

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)**

**Отчет о «Научно-исследовательской деятельности  
аспиранта и подготовке к защите диссертации на  
соискание ученой степени кандидата наук» за  
второй семестр**

**«Реконструкция частиц в мюонной системе установки SPD»**

Аспирант	Осетров Александр Олегович
Научная специальность	1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики
Научный руководитель	Солдатов Евгений Юрьевич
Должность, степень, звание	к.ф.-м.н, доцент
Дата защиты:	01 июля 2026 г.
Результат защиты:	

Москва, 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Описание эксперимента SPD .....</b>	<b>10</b>
1.1 Общее описание и физические задачи установки SPD .....	10
1.2 Конструкция детектора SPD .....	11
1.3 Мюонная система: назначение, конструкция и принцип работы ....	14
1.4 Детекторный элемент: Mini Drift Tubes (MDT) .....	16
<b>2 Создание геометрической модели мюонной системы SPD .....</b>	<b>18</b>
<b>3 Программная реализация Монте-Карло и детекторных хитов .....</b>	<b>23</b>
3.1 Монте-Карло хиты .....	23
3.2 Детекторные хиты .....	27
<b>Заключение .....</b>	<b>29</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>31</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современные астрофизические и космологические данные свидетельствуют, что барионная материя, чьи свойства определяются сильным и электромагнитным взаимодействиями, составляет лишь приблизительно 5% от полной плотности массы-энергии Вселенной [1]. На фоне доминирующих темной материи и темной энергии, свойства барионного вещества представляются наиболее изученными. Однако подобное представление является упрощенным. Несмотря на значительные успехи в построении теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики (КХД) – и её пертурбативное применение для описания процессов с большими передачами импульса, фундаментальные вопросы, касающиеся структуры и динамики нуклонов (протонов и нейтронов) – основных составляющих видимого мира, – остаются открытыми. В частности, актуальной нерешённой проблемой физики элементарных частиц является выведение структуры и свойств нуклона непосредственно из динамики его конститuentов – кварков и глюонов – в рамках первых принципов КХД.

Спин нуклона, равный  $\hbar/2$ , определяет его магнитный момент и играет ключевую роль в формировании фундаментальных свойств вещества. Он ответственен за возникновение различных фаз при низких температурах, определяет параметры нейтронных звёзд и, в конечном итоге, обеспечивает стабильность наблюдаемой Вселенной. В связи с этим исследование спиновой структуры нуклона имеет первостепенное значение. Простая кварковая модель, успешно описавшая общие квантовые числа адронов (заряд, чётность, изоспин) и позволившая качественно понять некоторые аспекты их динамики, оказалась неспособной корректно объяснить спиновые характеристики адронов через вклад спинов валентных кварков.

Переломным моментом стал так называемый «спиновый кризис» 1987 года [2], когда эксперименты по глубоконеупругому рассеянию

поляризованных мюонов на поляризованной протонной мишени продемонстрировали, что доля спинов валентных кварков в спине протона не превышает  $\sim 30\%$ . С этого времени проблема спиновой структуры нуклона остаётся одной из центральных задач физики высоких энергий. Ключевой вопрос, привлекающий значительные теоретические и экспериментальные усилия, заключается в механизме формирования спина  $\hbar/2$  нуклона из спиновых и орбитальных моментов его составляющих – валентных и морских кварков, а также глюонов. Исчерпывающее описание данной структуры может быть получено в рамках зависящих от поперечного импульса партонных функций распределения (transverse-momentum dependent parton distribution functions, TMDs).

На протяжении последних 25 лет основными источниками экспериментальных данных о спиново-зависимых структурных функциях нуклона служили, во-первых, эксперименты по поляризованному глубоконеупругому рассеянию на установках в ЦЕРН, DESY, Лаборатории Джефферсона (JLab) и SLAC, а во-вторых, эксперименты с поляризованными протон-протонными столкновениями на коллайдере RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL). Эти исследования позволили количественно оценить вклад валентных кварков в спин протона, получить частичные данные о поляризации морских кварков и установить первые ограничения на вклад глюонов.

Тем не менее, современные знания о внутренней структуре нуклона, в особенности касательно роли глюонной составляющей, остаются неполными. К числу актуальных нерешённых проблем относятся: количественная оценка и знак вклада глюонов ( $\Delta g$ ) в спин нуклона; роль орбитальных угловых моментов кварков и глюонов; трёхмерная структура нуклона в импульсном и координатном пространствах, описываемая TMD и обобщёнными партонными распределениями (GPD). Для перехода от фрагментарных данных к целостной картине в мире физики высоких энергий планируется

развёртывание новых специализированных установок, таких как Электронный коллайдер (EIC) в BNL и эксперименты с фиксированной мишенью на LHC в ЦЕРН.

В данном контексте реализация мегасайенс-проектов представляет собой приоритетное направление развития ядерной физики и физики элементарных частиц. Одним из таких проектов является коллайдер NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), сооружаемый в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна). В рамках данного проекта создаётся специализированный эксперимент Spin Physics Detector (SPD) [3], нацеленный на фундаментальные исследования спиновой структуры адронов. SPD будет размещён в одной из точек столкновения коллайдера NICA, работающего в уникальном диапазоне энергий (до  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ для протон-протонных столкновений). Проект опирается на значительный опыт ОИЯИ в области физики с поляризованными пучками.

Основной физической задачей эксперимента SPD является всестороннее исследование неполяризованного и, что критически важно, поляризованного глюонного содержимого нуклона. Уникальность эксперимента обусловлена комбинацией следующих факторов: работа в промежуточной области энергий; применение схемы двойной поляризации (поляризованные пучок и мишень); многоцелевая конструкция детектора, ориентированная на изучение широкого спектра процессов – от инклюзивных и полуинклюзивных измерений до эксклюзивного рождения тяжёлых кваркониев. Ожидается, что результаты измерений на SPD внесут существенный вклад в понимание спиновой структуры нуклона.

Успешная реализация данной исследовательской программы в решающей степени зависит не только от технических характеристик детекторных систем, но и от наличия высокоэффективного специализированного программного обеспечения для обработки, реконструкции и анализа данных. Это требование особенно актуально для

мюонной системы SPD, играющей ключевую роль в приоритетной задаче эксперимента – измерении глюонной поляризации посредством анализа распадов тяжёлых кваркониев, таких как  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Без точных и надёжных алгоритмов реконструкции треков и идентификации частиц корректная интерпретация экспериментальных данных невозможна.

