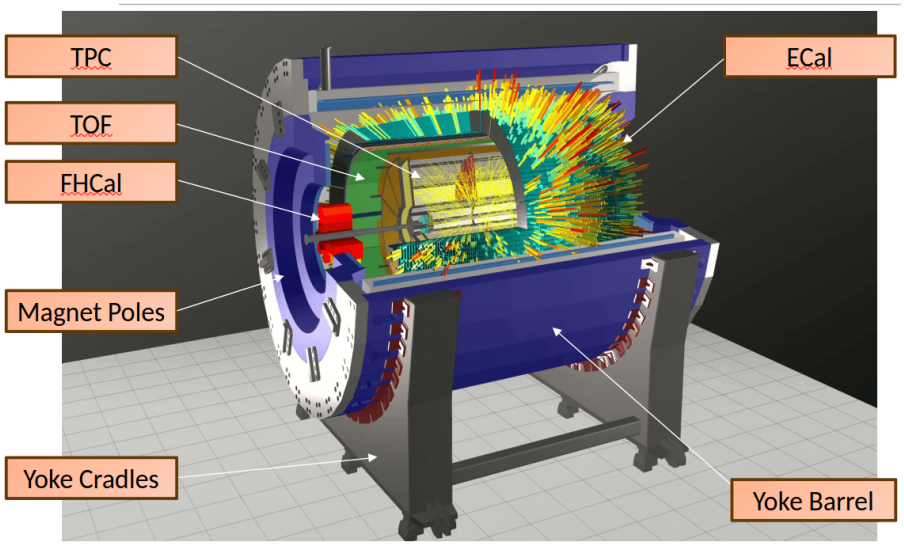

Рис. 1: Детекторы установки MPD

2. Моделирование детектора TPC эксперимента MPD/NICA

В ближайшие годы на коллайдере NICA в Дубне будет запущен эксперимент MPD для исследований в области релятивистской ядерной физики [1]. Физические данные в эксперименте MPD будут получаться с детекторов TPC (Time Projection Chamber, время-проекционная камера), TOF (Time-of-Flight detector, времяпролётный детектор), ECal (Electromagnetic Calorimeter, электромагнитный калориметр), FHCal (Forward Hadronic Calorimeter, передний адронный калориметр) (Рис. 1). Для моделирования эксперимента была разработана программная оболочка MpdRoot [4]. Основным трековым детектором установки является время-проекционная камера TPC. Реконструкция треков частиц в TPC — это сложная мате-

матическая и программная задача, и поэтому описание геометрии детектора TPC требует особой тщательности.

2.1. Время проекционная камера (TPC) установки MPD

В оболочке MpdRoot для проведения Монте-Карло моделирования детектора TPC была разработана подробная ROOT-совместимая геометрия на основе конструкторских чертежей.

Геометрия TPC (Рис. 2) отражает подробно весь газовый объем детектора (высоковольтный электрод - мембрана, система поддержки градиента электрического поля), а также конструкцию внутренней и внешней стенок цилиндра TPC, включая все силовые элементы конструкции, опоры крепления считывающих камер (Read-Out Chamber, ROC), элементы герметизации внутреннего объема TPC, а также термоэкран и силовые конструкции сервисных колец. Ключевой особенностью геометрии TPC является максимально подробное описание ROC, в особенности модулей считывающей электроники и их системы охлаждения. В геометрии ROC учитываются многослойная структура считывающей пэдовой поверхности, несущая рама, технологические отверстия в раме для связи модулей электроники и пэдовой поверхности, частичное расположение модулей электроники в два слоя. Модуль электроники представлен эквивалентами наружного и внутреннего сложно профилированных элементов охлаждения (смоделированы в том числе выступы на поверхностях системы охлаждения под основные интегральные микросхемы), текстолита печатной платы с эквивалентным слоем меди от разводки внутри платы и трех наиболее крупных интегральных микросхем. Общее число объемов в данном варианте геометрии – 139110.

