

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЖАДАН ДАНИИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ
СЧЁТЧИКОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ СЧТФ И $Mu2e$**

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Выпускная квалификационная работа

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Логашенко Иван Борисович

Новосибирск, 2022

Содержание

Введение	3
1 Эксперименты СЧТФ и Mu2e	6
1.1 Супер чарм тау фабрика	6
1.1.1 Проект детектора	6
1.1.2 Программное обеспечение детектора	7
1.1.3 Проект мюонной системы СЧТФ	9
1.2 Эксперимент Mu2e	11
1.2.1 Устройство детектора	11
1.2.2 Программное обеспечение эксперимента Mu2e	13
1.2.3 Мюонная система Mu2e	14
2 Развитие инфраструктуры моделирования СЧТФ	16
2.1 Модуль валидации геометрии	16
2.2 Реализация базовых элементов алгоритмов оцифровки и реконструкции	22
2.3 Реализация магнитного поля внутри железа мюонной системы	23
3 Моделирование мюонной системы СЧТФ	25
3.1 Описание геометрии	25
3.2 Алгоритм оцифровки	28
3.3 Алгоритм реконструкции	29
3.4 Анализ результатов	30
3.5 Модуль визуализации	33
4 Оценка нейтронного фона в мюонной системе Mu2e	35
4.1 Оценка фона в эксперименте Mu2e	35
4.2 Сравнение алгоритма «CRY» с реальными данными	38
4.3 Влияние конфигурации бетонного экранирования на нейтронный фон	39
Заключение	44
Список литературы	46

Введение

Пластиковые сцинтилляционные счётчики хорошо зарекомендовали себя в качестве детектирующих элементов и, как следствие, используются во многих экспериментах в физике высоких энергий. Одним из перспективных направлений данной технологии являются сцинтилляционные счётчики с кремневыми фото-умножителями. Детекторы с такими счётчиками планируются в проектах «Супер С-тау фабрики» (СЧТФ)[1, 3] и Mu2e[2].

Проект «Супер С-тау фабрики» в настоящее время разрабатывается в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук. Он включает в себя уникальный ускорительно-накопительный комплекс со светимостью 10^{35} см⁻²с⁻¹ с энергией пучков в системе центра масс от 3 до 7 ГэВ и универсальный детектор элементарных частиц. Планируется, что научный комплекс будет построен вблизи города Саров. Физические задачи, охватываемые установкой, довольно обширны. Можно выделить основные три направления: прецизионные эксперименты с очарованными адронами, эксперименты с тау-лептоном и исследования в области квантовой хромодинамики.

Эксперимент Mu2e будет проводиться в Fermilab, где на основе существующего ускорительного комплекса строится новый, с необходимыми для эксперимента параметрами. С помощью сложного комплекса магнитов и мишеней формируется чистый пучок мюонов, которые останавливаются во вторичной мишени. В ней ведётся поиск очень редкого процесса — безнейтринной конверсии отрицательного мюона в электрон в поле ядра с нарушением аромата заряженных лептонов, поиск и изучение которой является основной целью эксперимента Mu2e.

Кроме поиска Новой физики, эксперименты СЧТФ и Mu2e объединяет использование похожих технологий в их мюонных системах. Основной целью данной работы является моделирование мюонных систем экспериментов СЧТФ и Mu2e, включая разработку соответствующего программного обеспечения.

В качестве основы проекта мюонной системы детектора СЧТФ взята мюонная система детектора BELLE II[4, 5]. Система имеет две части: торцевую и баррельную, каждая из которых содержит восемь «суперслоёв», разделенных слоями металла. Под «суперслоем» подразумевается слой, в

который входит два взаимоперпендикулярных подслоя, состоящих из пластиковых сцинтилляционных счётчиков. Каждый счётчик сделан из полистирола с небольшой добавкой п-терфенила или PPO и POPOP. В пластике проделывается канавка, куда помещается спектросмещающее волокно, с помощью которого собирается свет. На торцах счётчика размещены кремневые фотоумножители. Основная задача системы — это отделение мюонов от адронов, в дополнение, на планируемом для СЧТФ диапазоне энергии, она выполняет роль адронного калориметра. В рамках данной работы реализовано программное обеспечение для моделирования мюонной системы, включая описание геометрии, оцифровку, реконструкцию и визуализацию, а также проведено моделирование характеристик системы.

Мюонная система Mu2e[6] разделяется на несколько секторов согласно сторонам, окружающим соленоид детектора : верхний, левый, правый, передний и задний. Каждый сектор составляется из модулей, которые включают 32 или 64 сцинтилляционных счётчика с описанной выше структурой. Счётчики укладываются в четыре длинных слоя с разделяющими их алюминиевыми поглотителями. Каждый слой размещается со сдвигом относительно предыдущего для увеличения эффективности. Главная цель системы — это экранировать детектор от космического излучения, отсюда вытекает её название — вето космических лучей (Cosmic Ray Veto – CRV). В рамках работы было проведено моделирование фона космических нейтронов прошедших мюонную систему.

В дополнение к моделированию мюонных систем, целью работы является разработка общего программного обеспечения детектора СЧТФ. В его рамках ведётся разработка фреймворка «Аврора»[7, 8], представляющим собой совокупность программных пакетов детектора. Внутри фреймворка пакеты организованы по группам: описание геометрии, моделирование, реконструкция, параметрическое моделирование, модели данных, визуализация, а также пакеты, связанные с настройкой и конфигурацией самого фреймворка и внешних зависимостей. В фреймворке используются различные программные инструменты, в их числе DD4hep[9] — для описания геометрии детектора, Geant4[10] — для моделирования, Gaudi[12] — для конфигурации фреймворка, ROOT[11] — для хранения данных и физического анализа. В рамках данной работы были реализованы элементы фреймвор-

ка «Аврора», позволяющие упростить и протестировать разработку программного обеспечения. Сюда относится модуль проверки геометрии, модули, включающие базовые части алгоритмов оцифровки и реконструкции, а также базовый класс для описания магнитного поля.

В первой главе описываются эксперименты СЧТФ и Mu2e. Во второй главе перечислены реализованные элементы для фреймворка «Аврора». Третья глава посвящена разработанным модулям для моделирования мюонной системы СЧТФ. Анализ нейтронного фона в рамках эксперимента Mu2e описан в четвертой главе. В заключении подводится итог проделанной работы.

1 Эксперименты СЧТФ и Mu2e

1.1 Супер чарм тау фабрика

1.1.1 Проект детектора

СЧТФ состоит из установки для инжекции электронов и позитронов, двухкольцевого коллайдера с одной областью взаимодействия и универсального детектора частиц, окружающего эту область. Энергия пучка в системе центра масс может изменяться в пределах от 3 до 7 ГэВ. Проектная светимость составляет $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Уникальной особенностью установки является продольная поляризация электронного пучка вблизи области взаимодействия, достигаемая с помощью специального источника поляризованных электронов. Физические задачи проекта направлены как на поиск новой физики в экспериментах с очарованными адронами и тау-лептоном, так и исследование физики сильных взаимодействий. Для решения задач, поставленных перед экспериментом СЧТФ, необходим универсальный магнитный детектор, удовлетворяющий следующим требованиям:

- Пороговое рождение частиц без лоренцевского буста приводит к неизмеримо малой длине полета очарованных адронов и τ -лептонов и наличию частиц с малым импульсом в конечном состоянии. Это означает, что эффективность обнаружения мягких треков имеет более высокий приоритет, чем пространственное разрешение вершин распада.
- Надежное разделение π/μ и π/K в диапазоне импульсов до 1,5 ГэВ/с.
- Система сбора данных и оцифровывающая электроника должны справляться с потоком событий частотой 300 – 400 кГц, при средней длине события 30 кБ.

Набор подсистем, входящих в детектор, основывается на опыте проведения экспериментов ИЯФ СО РАН и международных коллабораций. Схематичное изображение детектора представлено на Рис. 1. Для некоторых подсистем рассматривается несколько опций.

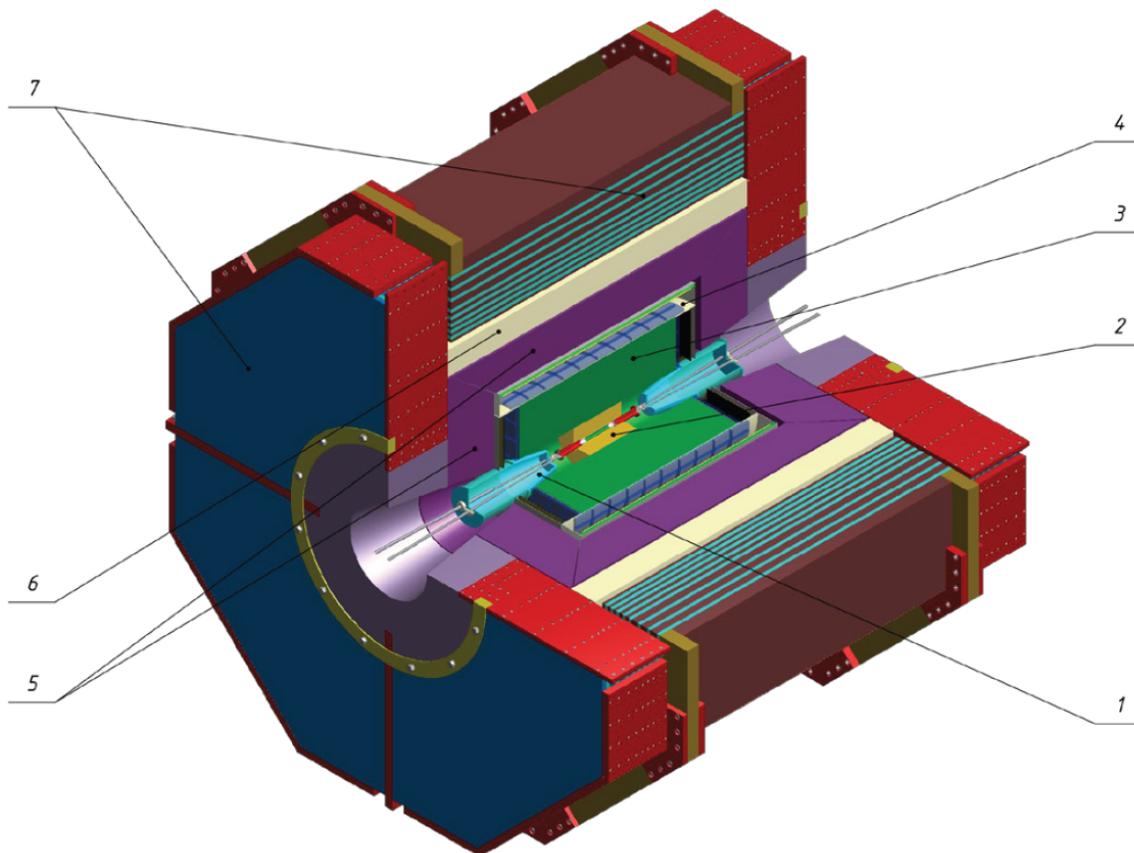


Рис. 1: Схематичное изображение детектора СЧТФ. 1 – магниты финального фокуса; 2 – внутренний трекер; 3 – дрейфовая камера; 4 – система идентификации частиц; 5 – калориметр; 6 – магнитная катушка; 7 – мюонная система и ярмо магнита;

1.1.2 Программное обеспечение детектора

Как и любому другому проекту в физике высокой энергии, детектору СЧТФ необходимо программное обеспечение. Его функционал включает генератор частиц, алгоритмы оцифровки и реконструкции событий, структурированную модель данных, доступ к хранилищу данных, алгоритмы онлайн и оффлайн анализа, а также систему сборки и управление программным обеспечением. Всё выше перечисленное можно объединить словом фреймворк, а разрабатываемый для проекта детектора СЧТФ носит название «Аврора». Он базируется на используемых и проверенных в физике высоких энергий программных пакетах, таких как Gaudi, DD4hep, ROOT, Geant4. Основные компоненты фреймворка и связи между ними изображены на Рис. 2.

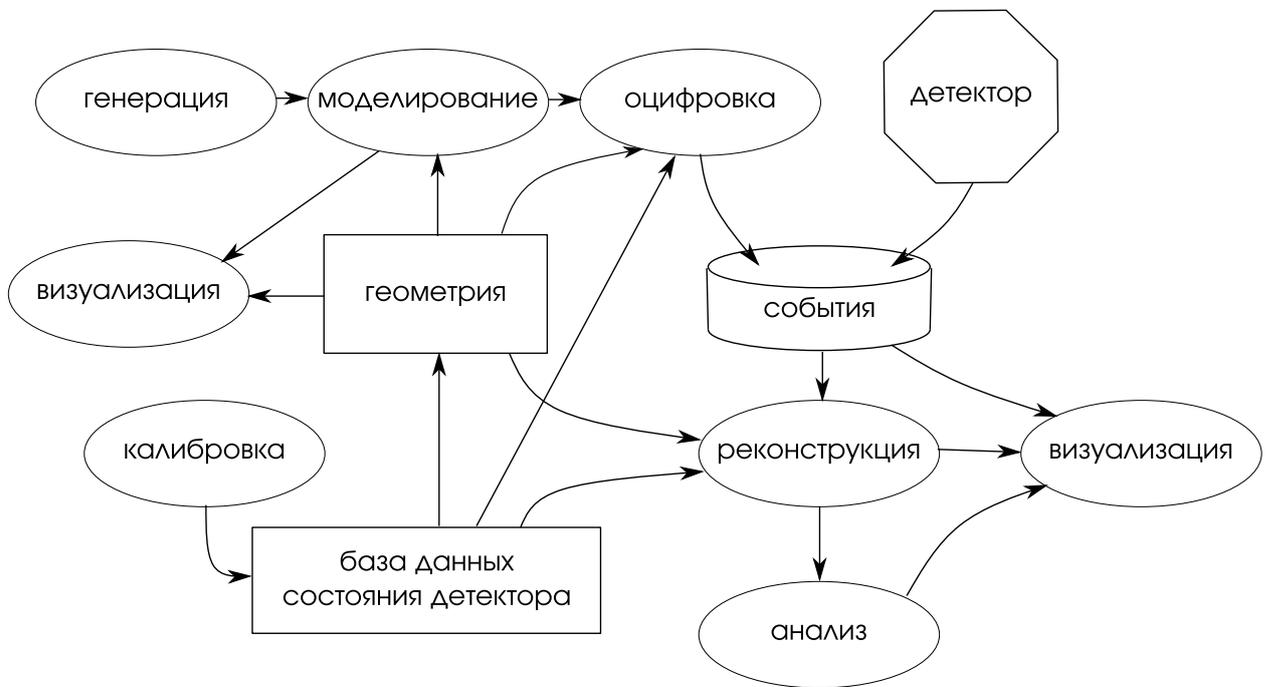


Рис. 2: Программное обеспечение детектора СЧТФ и связи между его компонентами.

Фреймворк «Аврора» охватывает все аспекты взаимодействия программных компонентов во время выполнения, включая настройку, обмен данными и выполнение заданий. Его архитектура соответствует традиционной схеме: разделение кода и данных. За обработку физических данных отвечают специальные модули, в функционал которых входит приём входных данных, манипуляция над ними и создание новых выходных данных. Весь процесс происходит пособытийно. Некоторые части этой работы могут быть делегированы специальным средствам — инструментам. Основным языком программирования, на котором реализованы алгоритмы и инструменты, это C++. Настройка и конфигурация различных сценариев работы реализована на языке Python, здесь же задаётся последовательность используемых алгоритмов. Стандартной вычислительной средой для платформы является Scientific Linux 7 с архитектурой x86_64 с GCC 9 в качестве основного компилятора.

Обычная цепочка полного моделирования состоит из нескольких этапов. Вначале генератор создаёт частицы, которые рождаются при столкновении, затем происходит моделирование процессов, произошедших при пролёте частиц через чувствительные объёмы в детекторе и формируется коллекция данных. Дальше данные обрабатываются модулями оцифров-

ки, генерируя отклик как у реальной детекторной аппаратуры в формате, соответствующему сырым данным детектора. Сгенерированные сырые данные пропускаются через модули реконструкции, где восстанавливаются события, которые будут использоваться в физическом анализе с помощью соответствующих инструментов высокого уровня. На каждом этапе этой цепочки промежуточные данные могут быть сохранены и считаны позже.