**Актуальность настоящего исследования,** посвящённого моделированию мюонной системы и разработке для неё соответствующего программного обеспечения, обусловлена следующими ключевыми факторами:

1. **Отсутствие готовых решений:** Для проектируемой мюонной системы SPD в настоящее время не существует готовых алгоритмов обработки данных, реконструкции треков и идентификации мюонов, валидированных в условиях, адекватных реальному эксперименту. Специфические условия SPD (конфигурация магнитного поля, геометрия детектора, высокий ожидаемый адронный фон) требуют разработки новых или глубокой модификации существующих методов.
2. **Расширение функциональности системы:** Помимо основной задачи идентификации мюонов, рассматривается возможность использования мюонной системы в качестве грубого адронного калориметра, в том числе для регистрации нейтронов. Реализация данной дополнительной функциональности требует отдельного исследования и создания специализированных алгоритмов с учётом аппаратных ограничений системы.
3. **Требования к производительности:** Высокий ожидаемый поток данных в эксперименте SPD предъявляет жёсткие требования к вычислительной эффективности алгоритмов реконструкции. Традиционные подходы могут оказаться неприменимыми из-за чрезмерных вычислительных затрат, что обуславливает необходимость исследования и внедрения современных оптимизированных методов,

включая алгоритмы машинного обучения, для ускорения процессов идентификации и фильтрации событий.

Таким образом, **целью работы** является комплексное моделирование мюонной системы детектора SPD с использованием программной среды SPDGeoModel и последующая разработка алгоритмов программного обеспечения для решения ключевых задач обработки данных этой системы.

**В задачи работы входит:**

- Описание концептуального дизайна и моделирование геометрии мюонной системы SPD в среде SPDGeoModel.
- Моделирование прохождения частиц через детектор и изучение его отклика в условиях, приближённых к реальным, включая моделирование фоновых процессов.
- Разработка и тестирование алгоритмов реконструкции треков мюонов, включая исследование современных вычислительных методов для обеспечения требуемой производительности.
- Оценка эффективности реконструкции, точности измерений и способности подавления фона на основе анализа результатов моделирования.
- Исследование возможностей расширенного применения системы (в целях калориметрии и регистрации нейтронов) и разработка соответствующего инструментария.

Проведённое моделирование и разработанные программные решения представляют собой необходимый этап в процессе оптимизации конструкции детектора, верификации его физических возможностей и создания программной инфраструктуры (геометрической модели и алгоритмов обработки данных) для реализации научной программы эксперимента SPD на коллайдере NICA.

**Научная новизна работы:**

- 1. Разработка специализированных алгоритмов для эксперимента SPD.** Создание и адаптация методов реконструкции и идентификации, оптимизированных для уникальных условий коллайдера NICA: промежуточного энергетического диапазона ( $\sqrt{s} \leq 27$  ГэВ), высокой плотности фоновых процессов и особой геометрии мюонной системы SPD. Это требует новых или существенно модифицированных решений для трекинга и подавления фона.
- 2. Комплексная методология моделирования и прототипирования ПО.** Реализация сквозного подхода: от детального моделирования мюонной системы в среде SPDGeoModel до создания прототипов рабочего ПО. Ключевое внимание уделяется валидации алгоритмов на смоделированных данных, максимально приближенных к реальным условиям эксперимента.
- 3. Адаптация современных вычислительных методов.** Исследование возможности применения алгоритмов машинного обучения (для классификации частиц и фильтрации событий) в условиях эксперимента SPD. Их адаптация к промежуточным энергиям и сильному адронному фону представляет актуальную научно-техническую задачу.
- 4. Расширение функциональности мюонной системы.** Исследование возможности использования мюонных фильтров SPD в качестве грубого адронного калориметра, включая регистрацию нейтронов. Разработка соответствующих алгоритмов анализа направлена на увеличение информационной отдачи установки.

## **Практическая значимость работы:**

### **1. Верификация и оптимизация физической программы SPD.**

Результаты работы позволят выполнить детальные симуляции ключевых процессов (например, эксклюзивного рождения  $J/\psi$ ), оценить статистическую значимость, систематические погрешности и чувствительность детектора к параметрам глюонной поляризации ( $\Delta g$ ) и TMD-функциям.

### **2. Формирование основы программной инфраструктуры.**

Разработанные алгоритмы станут основой для будущего рабочего ПО коллаборации SPD для онлайн- и офлайн-обработки данных.

### **3. Вклад в глобальные исследования спиновой структуры.**

Реализация проекта обеспечит работоспособность ключевого компонента детектора, создав технические предпосылки для получения уникальных данных в недостаточно изученном энергетическом диапазоне. Результаты SPD будут дополнять данные других проектов (EIC, LHC), способствуя построению целостной картины структуры нуклона.

### **4. Методологический трансфер.**

Разработанные подходы к реконструкции в условиях сильного фона и анализу для промежуточных энергий могут быть применены в других экспериментах. Опыт интеграции методов машинного обучения в цепочку обработки данных также представляет самостоятельную ценность для сообщества физики высоких энергий.

## 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

### 1.1 Общее описание и физические задачи установки SPD

Spin Physics Detector (SPD) представляет собой проект универсального 4π-детектора, предлагаемый для размещения во второй точке столкновения строящегося коллайдера NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия). Ключевой целью эксперимента является всестороннее исследование спиновой структуры протона и дейтрона, а также изучение других спиновых явлений. Реализация программы предусматривает использование поляризованных пучков протонов и дейтронов с энергией в системе центра масс до  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ и светимостью до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Возможность работы комплекса NICA с поляризованными дейтронными пучками в указанном энергетическом диапазоне является уникальной. Эксперимент SPD заполнит важный пробел в кинематической области между низкоэнергетическими измерениями на установках типа ANKE-COSY [4] и SATURNE и высокоэнергетическими экспериментами на коллайдере RHIC (Брукхейвенская национальная лаборатория, США), а также планируемыми экспериментами с фиксированной мишенью на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН).

Физическая программа SPD сосредоточена на комплексном изучении неполяризованных и поляризованных партонных распределений, в первую очередь глюонного содержания нуклона в области больших значений бьеркеновской переменной ( $V_{\text{Jorken-x}}$ ). Для этого будут использоваться взаимодополняющие процессы-зонды:

- Рождение чармония ( $J/\psi$ ,  $Y$ ) и открытого очарования.
- Рождение прямых фотонов.

- Рождение адронных струй и отдельных адронов с большим поперечным импульсом.

Измерение специфических односторонних и двусторонних спиновых асимметрий в указанных процессах позволит определить ключевые функции, описывающие глюонную подструктуру:

- Глюонную спиральность (gluon helicity) в нуклоне.
- Функции Сиверса и Боэра-Мулдерса, связанные с корреляцией между поперечным импульсом партона и спином нуклона.
- Трансверсальное распределение глюонов (gluon transversity distribution) и тензорные партонные функции распределения (tensor PDFs) в дейтроне.

Параллельное измерение одних и тех же физических величин с использованием различных каналов на единой экспериментальной установке является ключевым для минимизации систематических погрешностей. Ожидается, что результаты, полученные на SPD, внесут значительный вклад в общее понимание глюонной структуры нуклона и будут ценным дополнением к текущим и планируемым исследованиям на RHIC, будущем Электронном коллайдере (EIC, BNL) и установках LHC.

