

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-ОСЕТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.
К.Л. ХЕТАГУРОВА»**

Факультет: Физико-технический
Кафедра: Геофизики и геоинформатики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«Разработка визуального интерфейса для информационной системы
аппаратного обеспечения установки SPD»

Исполнитель:

Бакалавр, 4 курс, очная форма
обучения,

Направление подготовки: 03.03.02.
Физика

Магкаев Ролен Арсенович

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор, заведующий
кафедры геофизики и
геоинформатики

Заалишвили Владислав Борисович

Научные консультанты:

к.ф.м.н., с.н.с. лаборатории ядерных
проблем ОИЯИ

Прокошин Фёдор Валерьевич;

к.ф.м.н., Тваури Инга Васильевна

«Допущен к защите»

Зав. кафедрой _____ (профессор, доктор физико-математических наук,
Магкоев Тамерлан Таймуразович)

« ____ » _____ 2025г.

Владикавказ 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Детекторы и ускорители установки в физике частиц и высоких энергий	7
1.1. Общие сведения о детекторах частиц.....	7
1.2. Типы и конструкции детекторов, используемых в мегасайенс установках.....	8
1.2.1. Сцинтилляционные детекторы.....	8
1.2.2. Черенковские детекторы.....	10
1.2.3. Детекторы ионизационного типа.....	12
1.2.3.1. Газонаполненные детекторы.....	13
1.2.3.2. Полупроводниковые детекторы.....	15
1.2.4. Калориметры.....	16
1.2.5. Трековые детекторы.....	18
1.3. Основные характеристики и параметры детекторов частиц.....	19
1.3.1. Чувствительность.....	19
1.3.2. Разрешающая способность.....	20
1.3.3. Эффективность регистрации частиц.....	21
1.3.4. Время отклика.....	21
1.4. Ускорители частиц в современных экспериментах.....	22
1.4.1. Эксперименты на коллайдерах.....	24
1.4.2. Эксперименты с фиксированной мишенью.....	25
1.5. Ускорительный комплекс NICA: детектор SPD.....	26
Вывод по главе 1.....	30
Глава 2. Базы данных и информационные системы SPD.....	31
2.1. Общие сведения о базах данных.....	31
2.2. PostgreSQL и его преимущества.....	33
2.3. Основные информационные системы SPD.....	34
Вывод по главе 2.....	38

Глава 3. Информационная система аппаратного обеспечения установки SPD – Hardware Database.....	39
3.1. Hardware Database: назначение и архитектура.....	39
3.2. Проектирование и реализация backend-части.....	40
3.3. Hardware Mapping.....	42
3.4. Разработка визуального интерфейса информационной системы Hardware Database.....	43
3.4.1. Выбор инструментов для реализации сервиса.....	43
3.4.2. Авторизация и верификация на сервисе.....	45
3.4.3. Уровни доступа на сервисе.....	45
3.4.4. Реализация веб-интерфейса.....	46
Вывод по главе 3.....	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	51
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	53

РЕФЕРАТ

Дипломная работа на тему «Разработка визуального интерфейса для информационной системы аппаратного обеспечения установки SPD» состоит из введения, 3 разделов, выводов, заключения и списка используемых источников, который включает в себя 15 ссылок. Работа изложена на 54 страницах печатного текста, таблиц и рисунков.

В работе рассматривается эксперимент Spin Physics Detector (SPD), предназначенной для исследований спиновой физики на коллайдере NICA.

Целью данного исследования является разработка информационной системы Hardware Database (HWDB) для учёта оборудования детектора SPD.

Основные задачи исследования выглядят следующим образом:

1. Изучение экспериментальных установок для детектирования частиц;
2. Создание прототипа базы данных для хранения информации, где характеристики каждого устройства привязаны к уникальному идентификатору (Hardware ID);
3. Разработка средства автоматизированного заполнения данных;
4. Обеспечение удобного и надёжного доступа к информации через графический интерфейс для пользователей и командой строки (CLI) и программный интерфейс (API);
5. Разработка информационной системы для организации схемы (mapping) системы сбора данных, обеспечивающую соответствие между каналами на выходах концентраторов DAQ и элементами установки.

Объектом исследования является информационная система для учёта оборудования установки SPD и его характеристик.

Предметом исследования представляет собой методы и программно-технические решения, необходимые для реализации основных задач исследования.

Ключевые слова: Hardware, database, SPD, NICA, front-end, mapping, детекторы, ускоритель частиц, физика высоких энергий.

ВВЕДЕНИЕ

Spin Physics Detector (SPD) – это эксперимент, запланированный для исследования спиновой физики на адронном коллайдере NICA, являющейся мегасайенс-установкой, сооружаемой в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия). Установка предназначена для всестороннего изучения спиновой структуры протона и дейтрона. Основное внимание будет уделено изучению их поляризованной глюонной компоненты в реакциях инклюзивного рождения чармониев, открытого чарма и прямых фотонов, а также прочих спинзависимых явлений в столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов с энергией в системе центра масс до 27 ГэВ и светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Детектор SPD спланирован как универсальный 4π-спектрометр, который основан на современных технологиях. В составе детектора планируется использование различных типов устройств: дрейфовые трубки и камеры, сцинтилляционные детекторы, многозачерное резистивные пластинчатые камеры (MRPC), черенковские счётчики и кремниевые детекторы.

Каждая детекторная система состоит из множества элементов (может достигать сотен тысяч). Для каждой компоненты детекторных систем предусмотрен свой набор параметров, которые необходимо учитывать при работе установки и обработке данных.

Сигналы с детекторов будут поступать на интерфейсные карты, подключённые к концентраторам первого и второго уровня. Каждый элемент этой системы сбора данных обладает уникальными параметрами, которые должны храниться в базе данных и быть доступными для пользователей.

Целью данного исследования является разработка информационной системы Hardware Database (HWDB) для эффективного учёта оборудования установки SPD и его характеристик.

Основные задачи исследования заключаются в следующем:

1. Изучение экспериментальных установок для детектирования частиц;

2. Создание прототипа базы данных для хранения информации, где характеристики каждого устройства привязаны к уникальному идентификатору (Hardware ID);

3. Разработка средства автоматизированного заполнения данных;

4. Обеспечение удобного и надёжного доступа к информации через графический интерфейс для пользователей и командой строки (CLI) и программный интерфейс (API);

5. Разработка информационной системы для организации схемы (mapping) системы сбора данных, обеспечивающую соответствие между каналами на выходах концентраторов DAQ и элементами установки. Так как общее количество каналов регистрации в установке SPD составляет порядка 500 тысяч, создание схемы автоматизировано, а доступ к ней и характеристикам компонент должен быть быстрым и надёжным.

Объектом исследования является информационная система для учёта оборудования установки SPD и его характеристик.

Предметом исследования представляет собой методы и программно-технические решения (архитектура, интерфейсы, модули и т.д.), необходимые для реализации основных задач исследования.

Результаты проведённых исследований были представлены в виде докладов на Весенней школе по информационным технологиям ОИЯИ 2024 [1].

Глава 1. Детекторы и ускорители установки в физике частиц и высоких энергий

Прогресс в физике элементарных частиц неразрывно связан с использованием детекторов, способных регистрировать параметры широкого спектра излучения и частиц. Их функция заключается не только в исследовании фундаментальных свойств материи, но и в прикладных задачах, которые охватывают диагностику, обеспечение безопасности и производственный контроль.

1.1. Общие сведения о детекторах частиц

Детекторы частиц – устройства, предназначенные для регистрации и измерения параметров (энергии, импульса, траектории движения и др.) элементарных частиц и различных видов излучений [2]. Под «частицами» в данном контексте понимаются как фундаментальные (электроны, протоны, нейтроны и т.д.) и составные (барионы и мезоны), так и любые другие нестабильные образования, которые возникают в процессе высокоэнергетических взаимодействий.

Назначение детекторов в основном сводится к тому, чтобы с высокой степенью точности зарегистрировать каждую частицу, измерить её характеристики и определить её траекторию в поле действия сил. Всё это даёт возможность строить различные физические модели, подтверждать или опровергать существующие теории и получать новые знания о строении материи.

Классификация детекторов зависит от физического явления, которое лежит в основе их работы, и от методов и целей эксперимента. Каждый тип детектора служит определённым задачам и выбирается в зависимости от физических условий эксперимента, требуемой чувствительности и возможностей по обработке данных. В масштабных установках на больших коллайдерах применяется комбинация различных детекторов, чтобы максимально полно реконструировать события при соударении частиц.

Детекторы частиц находят широкое применение как в фундаментальных исследованиях, так и в большинстве прикладных областей. Основными направлениями их использования являются: фундаментальные исследования в области физики высоких энергий (изучение структуры материи и взаимодействия элементарных частиц: проверка стандартной модели и поиск новых частиц), ядерная физика и энергетика (измерения радиоактивности, контроль утечек), медицинская визуализация и диагностика (компьютерная томография, лучевая терапия), промышленные и космические исследования (изучение космических лучей, дефектоскопия), безопасность (системы досмотра).

1.2. Типы и конструкции детекторов, используемых в мегасайенс-установках

Принцип работы детекторов элементарных частиц основан на регистрации физических процессов, возникающих при взаимодействиях элементарных частиц с веществом. Частицы, участвующие в различных типах взаимодействий, вызывают характерные эффекты, которые позволяют регистрировать факт прохождения частицы и идентифицировать её тип и некоторые параметры (энергию, заряд и т. д.).

В экспериментах, исследующих элементарные частицы, применяются разные типы детекторов, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. Выбор детектора зависит от требований эксперимента. Такие современные установки, как SPD, требуют использования нескольких видов детекторов для эффективной регистрации частиц, возникающих в результате взаимодействий.