При разработке модулей для моделирования мюонной системы СЧТФ возникла необходимость в реализации некоторых общих модулей, связанных с инфраструктурой фреймворка «Аврора». Подробнее о них написано в главе 2.

1.1.3 Проект мюонной системы СЧТФ

В основу проекта мюонной системы СЧТФ легла мюонная система эксперимента BELLE II, т.к. они схожие по размерам и своей основной задаче: отделения мюонов от адронов. Конечные параметры, такие как количество слоёв, их толщина и расположение, будут оптимизированы в результате моделирования. На текущий момент планируется сделать по восемь чувствительных слоёв в торцевой и баррельной части системы. Слои будут состоять из двух подслоёв с пластиковыми сцинтилляционными счётчиками, расположенными взаимоперпендикулярно друг другу. Каждый из которых будет отвечать за восстановление одной из проекции координаты, таким образом, по сработавшему слою можно будет восстановить, где произошло событие. На Рис. 3 представлено схематическое изображение такого слоя.

Используемая технология сцинтилляционных счётчиков в проекте мюонной системы СЧТФ основывается на опыте эксперимента BELLE II. Сцинтилляционный счётчик представляет собой пластиковую полосу, покрытую светоотражающим материалом, например TiO_2 . В полоске формируется канавка, в которой находится спекросмещающее волокно, закреплённое с помощью оптического клея. С одной стороны волокна размещено зеркало для увеличения общей светоотдачи с полоски, с другой — кремниевый фотодетектор, который собирает сигнал и передаёт его дальше на электронику детектора. На Рис. 4 схематично изображён такой счётчик.

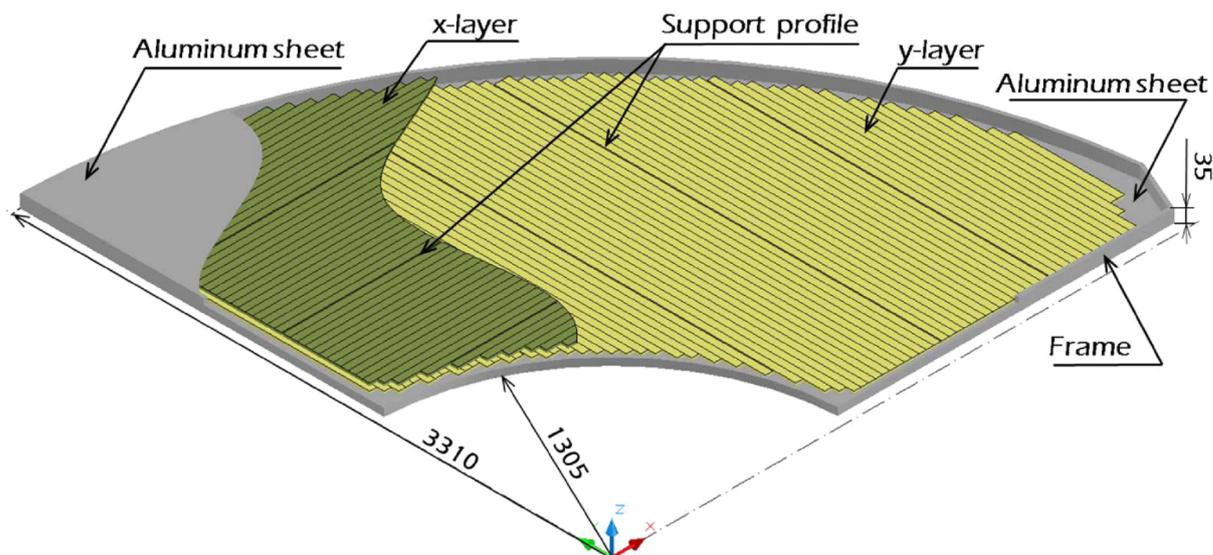


Рис. 3: Схематичное изображение «суперслоя», используемого в BELLE II. (размеры в мм).

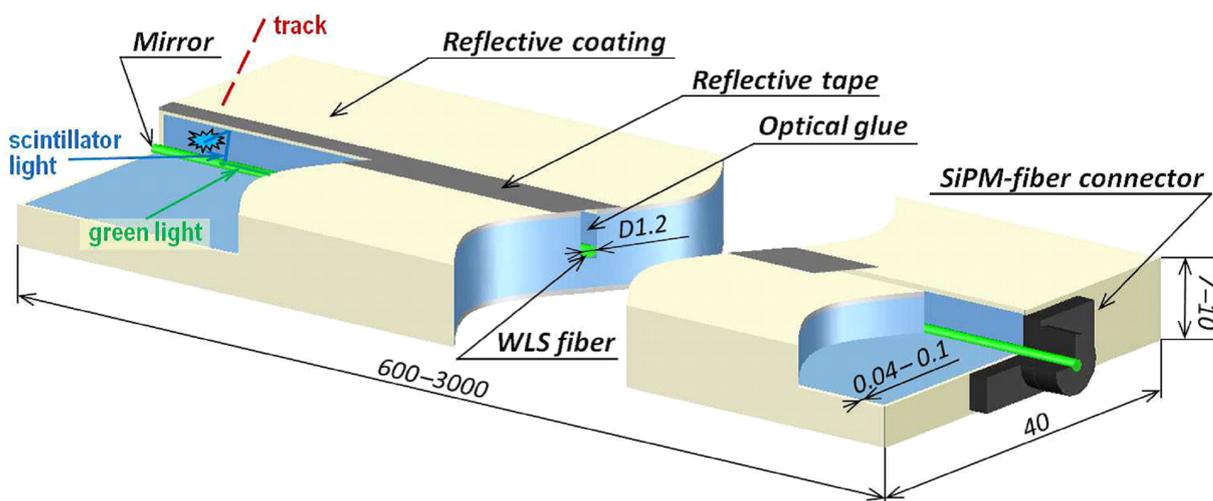


Рис. 4: Схематичное изображение пластикового сцинтилляционного счётчика.

Рассматриваемые в данной работе счётчики относятся к органическим сцинтилляторам, основной компонент которых — полистирол. Однако, состоящие из одного полистирола полоски не обладают достаточным световыходом, поэтому в основу счётчика легируют люминесцентные и спектросмещающие добавки, такие как р-терфинил и РОРОР. Данные полоски производятся методом экструзии, так как этот метод позволяет получить довольно узкие и протяженные формы.

Принцип действия сцинтилляционного счётчика заключается в том, что ионизирующая частица при пролёте через его материал возбуждает частицы, что провоцирует сцинтилляционное излучение, которое захватывается спектросмещающим волокном[13]. Переизлученный свет частично захватывается в спектросмещающем волокне и регистрируется кремневыми фотоумножителями, представляющие собой матрицу крошечных фотодиодов (пикселей), подключенных к общей шине и работающих в режиме Гейгера. В этом режиме отклик фотоумножителя пропорционален количеству сработавших пикселей и, при условии, что количество сработавших пикселей намного меньше, чем их общее количество, пропорционален начальному свету. Количество пикселей характерное для матрицы 1 мм на 1 мм варьируется обычно в диапазоне от 100 до 1000 штук. На Рис. 5 представлено изображение кремневого фототумножителя.

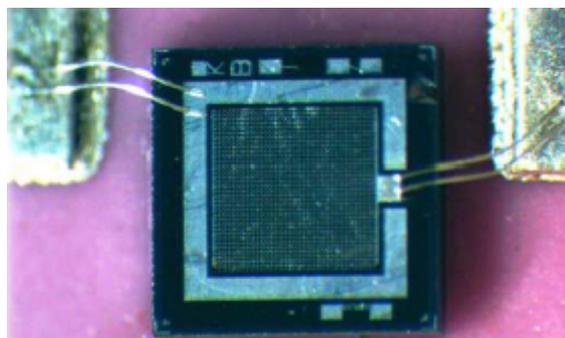


Рис. 5: Микроскопическое изображение поверхности кремниевого фотоумножителя, произведённого в МИФИ/Пульсар.

В программном обеспечении реализация проекта представлена в виде нескольких пакетов, отвечающих за разные функциональные части, среди них пакеты геометрии, оцифровки и реконструкции. Подробнее о них написано в главах 3.1, 3.2, 3.3.

1.2 Эксперимент Mu2e

1.2.1 Устройство детектора

Цель эксперимента Mu2e поиск событий безнейтринной конверсии мюона в электрон. В рамках стандартной модели вероятность такого перехода оценивается в 10^{-54} . Проектируемая чувствительность эксперимента Mu2e около 10^{-17} , и если события $\mu^- N \rightarrow e^- N$ будут обнаружены, то это будет

несомненным проявлением взаимодействий за рамками стандартной модели.

Дизайн эксперимента приведён на Рис. 6. Протонный пучок попадает на первичную мишень расположенную в производящем соленоиде и выбивает из неё пионы. Пионы и мюоны рождённые в распаде пиона вылетевшие в направлении обратному к направлению движения пучка протонов попадают в транспортный S-образный соленоид, где происходит их фильтрация. Отрицательные мюоны под действием магнитного поля отклоняются от центральной траектории к пропускающему отверстию в калиматоре, а затем во второй половине соленоида возвращаются к начальной траектории и останавливаются на вторичной мишени из алюминия. В сигнальном процессе происходит конверсия мюона в электрон, с кинетической энергией, приблизительно равной массе покоя мюона — 105 МэВ. Детектор Mu2e расположен внутри вакуумированного канала детекторного соленоида в почти однородном магнитном поле напряжённостью 1 Т. Основная его задача заключается в эффективной и точной идентификации спиральных траекторий электронов с энергией около 105 МэВ. Детектор состоит из трекера и калориметра, которые обеспечивают измерения энергии/импульса, времени и траектории. Мюонная система окружает детекторный соленоид и почти половину транспортного соленоида.

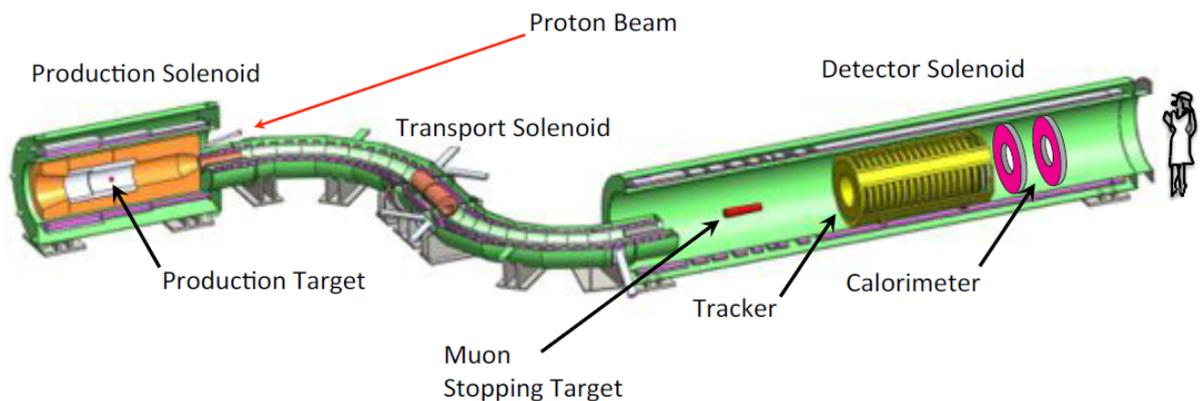


Рис. 6: Детектор Mu2e. Мюонная система, окружающая соленоид детектора, не показана.

1.2.2 Программное обеспечение эксперимента Mu2e

Как уже упоминалось, без программного обеспечения не обходится ни один эксперимент в физике высоких энергий. В случае с Mu2e программные пакеты объединены в фреймворк с названием «Art»[14, 15]. Его структура началась как эволюция фреймворка эксперимента CMS[16] и с тех пор была в значительной степени адаптирована для нужд экспериментов группы Fermilab, в которые помимо Mu2e входят NOvA[17], g-2[18] и LArSoft[19].

«Art» является модульной системой, функционально напоминающей фреймворк «Аврора», куда подключаются необходимые пользователю сервисы и модули. Фреймворк считывает последовательность событий из указанного пользователем источника ввода, вызывает перечисленные пользователем модули для выполнения задач реконструкции, анализа, моделирования или фильтрации событий, а затем может записывать результаты в один или несколько файлов. Модуль — это настраиваемая единица написанного пользователем кода с параметрами, определяемыми его родительским классом. По своему назначению модули делятся на анализирующие, производящие, фильтрующие, поисковые и выводящие. Сервис, как и модуль, является настраиваемым классом, зарегистрированный в фреймворке, но не имеет принадлежности к определённому типу. Ещё одно отличие — это доступ к служебным функциям. Сервисная система контролирует время создания и уничтожения сервисных объектов, а также обеспечивает доступность нужного их количества. И модули, и сервисы являются примерами подключаемых частей программы, использование которых определяется файлом для её конфигурации. Причём сервисы иницируются до модулей, что позволяет модулям их использовать, но не наоборот. Управление потоком данных в фреймворке организовано в виде конечного автомата — «EventProcessor». Он обеспечивает инициализацию основного приложения, вызов сервисов и различных этапов каждого модуля. Выше описанные операции параметризуются с помощью особого языка FHiCL[20], разработанного для простого описания конфигурационных данных. Модель взаимодействия модулей друг с другом похожа на реализованную в «Авроре» — через единую информационную область.

Фреймворк «Art» опирается на ряд внешних продуктов (например, библиотеку Boost C++[21] и ROOT); эти продукты развёртываются с помо-

пью упрощённой системы управлением пакетов UPS[22]. Сам фреймворк развёртывается с помощью того же механизма, и эксперименты с его использованием рассматривают его как ещё один внешний продукт, на который опирается их код.

1.2.3 Мюонная система Mu2e

Космические мюоны являются известным источником потенциального фона и для экспериментф Mu2e крайне важно его подавить. Ряд процессов, инициируемых космическими мюонами, может производить электроны с энергией 105 МэВ, которые неотделимы от тех, что исходят из вторичной мишени. Такие фоновые события должны быть подавлены, чтобы достичь чувствительности, требуемой Mu2e. С таким фоном борются как с помощью пассивного экранирования: вскрыши вокруг зала детектора и бетонного экранирования, окружающего соленоид детектора, так и активного, мюонной системы, называемой CRV (Cosmic Ray Veto). Система CRV состоит из четырёх слоёв смещённых относительно друг друга длинных экструдированных сцинтилляционных полос с алюминиевыми поглотителями между каждым слоем. на Рис. 7 изображена её геометрия. Технология счётчиков похожа на ту, которая планируется в мюонной системе СЧТФ, — полоска из полистерола лигируемого добавками, спектросмещающее волокно, а на торце — кремниевый фотоумножитель. Счётчики формируются в группы по 32 или 64 — модули, которые окружают выходной конец транспортного соленоида и боковые с верхней стороны детекторного соленоида, что можно увидеть на Рис. 8.

Обнаружение трека, состоящего как минимум из трёх соседних полос попаданий в разных слоях с временным окном 5 нс, сигнализирует о присутствии космического мюона. Предполагается, что конверсионный электрон-кандидат в течение 125 нс после такой регистрации создаётся именно этим мюоном и на него наложено вето в оффлайн анализе.

В космическом фоне, конечно, преобладают мюоны, но он также включает нейтронный фон, который системой CRV не экранируется так же хорошо как мюонный. В данной работе проведена оценка нейтронного фона и эффективности CRV относительно него.