## 1.2 Конструкция детектора SPD

Для решения поставленных физических задач детектор SPD проектируется как универсальная установка с полным телесным углом ( $4\pi$ ), обладающая расширенными возможностями трекинга и идентификации частиц на основе современных технологий [5]. Конструктивно установка, схематично изображенная на рисунке 1, включает следующие ключевые подсистемы:

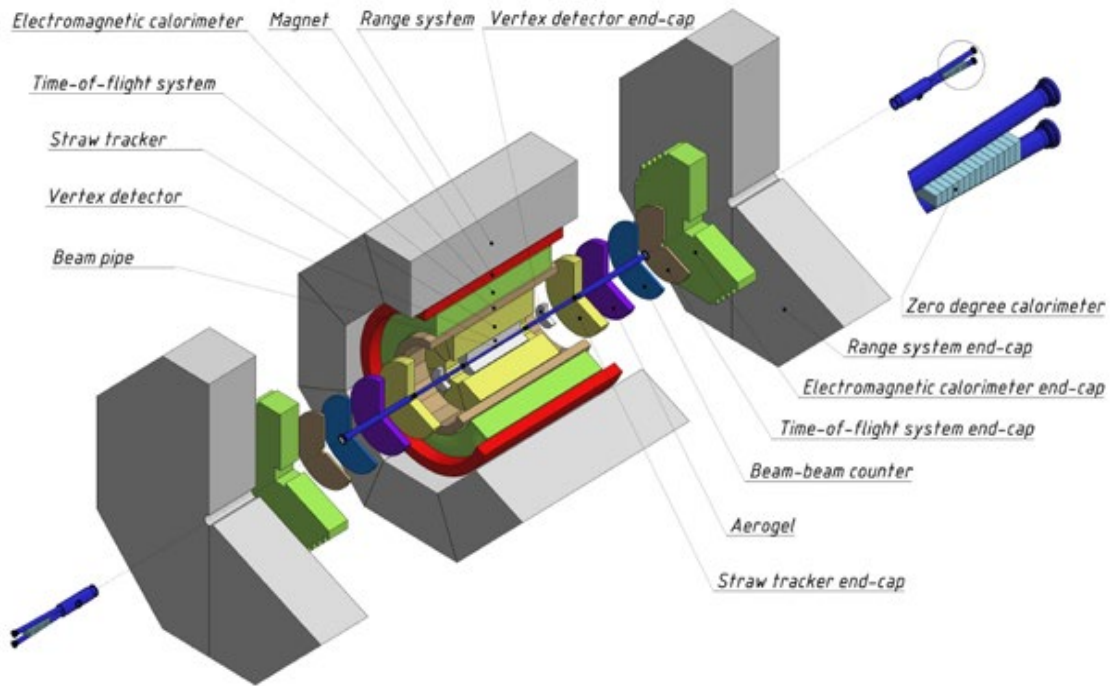


Рисунок 1 – Общая схема установки SPD

- Сверхпроводящий соленоидальный магнит создает однородное магнитное поле напряженностью до 1 Тл вдоль оси пучка, необходимое для определения импульса заряженных частиц по кривизне их траекторий.
- Вакуумная труба отделяет область вершинного детектора от ускорительного вакуума. Основные требования: высокая механическая прочность при минимальной толщине для снижения эффектов многократного рассеяния и конверсии фотонов.
- Вершинный детектор (Vertex Detector, VD): Кремниевый пиксельный детектор, обеспечивающий точность реконструкции первичной вершины столкновения лучше 100 мкм. Данная характеристика критически важна для восстановления вторичных вершин от распадов короткоживущих частиц, таких как D-мезоны.
- Трековая система (Straw Tracker, ST): Система дрейфовых трубок (straw tubes), расположенная внутри магнитного поля. Ее основная функция -

реконструкция траекторий первичных и вторичных заряженных частиц с высокой эффективностью. Ожидаемое разрешение по поперечному импульсу составляет  $\sigma_{p_T}/p_T \approx 2\%$  для частиц с импульсом 1 ГэВ/с. Система также обеспечивает идентификацию частиц путем измерения удельных энергопотерь ( $dE/dx$ ).

- Система идентификации частиц (Particle Identification System, PID) включает время-пролётную систему с временным разрешением порядка 60 пс, обеспечивающую разделение  $\pi/K$  и  $K/p$  на уровне  $3\sigma$  вплоть до импульсов  $\sim 1.2$  ГэВ/с и  $\sim 2.2$  ГэВ/с соответственно. Для расширения диапазона идентификации рассматривается возможность интеграции черенковского детектора на аэрогеле.
- Электромагнитный калориметр (Electromagnetic Calorimeter, ECal): Сэмплирующий калориметр, предназначенный для регистрации и идентификации фотонов и электронов. Его энергетическое разрешение планируется на уровне  $\sim 5\%/\sqrt{E}$  (ГэВ). Основные задачи: идентификация одиночных фотонов и нейтральных пионов ( $\pi^0$ ), а также подавление фона от адронных ливней.
- Мюонная (пробежная) система (Range System, RS): Специализированная система для идентификации мюонов в условиях высокого адронного фона. Способна выполнять функции грубого адронного калориметра. Является единственным субдетектором SPD, пригодным для регистрации нейтронов. Подробное описание приведено в разделе 1.3.
- Счетчики столкновений пучков (Beam-Beam Counters, BBC) и калориметры нулевого угла (Zero-Degree Calorimeters, ZDC): Данные системы, расположенные в прямом угле по отношению к оси пучка, отвечают за локальную поляриметрию, контроль светимости и генерацию точных временных меток событий.

Для обработки высокого потока данных (до 4 МГц частота столкновений) с нескольких сотен тысяч каналов SPD будет оснащен бестриггерной системой сбора данных (triggerless DAQ) [5], что предъявляет высокие требования к системам онлайн-мониторинга, оффлайн-вычислений и соответствующему программному обеспечению.

### 1.3 Мюонная система: назначение, конструкция и принцип работы

Мюонная (пробежная) система [6] является критически важным компонентом установки SPD. Ее основное назначение – эффективная идентификация мюонов на фоне интенсивного адронного фона (прежде всего пионов) и продуктов их распадов. Данная задача имеет первостепенное значение для реализации центральной части физической программы эксперимента, включающей изучение поляризованных глюонных распределений посредством анализа распадов тяжелых кваркониев, таких как  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $Y \rightarrow \mu^+\mu^-$ , дающих четкий экспериментальный сигнал в виде мюонных пар [7].

Помимо основной функции, система предназначена для выполнения дополнительных задач:

- Грубая адронная калориметрия: Оценка энергии адронов путем измерения множественности срабатываний (хитов) в детекторных слоях.
- Регистрация нейтронов: Будучи единственным субдетектором SPD на первой стадии, способным к регистрации нейтронов [8], система позволяет идентифицировать их, комбинируя собственный отклик с данными электромагнитного калориметра и внутренних трекеров.