1.2.1. Сцинтилляционные детекторы

Один из основных принципов регистрации частиц заключается в том, что заряженная частица, проходя через нейтральную среду детектора, вызывает ионизацию и возбуждение атомов среды, вследствие электромагнитного взаимодействия. В результате, вдоль траектории движения

частицы образуются свободные заряды и возбуждённые атомы. При наличии электрического поля в детекторе возникает электрический ток, который регистрируется как кратковременный импульс.

Когда возбужденные атомы возвращаются в своё основное состояние, они испускают фотоны, которые можно зафиксировать в виде оптической вспышки (сцинтилляции) в видимом или ультрафиолетовом диапазоне. Этот принцип применяется в сцинтилляционных детекторах [3].

Сцинтилляционные детекторы (схема приведена на рис.1.) состоят из следующих элементов:

1. Сцинтиллятор – вещество, преобразующее энергию ионизирующих частиц в фотоны видимого или ультрафиолетового спектра. Как правило, в качестве сцинтилляторов используют либо органические материалы (например, жидкости, кристаллы или пластики), либо неорганические (например, стекла или кристаллы). Помимо этого, сцинтилляторы могут быть газообразными (например, инертные газы).

2. Фотоэлектронный умножители (ФЭУ) – это вакуумные фотоэлементы с многократными усилениями, которые основаны на вторичной эмиссии. Они включают в себя фотокатод, фокусирующее устройство, эмиттеры и анод. ФЭУ преобразуют вспышку в импульс электрического тока.

3. Электронная система, необходимая для регистрации импульсов электрического тока ФЭУ.

Сцинтилляционные детекторы имеют ряд преимуществ:

1. У них высокий коэффициент поглощения для частиц разных типов и энергий;

2. Сцинтилляционные материалы дают возможность создавать детекторы практически любых размеров и форм;

3. Они обладают способностью регистрировать события с точностью до наносекунд;

4. Точность измерения энергии частиц выше, чем у множества других видов детекторов, особенно при регистрации γ -квантов.

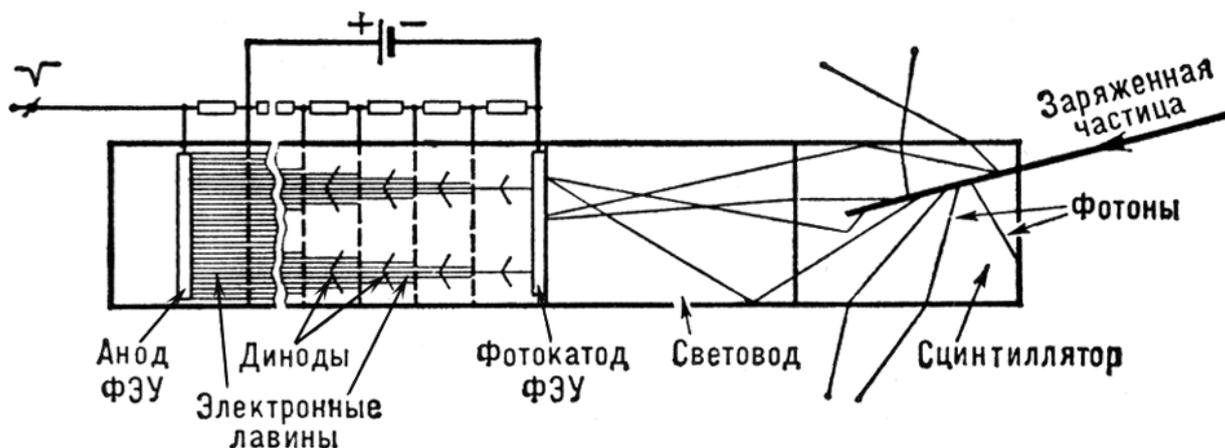


Рисунок 1. Схема сцинтилляционного детектора

1.2.2. Черенковские детекторы

Черенковские детекторы – это один из типов детекторных устройств, которые основаны на регистрации излучения Черенкова, возникающего при движении в прозрачной среде заряженных частиц со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в данной среде [4]. Исходя из определения скорости движения частиц в данной среде, вытекает условие возникновения черенковского излучения:

$$v > \frac{c}{n}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды.

Излучение Черенкова представляет собой когерентное испускание света электрическими диполями, которые образуются в среде в результате её поляризации пролетающей заряженной частицей, и возникает оно при возвращении этих диполей в исходное состояние (неполяризованное).

При медленном движении частиц диполи успевают поляризоваться симметрично относительно её координаты. Это приводит к тому, что излучения отдельных диполей при возвращении их в неполяризованное состояние компенсируют друг друга.

При движении частиц со скоростью, превышающей скорость света, реакция диполей становится запаздывающей, и они ориентируются

асимметрично относительно траектории частицы. Получается так, что излучение диполей оказывается некомпенсированным. Это приводит к характерному излучению, формирующему конусообразную волну, которая направлена под определённым углом относительно траектории частиц.

Угол испускания фотонов черенковского излучения связан со скоростью частицы соотношением:

$$\cos\theta = \frac{v}{c*n} = \frac{1}{\beta*n} \quad (2)$$

Зависимость (2) объясняется принципом Гюйгенса (Рис. 2). Огибающая световых волн вокруг частицы представляет собой конус, вершина P' которого совпадает с положением частицы в данный момент, а нормали m к образующим конуса показывают направление распространения излучения Черенкова.

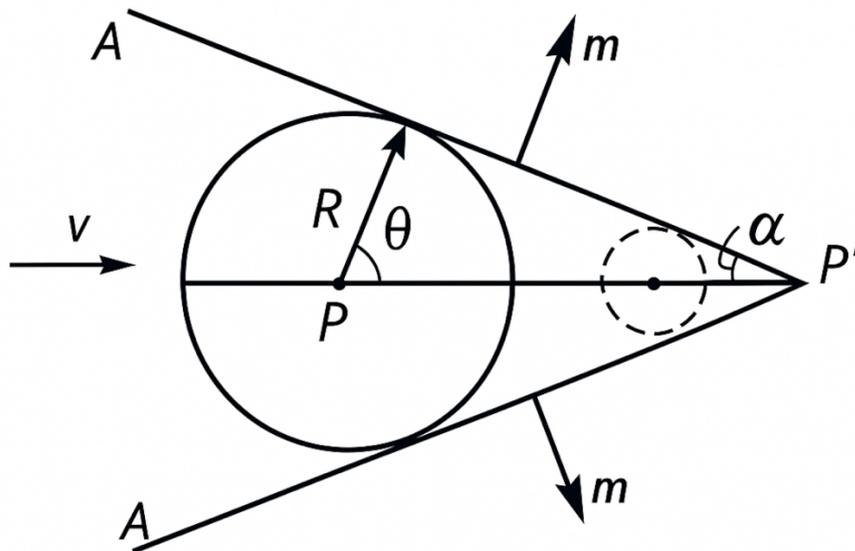


Рисунок 2. Геометрия излучения Черенкова. Угол $\theta = 90^\circ - \alpha$.

Энергетические потери частицы на черенковское излучение малы относительно потерь на ионизацию. Число фотонов, излучаемые на единицу пути варьируется от нескольких единиц до нескольких сотен фотонов на сантиметр.

Тем не менее, находя угол излучения Черенкова, можно точно определять скорость и энергию частицы. Черенковские детекторы дают

возможность эффективно регистрировать высокоэнергетические релятивистские частицы на фоне большого количества низкоэнергетических частиц.

Существует несколько типов черенковских детекторов:

1. Пороговые черенковские счётчики дают возможность различать частицы по пороговой скорости (т. е. частицы со скоростями больше, чем $\beta_{min} = 1/n$), определяемой показателем преломления среды (радиатора). Например, можно различать пионы, каоны и протоны.

2. Дифференциальные черенковские счётчики регистрируют частицы в определённом интервале скоростей. Они подразделяются на: счётчики с полным внутренним отражением и счётчики с кольцевой диафрагмой.

3. Черенковские детекторы кольцевого изображения (RICH-детекторы) – это продвинутый тип черенковских детекторов, которые регистрируют чёткое кольцевое изображение конуса излучения Черенкова. Они помогают идентифицировать тип частиц с высокой точностью. RICH-детекторы включают в себя: детекторы с квазифокусировкой, детекторы со сферическим зеркалом и DIRC-детекторы (детекторы с полным внутренним отражением)

1.2.3. Детекторы ионизационного типа

Детекторы, действие которых основано на ионизации атомов и молекул, вызываемых заряженной частицей в веществе рабочего объёма детектора, относятся к устройствам ионизационного типа [5]. Они устроены таким образом, что при ионизации заряженной частицей среды (газообразной, жидкой или твёрдой), к которой приложено электрическое поле, появляется кратковременный электрический ток, который регистрируется соответствующим оборудованием. К этому типу детекторов относятся газонаполненные и полупроводниковые детекторы.

1.2.3.1. Газонаполненные детекторы

Газонаполненные детекторы – это приборы, широко применяющиеся для регистрации различных видов ионизирующих излучений из-за их высокой чувствительности, простой конструкции и низкой стоимости в сборке и обслуживании. Их основным рабочим элементом является наполненная газом оболочка с двумя или тремя электродами внутри.

Принцип действия газонаполненных детекторов основывается на ионизации газа, возникающей при прохождении через него заряженных частиц. В результате такой ионизации образуются электроны, движущиеся к электродам под действием приложенного к ним напряжения, формируют электрический сигнал.