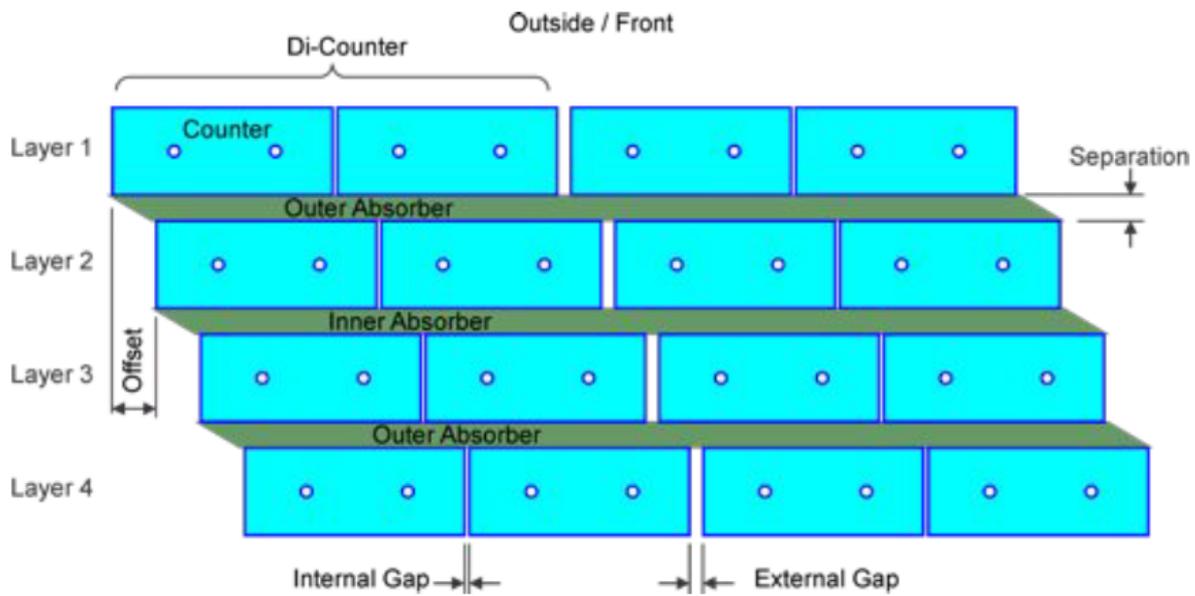


Рис. 7: Геометрия модулей системы CRV.

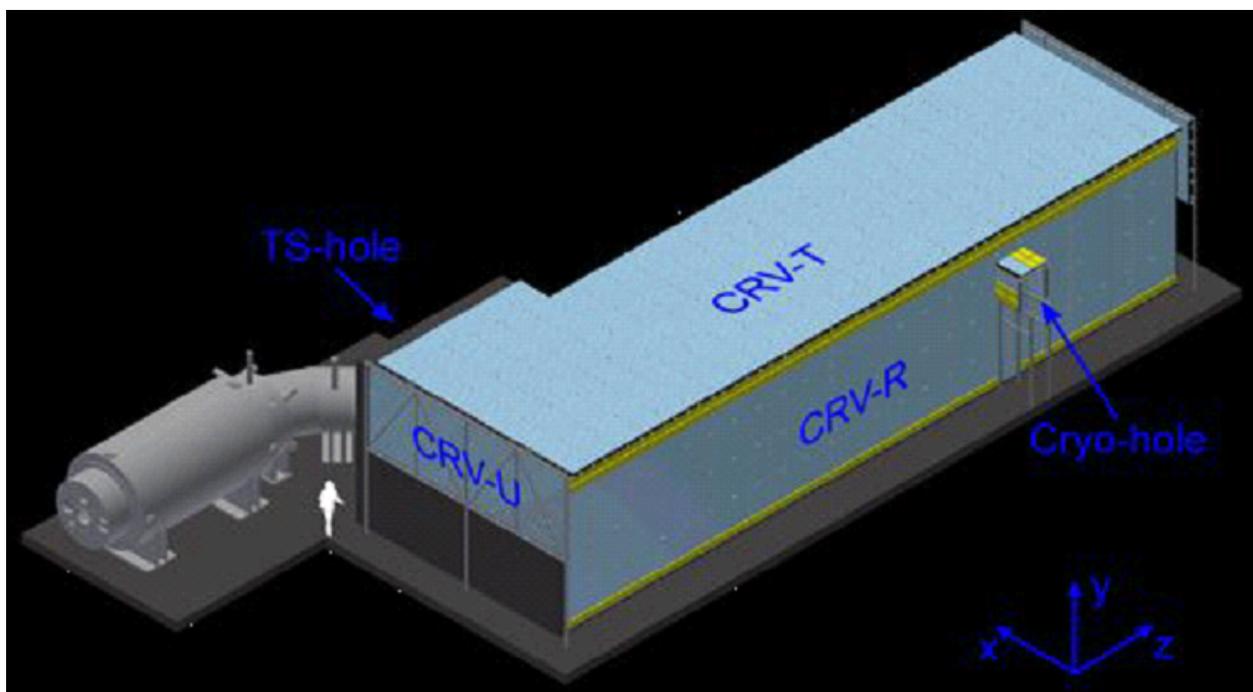


Рис. 8: Мюонная система Mu2e.

2 Развитие инфраструктуры моделирования СЧТФ

2.1 Модуль валидации геометрии

Геометрия детектора СЧТФ очень сложная и многоуровневая, при её описании возможны ошибки, разные подсистемы детектора описываются разными людьми, и вполне возможно пересечение геометрии. Всё это приводит к тому, что для реализации такой большой системы необходимы инструменты, которые позволяют проверить правильность её описания. Эти инструменты объединены в специальный модуль — модуль валидации геометрии, который реализован в виде программного пакета фреймворка «Аврора» «GeometryValidation». Для каждого инструмента подготовлен скрипт на языке Python для его запуска, внутри которого происходит вызов определённых функций пакета, реализованных на C++.

Общим параметром у всех скриптов является список подсистем, геометрия которых должна быть загружена. Для удобства и скорости использования был модифицирован алгоритм нахождения нужной геометрии в фреймворке. Был разработан механизм псевдонимов, которые позволяют перечислять необходимые для загрузки модули короткими названиями и использовать собирающие имена. Список всех псевдонимов и то, в какие имена пакетов они разворачиваются при исполнении скрипта, задаётся отдельным файлом в формате YAML[23].

Стоит упомянуть ещё об одном небольшом изменении, позволившем обеспечить корректную работу инструментам валидации геометрии. В DD4hep есть внутреннее ограничение, требующее, чтобы геометрия должна быть описана единым файлом. Однако для фреймворка «Аврора» это требование является очень ограничивающим, поскольку разработка всех систем ведётся многими людьми параллельно и при естественной организации нужно описать геометрию каждой системы в отдельном файле. Кроме того, на этапе проектирования, на котором мы находимся сейчас, для каждой системы существуют разные варианты геометрии, поэтому потребовалось расширить возможность представления геометрии в виде нескольких файлов. Была расширена схема описания геометрии в xml файле и реализован

механизм чтения геометрического описания из иерархии файлов.

В процессе работы было реализовано 4 средства валидации описанных далее.

Инструмент «testLoadGeometry»

Первый инструмент служит для проверки процесса загрузки геометрии детектора. Код, который выполняется при его запуске, также выполняется при запуске любого другого задания, которое как-то работает с геометрией детектора. Назначение этого инструмента состоит в том, чтобы исключить ошибки на стадии инициализации геометрии. Результатом его работы является вывод в консоль сообщений, которые генерируются системой и детектор-конструкторами (специальные C++ классы, создающее геометрические объёмы по описанию из xml файлов) загружаемых подсистем. Это могут быть как информационные сообщения, так и предупреждения об ошибках. Например, на Рис. 9 изображён случай, когда в xml файлах геометрии произошло переопределение переменной.

```
|FarichEndcap      INFO - readout: FarichEndcapHits  
FarichEndcap      INFO - set sensitive for layer_3 and slice_1 (Si)  
FarichEndcap      INFO create_PolyHedraEndCaps() is finished  
CoilConstruction  INFO create_Coil() is started  
CoilConstruction  INFO - det_name: Coil  
CoilConstruction  INFO create_Coil() is finished  
Detector          WARN  +++ Object 'MuonBarrelRmin' is already defined and new one will be ignored  
MuonBarrel        INFO create_PolyHedraBarrel is started  
MuonBarrel        INFO - det_name: MuonBarrel  
MuonBarrel        INFO - readout: MuonBarrelReadout  
MuonBarrel        INFO - set sensitive for lauer 1 and slice 2 (Plexiglass)
```

Рис. 9: Пример сообщения, выводимого скриптом «testLoadGeometry». Красным выделено предупреждение о возможной ошибке.

Инструмент «testOverlap»

Другой возможной ошибкой в реализации геометрии детектора является наложение одних объёмов на другие. Инструмент «testOverlap» позволяет обнаружить проблемы такого рода, причём как внутри одной подсистемы, так и между разными подсистемами. В дополнение он позволяет детектировать случаи так называемой экструзии, когда дочерний объём выходит за пределы родительского. В основе логики работы алгоритма лежит функция из пакета ROOT «CheckOverlaps», для корректной работы которой

требуется правильная загрузка геометрии. В качестве результата работы инструмент выводит в консоль количество перекрытий/экструзий и, при наличии таковых, пишет, какие объёмы в этом были задействованы. Пример обнаружения перекрытия объёмов продемонстрирован на Рис. 10.

Инструмент «printGeoHierarchy»

Для корректного моделирования и реконструкции необходимо, чтобы реализованная геометрия детектора обладала правильной вложенностью объёмов. Для контроля этого аспекта был реализован инструмент «printGeoHierarchy». Параметры скрипта, подготовленного для этого инструмента, в отличие от упомянутых выше, расширенные. Среди них параметр, отвечающий за максимальный уровень вложенности, т.е. объёмы, которые находятся глубже, выводиться не будут, а также параметр, по которому определяется иерархию какого типа выводить на экран. Есть два типа иерархии: низкоуровневая, составляется из геометрических объёмов, создаваемых ROOT, и высокоуровневая, состоящая из DetElement'ов — сущностей, которые присваиваются определённым объёмам на стадии детектор-конструктора. Как указано в документации DD4hep[24], DetElement при описании геометрии стоит создавать для каждой части подсистемы, для которой имеет смысл понятие детекторной информации, т.е. температуры, напряжения, позиционирование, и прочие медленно меняющиеся параметры, которые попадают в понятие условия эксперимента. Помимо иерархии объёмов, инструмент выводит другую важную информацию: для низкоуровневой иерархии пишутся идентификаторы объёма, а для высокоуровневой — полный путь к объёму детектора, к которому привязан DetElement. Стоит также отметить, что для обоих случаев возможен разный вывод, т.к. не каждому объёму присваивается DetElement. На Рис. 11 и 12 это продемонстрировано.

[zhadan@proxima build]\$ testOverlap.py -s FARICH,FF  Вызов скрипта с параметрами

Используемые xml файлы с геометрией 

```

detector_geo_input:
/home/zhadan/workarea/build/x86_64-slc7-gcc8-opt/XML/InstallArea/x86_64-slc7-gcc8-opt/XML/DetBase/sctau_detector_geo_initialize.xml
/home/zhadan/workarea/build/x86_64-slc7-gcc8-opt/XML/FARICHGeo/sctau_FarichPID.xml
/home/zhadan/workarea/build/x86_64-slc7-gcc8-opt/XML/FinalFocusGeo/FinalFocusGeom_def.xml
/ceph/groups/sctau/software/nightlies/master/2020-04-22/0849/SCTauSim/0.2.2/InstallArea/x86_64-slc7-gcc8-opt/XML/DetBase/sctau_detector_geo_initialize.xml

```

GeometryTools INFO Start test overlap
Info in <TGeoModelatrix::CheckOverlaps>: Checking overlaps for world_volume and daughters within 0.01
TGeoMatrix::dtor:0; RuntimeWarning: Registered matrix Identity was removed
TGeoMatrix::dtor:0; RuntimeWarning: Registered matrix FarichEndcap_assembly_vol_placement was removed
TGeoMatrix::dtor:0; RuntimeWarning: Registered matrix Identity was removed
Check overlaps: [====] 764 [100,00 %]
Info in <TGeoModelatrix::CheckOverlaps>: Number of illegal overlaps/extrusions: **2**  **нарушений**
Список объёмов в которых найдены нарушения 

```

=== Overlaps for default ===
= Overlap ov00000: world_volume/FarichEndcap_assembly_vol_1/FarichEndcap_1/Layer_2_1 overlapping world_volume/full_FinalFocus_assembly_vol_1/SteelFlange_2 ovlp=0,85
= Overlap ov00001: world_volume/FarichEndcap_assembly_vol_1/FarichEndcap_0/Layer_2_1 overlapping world_volume/full_FinalFocus_assembly_vol_0/SteelFlange_2 ovlp=0,85
GeometryTools INFO End test overlap

```

Рис. 10: Пример вывода сообщения инструмента «testOverlap» в случае нахождения перекрытий геометрии.

```

GeometryTools INFO Start printing DetElements hierarchy, nesting level = 3
level 0: world Placement path: /world_volume_1
level 1: FinalFocus Placement path: /world_volume_1/full_FinalFocus_assembly_vol_0
level 2: FinalFocus_left Placement path: /world_volume_1/full_FinalFocus_assembly_vol_0/sub_FinalFocus_assembly_vol_1
level 2: FinalFocus_right Placement path: /world_volume_1/full_FinalFocus_assembly_vol_0/sub_FinalFocus_assembly_vol_0
GeometryTools INFO End printing DetElements hierarchy

```

 **Путь до объёма**

Рис. 11: Пример вывода сообщения инструмента «printGeoHierarchy» для финального фокуса в режиме печати DetElement'ов.

```

GeometryTools  INFO Start printing ROOT nodes hierarchy, nesting level = 3
level 0: world_volume_1
  level 1: full_FinalFocus_assembly_vol_0 VolIDs: system=80
    level 2: sub_FinalFocus_assembly_vol_0 VolIDs: RL=0
      level 3: InnerTubeSteelOut_0 VolIDs: part=0 detail=6
      level 3: InnerTubeSteelOut_1 VolIDs: part=0 detail=8
      level 3: SteelFlange_2 VolIDs: part=1 detail=0
      level 3: PipeAdapterTubeOut_3 VolIDs: part=4 detail=0
      level 3: PipeAdapterTubeOut_4 VolIDs: part=4 detail=1
      level 3: Pipe_round_trap_5 VolIDs: part=7 detail=1
      level 3: RoundTrapAdapter_VacTube_6 VolIDs: part=8 detail=0
      level 3: RoundTrapAdapter_VacTube_7 VolIDs: part=8 detail=1
      level 3: PConeFl_8 VolIDs: part=9 detail=0
      level 3: RoundTrapAdapter_9 VolIDs: part=10 detail=0
    level 2: sub_FinalFocus_assembly_vol_1 VolIDs: RL=1
      level 3: InnerTubeSteelOut_0 VolIDs: part=0 detail=6
      level 3: InnerTubeSteelOut_1 VolIDs: part=0 detail=8
      level 3: SteelFlange_2 VolIDs: part=1 detail=0
      level 3: PipeAdapterTubeOut_3 VolIDs: part=4 detail=0
      level 3: PipeAdapterTubeOut_4 VolIDs: part=4 detail=1
      level 3: Pipe_round_trap_5 VolIDs: part=7 detail=1
      level 3: RoundTrapAdapter_VacTube_6 VolIDs: part=8 detail=0
      level 3: RoundTrapAdapter_VacTube_7 VolIDs: part=8 detail=1
      level 3: PConeFl_8 VolIDs: part=9 detail=0
      level 3: RoundTrapAdapter_9 VolIDs: part=10 detail=0
GeometryTools  INFO End printing ROOT nodes hierarchy

```

Идентификатор
объёма

Уровень
вложенности

Имя объёма

Рис. 12: Пример вывода сообщения инструмента «printGeoHierarchy» для финального фокуса в режиме печати ROOT узлов.