Концепция мюонной системы SPD основана на ламинарной структуре, в которой слои поглотителя из железа чередуются со слоями газовых детекторов. Общая толщина поглотителя составляет приблизительно 4 длины ядерного взаимодействия ( $\lambda_i$ ), что обеспечивает эффективную фильтрацию

адронного фона и замедляет мюоны в заданном диапазоне энергий. С учетом толщины электромагнитного калориметра ( $\sim 0.5 \lambda_i$ ) полная толщина установки SPD достигает около  $4.5 \lambda_i$  [5, 6].

Система состоит из двух основных компонентов (рисунок 2):

1. Баррельная часть (Barrel) включает восемь модулей, окружающих точку взаимодействия. Основные поглощающие пластины имеют толщину 30 мм, внутренний и внешний слои – 60 мм (для обеспечения механической прочности). Между слоями железа организованы зазоры ( $\sim 35$  мм) для размещения детекторов.
2. Торцевые диски (Endcap): Две конструкции, расположенные по краям барреля вдоль оси пучка. Состоят из 19 слоев железа толщиной 30 мм и двух внешних слоев 60 мм. Между слоями также имеются зазоры 35 мм для детекторов.

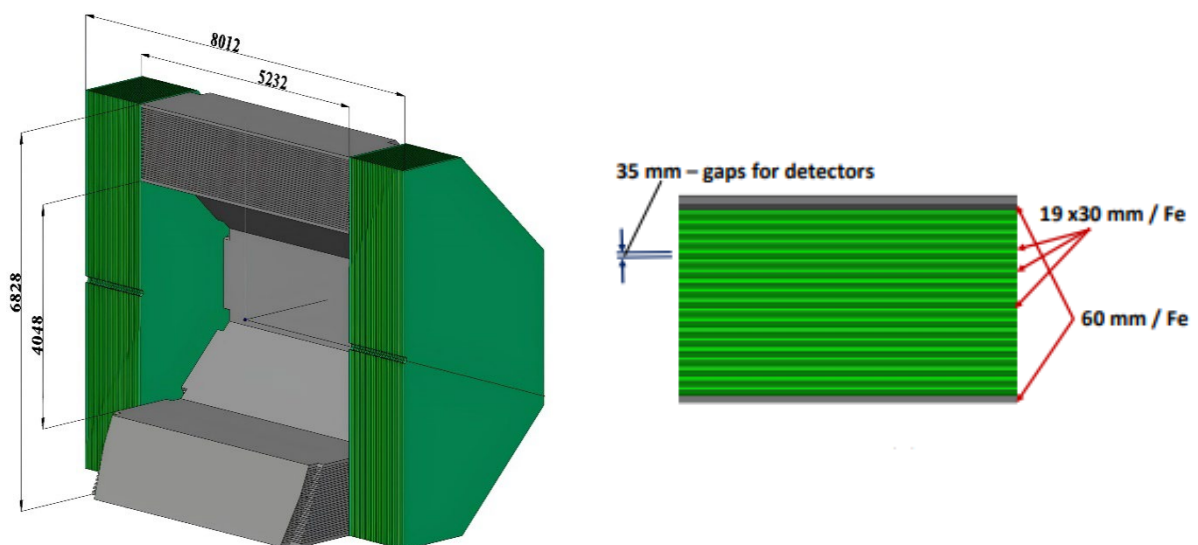


Рисунок 2 – (а) Схематичный вид (половина разреза) мюонной системы  
 Баррельная часть показана серым цветом, торцевые диски – зеленым;  
 (б) Размеры слоев системы

#### 1.4 Детекторный элемент: Mini Drift Tubes (MDT)

В качестве активных детекторных элементов выбраны мини-дрейфовые трубки (Mini Drift Tubes, MDT) [5], сечение которых схематично изображено на рисунке 3. Это газовые пропорциональные детекторы, первоначально разработанные в ОИЯИ и успешно применявшиеся в экспериментах D0 [9] (FNAL) и COMPASS [10] (ЦЕРН). Для SPD предлагается модификация с двухкоординатным считыванием, аналогичная принятой для эксперимента PANDA [11] (FAIR).



Рисунок 3 – Поперечное сечение детектора MDT

### Конструкция MDT:

- Катод: Алюминиевый экструдированный гребенчатый профиль, образующий 8 независимых ячеек.
- Анод: Тонкая проволока диаметром 50 мкм, натянутая вдоль центра каждой ячейки.
- Оболочка: Пластиковый корпус (норил), обеспечивающий газовую герметичность.
- Газовая смесь: Ar/CO<sub>2</sub> (70/30) при атмосферном давлении.
- Считывание координат: Первая координата определяется по номеру сработавшей анодной проволоки. Вторая, ортогональная координата считывается с внешних катодных стрипов шириной 3 см, расположенных поверх детекторного модуля. Наведенный на стрипах сигнал составляет около 15% от анодного и требует дополнительного усиления.

Подобная конструкция обеспечивает необходимую радиационную стойкость, координатное разрешение ~1 см по направлению проволоки и ~3 см в ортогональном направлении, а также высокую надежность. Общее количество детекторов MDT в системе составит около 8000 единиц.

Использование открытой катодной геометрии обеспечивает возможность двухкоординатного считывания, но нарушает симметрию электрического поля в каждой из восьми ячеек детектора. Следствием данного конструктивного различия является снижение требуемого приложенного напряжения для достижения эквивалентного коэффициента газового усиления по сравнению со стандартной геометрией, предполагающей использование сплошного катода из нержавеющей стали.

## 2. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ SPD

Основной целью первого этапа работы является построение детализированной и физически адекватной геометрической модели мюонной системы эксперимента SPD (Spin Physics Detector). Созданная модель формирует базис для решения ряда ключевых задач:

- Предоставление точного геометрического каркаса для последующего моделирования процессов прохождения частиц и их взаимодействия с веществом.
- Формирование основы для симуляции отклика детекторных элементов – генерации смоделированных сигналов срабатывания (хитов).
- Создание инструментальной базы для будущей разработки и тестирования алгоритмов реконструкции треков и идентификации мюонов.

Модель реализована в программной среде SPDGeoModel - специализированном фреймворке, унаследованном от пакета GeoModel (CERN) [12] и адаптированном для задач геометрического моделирования в рамках эксперимента SPD.

Принцип построения геометрии в SPDGeoModel следует парадигме, принятой в широко используемом пакете моделирования Geant4 [13]. Ключевым подходом является построение иерархического дерева геометрических объемов.

- Объемы верхнего уровня (envelopes) выступают в качестве контейнеров и задают системы координат.
- Дочерние объемы позиционируются внутри родительских посредством пространственных преобразований (сдвиг, поворот).

- Каждому геометрическому объему присваивается определенный материал (железо, алюминий, газовая смесь и т.д.), что является критически важным для корректного расчета взаимодействий частиц на последующих этапах.