Характер работы газонаполненных детекторов зависит от величины приложенного к электродам напряжения. Выделяют несколько рабочих областей (Рис. 3), каждая из которых соответствует определённому типу газонаполненных детекторов:

1. Область рекомбинации: область, не используемая для детектирования, так как происходит соби́рание зарядов на электродах и рекомбинация ионов в объёме газа. При увеличении напряжения скорость ионов увеличивается, что ведёт к уменьшению вероятности рекомбинации, росту количества собранных зарядов и амплитуда сигнала.

2. Область насыщения: при дальнейшем увеличении напряжения наступает момент, когда практически все образовавшиеся в детекторе заряды собираются на электродах, и амплитуда сигнала перестаёт зависеть от приложенного напряжения. В данной области работают ионизационные камеры.

3. Пропорциональная область: при продолжении увеличения напряжения электроны приобретают энергию, достаточную для возникновения вторичной ионизации газа (газового усиления). Коэффициент этого усиления пропорционален начальному числу частиц, образованных в

детекторе, что даёт возможность хранить информацию об энергии первичных частиц. В этой области работают пропорциональные счётчики.

4. Область ограниченной пропорциональности: при ещё большем увеличении напряжения коэффициент газового усиления теряет линейную зависимость от приложенного напряжения. Сигнал становится менее предсказуемым, что ведёт к снижению точности измерений энергии. Как правило, детекторы не применяются в этой области.

5. Область Гейгера-Мюллера: напряжение достигает настолько высоких значений, что собираемый заряд не зависит от первичной ионизации. При попадании частицы в детектор, в нём вспыхивает самостоятельный газовый разряд. В этой области работают счётчики Гейгера-Мюллера.

6. Область непрерывного разряда: при дальнейшем увеличении напряжения детектор становится непригодным для регистрации частиц из-за перехода в режим постоянного разряда.

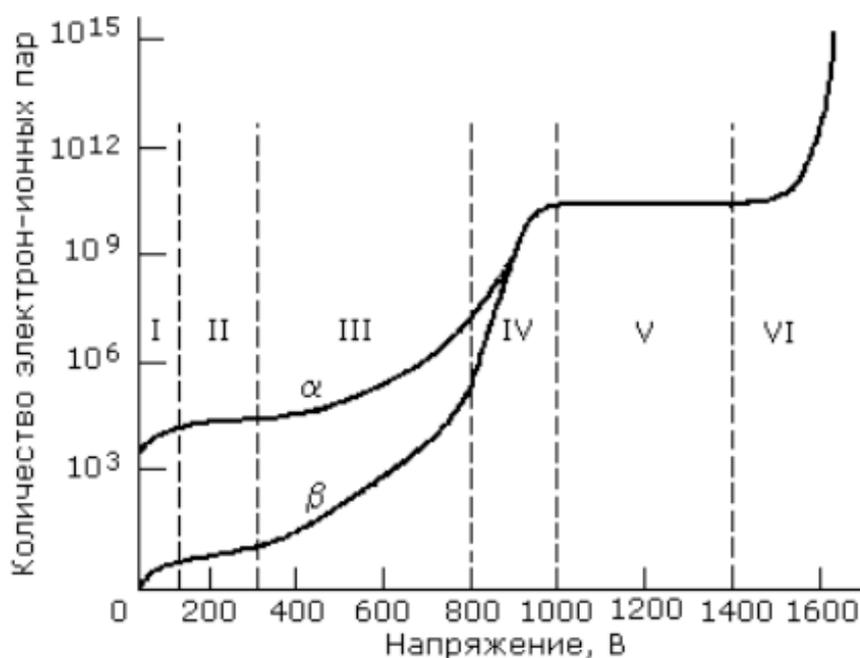


Рисунок 3. Зависимость количества регистрируемых электрон-ионных пар от приложенного напряжения (рабочие области детекторов)

1.2.3.2. Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы – это детекторы с твердотельной рабочей средой, регистрирующие заряженные частицы и γ -квантов. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с газонаполненными детекторами.

Газонаполненные детекторы имеют низкую плотность газа и энергию, теряемую частицей в рабочем объеме, что не даёт эффективно регистрировать высокоэнергетические и слабоионизирующие частицы. Также, энергия, необходимая для рождения электрон-ионной пары в газе, велика (около 30-40 эВ), что увеличивает флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение.

Эти недостатки эффективно преодолеваются использованием полупроводниковых детекторов, у которых рабочее вещество является твердотельным материалом с высокой плотностью и малой энергией ионизации. Чаще всего используют детекторы на основе кристаллов кремния (плотность около 2,3 г/см³) и германия (плотность около 5,3 г/см³).

Принцип работы полупроводниковых детекторов заключается в создании чувствительной области с низкой концентрацией свободных носителей заряда. Попадая в чувствительную область, частица вызывает ионизацию, следовательно в зоне проводимости появляются электроны, а в валентной зоне – дырки. Из-за приложенного к полупроводниковому кристаллу напряжения появляется движение электронов и дырок к электродам, что формирует импульс тока. Высокое напряжение (до нескольких кВ) обеспечивает эффективный сбор всех зарядов, образованных частицей в рабочем объеме.

Кремниевые детекторы могут работать при комнатной температуре и широко применяются в различных физических экспериментах благодаря удобству эксплуатации. Германиевые детекторы требуют охлаждения до азотных температур для снижения уровня собственных шумов и улучшения энергетического разрешения.

1.2.4. Калориметры

Калориметры – это тип детекторов, которые, в первую очередь, предназначены для измерения полной энергии частиц, в том числе и нейтральных [6]. Принцип их действия заключается в регистрации ливней (или каскадов) вторичных частиц, в результате попадания первичной частицы в вещество калориметра.

Попадая в вещество калориметра, частица порождает каскад реакций, в результате которых она передаёт свою энергию вторичным частицам. Эта энергия поглощается в рабочем объёме детектора и затем измеряется.

Калориметры обладают рядом преимуществ в сравнении с другими детекторами:

1. Широкий диапазон измеряемых энергий (от нескольких МэВ до максимально достижимых значений);
2. Высокое энергетическое разрешение (для идеального гомогенного электромагнитного калориметра $\sim E^{1/2}$, где E – энергия падающей частицы). На него влияют: статистические флуктуации числа частиц в ливне, флуктуации утечки ливня из объёма калориметра, шумы и структурные неоднородность инструментов и «сэмплинг» флуктуации;
3. Размер калориметра увеличивается с энергией логарифмически;
4. Хорошая пространственная точность;
5. Могут использоваться в качестве триггеров для отбора событий из-за быстрого формирования сигнала;
6. Дают возможность эффективно различать типы частиц.

Калориметры можно разделить на несколько типов, исходя из типы детектируемых частиц (электромагнитные и адронные) или конструкции (гомогенные и гетерогенные):

1. Электромагнитные калориметры применяются для детектирования электронов, позитронов и γ -квантов, которые рождают электромагнитные ливни (Рис. 4).

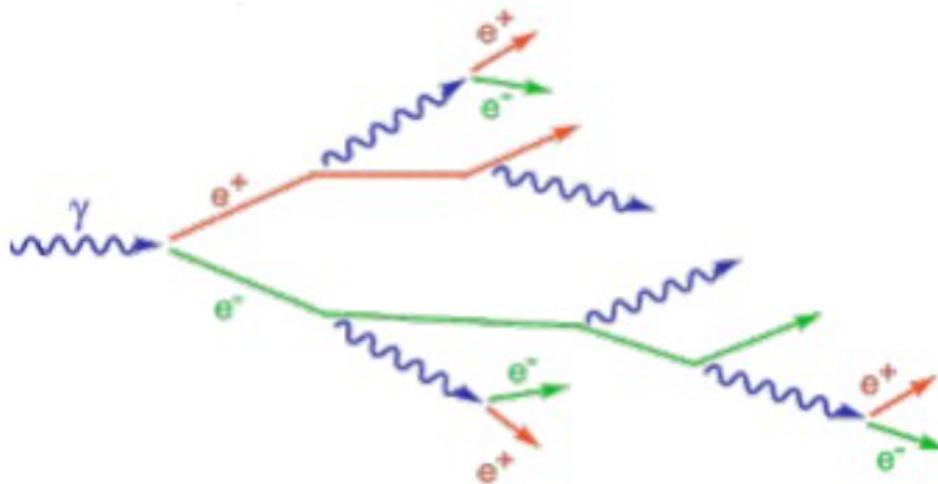


Рисунок 4. Схема электромагнитного ливня

При энергиях ~ 1 ГэВ и больше для фотонов основными процессами являются рождения электрон-позитронных пар, а для электронов (и позитронов) генерация тормозного излучения.

В качестве основного материала для электромагнитных калориметров обычно выбирают плотные вещества (свинец, йодид цезия и др.) или же жидкие благородные газы (аргон, ксенон и т.д.).

2. В гомогенных калориметрах поглощающий материал является одновременно и детектирующим. Они отличаются своим хорошим энергетическим разрешением, что связано с особенностью их рабочей среды. Обычно их применяют в нейтринных экспериментах, в которых для обнаружения редких событий нужны большие объёмы и недорогие материалы.

Реже всего гомогенные калориметры используются для детектирования адронных ливней в экспериментах на ускорителях. Это связано с тем, толщины, которые необходимы для поглощения ливней от высокоэнергетических частиц, могут превышать разумные пределы.

3. Гетерогенные калориметры представляют собой чередующиеся слои поглотителя и детектирующего (активного) слоя. В активных слоях детектируется только часть энергии, которая выделяется вторичными частицами.

Как правило, они используются в адронной калориметрии из-за своей способности эффективно поглощать и регистрировать сложные адронные ливни.

Адронные калориметры регистрируют сильно взаимодействующие частицы (адроны), инициирующие более сложные по структуре ливни при прохождении вещества (Рис. 5).