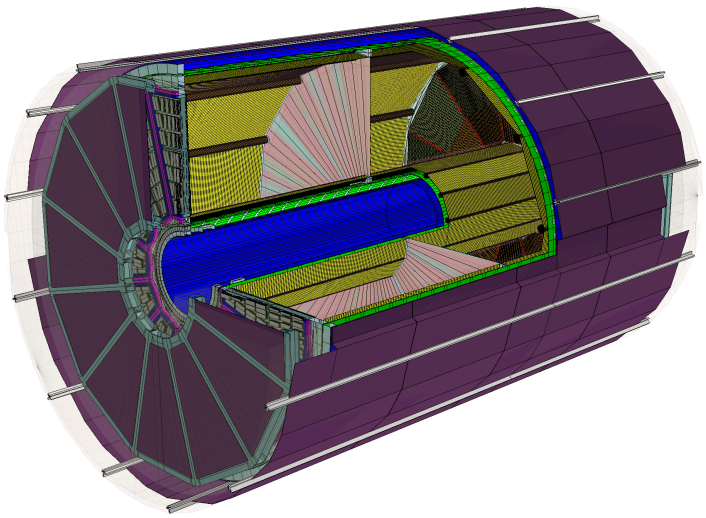

Рис. 2: Геометрия время-проекционной камеры установки MPD для моделирования

2.2. Возможность нахождения треков частиц за торцами TPC
Высокий уровень детализации геометрии MPD TPC позволил провести модельное исследование на прохождение различных частиц через сильно неоднородную структуру торцов TPC и, соответственно, оценить возможность установки других трековых детекторов за торцами TPC. Например, для частиц $p, \pi+, \mu-, K+$ в условиях отсутствия магнитного поля и начальном импульсе $P_0 = 600$ МэВ проведено моделирование прохождения торцов TPC для изучения изменения направления и потерь импульса частицы: $\Delta P = P_{\text{in}}^{\text{end-caps}} - P_{\text{out}}^{\text{end-caps}}$, где $P_{\text{in}}^{\text{end-caps}}$ - импульс частицы перед торцом TPC и $P_{\text{out}}^{\text{end-caps}}$ - импульс частицы после прохождения торца TPC; $\alpha = \vec{P}_{\text{in}}^{\text{end-caps}}, \vec{P}_{\text{out}}^{\text{end-caps}}$, где $\vec{P}_{\text{in}}^{\text{end-caps}}$, $\vec{P}_{\text{out}}^{\text{end-caps}}$ - направление импульса частицы перед и после прохождения торца TPC соответственно (Рис. 3). Моделирование показывает, что для частиц прошедших через весь материальный бюджет торцов потери импульса составляют до 15%, а изменение направления траектории до 5°, при этом для части частиц изменения импульса и траектории движения практически не происходит. Ввиду жестких требований к точности восстановления импульсов частиц и невозможности предсказать изменения траектории и импульса для конкретной частицы после прохождения торцов TPC, расположение трековых детекторов за торцами выглядит необоснованным.

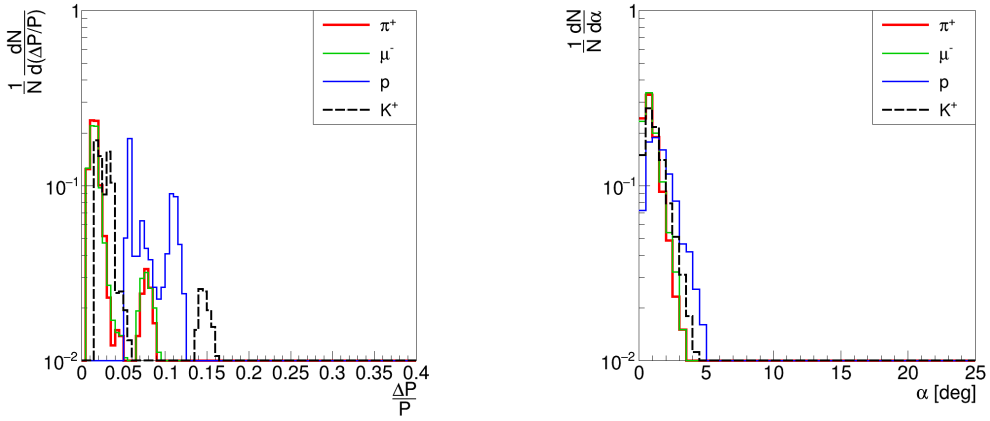

Рис. 3: Изменение параметров частицы при прохождении торцов MPD TPC для начального импульса частиц 600 МэВ