Такая иерархическая организация обеспечивает системность, физическую наглядность и удобство модификации модели.

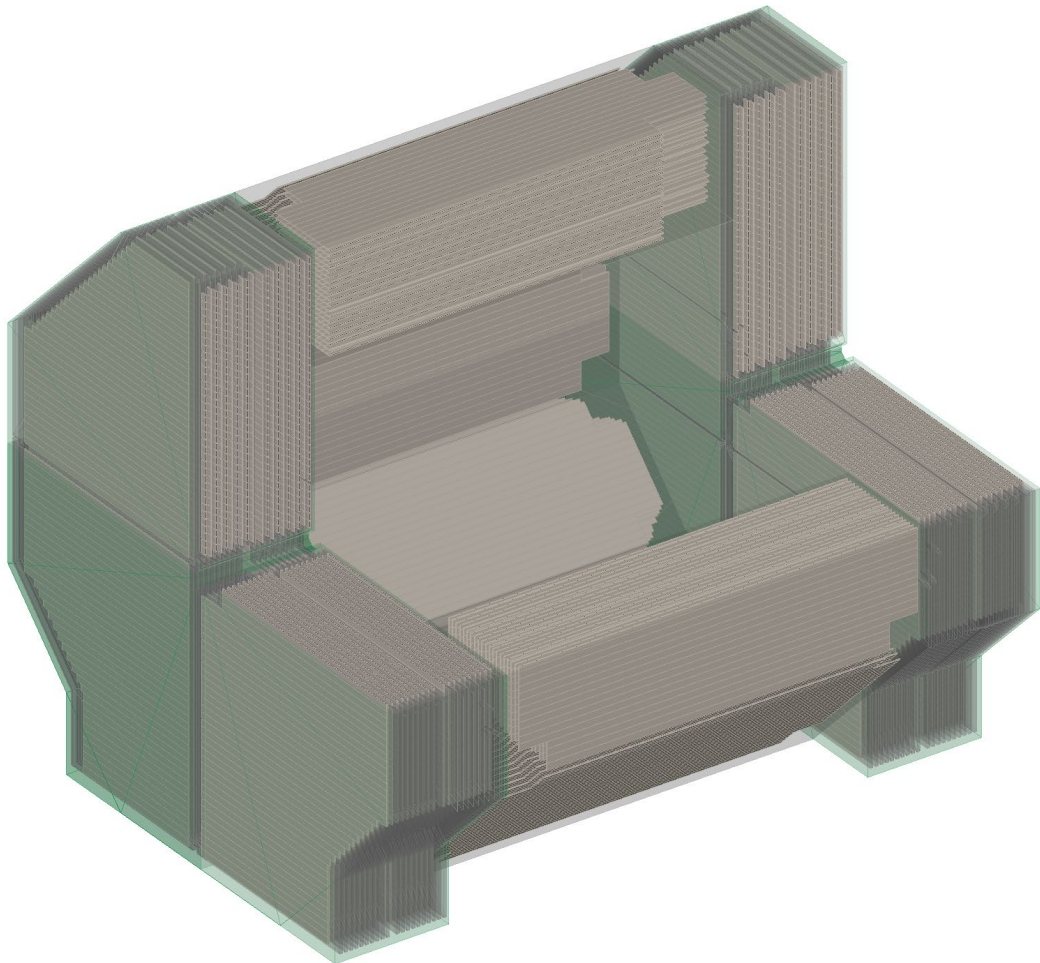


Рисунок 4 – Геометрическая модель мюонной системы SPD

Мюонная система в геометрической модели, изображенной на рисунке 4, состоит из двух основных подсистем: центральной части (баррель) и двух торцевых крышек (эндкапов). Ниже приводится описание их иерархической структуры.

## 1. Структура барреля

Баррель представляет собой внешнюю оболочку в форме восьмиугольной призмы (изображена серым прозрачным объемом), заполненную воздухом. Она является родительским объемом, в который помещены все последующие элементы центральной части системы.

- Модули барреля: Внутри воздушной оболочки размещены восемь равных трапециевидальных модулей. Нумерация модулей от 0 до 7 ведется по часовой стрелке в поперечной плоскости (север-верх). Каждый модуль представляет собой сплошной монолитный объем из железа, в который далее вставлены воздушные детекторные слои. Части железного модуля, расположенные между детекторными слоями, выполняют функцию поглотителей и служат для фильтрации мюонов. Толщина этих поглощающих промежутков составляет 60 мм у оснований трапеции и 30 мм во внутренней части.
- Детекторные слои: Внутри каждого железного модуля, в промежутках между поглощающими частями, размещена система из 20 чередующихся воздушных детекторных слоев толщиной 35 мм каждый. На рисунке они изображены бежевым цветом. Слои пронумерованы от 0 до 19 радиально, от оси пучка наружу (от узкого конца трапеции к широкому).
- Детекторы MDT: Внутри каждого детекторного слоя, по всей его плоскости, с равномерным шагом 1.6 мм размещены дрейфовые трубки (MDT). В каждом детекторе выделяются концы, на которых присутствуют нечувствительные зоны длиной по 60 мм. Отступ краевых детекторов от границ объема детекторного слоя определяется с учетом толщины защитной оболочки для электроники (0.3 мм), которая не моделируется как самостоятельный физический объем.

Каждый MDT-детектор представляет собой иерархию вложенных друг в друга объемов, моделирующих детектирующую газовую ячейку:

1. Оболочка: Внешний объем из норила (чистый ПВХ с формулой  $C_2H_3Cl$  и плотностью  $1.4 \text{ г/см}^3$ ), имеющий форму параллелепипеда.
2. Катод: Вложенный в корпус алюминиевый параллелепипед, выполняющий роль катода.
3. Рабочее вещество: Внутри катода размещены 8 параллелепипедов, заполненных газовой смесью  $Ar+CO_2$  в пропорции 70/30 при атмосферном давлении и комнатной температуре. Плотность газовой смеси составляет  $\sim 1.66 \text{ мг/см}^3$ . Эти газовые объемы являются чувствительными ячейками детектора и индексируются от 0 до 7. Анодные проволоки в геометрии не моделируются. Газовые ячейки зарегистрированы в системе как единственные чувствительные объемы барреля под именем:

*«/SPD/RSBarrel/Module/BarrelMDTLayer/MDT/GasCell».*

## 2. Структура эндкапа

Торцевая часть системы состоит из двух идентичных, зеркально отраженных относительно барреля крышек: восточной (EndcapPos) и западной (EndcapNeg), разнесенных вдоль оси пучка (направление запад-восток). Каждый эндкап представляет собой воздушную оболочку (изображена зеленым прозрачным объемом), служащую родительским объемом для всех элементов торцевой подсистемы. В этой оболочке оставлено место для апертуры пучка, детальная форма которой задается уже конфигурацией размещаемых внутри детекторных слоев.