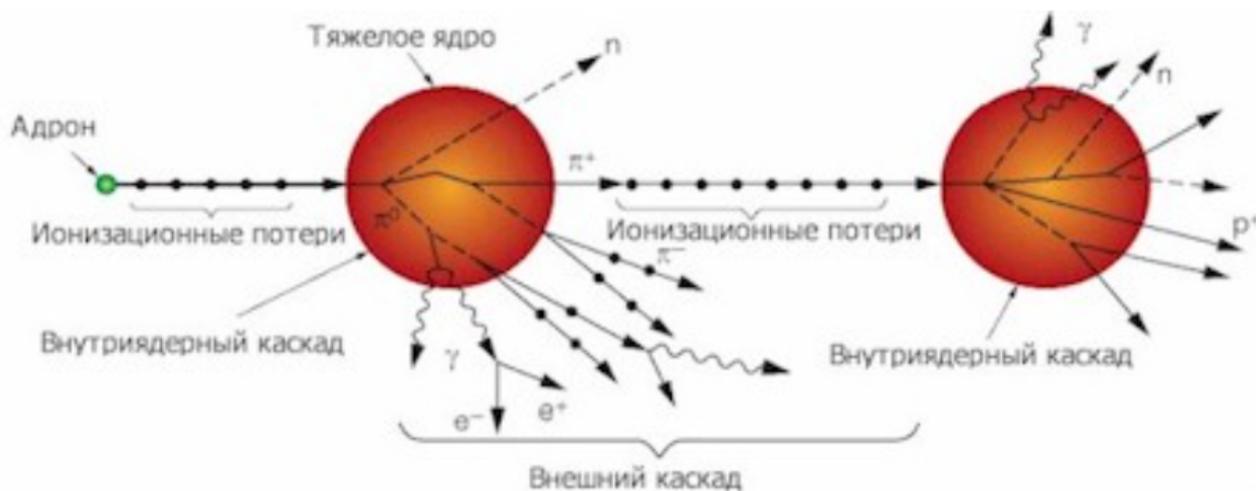


Рисунок 5. Схема адронного ливня

Адрон, попадая в ядро, взаимодействует с его нуклонами. И передаёт им часть своей энергии. Получившие эту энергию нуклоны взаимодействуют с другими нуклонами. В результате этого внутриядерного каскада, энергия протона перераспределяется по количеству нуклонов ядра и, спустя какое-то время, возникает составное ядро. Часть нуклонов вылетает из ядра также, как кластеры и γ -кванты.

1.2.5. Трековые детекторы

Трековые детекторы – это устройства, которые регистрируют траектории заряженных частиц (или треки). Они дают пространственную информацию о траекториях частиц, которая даёт возможность реконструировать события [7].

Принцип действия трековых детекторов основан на регистрации ионизационных следов заряженных частиц, которые проходят через чувствительную область детектора. К детекторам этого типа относятся: ядерные фотоэмульсии, диэлектрические детекторы, камера Вильсона, диффузная камера, пузырьковая камера, искровая камера.

В трековых детекторах следы частиц визуально наблюдаемы. Однако также есть группа детекторов (например, многопроволочная пропорциональная камера, дрейфовая камера, время-проекционная камера и микростриповый детектор), в которых треки частиц не наблюдаемы, но фиксируются их пространственные координаты. Такие детекторы называются координатными.

1.3. Основные характеристики и параметры детекторов частиц

При выборе или проектировании детекторов элементарных частиц важную роль играют физические и технические характеристики. Эффективность решения поставленных задач эксперимента определяется совокупностью параметров, которые описывают работу детекторов.

1.3.1 Чувствительность

Чувствительность – это минимальная энергия или минимальный заряд частицы, который способен зарегистрировать данный детектор. Она является одной из важнейших характеристик любого детектора элементарных частиц. Чем выше чувствительность, тем меньшую энергию или менее интенсивный сигнал он способен зарегистрировать.

Чувствительность определяется физическим принципом детектирования частиц, используемым материалом, уровнем собственных шумов электроники и характеристиками используемых усилительных схем. Например, газонаполненные детекторы обладают высокой чувствительностью к низкоэнергетическим заряженным частицам благодаря низкой энергии, нужной для создания электрон-ионных пар. Полупроводниковые детекторы

демонстрируют ещё более высокую чувствительность, так как энергия для генерации пары электрон-дырка в кремнии или германии намного ниже, чем для газовых сред. У сцинтилляционных детекторов чувствительность зависит от световых выхода материала и эффективности фотоумножителя.

При регистрации нейтральных частиц чувствительность играет особую роль. Для регистрации таких сигналов используют специализированные детекторы с низким уровнем собственного шума.

1.3.2. Разрешающая способность

Разрешающая способность определяет возможности детектора различать близкие по значению физические параметры или близко расположенные события. К этой характеристике относятся пространственное, энергетическое и временное разрешения.

Пространственное разрешение – минимальное расстояние между двумя точками, события которых могут быть зафиксированы детектором отдельно друг от друга. Этот параметр имеет критическое значение в экспериментах по реконструкции траекторий частиц и идентификации точек взаимодействий. Высокое пространственное разрешение нужно для трековых и вершинных детекторов, которые позволяют восстанавливать траектории частиц с точностью до нескольких микрометров.

Энергетическое разрешение – способность детектора точно измерять энергию падающей частицы и различать близкие по энергии частицы. Высокое энергетическое разрешение нужно в спектрометрических задачах. Оно определяется: статистическими флуктуациями при формировании сигнала, нужной для создания измеряемых пар энергией, а также характеристиками системы сбора данных. Наиболее высокое значение энергетического разрешения (на уровне 0,1%) демонстрируют полупроводниковые детекторы на основе сверхчистого германия.

Временное разрешение – это минимальный промежуток времени между двумя событиями, которые детектор способен различить. Этот параметр очень

важен в условиях высокой интенсивности пучков частиц, когда события происходят с высокой частотой. Лучшее временное разрешение имеют сцинтилляционные и черенковские детекторы, которые могут регистрировать события с точностью до единиц пикосекунд.

1.3.3. Эффективность регистрации частиц

Эффективность регистрации частиц определяет вероятность того, что прошедшая через чувствительный объём детектора, будет зарегистрирована. Она влияет на количество зарегистрированных событий и является важнейшим фактором при проведении физического анализа (особенно в задачах с регистрацией редких процессов или с высокой интенсивностью потоков частиц).

Эффективность регистрации определяется: типом и энергией частицы, толщиной чувствительного слоя и его физических свойств, геометрией детектора и степенью покрытия, вероятностью различных типов взаимодействий частицы с веществом.

Высокой эффективностью регистрации низкоэнергетических частиц характеризуются полупроводниковые детекторы, благодаря высокой плотности рабочего вещества и низкой энергии образования пар. А вот калориметры обладают высокой эффективностью регистрации электромагнитных и адронных ливней из-за большого рабочего объёма.

1.3.4. Время отклика

Время отклика – это параметра, характеризующий задержку между прохождением частицы через детектор и появлением регистрируемого сигнала. Чем меньше это время, тем быстрее детектор работает, обеспечивая высокую скорость регистрации событий. Этот параметр особенно важен для детекторов, используемых в условиях высокой интенсивности пучков частиц.

Газонаполненные детектора (например, ионизационная камера) обладают сравнительно большим временем отклика (микросекунды).

Сцинтилляционные и черенковские детекторы имеют время отклика порядка наносекунд и даже пикосекунд.

Низкое время отклика обеспечивает возможность работы с частотами взаимодействия до миллионов событий в секунду, что очень важно на современных ускорительных комплексах.

1.4. Ускорители частиц в современных экспериментах

Ускорители частиц представляют собой устройства, предназначенные для исследования структуры материи посредством ускорения заряженных частиц до высоких энергий и последующего столкновения их между собой или с мишенью.

Принцип работы ускорителей основан на взаимодействии заряженных частиц с электрическими и магнитными полями. Электрическое поле необходимо для придания частицам кинетической энергии, а магнитное – для изменения направления (действуя на частицу силой Лоренца) их движения, не меняя их скорости.

Основными элементами ускорительных установок являются:

1. Источник – устройство для получения пучков заряженных частиц. Он может быть и относительно простым (например, электронная пушка), и представлять собой сложный комплекс ускорительных устройств (например, источник антипротонов Национальной ускорительной лаборатории имени Ферми)
2. Ускоритель – устройство или цепочка устройств, увеличивающих кинетическую энергию частиц.
3. Устройства, осуществляющие вывод и транспортировку пучка на мишень или взаимодействие пучка с мишенью, или соударение встречных пучков в ускорителе.

Существует несколько параллельных принципов классификации ускорителей (Рис. 6), отражающих либо принцип действия, либо

конструктивные и технические особенности, либо способ использования и назначение [8].

По форме траектории частиц различают линейные ускорители (пучок частиц проходит ускоряющие промежутки один раз) и циклические ускорители (пучок проходит ускоряющие промежутки несколько раз).

По способу создания ускоряющего поля ускорители делятся на:

1. Статические – ускорители, в которых за время ускорения величина поля практически не меняется;

2. Индукционные – ускорители, в которых ускорение осуществляется с помощью вихревого поля, образованное в результате изменения магнитного потока через орбиту частиц;

3. Высокочастотные резонансные – ускорители, в которых используется переменное электрическое поле, которое множество раз меняет направление за время ускорения пучка;

4. Коллективные – ускорители, в которых поля создаются в пучке или плазме.

		Вид траектории	
		Линейный	Циклический
Способ создания электрического поля	Статический	Ускоритель прямого действия	–
	Индукционный	Линейный бетатрон	Бетатрон
	Высокочастотный резонансный	Линак	Высокочастотный резонансный ускоритель
	Коллективный	Коллективный ускоритель	–

Рисунок 6. Классификация ускорителей частиц

Ускорители частиц широко используются в экспериментах двух типов: эксперименты на коллайдерах и эксперимента с фиксированной мишенью (fixed-target experiment).