Инструмент «MaterialScan»

Инструмент «MaterialScan» является вспомогательным при проектировании геометрии детектора. За его основу была взята утилита с аналогичным названием из DD4hep. Её код был адаптирован под фреймворк «Аврора». Основная функция инструмента заключается в выводе таблицы материалов, находящихся на пути частицы из одной точки пространства в другую. В этой таблице присутствует информация о пройденных геометрических объёмах, их толщинах, радиационных длинах, плотности вещества, название материала и уже пройденная длина пути частицы. Как и в случае инструмента «printGeoHierarchy», скрипт для «MaterialScan» имеет расширенные параметры. В его случае это координаты для одиночного запуска или файл с координатами с построенным путём частицы. Вывод данного инструмента является очень информативным, но в некоторых случаях это излишне. Для таких ситуаций был введён режим упрощённой печати, который выводит только таблицу материалов без дополнительной информации. Пример сокращённого и полного вывода представлен на Рис. 13 и 14 соответственно. Режим вывода задаётся также через параметр скрипта.

```
+ Material scan between: x_0 = ( 0,00, 0,00, 0,00) [cm] and x_1 = ( 300,00, 0,00, 0,00) [cm] :
```

Layer \	Material	Atomic Number/Z	Mass/A [g/mole]	Density [g/cm3]	Radiation Length [cm]	Interaction Length [cm]	Thickness [cm]	Path Length [cm]	Integrated X0 [cm]	Integrated Lambda [cm]	Material Endpoint (cm, cm, cm)
1	Air	7	14,801	0,0012	30513,4405	72002,7064	160,000	160,00	0,005244	0,002222	(160,00, 0,00, 0,00)
2	Steel235	26	55,734	7,8500	1,7662	17,1814	0,500	160,50	0,288340	0,031323	(160,50, 0,00, 0,00)
3	Vacuum	7	14,784	0,0000	3,66346e+11	8,63978e+11	14,285	174,78	0,288340	0,031323	(174,78, 0,00, 0,00)
4	NbTiAl	18	38,283	4,0175	4,7908	28,5769	0,430	175,22	0,378094	0,046370	(175,22, 0,00, 0,00)
5	Vacuum	7	14,784	0,0000	3,66346e+11	8,63978e+11	14,285	189,50	0,378094	0,046370	(189,50, 0,00, 0,00)
6	Steel235	26	55,734	7,8500	1,7662	17,1814	0,500	190,00	0,661191	0,075472	(190,00, 0,00, 0,00)
7	Air	7	14,801	0,0012	30513,4405	72002,7064	110,000	300,00	0,664796	0,076999	(300,00, 0,00, 0,00)
0	Average Material	22	47,635	0,0330	451,2666	3896,1357	300,000	300,00	0,664796	0,076999	(300,00, 0,00, 0,00)

Рис. 13: Пример сокращённого вывода сообщения инструмента «MaterialScan» для катушки.

```
using subsystems aliases :
  Coil
detector_geo_input:
  /ceph/groups/sctau/software/nightlies/master/2022-04-06T1306/Aurora/1.1.0/InstallArea/x86_64-slc7-gcc9-opt/XML/DetBase/sctau_detector_geoinitialize.xml
  /ceph/groups/sctau/software/nightlies/master/2022-04-06T1306/Aurora/1.1.0/InstallArea/x86_64-slc7-gcc9-opt/XML/CoilGeo/CoilGeom_def.xml
  /ceph/groups/sctau/software/nightlies/master/2022-04-06T1306/Aurora/1.1.0/InstallArea/x86_64-slc7-gcc9-opt/XML/DetBase/sctau_detector_geofinalize.xml
GeometryTools INFO Start scan
Info in <TGeoManager::TGeoManager>: Geometry default, Detector Geometry created
Info in <TGeoManager::SetTopVolume>: Top volume is world_volume, Master volume is world_volume
Info in <TGeoNavigator::BuildCache>: --- Maximum geometry depth set to 100
CoilConstruction INFO create_Coil() is started
CoilConstruction INFO - det_name: Coil
CoilConstruction INFO create_Coil() is finished
Info in <TGeoManager::CheckGeometry>: Fixing runtime shapes...
Info in <TGeoManager::CheckGeometry>: ...Nothing to fix
Info in <TGeoManager::CloseGeometry>: Counting nodes...
Info in <TGeoManager::Voxelize>: Voxelizing...
Info in <TGeoManager::CloseGeometry>: Building cache...
Info in <TGeoManager::CountLevels>: max level = 3, max placements = 1
Info in <TGeoManager::CloseGeometry>: 4 nodes/ 5 volume UID's in Detector Geometry
Info in <TGeoManager::CloseGeometry>: -----modeler ready-----
```

```
+ Material scan between: x_0 = ( 0,00, 0,00, 0,00) [cm] and x_1 = ( 300,00, 0,00, 0,00) [cm] :
```

Layer \	Material	Atomic Number/Z	Mass/A [g/mole]	Density [g/cm3]	Radiation Length [cm]	Interaction Length [cm]	Thickness [cm]	Path Length [cm]	Integrated X0 [cm]	Integrated Lambda [cm]	Material Endpoint (cm, cm, cm)
1	Air	7	14,801	0,0012	30513,4405	72002,7064	160,000	160,00	0,005244	0,002222	(160,00, 0,00, 0,00)
2	Steel235	26	55,734	7,8500	1,7662	17,1814	0,500	160,50	0,288340	0,031323	(160,50, 0,00, 0,00)
3	Vacuum	7	14,784	0,0000	3,66346e+11	8,63978e+11	14,285	174,78	0,288340	0,031323	(174,78, 0,00, 0,00)
4	NbTiAl	18	38,283	4,0175	4,7908	28,5769	0,430	175,22	0,378094	0,046370	(175,22, 0,00, 0,00)
5	Vacuum	7	14,784	0,0000	3,66346e+11	8,63978e+11	14,285	189,50	0,378094	0,046370	(189,50, 0,00, 0,00)
6	Steel235	26	55,734	7,8500	1,7662	17,1814	0,500	190,00	0,661191	0,075472	(190,00, 0,00, 0,00)
7	Air	7	14,801	0,0012	30513,4405	72002,7064	110,000	300,00	0,664796	0,076999	(300,00, 0,00, 0,00)
0	Average Material	22	47,635	0,0330	451,2666	3896,1357	300,000	300,00	0,664796	0,076999	(300,00, 0,00, 0,00)

Информационный вывод системы и детектор-конструкторов

Путь до объёма

Рис. 14: Пример подробного вывода сообщения инструмента «MaterialScan» для катушки. Стрелками указаны элементы, опускаемые при сокращённом выводе.

Каждый скрипт запуска всех описанных выше инструментов имеет параметр «-help», с помощью которого будет выведено информационное сообщение с описанием принимаемых параметров, их порядке и необходимости.

2.2 Реализация базовых элементов алгоритмов оцифровки и реконструкции

Неотъемлемой частью программы моделирования являются модули оцифровки и реконструкции. Каждая из проектируемых подсистем детектора должна иметь свой пакет в каждом из этих модулей. Для унификации кода, упрощения дальнейшего расширения и изменения решено выделить общие части алгоритмов в отдельный пакет, на котором уже будут основываться пакеты подсистем. В данной работе были реализованы пакеты «DigiBase» и «RecoBase», включившие в себя базовую инициализацию, исполнение и завершение алгоритмов оцифровки и реконструкции, соответственно.

Основным элементом пакета «DigiBase» является класс с таким же названием. В этом классе определяются такие общие методы алгоритма, как «initialize», «execute», «finalize». В первом методе, как можно понять из названия, происходит инициализация алгоритма, выводятся информационные сообщения о том, какой именно алгоритм запущен, и заполнение данных класса, общих для всех подсистем, например декодер поля идентификатора ячейки. Помимо общих данных, подсистема может содержать уникальные параметры или сервисы, необходимые для её оцифровки. Для такого случая предусмотрена виртуальная функция «digiInitialize», выполняемая вне пакета «DigiBase», которая выполняется также на этапе инициализации. Основным методом, в котором реализуется логика алгоритма, это метод «execute». Согласно принятой в фреймворке «Аврора» модели данных, алгоритм оцифровки принимает данные коллекции типа «G4Hit», а на выходе выдаёт две коллекции — данных и времён, обе типа «RawHit», т.е. количество входных и выходных коллекций, а также их тип не зависит от подсистемы. Поэтому в общую часть метода «execute», помимо информационного вывода, вынесено создание выходных коллекций, а их наполнение происходит в функции «fillCollections» дочерних классов каждой подсистемы, согласно логике работы их алгоритма оцифровки. И в отличие от функции «digiInitialize», определение которой необязательно, «fillCollections» должна быть определена в дочернем классе. Последний общий метод алгоритмов «finalize» гарантирует их корректное завершение. Кроме общих функций алгоритмов, класс «DigiBase» содержит вспомогательные методы. Среди них перевод значения из идентификатора ячейки

в идентификатор канала, и доступ к значению геометрических констант, определённых в xml файле геометрии.

В пакете «RecoBase» всё устроено почти аналогично написанному выше, лишь с заменой в названии «Digi» на «Reco». Основное отличие в принимаемых и возвращаемых коллекциях. Каждая подсистема уникальна, из чего следует, что тип данных реконструируемой информации зависит от конкретных алгоритмов реконструкции. В реализации это отразилось следующим образом: функция «createOutputCollections», аналог «fillCollections», содержит алгоритм реконструкции и создаёт выходные коллекции внутри себя, а не изменяет их, принимая как параметры. Входные же данные у каждой подсистемы имеют одинаковый тип, что логично, так как перед реконструкцией идет этап оцифровки, где выходной тип данных унифицирован.

2.3 Реализация магнитного поля внутри железа мюонной системы

Для описания магнитного поля внутри железа мюонной системы был реализован отдельный класс «SolenoidField», наследуемый от стандартного класса Geant4 «G4MagneticField». Данный класс используется в процессе моделирования, чтобы получить значение поля в определённой точке пространства. Поле, реализуемое классом «SolenoidField», можно разделить на три части: соленоид, боковое железо и баррельная часть. Соленоид — это собственно сам источник магнитного поля, в детекторе СЧТФ оно направлено вдоль оси пучка и равно 1,5 Т. В боковом железе поле рассчитывается через поток магнитного поля, генерируемый соленоидом. Внутри железного слоя поле спадает по радиусу, а от первого (внутреннего) слоя к последнему (внешнему) по экспоненте. На данном этапе такого приближения достаточно для расчётов. В дальнейшем планируется использовать подробную карту магнитного поля. Поле баррельной части железа считалось по аналогии с учётом закона сохранения потока магнитного поля. Его схематичное направление в железе мюонной системы представлено на Рис. 15.

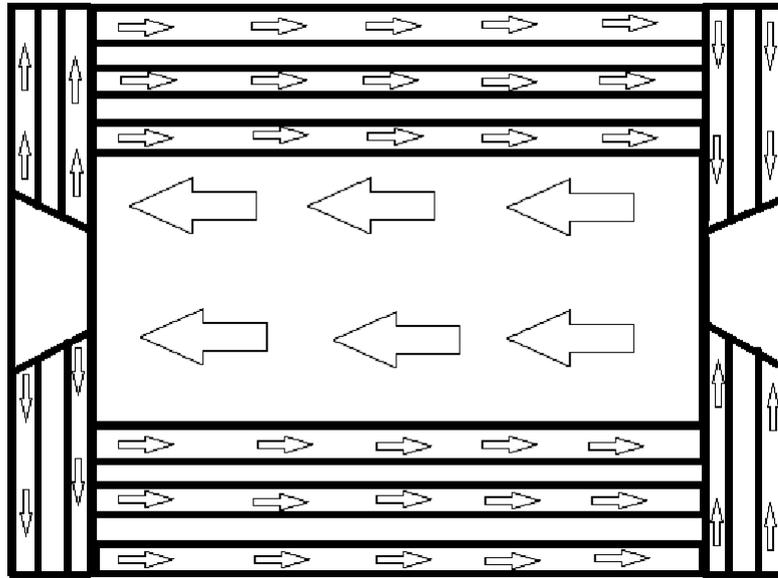


Рис. 15: Схематичное направление потока магнитного поля в железе мюонной системы.

Для простоты переключения между разными конфигурациями магнитного поля был реализован базовый абстрактный класс, включивший в себя все базовые вещи, такие как инициализация инструмента и необходимые ему параметры. Для каждой конкретной конфигурации магнитного поля реализуется класс наследник со своей собственной функцией конструктора магнитного поля.

3 Моделирование мюонной системы СЧТФ

3.1 Описание геометрии

Геометрия мюонной системы описана отдельно для баррельной и торцевой части. Баррельная часть описывается как набор модулей из входящих в них слоёв. Описание торцевой части немного сложнее из-за центральной заглушки, но принцип тот же. На Рис. 16 показана иерархия объектов частей системы в xml файле. Рассмотрим реализацию геометрии мюонной систе-

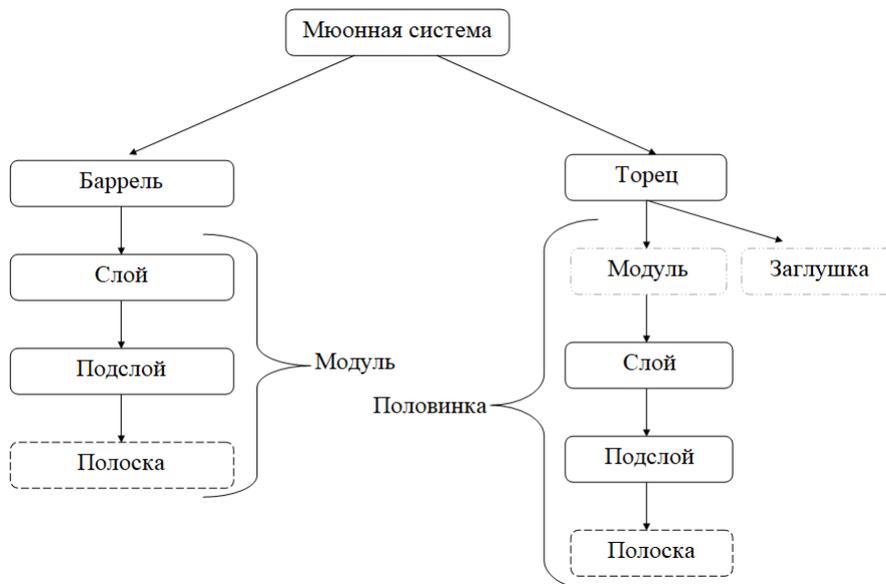


Рис. 16: Иерархия объектов частей системы в xml файле. Серый пунктир — объекты не вносящие вклад в идентификатор ячейки. Жирный пунктир — логические объекты, без физического объёма.

мы подробнее. Имеется три файла описания геометрии, один общий, где перечислены такие константы как размеры элементов, количество модулей, поворот системы и цвет отображаемых объёмов. Здесь же задаётся логическая сегментация слоёв на полоски и указывается правило, по которому будут устанавливаться идентификаторы ячейки. Два других файла включаются в общий и задают инструкцию для детектор-конструкторов частей системы: один для баррельной части, второй для торцевой. Детектор-конструктор — это реализованный C++ класс, который по тегам в xml файле создаёт геометрические объёмы согласно внутреннему алгоритму.

Детектор-конструктор для баррельной части называется «Sctau_PolyHedraBarrel». Его алгоритм заключается в создании объёма

следующей иерархии: модуль, слой, подслой, а затем его размножение на указанное количество сторон, указанных в xml файле. Пользователь описывает составляющие только одного модуля. Баррель имеет восемь сторон, модуль состоит из девяти слоёв. Первые восемь содержат «суперслой» — подслои, где находятся два чувствительных объёма, логически разделённых при помощи механизма сегментации DD4hep на полосы. Эти участки являются представлением в моделировании сцинтилляционных счётчиков системы. Каждый модуль представляет собой протяжённый пласт, сечение которого это трапеция.

Для торцевой части алгоритм детектор-конструктора «Sctau_PolyHedraEndCaps» немного сложнее, из-за необходимости учитывать конфигурацию железной заглушки. В xml файле описывается одна половина торцевой части, вторая половина будет получена её отражением. Как и в случае с баррелью, в файле прописывается последовательность слоёв с входящими в них подслоями. Кроме параметров слоёв необходимо задать внешние границы для заглушки и указать параметры для внутреннего выреза, проходящего через всю торцевую часть. Такие инструкции пользователь передаёт с помощью тегов, специально определённых для детектор-конструктора подсистемы. На Рис. 17 схематично показано разбиение торцевой части на элементы.