3. Трекинговая геометрия ACTS

Для использования в MpdRoot нового программного обеспечения (ПО) для реконструкции треков ACTS Common Tracking Software [5] потребовалась разработка нового варианта геометрии TPC. ПО ACTS осуществляет процедуру построения трека на основе комбинированного фильтра Калмана с использованием специализированной послойной геометрии. Эта геометрия не является совместимой с пакетом Geant4, в том числе с

точки зрения идеологии построения. Послойная геометрия ACTS отражает активную часть любого детектора в виде набора плоскостей с принадлежащими этим плоскостям восстановленными точками треков. Опционально, для повышения точности реконструкции, указываются как материалы самих плоскостей, так и материалы окружающих пассивных объемов.

Послойная геометрия соответствует конструктивным особенностям MPD TPC. Геометрия описывает TPC как систему плоскостей, где каждая плоскость имеет длину равную расстоянию дрейфа, а ширина и поперечное положение в пространстве соответствует строкам пэдов на торцах TPC (Рис. 4). Такая геометрия обеспечивает прямой перенос восстановленных хитов на послойную геометрию.

Дальнейшим расширением послойной геометрии стало добавление детектора MPD TOF в виде плоскостей - эквивалентов отдельных камер MRCP (multi-gap resistive plate chambers) TOF. Такое расширение обеспечивает работу фильтра Калмана библиотек ACTS в едином глобальном пространстве для обоих детекторов, превращая TPC и TOF в один обобщенный детектор (Рис. 5). Дальнейшим планом по расширению трекинговой геометрии является включение геометрии всех остальных детекторов установки MPD в плоскостном представлении для обеспечения реконструкции событий во всех детекторах как в едином целом.

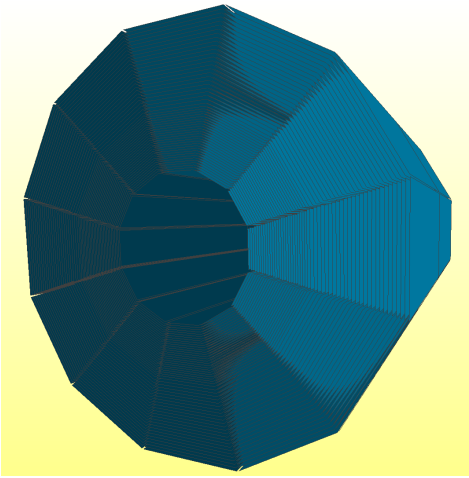

Рис. 4: ACTS геометрия MPD TPC

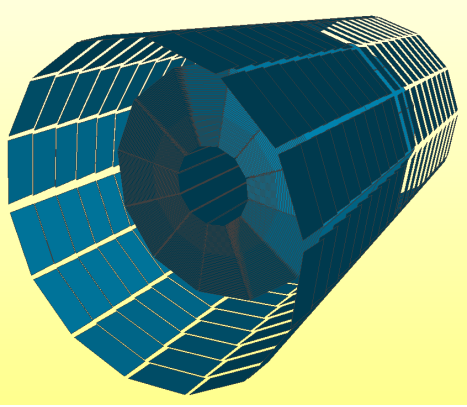

Рис. 5: ACTS геометрия MPD TPC и TOF

4. Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

5. Конфликт интересов

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

Список литературы

1. NICA MPD / Nuclotron-based Ion Collider fAcility / Multi-Purpose Detector — URL: `https://nica.jinr.ru/projects/mpd.php`.

2. *J. Allison et al.* Recent Developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Meth. — 2016. — V. 835. — P. 186–225. — doi:10.1016/j.nima.2016.06.125

3. *Rene Brun and Fons Rademakers* ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework // Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A — 1997. — V. 389. — P. 81–86. — doi:10.1016/S0168-9002(97)00048-X

4. MPDRoot / Simulation and Analysis Framework for the MPD experiment of the NICA project — URL: `https://mpdroot.jinr.ru/`.

5. ACTS / ACTS Common Tracking Software — URL: `https://acts.readthedocs.io/en/latest/`.