1.4.1 Эксперименты на коллайдерах

Суть экспериментов на коллайдерах заключается в изучении результатов соударения встречных пучков. В таких установках можно задавать высокую кинетическую энергию частицам и направлять их друг на друга для столкновения.

В экспериментах на коллайдерах кинетическая энергия частиц полностью переходит в энергию вторичных частиц:

$$E = 2\gamma mc^2, \quad (3)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{\varepsilon}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (4)$$

Для регистрации результатов столкновений на коллайдерах необходимы многоуровневые, высокочувствительные комплексы, которые могут одновременно регистрировать сотни и тысячи вторичных частиц, рождающихся в области взаимодействия. Типичные детекторы таких установок включают в себя: трековые системы, позволяющие реконструировать траектории частиц; электромагнитные и адронные калориметры для измерения энергии и идентификации частиц; черенковские и сцинтилляционные детекторы для определения времени пролёта и определения типов частиц.

Преимущество эксперимента на коллайдере заключается в том, что продукты реакций при столкновении встречных пучков разлетаются во все стороны независимо от энергии, что даёт возможность эффективно их детектировать. В то время, как в экспериментах на фиксированной мишени детектируются только вторичные частицы, полетевшие в том же направлении, что и первичные.

1.4.2. Эксперименты с фиксированной мишенью

Эксперименты с фиксированной мишени предназначены для ускорения пучка заряженных частиц до релятивистских скоростей и столкновения его с неподвижной мишенью (твёрдое тело, жидкая или газообразная среда).

Энергия, необходимая в эксперименте с фиксированной мишенью, превышает более чем на три порядка энергию, затрачиваемую в эксперименте на коллайдере. При этом, часть кинетической энергии частиц уходит на создание новых частиц и определяется формулой:

$$E = \sqrt{2(\gamma + 1)}mc^2 \quad (5)$$

А другая часть энергии – на придание скорости вторичным частицам, летящим вдоль траектории движение первичных частиц.

При столкновении пучка частиц с мишенью, вторичные частицы направляются дальше по траектории налетевших частиц в узкий конус (Рис.7).

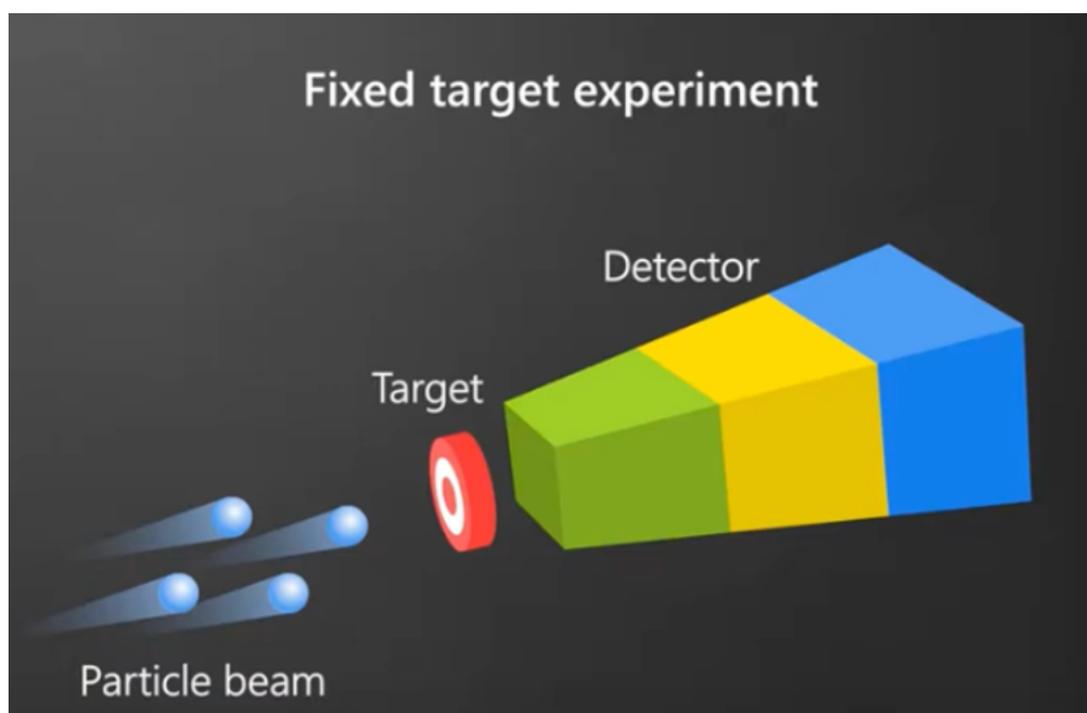


Рисунок 7. Схема эксперимента с фиксированной мишенью

В таких экспериментах используются комбинации трековых детекторов и калориметров, расположенных последовательно друг за другом вдоль оси пучка.

1.5. Ускорительный комплекс NICA: детектор SPD

Одним из современных проектов в области физики высоких энергий является ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) (Рис. 8), создаваемый на базе Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ), в городе Дубна. NICA представляет собой коллайдер, предназначенный для ускорения и столкновений тяжёлых ионов (до ядер золота включительно), а также поляризованных пучков протонов и дейтронов.

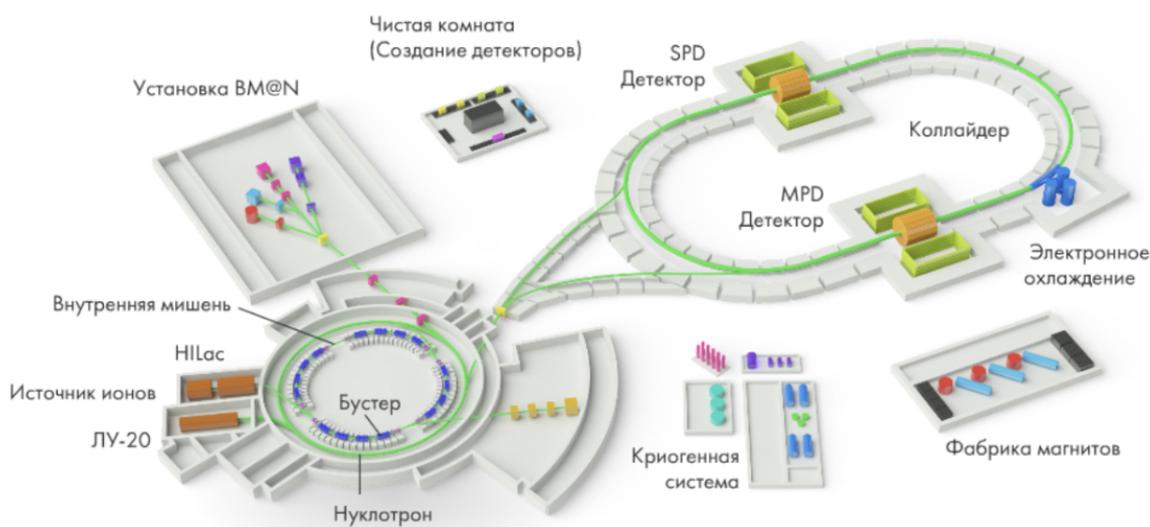


Рисунок 8. Ускорительный комплекс NICA, г. Дубна

В области пересечения ускоренных пучков комплекса NICA запланирована установка двух специализированных детекторов. Для исследований релятивистской ядерной физики при столкновениях тяжёлых ионов предусмотрен установка MPD (Multi-Purpose Detector) – многоцелевой детектор. Для изучения спиновой структуры материи и проведения экспериментов области спиновой физики при средних и высоких энергиях с использованием поляризованных пучков разрабатывается установка SPD (Spin Physics Detector) – детектор спиновой физики. Другими словами, детектор SPD предусмотрен для изучения распределения спина и импульса глюонов, несущих в себе массу всей видимой Вселенной [9].

Конструкция современных детекторных установок напрямую определяется физическими задачами, стоящими перед конкретным экспериментом. Вместе с тем существуют общие конструктивные решения, характерные для универсальных детекторных комплексов на встречных пучках, к которым относится SPD.

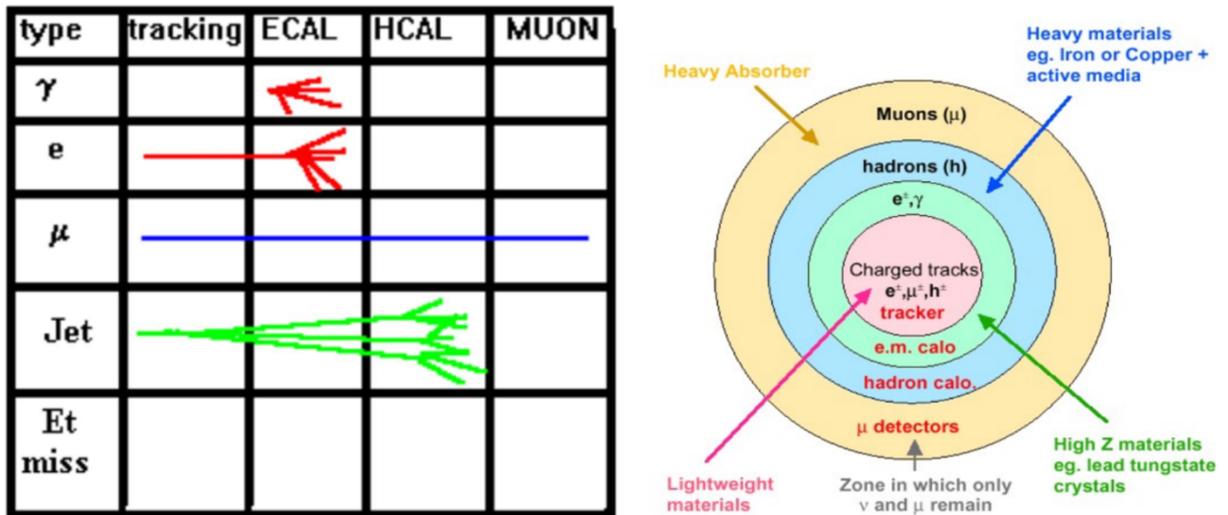


Рисунок 9. Структура универсального детектора

Задачей таких детекторов является наиболее полная регистрация продуктов взаимодействия и максимально точное измерение их параметров. Для эффективного выполнения данной задачи используются установки с 4π-геометрией, обеспечивающей практически полное покрытие телесного угла точки столкновения.