- Модуль эндкапа: Внутри воздушной оболочки каждого эндкапа помещен один сплошной монолитный объем из железа, аналогичный по функции модулям барреля. В отличие от барреля, где используется восемь модулей, каждый эндкап содержит только один такой железный модуль.
- Детекторные слои: Размещение детекторных слоев внутри воздушной оболочки определяет их разделение на левую и правую стороны. В центральной части форма слоев формирует ступенчатую прямоугольную апертуру для прохождения пучка. Кроме того, внутри каждого детекторного слоя его сегменты разделены отступами, которые по иерархии заполняются железом родительского модуля и выполняют функцию ребер жесткости, которые разбивают детекторные слои с 3-го по 19-й на 4 сегмента, а первые три слоя — на 6 сегментов.
- Детекторные слои: Аналогично баррелю, каждый эндкап содержит 20 детекторных слоев толщиной 35 мм. Нумерация слоев от 0 до 19 ведется вдоль оси пучка, от внутренней стороны установки к внешней. На границах эндкапа и в центре (между 9-м и 10-м слоями) толщина железа увеличена до 60 мм.
- Детекторы MDT: Внутри сегментов каждого слоя размещаются детекторы, по конструкции идентичные баррельным. Детекторы размещаются с отступом 14 мм от нижней границы сегмента и последовательно заполняют его снизу вверх. Для них принята непрерывная глобальная индексация в направлениях снизу вверх и справа налево.

Чувствительные объемы конструктивно полностью повторяют детекторы барреля (нориловый корпус-параллелепипед, алюминиевый катод-параллелепипед, 8 газовых каналов-параллелепипедов, заполненных смесью Ar+CO<sub>2</sub>). Газовые ячейки индексируются от 0 до 7 по направлению снизу

вверх и являются единственными чувствительными объемами эндкапа. В иерархии модели они зарегистрированы под именем: «/SPD/RSEndcap/Module/EndcapMDTLayer/MDT/GasCell».

Геометрическая модель учитывает все технологические особенности мюонной системы, необходимые для интеграции служебных элементов в её конструкцию. В самом верхнем модуле барреля предусмотрен специальный слот для размещения криогенной подсистемы. Кроме того, по бокам баррельных модулей заложены зазоры под кабелеводы для прокладки коммуникаций.

### **3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОНТЕ-КАРЛО И ДЕТЕКТОРНЫХ ХИТОВ**

Следующим этапом исследования является разработка классов хитов и их интеграция в программную среду Sampro. В рамках данного программного пакета выделяются два типа хитов: Монте-Карло хиты (МС-хиты) - первичные объекты моделирования, наследующие метаинформацию из шагов (степов) библиотеки Geant4, и детекторные хиты - объекты, учитывающие диджитализацию моделируемой электроникой детектора и не содержащие данных о характеристиках частиц. Ниже описаны структура и атрибуты обоих типов хитов применительно к мюонной системе установки SPD.

#### **3.1. Монте-Карло хиты**

При моделировании прохождения частиц через геометрическую модель Geant4 разбивает траекторию каждой частицы на последовательность шагов (степов), руководствуясь собственной внутренней логикой. Шаг может содержать как физическое взаимодействие, так и простое перемещение

частицы между двумя точками без изменения её состояния. Для последующего формирования хитов интерес представляют исключительно шаги, пересекающие чувствительные объемы детектора; один из таких объемов схематично показан серым квадратом на рисунке 5. Поскольку генерация шагов выполняется автоматически ядром Geant4, одному чувствительному объему может соответствовать множество шагов для каждой отдельной частицы.

На рисунке 5 для иллюстрации приведён пример распада частицы в чувствительном объеме. Несмотря на то, что вероятность такого процесса в мюонной системе пренебрежимо мала, данный случай позволяет наиболее наглядно разъяснить соотношение понятий шага, MC хита и диджи (детекторного хита). Степы показаны зелёными отрезками с красными точками в центре; точки и границы отрезков являются условными и служат лишь для визуального разделения объектов.

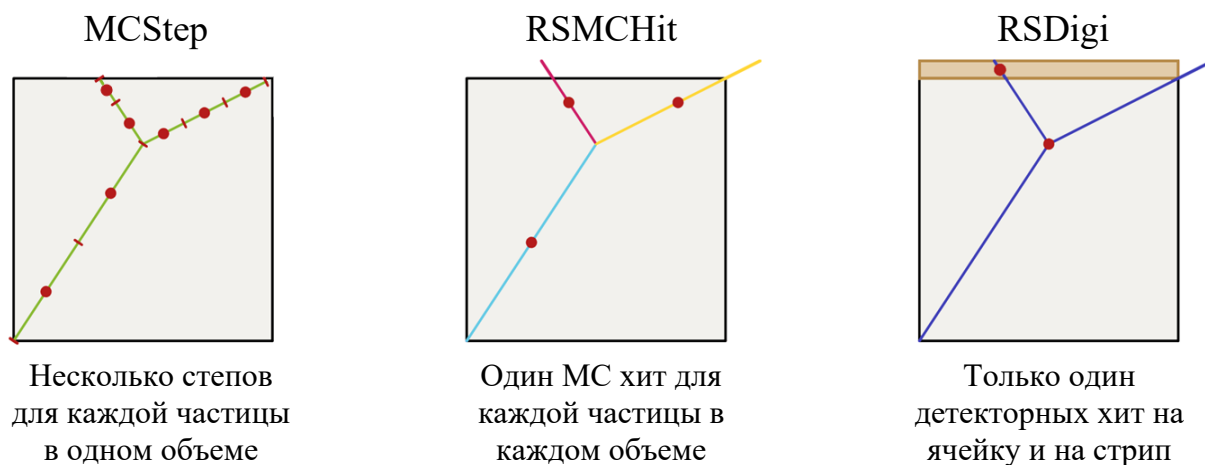


Рисунок 5 – Визуализация различных видов хитов

В каждом шаге Geant4 сохраняет значительный объём информации: энерговыделение, временные метки, тип частицы, координаты и т.д. Для формирования Монте-Карло хита отбираются только те данные, которые необходимы для формирования детекторного хита и позволят установить, произошло ли срабатывание данной ячейки. Извлечённые из шагов параметры

помещаются в промежуточный класс (имя которого формируется из сокращенного названия подсистемы с добавлением суффикса MCHit), уникальный для каждой подсистемы. В случае мюонной системы (класс RSMCHit) для каждой частицы, пересекающей каждый чувствительный объем, создаётся отдельный Монте-Карло хит. Так, для приведённого выше примера распада множество шагов в пределах одной ячейки преобразуются в три Монте-Карло хита: один для родительской частицы и по одному для каждого продукта распада.

На основе Монте-Карло хитов впоследствии формируются детекторные хиты RSDigi – по одному на каждую ячейку и на каждый стрип. Поскольку стрипы не представлены в геометрической модели как отдельные объемы, детекторные хиты в стрипах получаются путём экстраполяции треков частиц из ячеек с учётом предварительно заданных критериев, определяющих вероятность срабатывания стрипа в случае, если произошло срабатывание находящейся под ним ячейки.