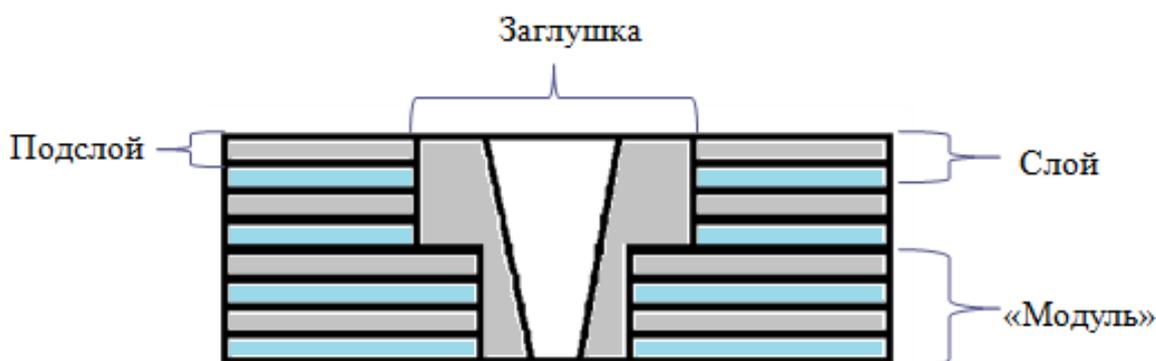


Рис. 17: Схематичное разбиение торцевой части на элементы.

Резюмируя выше описанное, конфигурация геометрии по слоям баррельной и торцевой части схожая, по восемь чувствительных слоёв в каждой

части, разделенных слоями железа различной толщины, которая варьируется от 30 мм до 150 мм, в зависимости от расположения слоя. Габариты мюонной системы в сборке составляют 5340 мм по Z направлению и 5560 мм по X и Y. Используя утилиту «GeoDisplay», было получено представление геометрии мюонной системы, результат на Рис. 18.

Описанная выше геометрия используется для первого этапа моделирования — проведения частиц через вещество детектора. В фреймворке «Аврора» для этой цели используется Geant4. Произошедшие события в чувствительных объёмах объединяются в коллекции и сохраняются в формате ROOT файлов. Тип события в выходном файле един для всех подсистем детектора и на начальном этапе включает информацию, среди которой координаты и время хита, тип и импульсы частицы, энерговыделение, идентификаторы трека и ячейки.

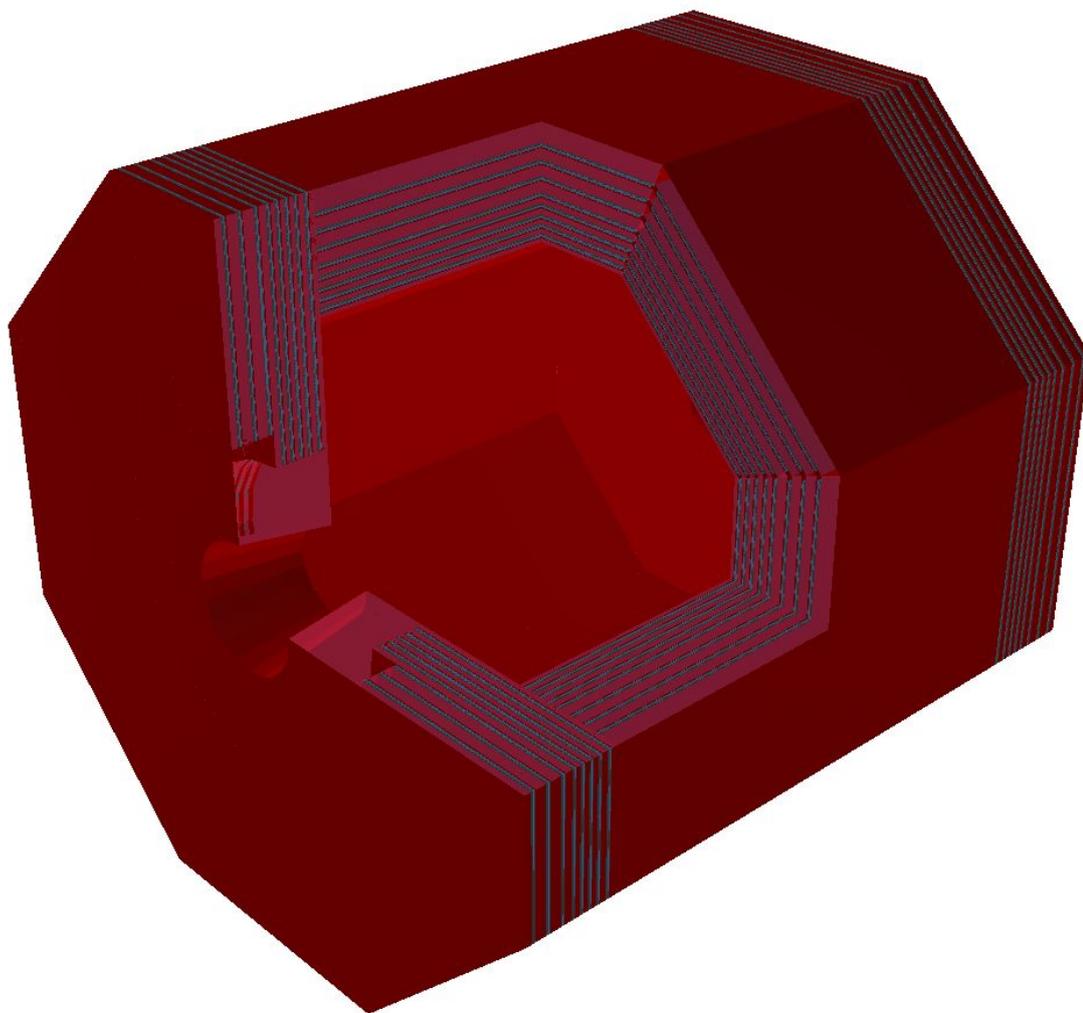


Рис. 18: Геометрия мюонной системы.

3.2 Алгоритм оцифровки

Следующий этап после моделирования — это оцифровка. Её задача состоит в имитации отклика электронники реального детектора. Модель данных СЧТФ предполагает, что тип выходных данных оцифровки включает всего два поля: номер канала и информацию, и, как было сказано в предыдущей главе, алгоритм оцифровки создаёт две коллекции — с данными и временем.

Для баррельной и торцевой частей системы написаны индивидуальные алгоритмы оцифровки, но в целом идея в них одинаковая. Модуль формирует выходные коллекции с данными, необходимыми для дальнейшей работы, в них входит время и номер ячейки для временной коллекции, энерговыделение и также номер ячейки для коллекции с данными. Время срабатывания увеличивается на время, которое потребуется сигналу на распространение до датчика на торце счётчика. Энерговыделение уменьшается согласно коэффициенту светосбора, зависящему от конкретных счётчиков. Номер ячейки преобразуется в номер канала. Рассмотрим формирование последнего подробнее. В реализованном на данный момент программном обеспечении номер канала баррельной части состоит из следующих полей: система, отношение к баррели, номер модуля, номер слоя, номер подслоя и номер полосы. Все поля, кроме последнего, устанавливаются детектор-конструктором и относятся к физическим объёмам, а номер полосы формируется благодаря механизму логической сегментации DD4her. Поля номера канала торцевой части следующие: система, правая/левая часть, номер четверти, номер слоя, номер подслоя и номер полосы. Здесь почти всё аналогично баррельной части, за исключением того, что номер четверти устанавливается на этапе оцифровки. По полученным данным из моделирования известно, в каком месте пространства произошло событие, и таким образом можно выделить конкретную четверть торцевой части без создания отдельного геометрического объёма. На этапе оцифровки некоторые хиты могут быть выкинуты, если они произошли вне физической области. И наоборот, в результате случайных срабатываний или шумов в выходную коллекцию добавятся события.

3.3 Алгоритм реконструкции

Реконструкция использует данные оцифровки и, по сути, является обратным для неё процессом. Её задача по совокупности этих данных восстановить, что это за событие и где именно оно произошло. Результатом работы реализованного алгоритма реконструкции мюонной системы является пересечение двух взаимоперпендикулярных счётчиков из одного слоя. Таким образом, тип выходных данных содержит следующую информацию: номер канала X полосы, номер канала Y полосы, номер слоя, общее энерговыделение и трёхмерную координату места события. Сам алгоритм можно разделить на два этапа. Рассмотрим его на примере торцевой части системы. На вход подаются две коллекции, с энерговыделением и временем. Алгоритм оцифровки гарантирует, что их размер одинаковый. Первый этап реконструкции заключается в проходе по этим двум коллекциям и формировании информации для второго этапа. Срабатывания счётчиков мюонной системы группируются по слоям и четвертям и формируются два отдельных массива X и Y полосок, причём, если находятся две соседние по координате полосы и время срабатывания которых отличается на величину меньше, чем заданное δ , то эти полосы объединяются в кластер. Время и энерговыделение в этом случае усредняется, а идентификатор канала берётся у той полосы, в которой выделилось больше энергии. На этом первый этап закончен, и в качестве результата появляются массивы X и Y полосок, сгруппированных по слоям и четвертям. Вторым этапом алгоритма формируется выходная коллекция, являющаяся результатом реконструкции. В случае, когда X и Y счётчики сработали в одной четверти, одном слое, и время их срабатывания отличается меньше, чем на заданный параметр, то они объединяются в реконструированный хит. Схематично оба этапа алгоритма представлены на Рис. 19. Если пары для сработавшей полосы не нашлось, то текущим алгоритмом она не учитывается. В дальнейшем планируется модифицировать алгоритм для более аккуратного подсчёта энерговыделения и учёта ситуаций, когда не находится сопоставление X или Y счётчику. Для баррельной части системы алгоритм принципиально почти не отличается, за исключением того, что счётчики в баррели группируются по модулям, а не четвертям.

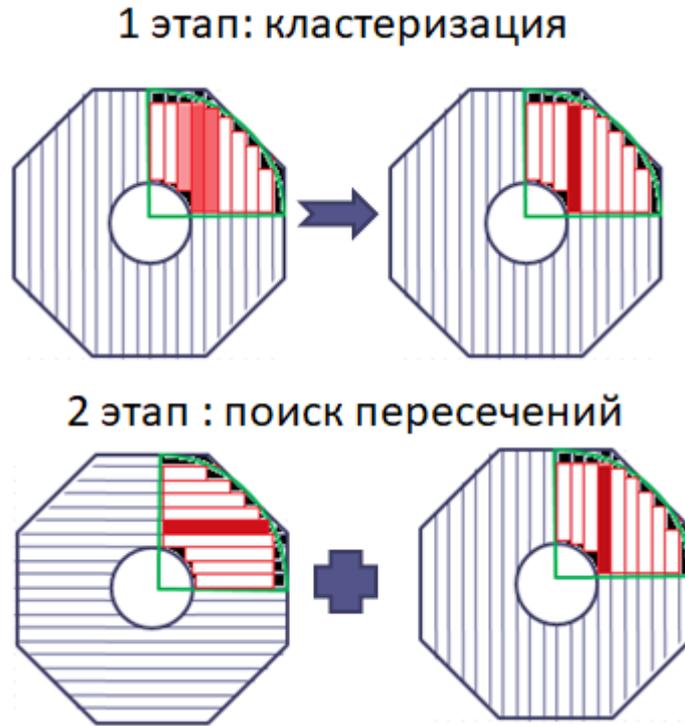


Рис. 19: Схематичное представление алгоритма реконструкции торцевой части мюонной системы.

3.4 Анализ результатов

С помощью разработанного программного обеспечения был проведен анализ эффективности мюонной системы на простом тесте, в качестве которого была выбрана проверка эффективности восстановления события срабатывания в слоях мюонной системы в зависимости от энергии. Проводился ряд моделирований, в которых из центра координат запускалась частица в направлении к одной из частей системы. В одном тесте рассматривалась только одна частица, т.е. для пионов и мюонов были отдельные запуски, по 100000 событий с одной энергией, в диапазоне 100-1500 МэВ с шагом 100 МэВ и 1,5-3 ГэВ с шагом 0,5 ГэВ. Угол θ для торцевой части составлял $36^\circ \pm 0,5^\circ$, чтобы зацепить все слои и не попасть в заглушку, а для баррельной — $90^\circ \pm 5^\circ$. Распределение по углу ϕ было равномерным, чтобы избежать просадки эффективности, которая была выявлена для баррели при запуске частицы под одинаковым углом на энергиях 800-1500 МэВ. Причиной было магнитное поле, которое на этом энергетическом диапазоне закручивало больше частиц в щель между модулями, чем вне его. Сравнение этого эффекта показано на Рис. 20.

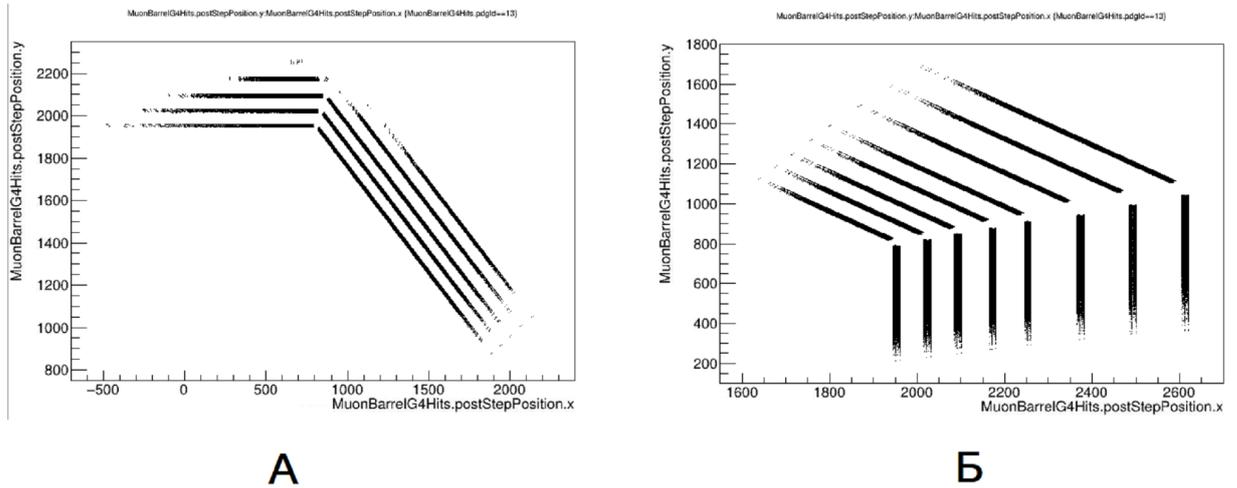


Рис. 20: XY распределение мюонов, зафиксированных баррельной частью мюонной системой. Магнитное поле 1,5 Т. Энергия мюонов А: 600 МэВ, Б: 1300 МэВ.

При проведении моделирования использовалась целиком вся геометрия детектора и описанные ранее алгоритмы оцифровки и реконструкции. Отдельный скрипт обрабатывал сгенерированные файлы реконструкции, вычислял эффективность и выводил её график. Стоит отметить, что срабатывание слоя в пределах одного события учитывалось только единожды, все следующие игнорировались. На Рис. 21 представлены результаты описанной выше цепочки действий для торцевой части мюонной системы. Полученные результаты соответствуют предварительно сделанным оценкам. Порог срабатывания слоёв для мюонов начинается примерно с 400 МэВ, когда 60% из них уже обнаруживалось первым слоем. Последовательность порогов по энергии срабатывания соответствует нумерации слоёв — наименьшая энергия наблюдается в первом слое, наибольшая в последнем. Чуть большая разница между восьмым и седьмым, седьмым и шестым порогами объясняется геометрией, в этих местах действительно находятся более толстые слои железа по 80 мм каждый. А общая эффективность выходит на полочку примерно в 99,9%. На Рис. 22 приведены аналогичные зависимости для пионов. Наблюдаются значительные отличия в эффективности срабатывания мюонной системы для мюонов и пионов, что и позволяет их различать.