Универсальные детекторы (Рис. 9), чаще всего, обладают осевой симметрией. Центральную часть такого устройства занимает трековая система (трекер), размещённая в области сильного магнитного поля, закручивающее заряженные частицы. По изгибам траекторий заряженных частиц можно определить их импульс.

Вслед за трекерной системой располагаются калориметры, задача, которых заключается в измерении энергии зарегистрированных частиц. Материалы и геометрические параметры калориметров подбираются так, чтобы электроны и γ -кванты полностью отдавали свою энергию внутри

электромагнитного калориметра, в то время как адронные струи (результат лавинообразного распада адронов) теряли энергию в адронном калориметре.

За пределами адронного калориметра располагаются мюонные детекторы, которые регистрируют пролетевшие через калориметры мюоны и дают возможность получать дополнительную информацию о параметрах событий. Нейтрино, являющиеся электрически нейтральными частицами и не взаимодействующие с детектором напрямую, могут быть идентифицированы и измерены косвенно с помощью энергетического баланса событий.

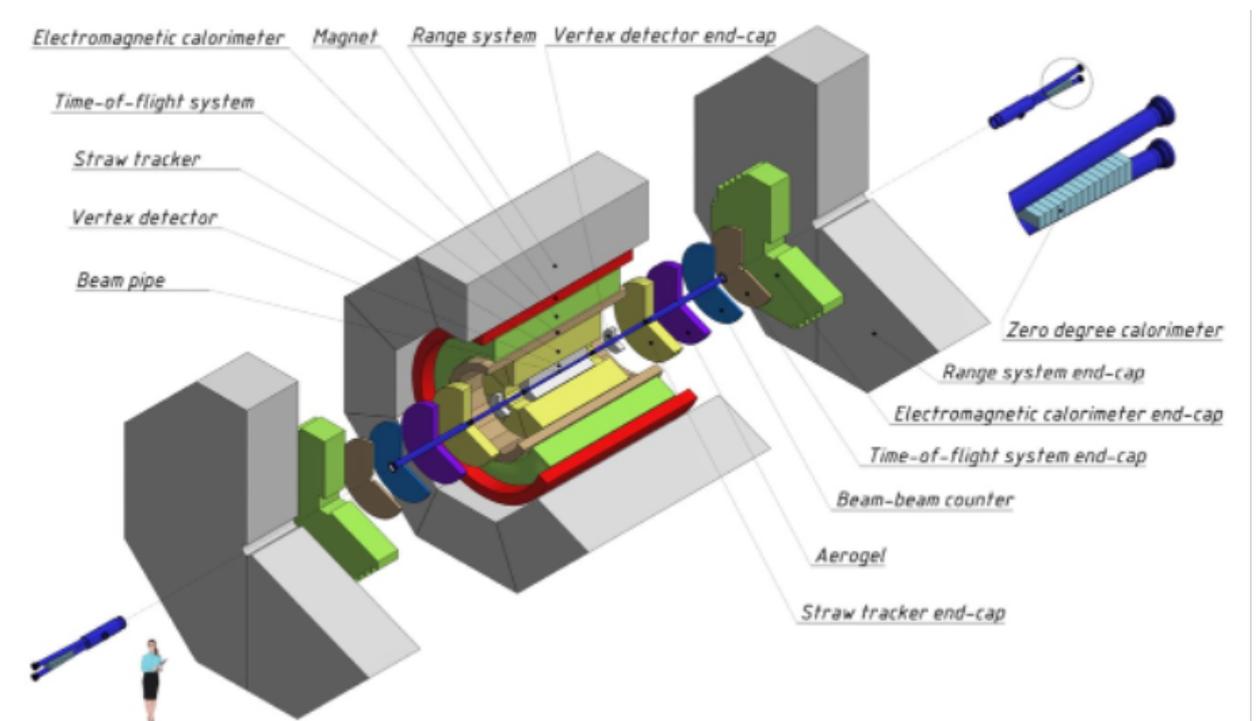


Рисунок 10. Устройство детектора SPD

SPD представляет собой универсальный 4π -детектор с характерной для коллайдерных экспериментов цилиндрической формой (Рис. 10). Его компонентами являются:

- кремниевый вершинный детектор (VD) с разрешением выше 100 мкм для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов;
- трековая система (TS) $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx 2\%$;

- время-пролётная система (TOF) с разрешением порядка 60 пс для разделения π/K и K/p ;
- детектор FАRICH для улучшения разделения π/K и K/p ;
- электромагнитный калориметр (ECal) с энергетическим разрешением $\sim 5\%/\sqrt{E}$ для регистрации фотонов;
- мюонная система (RS);
- пара счётчиков столкновений (BBC) и калориметров нулевых углов (ZDC) для контроля поляризации и светимости.

Особенностью детектора SPD является отсутствие классического триггера ввиду того, что на аппаратном уровне невозможен простой выбор физических событий, поскольку решение о записи того или иного события будет зависеть от измерения импульса и положения вершины. Это значит, что данные с детектора будут считываться непрерывно и, следовательно, возникнет большой объём принимаемой информации. Система является «бестриггерной», то есть глобального аппаратного триггера в ней нет.

В совокупности с высокой частотой столкновений и большим числом каналов детектора это является сложной задачей по разработке эффективной системы сбора и обработки данных.

Каждый элемент детекторной системы состоит из множества отдельных компонент, количество которых может достигать до сотен тысяч. Для эффективного учёта всех этих компонентов установки и их характеристик требуется отдельная система.

Вывод по главе 1

Современные детекторы частиц представляют собой сложные многофункциональные установки, которые необходимы для изучения фундаментальных свойств материи, посредством регистрации частиц и измерения их параметров в разнообразных условиях.

В рамках крупных мегасайенс-проектов применяют различные виды детекторов: сцинтилляционные, черенковские, детекторы ионизирующего типа (полупроводниковые и газонаполненные), калориметры и трековые детекторы. Важными характеристиками любого детектора являются чувствительность, разрешающая способность, эффективность регистрации и время отклика. Эти характеристики определяют способность регистрации и идентификации частиц, а также точность измерения их параметров (энергии).

Одним из ярких примеров объединения новейших технологий детектирования в современных ускорительных комплексах является NICA (ОИЯИ, г. Дубна), где ведутся исследования по столкновению тяжёлых ионов и работа с поляризованными протонами и дейтронами. На NICA предполагается запуск двух основных детекторных установок: MPD, специализирующегося на исследованиях релятивистской ядерной физики, и SPD, где планируется изучать спиновую структуру материи на средних и высоких энергиях. SPD сфокусирован на анализе распределения спина и импульса глюонов, определяющих массу и внутреннюю динамику нуклонов. Многофункциональность этого комплекса достигается за счёт применения ряда общих принципов, характерных для универсальных детекторных систем на встречных пучках.

Таким образом, развитие ускорительных комплексов и детекторных установок, аналогичных NICA, даёт возможность охватить весь спектр взаимодействий частиц в экспериментах различного типа. Такой комплексный подход приближает физиков к пониманию особенностей микромира и закладывает основу для будущих открытий, способных повлиять на многие сферы науки и техники.

Глава 2. Базы данных и информационные системы SPD

Современные информационные системы строятся вокруг хранения и обработки данных, поэтому понимание принципов организации баз данных является ключевым фактором при разработке любого программного обеспечения. Для детектора SPD, требующего сбора и анализа большого объёма технологических параметров, грамотное проектирование и эффективное управление структурой данных обеспечивают надёжную и стабильную работу.

2.1. Общие сведения о базах данных

База данных (БД) – это организованная совокупность структурированных данных, предназначенных для их хранения, управления и дальнейшей обработки. Её главные задачи: обеспечение удобного и надёжного доступа к информации, минимизация дублирования данных и упрощение взаимодействия с ними.

Базы данных имеют ряд преимуществ, благодаря которым они используются повсеместно: от небольших прикладных задач до крупных информационных систем, обрабатывающих миллионы запросов в секунду. Основными преимуществами в использовании баз данных являются:

1. Централизованное хранение информации (т. е. данные собраны в одном хранилище и доступ к ним можно организовать с учётом прав и политик безопасности);
2. Упорядоченная структура (благодаря определённой схеме (структуре) данные не теряются);
3. Надёжность (системы управления базами данных обеспечивают механизмы защиты от сбоев, а также средства для поддержания работы при многопользовательском доступе);
4. Удобство поиска и обработки (система управления базами данных предоставляет список запросов, которые позволяют быстро находить, анализировать и преобразовывать данные);

5. Гибкость (структура БД может развиваться и меняться под новые требования без полной переработки всей системы).

Существует множество критериев, по которым можно классифицировать базы данных. Классификация позволяет определять оптимальную модель хранения данных и архитектуру БД в зависимости от требований данной задачи.