На рисунке 6 приведена UML-диаграмма класса Монте-Карло хита для мюонной системы. Объект RSMCHit содержит следующие поля:

- энергосодержание в ячейке;
- координаты точки входа и выхода частицы из ячейки (необходимы для применения эмпирического критерия срабатывания, основанного на пороге по энергосодержанию и минимальной длине пройденного пути в веществе ячейки);
- временная метка срабатывания;
- пара 32-битных числовых идентификаторов: уникальный (particle id) и неуникальный (track id).

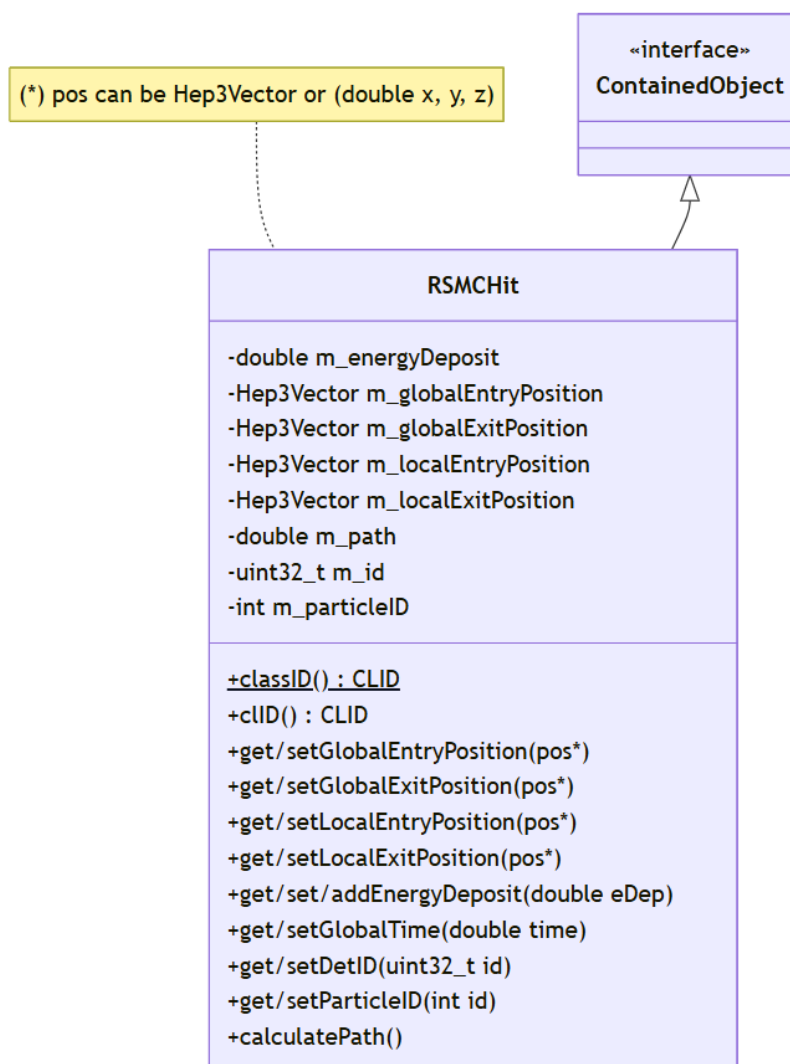


Рисунок 6 – UML-диаграмма класса RSMCHit

Неуникальный идентификатор наследует идентификатор родительской частицы в случае, если последняя классифицирована как представляющая интерес, что позволяет отслеживать иерархию частиц. Уникальный идентификатор присваивается каждой частице независимо от её происхождения и гарантирует различие отдельных частиц. Числовые значения порогов срабатывания на текущем этапе уточняются; предварительно они составляют 0,2 кэВ по энерговыделению и 2 мм по пройденному пути. Окончательные величины будут зафиксированы в ходе дальнейшей подготовки эксперимента SPD к набору данных. Таким образом, класс RSMCHit аккумулирует промежуточную информацию, необходимую для построения объектов класса RSDigi.

### 3.2. Детекторные хиты

Детекторный хит (RSDigi) представляет собой программную репрезентацию экспериментального хита в условиях моделирования. Его единственная функция - указать, какой конкретно детекторный элемент мюонной системы зарегистрировал срабатывание; никакой дополнительной физической информации хит не несёт. UML-диаграмма класса RSDigi показана на рисунке 7.

Объект RSDigi содержит следующие данные:

- тип хита, определяющий, от какого именно элемента получен сигнал: анодная проволока MDT-ячейки или стрип;
- принадлежность к части мюонной системы (баррель или эндкап). Хотя эта информация уже закодирована в числовом идентификаторе, выделенное поле позволяет избежать избыточных обращений к декодеру при простых промежуточных операциях;
- компактный 32-битный идентификатор, обеспечивающий однозначный мэппинг по иерархии геометрических объемов: в нём зашифрованы номера всех объемов, начиная от корневого уровня до конкретного сработавшего элемента;
- временная метка, используемая для временного разделения событий.