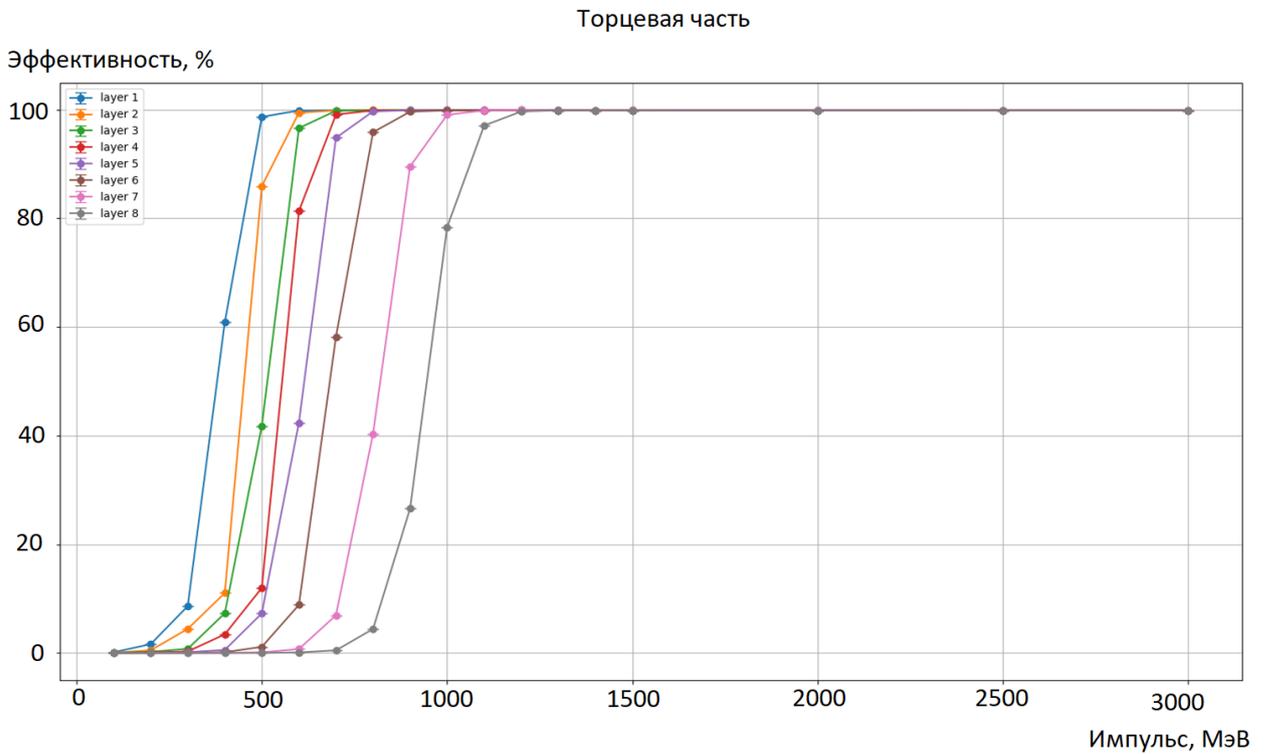


Рис. 21: Эффективность торцевой части мюонной системы в зависимости от энергии мюона.

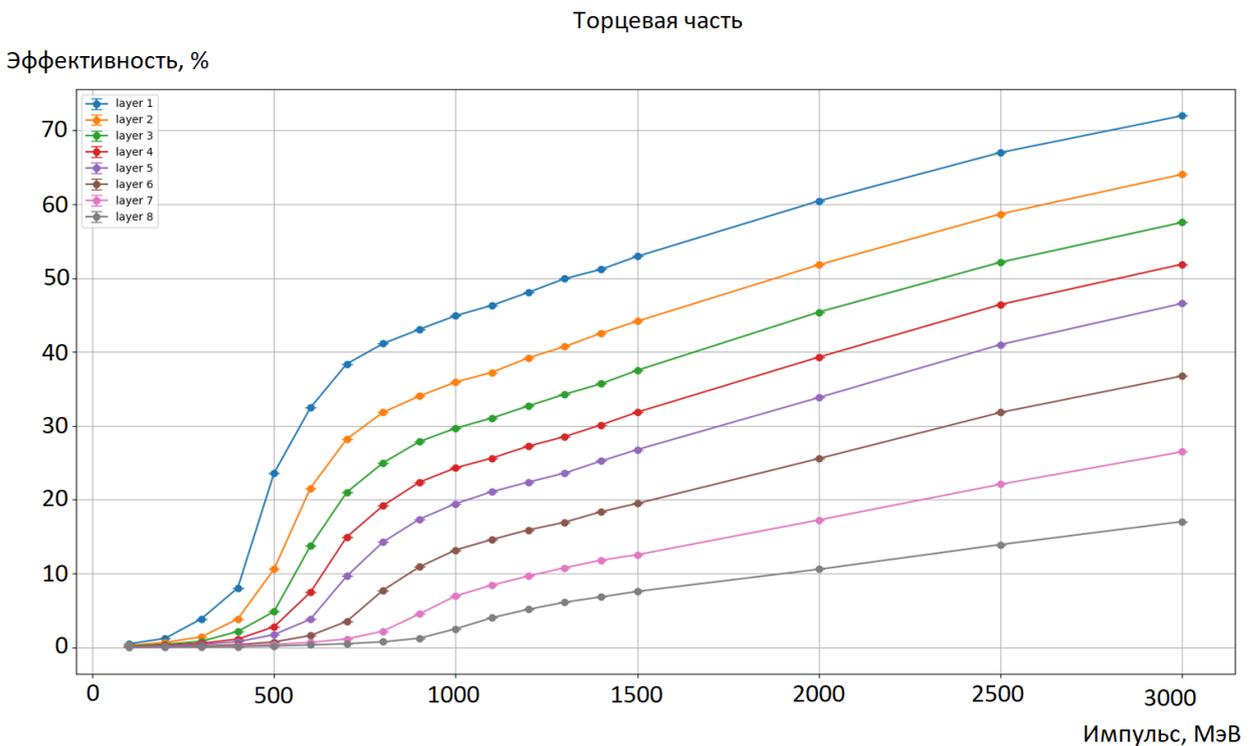


Рис. 22: Эффективность торцевой части мюонной системы в зависимости от энергии пиона.

3.5 Модуль визуализации

Ещё один способ, позволяющий отладить геометрию, алгоритмы оцифровки и реконструкции – это визуализация их результатов. Командой, отвечающей за программное обеспечение фреймворка «Аврора», ведётся разработка средства визуализации, основанного на веб-технологии, — так называемый `WebEventDisplay`. В основе него лежит фреймворк «Phoenix» [25], и функционал включает как отрисовку геометрии детектора, так и произошедших событий. Помимо этого разрабатывается возможность отображать сработавшие объёмы подсистем. Для каждой подсистемы необходимо реализовать отдельные модули, поскольку этот процесс схож с реконструкцией, общим алгоритмом здесь не обойтись. Эти модули в фреймворке «Аврора» называются веб-помощники, и их основная задача состоит в подготовке информации для модуля визуализации, что включает получение координат вершин сработавших объёмов и их форму по данным, полученным из оцифровки, т.е. по номеру канала.

В данной работе был реализован веб-помощник для мюонной системы. Логика его работы заключается в следующем. В момент инициализации из `xml` файла описания геометрии мюонной системы берутся необходимые константы, такие как ширины зазоров и толщина счётчика. Затем с помощью средств `DD4hep` находится центр сработавшего объёма и координаты, ограничивающей его коробки. На основе этого восстанавливается контур полосы, который отсутствует как физический объём и описан только с помощью логической сегментации. Реальные размеры счётчика и его положение в системе определяются благодаря комбинации этих данных с данными, полученными на фазе инициализации. Для мюонной системы — это 8 координат, которые записываются в `json` файл по правилу, заданному модулем визуализации. Результат работы модуля продемонстрирован на Рис. 23, где изображены сработавшие счётчики для торцевой и баррельных частей системы.

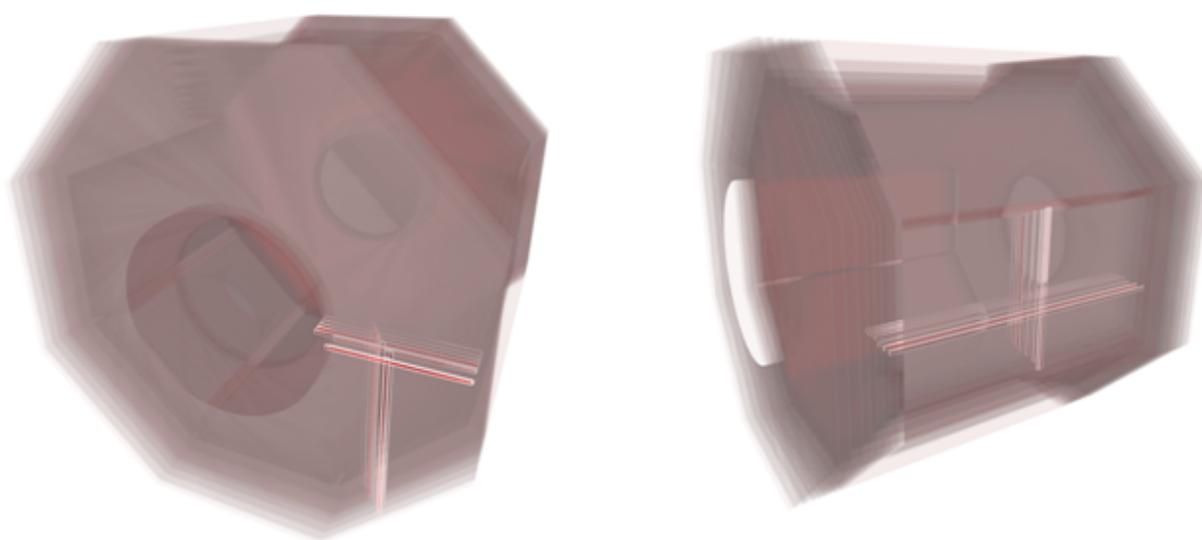


Рис. 23: Отображение сработавших сцинтилляционных счётчиков для торцевой и баррельной частей мюонной системы в веб-дисплее отображения событий.

4 Оценка нейтронного фона в мюонной системе Mu2e

4.1 Оценка фона в эксперименте Mu2e

Одной из основных трудностей в проведении эксперимента Mu2e является подавление фона. При предполагаемой чувствительности имеется ряд процессов, которые могут имитировать сигнал преобразования мюона в электрон. В основном этот фон возникает из пяти источников.

- Внутренние процессы, которые масштабируются с интенсивностью мюонного пучка, это радиоактивный захват мюона и распад мюона на орбите ядра.
- Процессы, которые происходят с задержкой по времени из-за частиц, медленно дрейфующих по спирали вниз от первичной мишени, таких как антипротоны.
- Быстрые процессы, в которых зарегистрированный электрон почти совпадает по времени с прибытием частицы пучка во вторичную мишень, это радиационный захват пиона.
- События, возникающие в результате ошибок реконструкции, вызванных дополнительной активностью в детекторе из-за обычных процессов.
- Космический фон.

В Таблице 1 приведена оценка фона из этих источников при предполагаемом времени проведения эксперимента. Наибольший вклад вносят распад мюона на орбите ядра и космические частицы. Казалось бы, что свободный мюон распадается по спектру Мишеля с пиковой вероятностью при максимальной энергии примерно при половине энергии покоя мюона (52,8 МэВ) и далеко от энергии конверсионного электрона 105 МэВ. Однако, хвост распределения тянется до этой энергии, что показано на Рис. 24, и при необходимой чувствительности эксперимента оказывает заметное влияние.

Космические лучи являются потенциальным источником электронов с сигнальной энергией в 105 МэВ. Если такие электроны будут иметь траектории, исходящие из вторичной мишени, то их можно принять за конверсионный мюонный электрон. Идентификация входящей космической частицы поможет исключить такие события, а пассивное экранирование уменьшить их количество. Отметим, что этот фон масштабируется в зависимости от времени жизни эксперимента, а не от интенсивности мюонного пучка.

Процесс	Ожидаемое значение
Космический фон	$0,209 \pm 0,02 \pm 0,06$
Распад мюона на ядре	$0,144 \pm 0,03 \pm 0,11$
Антипротоны	$0,040 \pm 0,001 \pm 0,020$
Радиоактивный захват пиона	$0,021 \pm 0,001 \pm 0,002$
Распад мюона в полете	$< 0,003$
Распад пиона в полете	$0,001 \pm < 0,001$
Пучок электронов	$2,1 \pm 1,0 * 10^{-4}$
Радиоактивный захват мюона	$0,000^{+0,004}_{-0,000}$
Общий фон	$0,41 \pm 0,03$

Таблица 1: Ожидаемый фон (число событий) за время проведения эксперимента Mu2e[26].

Для подавления фона космических мюонов есть мюонная система, но есть и другие фоны, вызываемые космическими частицами, на подавление которых она не оптимизирована. В данной работе была проведена оценка космического фона, производимого космическими нейтронами. Для анализа проводилось полное моделирование эксперимента с помощью фреймворка «Art». Моделировались космические частицы с помощью генератора «CRY»[27]. Отбирались события, источником которых были нейтроны, которые производили трек, как у конверсионного электрона, и не были зарегистрированы мюонной системой. Число событий нормировалось на общее время эксперимента. В результате фон оказался равен примерно $5 \cdot 10^{-2}$. Был рассмотрен общий поток нейтронов, и выявлены характеристики тех, которые вызывают фоновые события. Выяснилось, что средняя энергия нейтронов, производящих фон равна примерно 6,5 ГэВ, а медиана — около 2,4 ГэВ. Данные результаты (Рис. 25) сильно зависят от того, насколько

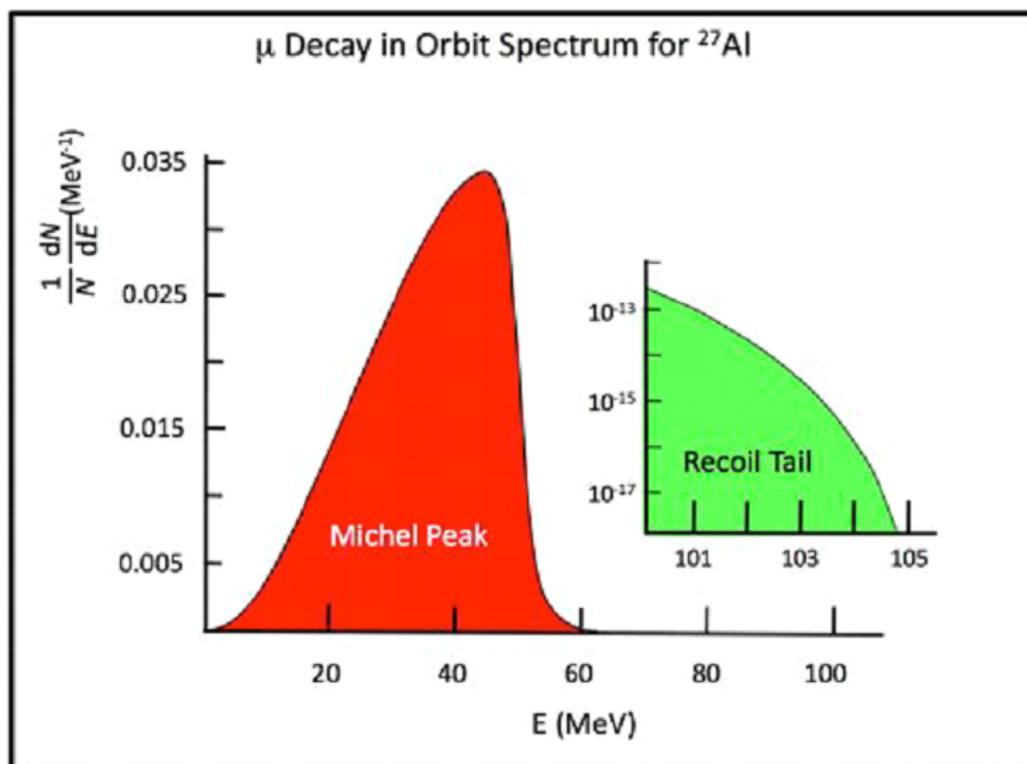


Рис. 24: Энергетический спектр электронов при распаде мюона на орбите ядра алюминия.

ко правильно моделируются космические нейтроны, поэтому было решено сравнить используемый алгоритм с реальными данными.