Базы данных разделяют:

1. По модели данных:

- Реляционные. Данные хранятся в виде таблиц, связанных внешними ключами. К таким базам относятся MySQL и др.

- Нереляционные. Данные хранятся в различных форматах: документы (например, MongoDB, CouchDB и др.), ключ-значение (например, Redis, Memcached и др.), графовые структуры (например, Neo4j) или колоночные (например, HBase).

- Объектно-реляционные. Такие базы расширяют реляционную модель, позволяя хранить объекты, коллекции и сложные типы данных. Примером такой базы данных является PostgreSQL.

- Объектно-ориентированные. Для хранения данных используется объектная модель (например, ObjectDB).

2. По способу распределения:

- Централизованные. Все данные хранятся в одном месте на одном сервере.

- Распределённые. Данные физически разделены между несколькими серверами, но логически представляют собой единую базу данных.

- Распараллеленные (или кластерные). Данные хранятся и обрабатываются одновременно в нескольких узлах кластера, что повышает производительность.

3. По степени надёжности и доступности:

- Высокодоступные базы предполагают резервирование данных и механизмов доступа (репликации).
- Менее критичные базы предусмотрены для небольших систем с ограниченным числом пользователей.

2.2. PostgreSQL и его преимущества

PostgreSQL – это объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД) с открытым исходным кодом, известная своей надёжностью и функциональной гибкостью. С момента создания данная СУБД постоянно улучшается и, на сегодняшний день, является одной из наиболее применяемых систем в науке, разработке приложений и др.

Архитектура PostgreSQL основана на реляционной модели данных, дополненной объектно-ориентированными возможностями. Данные в ней хранятся в виде таблиц, которые состоят из строк и столбцов, между которыми могут быть установлены связи с помощью внешних ключей. PostgreSQL полностью поддерживает стандарты языка SQL и отличается развитой поддержкой сложных запросов, транзакцией и процедур обработки данных, обеспечивая соблюдение набора требований ACID (atomicity, consistency, isolation, durability – атомарность, согласованность, изоляция и долговечность). PostgreSQL эффективно работает в условиях высокой нагрузки и многопользовательского доступа, сохраняя при этом целостность данных, благодаря механизму управления параллельным доступом посредством многоверсионности (MVCC).

Важным преимуществом PostgreSQL являются возможности масштабирования и организации высокой доступности. В СУБД предусмотрены механизмы потоковой репликации, резервного копирования и восстановления, которые позволяют создавать отказоустойчивые кластеры.

При использовании дополнительных инструментов PostgreSQL создаёт полноценную инфраструктуру, которая выдерживает высокие нагрузки и

сохраняет доступность даже при сбоях отдельных компонентов. СУБД также поддерживает ролевую модель авторизации, разграничение пользовательских прав, шифрование данных и сетевых соединений с помощью сертификатов SSL/TLS.

Экосистема данной СУБД постоянно развивается:

- Графические интерфейсы (pgAdmin, DBeaver);
- Утилиты командной строки (psql, pg_dump, pg_restore);
- Средства мониторинга и аналитики (Prometheus, Grafana);
- Инструменты для резервного копирования и автоматизации.

Использование PostgreSQL особенно актуально для информационных систем таких установок, как SPD, где требуются высокая стабильность работы и быстрая обработка больших объёмов данных. Помимо этого, данная СУБД легко взаимодействует с современными технологиями фронтенд-разработки, что делает её удобной для создания визуального интерфейса, который обеспечивает быстрый и интуитивно понятный доступ к данным аппаратного обеспечения детектора SPD. Исходя из этого, PostgreSQL была выбрана для разработки системы Hardware Database.

2.3. Основные информационные системы для установки SPD

В рамках эксперимента SPD на ускорительном комплексе NICA разрабатываются различные информационные системы, которые обеспечивают полный цикл обработки данных (от получения с детектора до их анализа и визуализации).

Одной из таких систем является Data Acquisition System (DAQ), которая отвечает за сбор цифровых сигналов с детекторов и их первичную фильтрацию. Из-за большого потока данных (около 20 Гб/с) в SPD планируется использование бестриггерной системы DAQ (Рис. 11), события в которой отбираются с помощью сложных алгоритмов (а не на основе сигналов с триггерных детекторов, критерии для которых определяются заранее) для снижения систематических погрешностей.

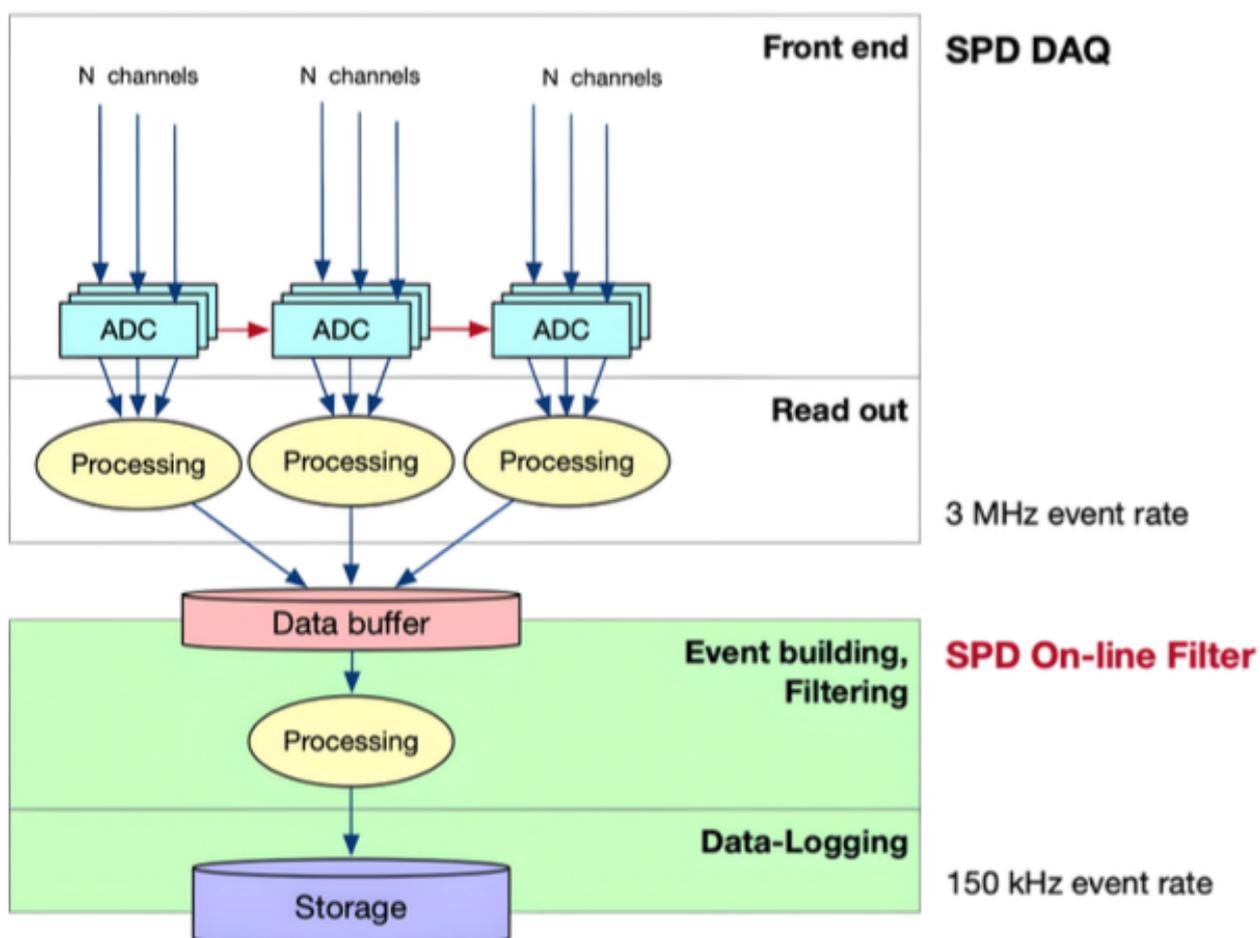


Рисунок 11. Архитектура бестриггерной системы DAQ

Для решения задач фильтрации и отбора событий разрабатывается система SPD On-line Filter (Рис. 12), которая отвечает за реконструкцию и отбор «полезных» событий в реальном времени [10]. Система использует машинное обучение, что обеспечивает высокую производительность для реконструкции событий и точный отбор в условиях потоковой обработки. После этой системы на выходе ожидается около 20-23 тысяч событий в секунду.

Все эти события передаются в систему Event Index (Рис. 13), разрабатываемую для индексации, хранения и поиска событий по определённым параметрам.