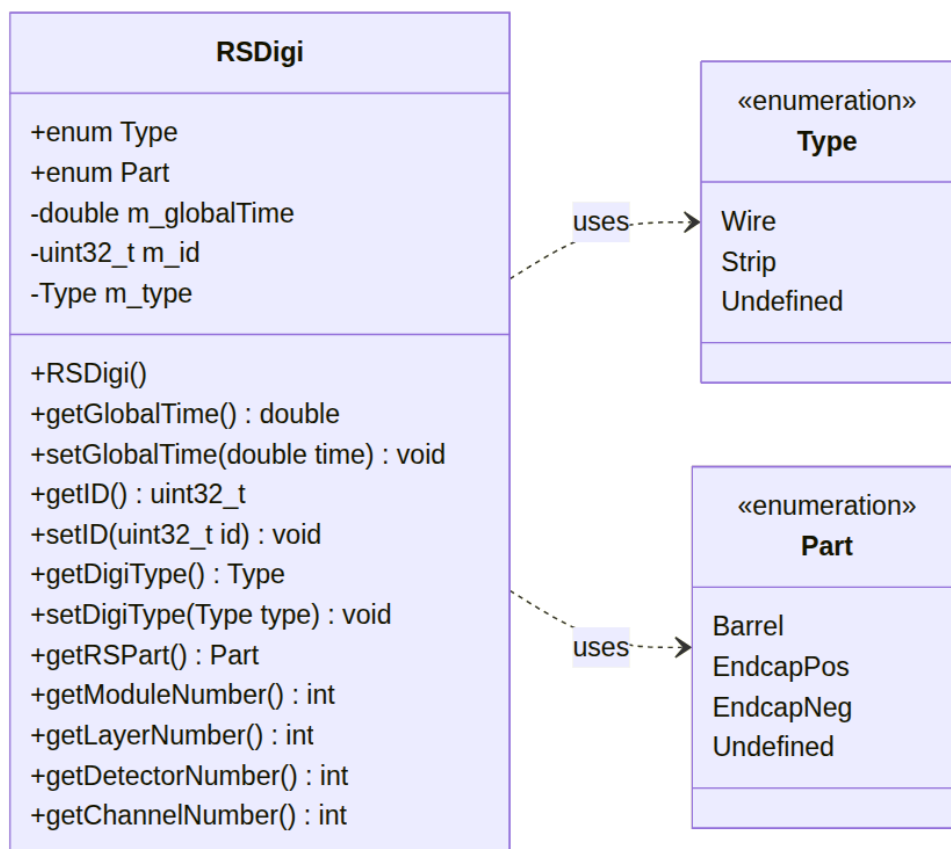


Рисунок 7 – UML-диаграмма класса RSDigi

На следующем этапе обработки полный набор детекторных хитов выступает в качестве входных данных для алгоритма формирования реконструированных объектов, а именно - кластеров хитов. Предполагается применение алгоритма DBSCAN. Дальнейшее развитие исследования включает разработку алгоритма кластеризации и реализацию класса кластеров детекторных хитов. Полученные в результате кластеризации данные будут использованы как входные для создания, отладки и валидации алгоритмов реконструкции треков и идентификации мюонов в условиях эксперимента SPD. Таким образом, выполненная работа по созданию геометрической модели и реализации Монте-Карло и детекторных хитов является необходимым и значимым начальным этапом в комплексной задаче реконструкции частиц в мюонной системе установки SPD.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи работы, направленной на моделирование и разработку программного обеспечения для мюонной системы (Range System) детектора SPD в рамках проекта класса мегасайенс NICA (ОИЯИ). Исследование ориентировано на создание программного инструментария для решения фундаментальной проблемы физики высоких энергий – изучения спиновой структуры нуклона, в частности, количественного определения вклада глюонной составляющей.

Проведённый анализ демонстрирует, что успех ключевых измерений в эксперименте SPD, таких как исследование поляризованных глюонных распределений посредством анализа распадов тяжёлых кваркониев ( $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ), в существенной мере определяется эффективностью работы мюонной системы. В условиях энергий пучков коллайдера NICA ( $\sqrt{s} \leq 27$  ГэВ) и прогнозируемого высокого уровня адронного фона, необходима разработка специализированных и оптимизированных алгоритмов реконструкции треков и идентификации частиц, которые в настоящее время отсутствуют.

На первом этапе была создана геометрическая модель мюонной системы в среде SPDGeoModel. Она включает в себя железные поглотители и активные элементы из MDT, что позволяет реалистично воспроизводить иерархию детектора. На этой основе в дальнейшем выполняется симуляция прохождения частиц и разрабатываются алгоритмы обработки событий. В дополнение к этому реализованы классы для Монте-Карло и детекторных хитов, которые служат базой для трекинга и идентификации. Актуальность данного этапа обусловлена тем, что кластеры на основе этих хитов лягут в основу процедуры выделения мюонов на адронном фоне.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в применении комплексного подхода, интегрирующего моделирование

детектора, разработку прототипов программного обеспечения с использованием современных вычислительных методов (включая методы машинного обучения) и исследование расширенной функциональности системы. Результаты данного исследования заложат основу программной инфраструктуры коллаборации SPD, обеспечат верификацию её физической программы и внесут вклад в глобальные исследования структуры нуклона.

Для достижения поставленных целей и полной реализации потенциала исследования дальнейшая работа планируется в следующей последовательности:

1. Проведение полномасштабного моделирования прохождения частиц и генерации фоновых процессов в созданной геометрии с целью получения репрезентативных смоделированных данных.
2. Разработка и адаптация алгоритмов кластеризации хитов (на основе интегрированной в программный пакет `spdroot` реализации алгоритма DBSCAN [14]) для сред обработки данных эксперимента.
3. Создание и оптимизация алгоритмов идентификации мюонов в условиях сильного адронного фона с применением современных методов, включая машинное обучение и классические трековые алгоритмы (например, фильтр Калмана).
4. Исследование возможности регистрации нейтронов мюонной системой и разработка соответствующих методов анализа.
5. Оценка потенциала использования системы в качестве грубого адронного калориметра и создание алгоритмов для данной цели.
6. Калибровка и валидация разработанных алгоритмов на данных, полученных с реального прототипа мюонной системы при облучении космическими лучами.

Реализация указанного плана работ обеспечит создание комплексного инструментария для моделирования, реконструкции и анализа данных мюонной системы SPD, что является необходимым условием для успешного выполнения научной программы эксперимента и получения новых фундаментальных результатов о структуре материи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spergel D. N. et al. [WMAP Collaboration].* First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 2003. — Vol. 148, No. 1. — Pp. 175–194.
2. *Ashman J. et al. [EMC Collaboration].* A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function  $g_1$  in deep inelastic muon-proton scattering // *Phys. Lett. B.* — 1988. — Vol. 206, No. 2. — Pp. 364–370.
3. *Abazov V. M. et al. [SPD Collaboration].* Conceptual design of the Spin Physics Detector // arXiv:2102.00442 [physics.ins-det]. — 2021.
4. *Barsov S. et al.* ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2001. — Vol. 462, No. 3. — Pp. 364–381.
5. *SPD collaboration.* Technical design report of the Spin Physics Detector. — 12 February, 2023.
6. *Abazov V. M. et al.* SPD Range (Muon) System: Technical Design Report. — Дубна: ОИЯИ, 2022.
7. *Baranov D. V. et al.* Challenges and Problems in Charmonium Production at the SPD NICA // *Phys. Part. Nucl. Lett.* — 2022. — Vol. 19, No. 4. — Pp. 375–382.
8. *Guskov A. V. et al.* Possible studies at the first stage of the NICA collider operation with polarized and unpolarized proton and deuteron beams // *Eur. Phys. J. A.* — 2021. — Vol. 57, Article 212.

9. *Abazov V. M. et al. [D0 Collaboration]*. The Muon system of the run II D0 detector // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2005. — Vol. 552, No. 3. — Pp. 372–398.
10. *Abbon P. et al. [COMPASS Collaboration]*. The COMPASS experiment at CERN // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2007. — Vol. 577, No. 3. — Pp. 455–518.
11. *Novotny R. et al.* Technical Design Report for the PANDA Electromagnetic Calorimeter. — panda.gsi.de, August 2008.
12. *ATLAS Collaboration*. ATLAS Computing: technical design report. — Geneva: CERN-LHCC-2005-022, 20 June 2005.
13. *Agostinelli S. et al.* Geant4 — a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. A.: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. Vol. 506, № 3. — P. 250–303.
14. *Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X.* A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise // Proc. 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). — 1996. — Pp. 226–231.