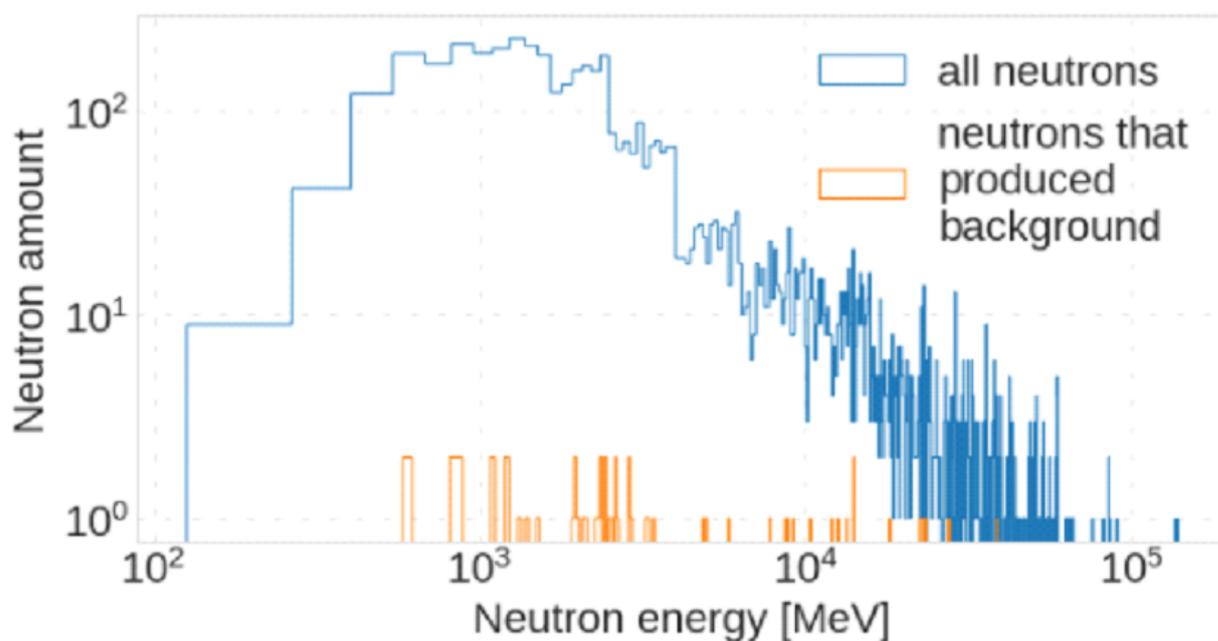


Рис. 25: Распределение космических нейтронов по энергии. Синий — общее количество, жёлтый — те, которые произвели фон.

4.2 Сравнение алгоритма «CRY» с реальными данными

Алгоритм «CRY»[27] является основным средством для генерации космических лучей при моделировании в эксперименте Mu2e. В качестве параметров алгоритм принимает уровень высоты (три опции: уровень моря, 2100 м и 11300 м), широту, дату, размер площадки и набор флагов, отвечающих за тип сгенерированных частиц. Чтобы понять, как он соотносится с реальными данными, были найдены опубликованные экспериментальные результаты[28, 29], которые рассматривают нейтронный космический фон, причём на энергии более 1 ГэВ, т.к. интересующие нас нейтроны обладают высокой энергией. Как оказалось, информации с такими исследованиями достаточно мало, поэтому сравнение проводилось только с данными из одной статьи и с предложенной в ней аналитической моделью. Её параметры показаны на Рис. 26.

$$\frac{d\phi_0(E)}{dE} = \sum_{j=1}^2 c_j \exp\left[-\beta_j (\ln(E))^2 + \gamma_j \ln(E)\right].$$

j	β_j	γ_j	c_j
1	0.3500	2.1451	1.006×10^{-6}
2	0.4106	-0.6670	1.011×10^{-3}

Рис. 26: Аналитическая модель для космического потока нейтронов [29].

И статья и модель оценивали нейтронный фон на уровне моря в Нью-Йорке, поэтому было проведено моделирование с помощью «CRY» при тех же условиях как при эксперименте, описанном в статье. На Рис. 27 приведён график, по которому видно, что алгоритм в среднем недооценивает нейтронный фон. Ступенчатая структура, наблюдаемая на графике, обуславливается особенностью реализации алгоритма «CRY». На основе распределений на Рис. 25 и 27 был получен взвешанный коэффициент отношения числа нейтронов, производящих фон, в эксперименте и в моделирова-

нии. В итоге получилось, что алгоритм «CRY» недооценивает нейтронный поток примерно в полтора раза.

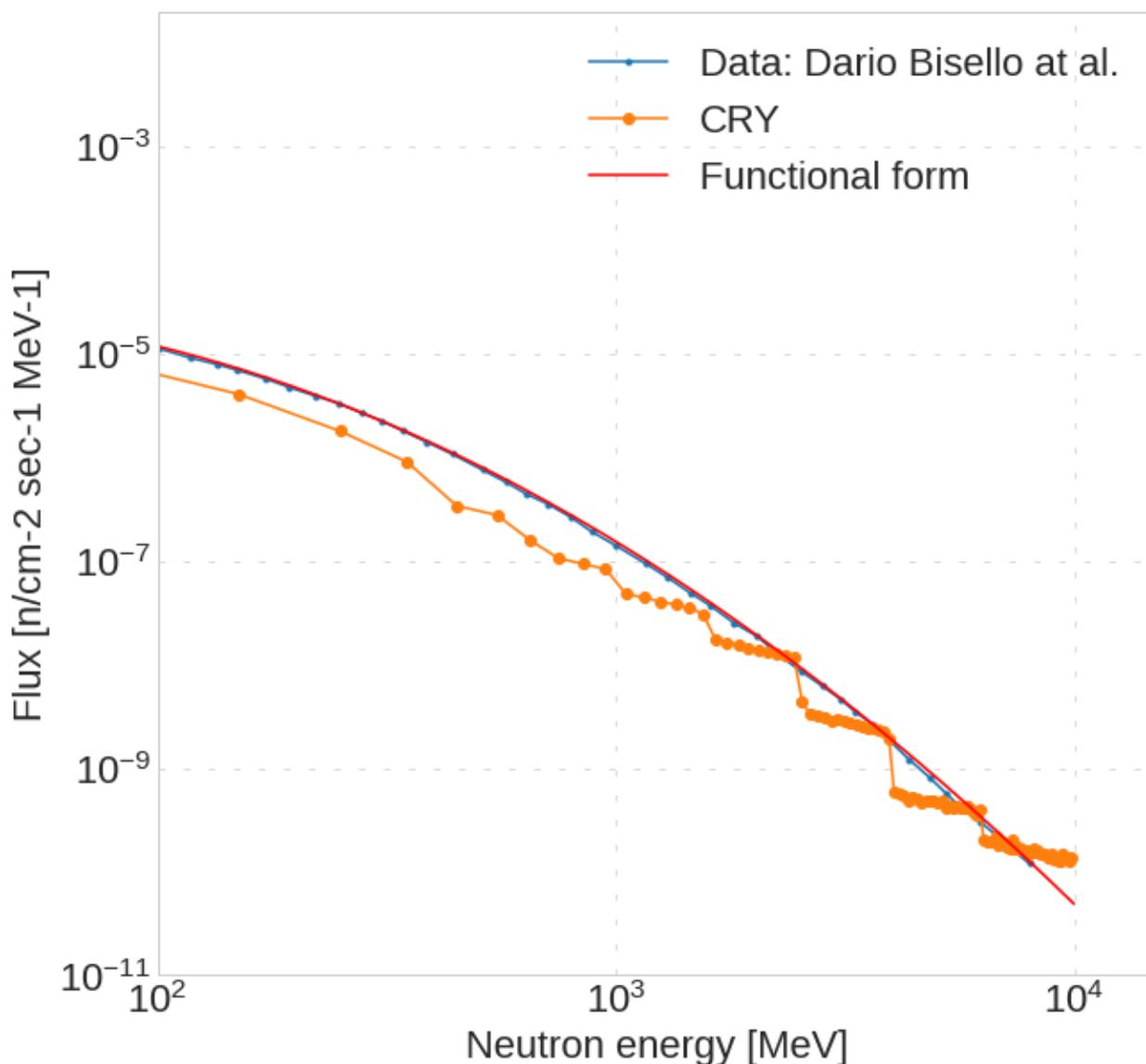


Рис. 27: Сравнение алгоритма «CRY» с реальными данными и аналитической моделью.

4.3 Влияние конфигурации бетонного экранирования на нейтронный фон

Ещё одним фактором, влияющим на нейтронный космический фон, является бетонное экранирование. В данной работе была проведена серия моделирований с различной его конфигурацией. Изначально в проекте Mu2e рассматривалось бетонное экранирование с толщиной шесть футов для за-

щиты от радиационного излучения. В процессе работы над проектом оказалось, что для этой задачи достаточно трёхфутового слоя бетона. Первый вариант значительно дороже, но лучше подавляет фон. Задача моделирования заключалась в поиске оптимального решения. Также, помимо толщины, изучалось влияние плотности бетона, т.к. производитель заявил, что сможет изготовить материал с плотностью $2,31 \text{ г/см}^3 \pm 3\%$.

На Рис. 28 показаны конфигурации эксперимента с двумя разными толщинами.

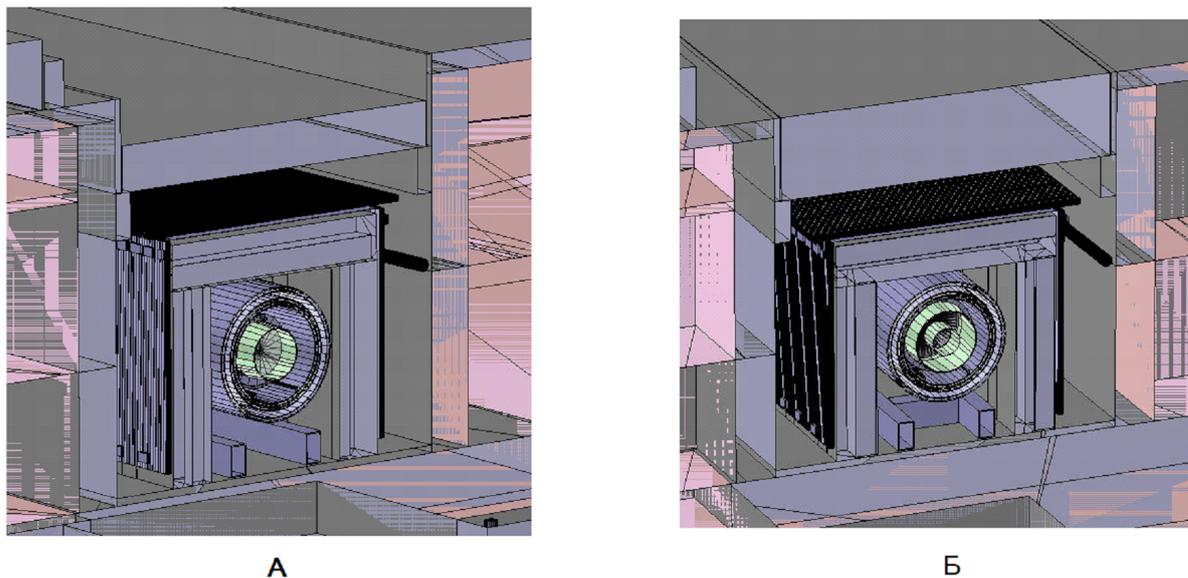


Рис. 28: Бетонное экранирование над системой CRV: А — 3 фута, Б — 6 футов.

Полученный результат (представлен на Рис. 29) показал, что в интересующем нас диапазоне энергий двойное экранирование пропускает примерно в пять раз меньше нейтронов. Тесты с изменением плотности проводились при толщине экранирования равной трём футам. Стандартная плотность в моделировании учитывалась как $2,35 \text{ г/см}^3$, поэтому относительно неё производится дальнейшее сравнение с заявленной производителем плотностью, только с отклонением в пять процентов. Результаты показаны на Рис. 30, 31, 32 в порядке увеличения плотности.

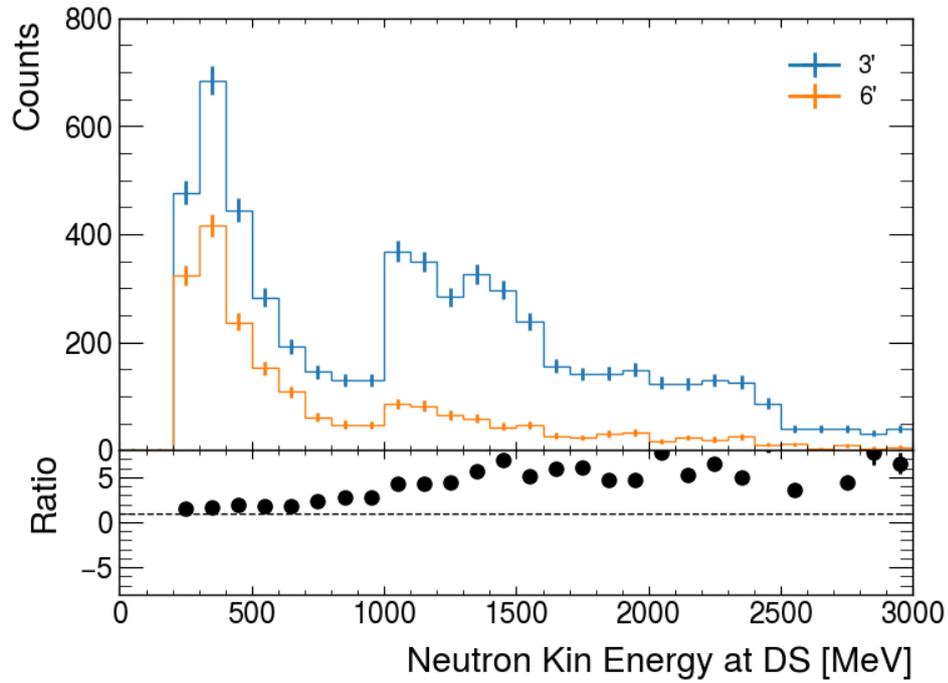


Рис. 29: Гистограммы показывают, сколько нейтронов с определённой кинетической энергией проходит через бетонное экранирование. График демонстрирует отношение конфигураций. Синий — толщина 3 фута, жёлтый — 6 футов.

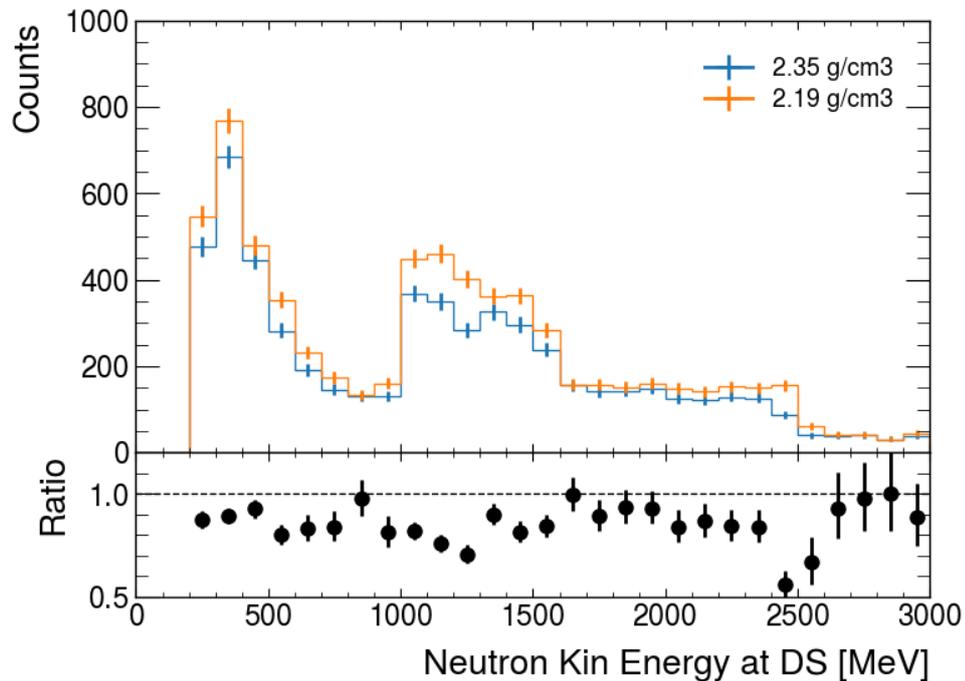


Рис. 30: Гистограммы показывают, сколько нейтронов с определённой кинетической энергией проходит через бетонное экранирование. График демонстрирует отношение конфигураций. Синий — плотность 2,35 г/см³, жёлтый — 2,19 г/см³.

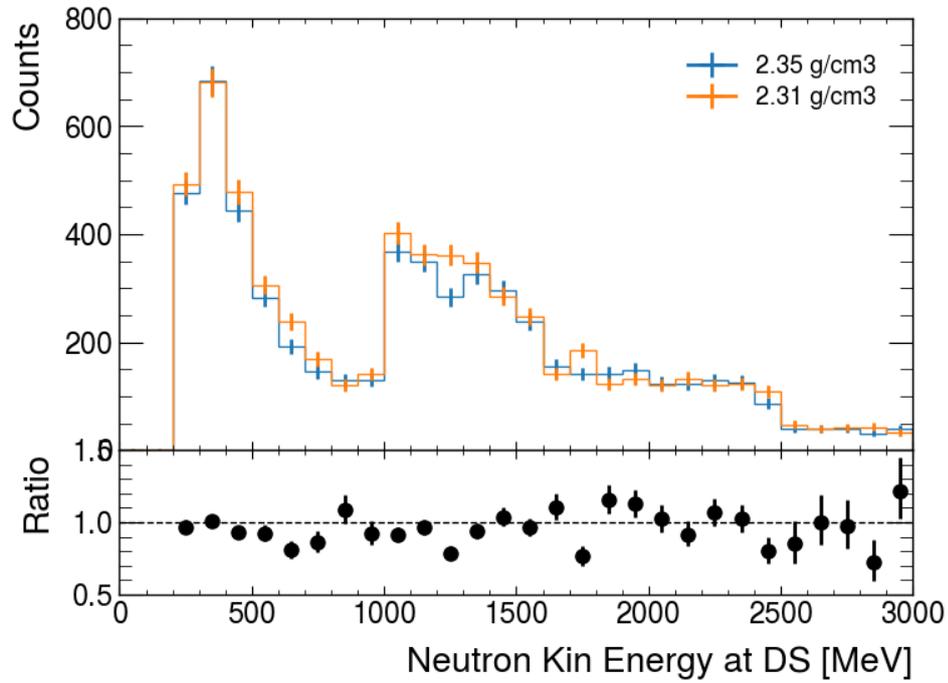


Рис. 31: Гистограммы показывают, сколько нейтронов с определённой кинетической энергией проходит через бетонное экранирование. График демонстрирует отношение конфигураций. Синий — плотность $2,35 \text{ г/см}^3$, жёлтый — $2,31 \text{ г/см}^3$.

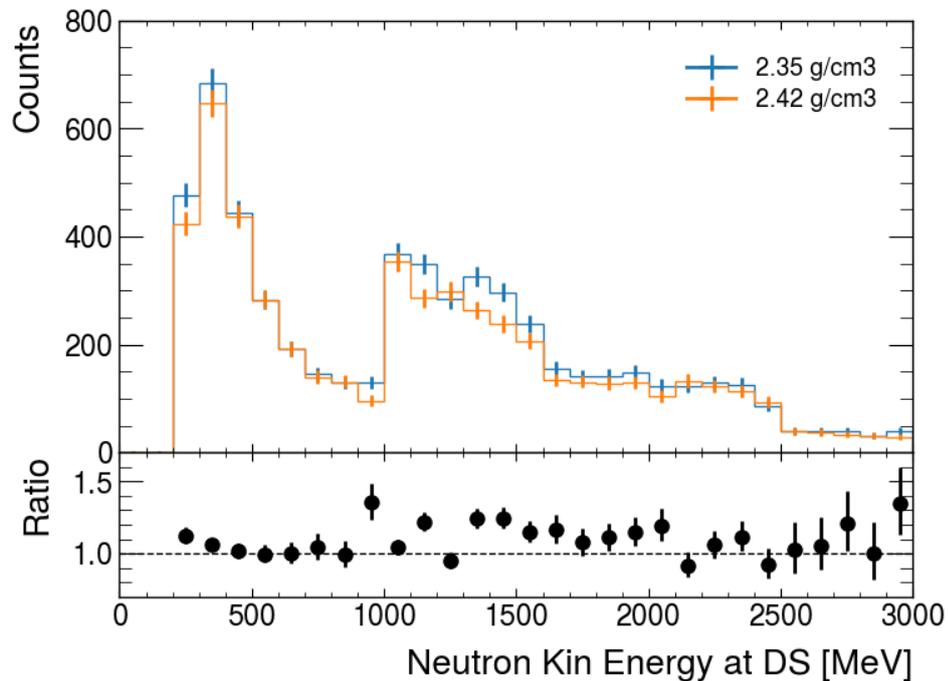


Рис. 32: Гистограммы показывают, сколько нейтронов с определённой кинетической энергией проходит через бетонное экранирование. График демонстрирует отношение конфигураций. Синий — плотность $2,35 \text{ г/см}^3$, жёлтый — $2,42 \text{ г/см}^3$.

Оказалось, что небольшой разброс в плотности может оказать серьёзное влияние на пропускаемый фон. Это хорошо видно из графика на Рис. 33, где построено отношение фонов заданной и стандартной плотности. Применялось дополнительное условие выборки, при котором не учитывались нейтроны с энергией ниже порога. С учётом неопределённости плотности в 5% неопределённость нейтронного фона составляет около 25%.

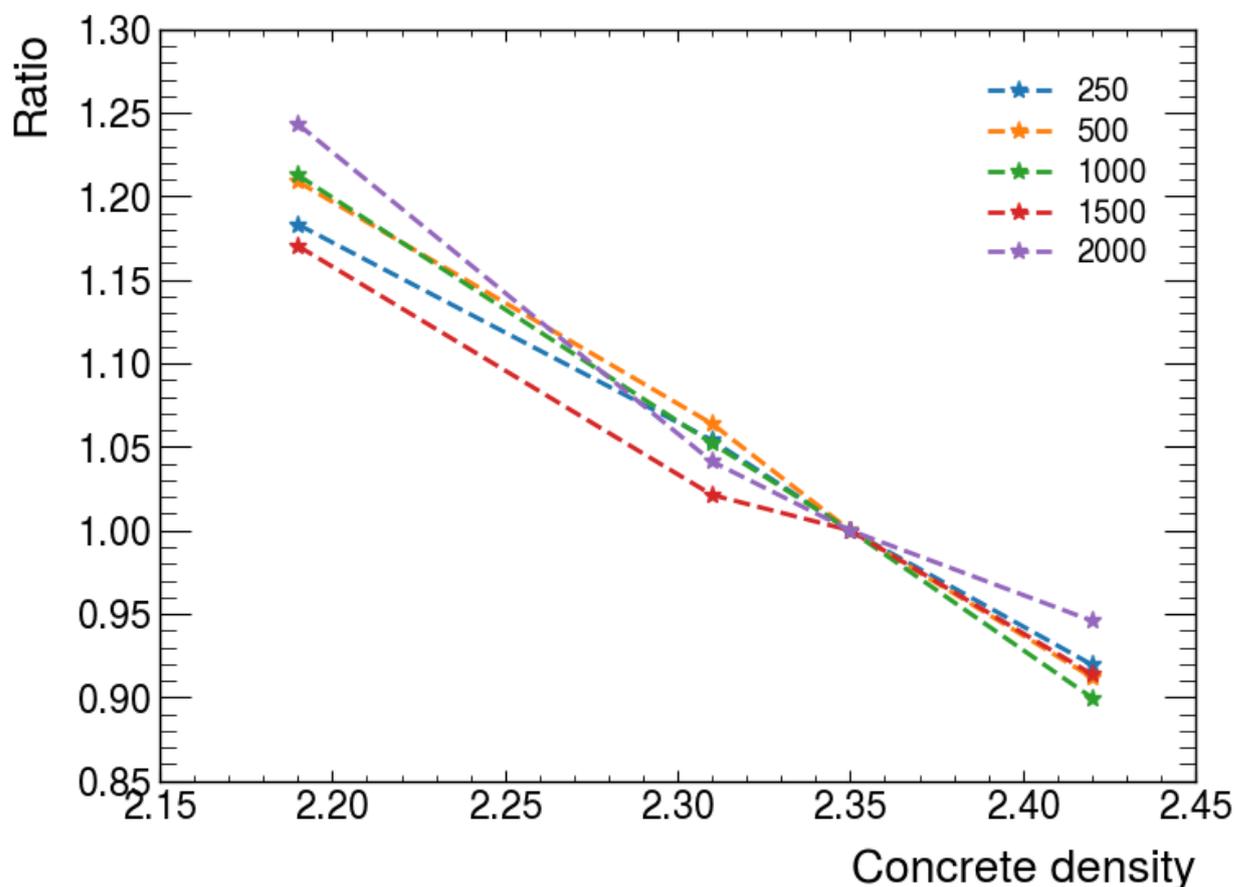


Рис. 33: Отношение фонов при разной плотности бетона к стандартной с дополнительным условием на энергию нейтронов.

С учётом рассмотренных факторов, нейтронный фон, полученный при моделировании, в худшем случае вырастет почти в два раза, что является приемлимым в условиях эксперимента Mu2e.

Заключение

В процессе работы были получены следующие результаты.

1. Внесён существенный вклад в разработку программного обеспечения детектора СЧТФ.
 - В фреймворк «Аврора» добавлен модуль проверки геометрии, включающий набор инструментов для её отладки, которые предоставили быстрый способ подтверждения корректности реализованной геометрии детектора, и механизм псевдонимов, который позволил использовать короткие имена для загрузки пакетов геометрии.
 - Проведено выделение общих частей для модулей оцифровки и реконструкции в отдельные абстрактные пакеты, что позволило централизовать изменения входных и выходных параметров алгоритмов и упростить их разработку до определения только системозависимых моментов.
 - Создан абстрактный класс, для простой смены конфигурации магнитного поля.
2. Было разработано программное обеспечение моделирования мюонной системы СЧТФ.
 - Добавлено более детальное описание магнитного поля.
 - Разработан пакет геометрии, включающий описание геометрии торцевой и баррельной частей системы.
 - Разработан пакет оцифровки, имитирующий отклик электроники детектора.
 - Разработан пакет реконструкции, содержащий алгоритм для восстановления координаты хита по пересечению двух сцинтилляционных счётчиков.
 - Разработан модуль для программы визуализации, позволяющий отображать сработавшие элементы мюонной системы.
3. Проведено моделирование эффективности срабатывания мюонной системы СЧТФ при прохождении мюонов и пионов разных энергий.

4. Проведено моделирование нейтронного фона в эксперименте Mu2e.
- Получена оценка вклада нейтронов в полный космический фон.
 - Проведено сравнение алгоритма, отвечающего за генерацию космического нейтронного фона, с данными экспериментов в диапазоне энергии, соответствующему нейтронам, производившим больше всего фоновых событий.
 - Проведено моделирование с разной конфигурацией бетонного экранирования, и изучен фактор его влияния на нейтронный фон.

Список литературы

- [1] Концептуальный проект часть первая (физическая программа, детектор) [Электронный ресурс]. URL: https://ctd.inp.nsk.su/wiki/images/8/8b/CDR2_ScTau_ru_vol1.pdf (дата обращения: 18.06.2022)
- [2] Bartoszek L. Mu2e Technical Design Report / L. Bartoszek, E. Barnes, J.P. Miller и др. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/1501.05241> (дата обращения: 18.06.2022)
- [3] Концептуальный проект часть вторая (коллайдер, инжектор) [Электронный ресурс]. URL: https://ctd.inp.nsk.su/wiki/images/f/f3/CDR2_ScTau_ru_vol2.pdf (дата обращения: 18.06.2022)
- [4] Эксперимент Belle II [Электронный ресурс]. URL: <https://www.belle2.org/> (дата обращения: 18.06.2022)
- [5] Aushev T. A scintillator based endcap KL and muon detector for the Belle II experiment / T. Aushev, D.Z. Besson, K. Chilikin и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – Vol. 789. – P. 134-142.
- [6] Dukes, E. C. A High Efficiency Cosmic Ray Veto for the Mu2e Experiment / Dukes E. Craig and Ehrlich Ralf // PoS – 2016. – Vol. ICHEP2016 – P. 789.
- [7] Belozyorova M. Software framework for the Super Charm-Tau factory detector project / M. Belozyorova, D. Maksimov, G. Razuvaev и др. // Proceedings of the 25th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2021). – Virtual Event hosted by CERN, 2021. – Vol. 251.
- [8] Belozyorova M. Computing Environment for the Super-Charm-Tau Factory Detector Project/ M. Belozyorova, D. Maksimov, G. Razuvaev и др. // Proceedings of the 9th International Conference

«Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education» (GRID'2021). – Dubna, Russia, 2021.

- [9] Frank M. DD4hep: A Detector Description Toolkit for High Energy Physics Experiments / M. Frank, F. Gaede, C. Grefe, P. Mato // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 513. – Issue 2.
- [10] Agostinelli S. Geant4 — a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako и др. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Vol. 506. – Issue 30. – P. 250-303.
- [11] Brun R. ROOT — An object oriented data analysis framework / R. Brun, F. Rademakers // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Vol. 389. – Issues 1–2. – P. 81-86.
- [12] Barrand G. GAUDI — A software architecture and framework for building HEP data processing applications / G.Barranda, I.Belyaevb, P.Binko и др. // Computer Physics Communications. – 2001. – Vol. 140. – P. 45–55.
- [13] Харжеев, Ю. Н. Сцинтилляционные счётчики в современных экспериментах по физике высоких энергий // Физика элементарных частиц и атомного ядра - 2015 - Т. 46. С. 1229
- [14] Фреймворк Art [Электронный ресурс].
URL: <https://art.fnal.gov/> (дата обращения: 18.06.2022)
- [15] Green C. The art framework / C. Green, J. Kowalkowski, M. Paterno и др. // Journal of Physics: Conference Series. – 2012. – Vol. 396. – № 2. – P. 022020.
- [16] The CMS Collaboration. The CMS experiment at the CERN LHC / The CMS Collaboration, S. Chatrchyan, G. Hmayakyan и др. // Journal of Instrumentation. – 2008. – Vol. 3. – № 08. – P. S08004–S08004.
- [17] Ayres D. S. The NOvA Technical Design Report / D.S. Ayres, G.R. Drake, M.C. Goodman и др. // FERMILAB-DESIGN-2007-01. – 2007.

- [18] Roberts B. L. The History of the Muon (g-2) Experiments // SciPost Phys. Proc. – 2019. – issue 1. – P. 32.
- [19] Snider E. L. LArSoft: Toolkit for Simulation, Reconstruction and Analysis of Liquid Argon TPC Neutrino Detectors / E.L. Snider, G. Petrillo // J. Phys. Conf. Ser. – 2017. – Vol. 898. – № 4. – P. 042057.
- [20] The Fermilab Hierarchical Configuration Language. [Электронный ресурс].
URL: <https://cdcvns.fnal.gov/redmine/projects/fhicl> (дата обращения: 18.06.2022)
- [21] Библиотека C++ Boost. [Электронный ресурс].
URL: <http://www.boost.org> (дата обращения: 18.06.2022)
- [22] Система развёртывания пакетов UPS [Электронный ресурс].
URL: https://www.fnal.gov/projects/ckm/ckm_cluster/ups/ups.html
(дата обращения: 18.06.2022)
- [23] Язык Yaml [Электронный ресурс].
URL: <https://yaml.org/> (дата обращения: 18.06.2022)
- [24] Руководство пользователя DD4hep [Электронный ресурс].
URL: <https://dd4hep.web.cern.ch/dd4hep/usermanuals/DD4hepManual/DD4hep>
(дата обращения: 18.06.2022)
- [25] Moyses E. The Phoenix event display framework / E. Moyses, F. Ali, E. Cortina и др. // Proceedings of the 25th International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2021). – Virtual Event hosted by CERN, 2021. – Vol. 251.
- [26] Bernstein R.H. The Mu2e Experiment // Frontiers in Physics. – 2019. – Vol. 7.
- [27] Hagmann C. Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes / C. Hagmann, D. Lange, D. Wright" // 2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record – 2007. – Vol. 2. – P. 1143-1146.

- [28] Bisello D. Neutron production targets for a new Single Event Effects facility at the 70 MeV Cyclotron of LNL-INFN / D. Bisello, A. Candeloria, N. Dzysiuk и др. // Physics Procedia – 2012. – Vol. 26. – P. 284.
- [29] Gordon M. S. Measurement of the Flux and Energy Spectrum of Cosmic-Ray Induced Neutrons on the Ground / M. S. Gordon, P. Goldhagen, K.P. Rodbell и др. //IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2005 –Vol. 52. –P. 2703-2703.