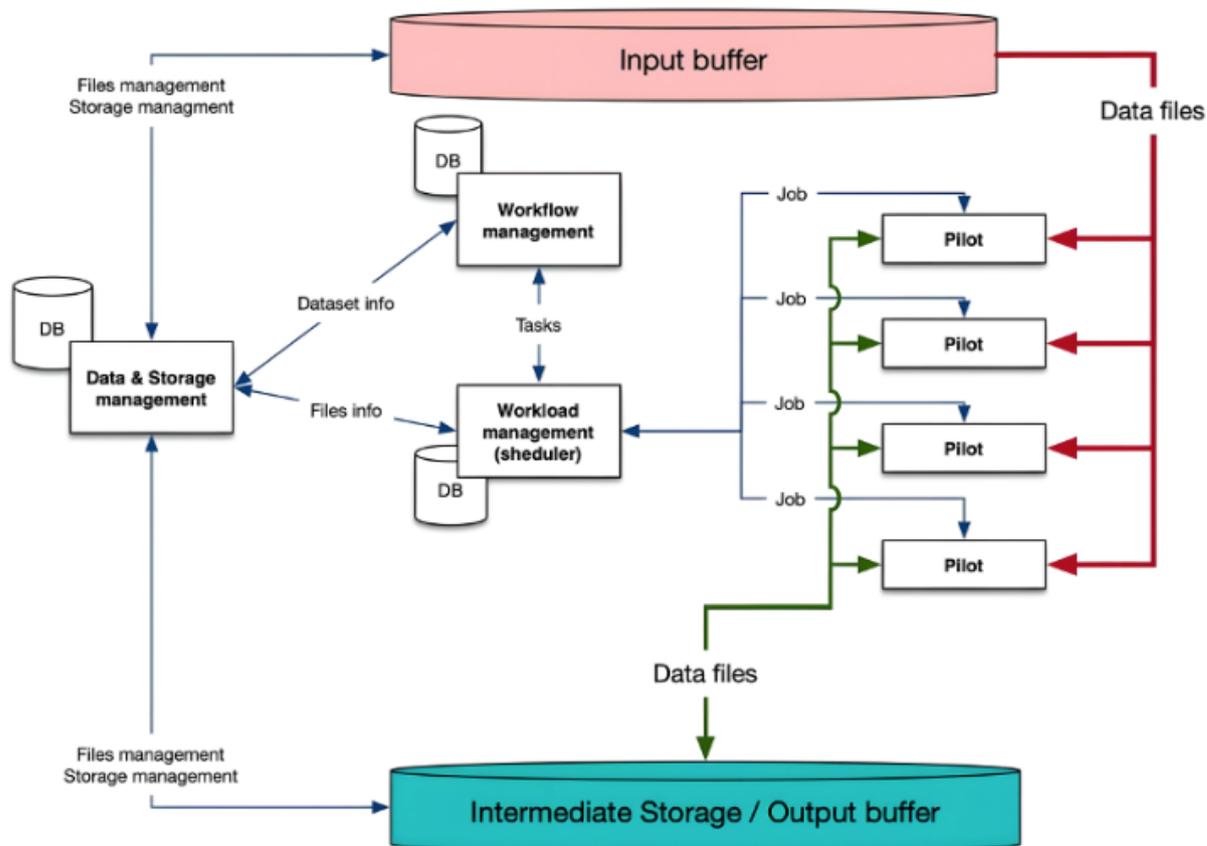


Рисунок 12. Архитектура системы SPD On-line Filter

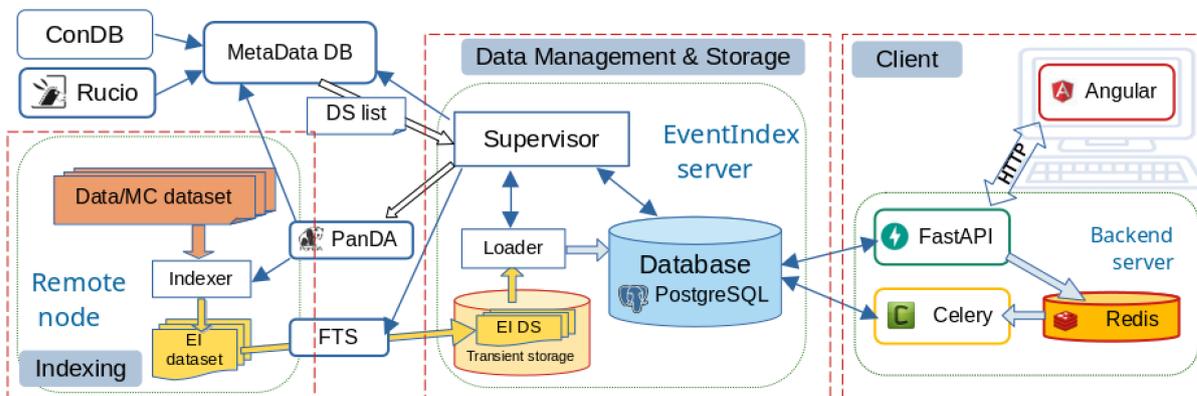


Рисунок 13. Архитектура системы Event Index

В дополнение к этим системам разрабатывается SPD Metadata (Рис. 14) – система для управления метаданными (т. е. «данными о данных») [11]. Она отвечает за хранение и доступ к информации о наборах данных, описание параметров и истории их обработки, конфигураций программного обеспечения и др.

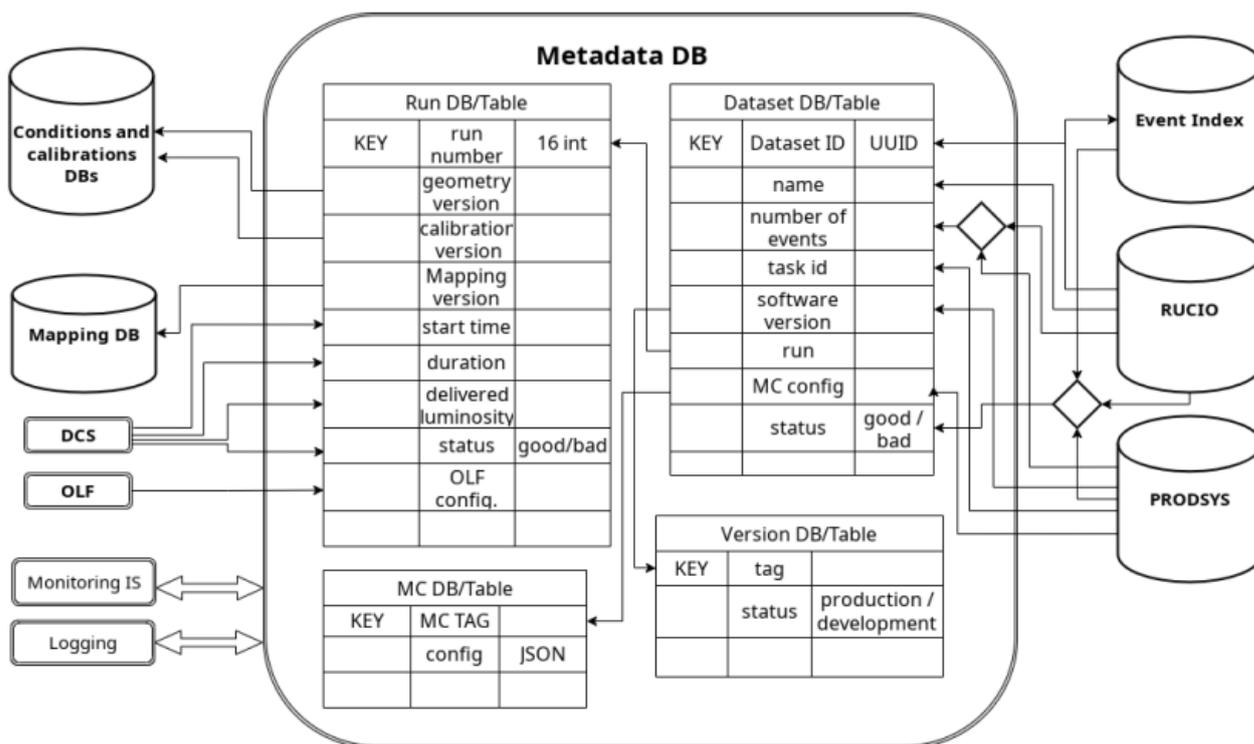


Рисунок 14. Архитектура системы SPD Metadata

Эти системы образуют информационную структуру для эксперимента SPD, которая ориентирована на работу с огромными объёмами данных для физики высоких энергий. Однако, основное внимание в этих системах сосредоточено на данных физического эксперимента, в то время как для аппаратного обеспечения установки SPD также необходима собственная информационная система. Назначение и архитектура данной системы подробнее рассмотрены в следующей главе.

Вывод к главе 2

Базы данных необходимы для организации хранения, обработки и анализа данных, особенно в проектах, требующих обработки больших объёмов информации. Современные СУБД дают возможность структурировать данные, обеспечивать их целостность и быстрый доступ. Они являются важной частью любой информационной системы.

Одна из наиболее эффективных и гибких СУБД – PostgreSQL – имеет ряд преимуществ: богатый функционал, расширяемость, способность обрабатывать большие потоки данных при многопользовательской нагрузке. Она является хорошим выбором для создания информационных систем и удобных интерфейсов взаимодействия с пользователем.

Информационная структура установка SPD включает в себя различные системы для сбора, фильтрации и индексации данных о событиях. Они обеспечивают полноценную обработку информации с эксперимента, но не охватывают задачи, связанные с мониторингом и управлением техническим состоянием установки. Для этой задачи необходима отдельная информационная система для аппаратного обеспечения, которая позволит мониторить компоненты оборудования и их параметры.

Использование современных СУБД в системах различного назначения создаёт технологическую основу для построения надёжной информационной среды, обеспечивает поддержку работы установки SPD.

Глава 3. Информационная система аппаратного обеспечения детектора SPD

3.1. Hardware Database: назначение и архитектура

Для обеспечения надёжной эксплуатации и обслуживания детектора SPD, а также для эффективного управления данными об аппаратных компонентах, разрабатывается система Hardware Database (HWDB). Её главной задачей является централизованное хранение информации о конфигурациях и характеристиках всех элементов установки, включая сенсоры, электронные модули и другие устройства.

Система HWDB даёт возможность:

1. Хранить информацию о типах и экземплярах аппаратных компонентов;
2. Отслеживать физическое расположение и историю перемещения устройств;
3. Фиксировать параметры оборудования, включая производственные характеристики и диапазоны допустимых значений;
4. Облегчить техническое обслуживание и передачу информации между специалистами;
5. Автоматически строить схему подключения системы сборки данных (DAQ Mapping).

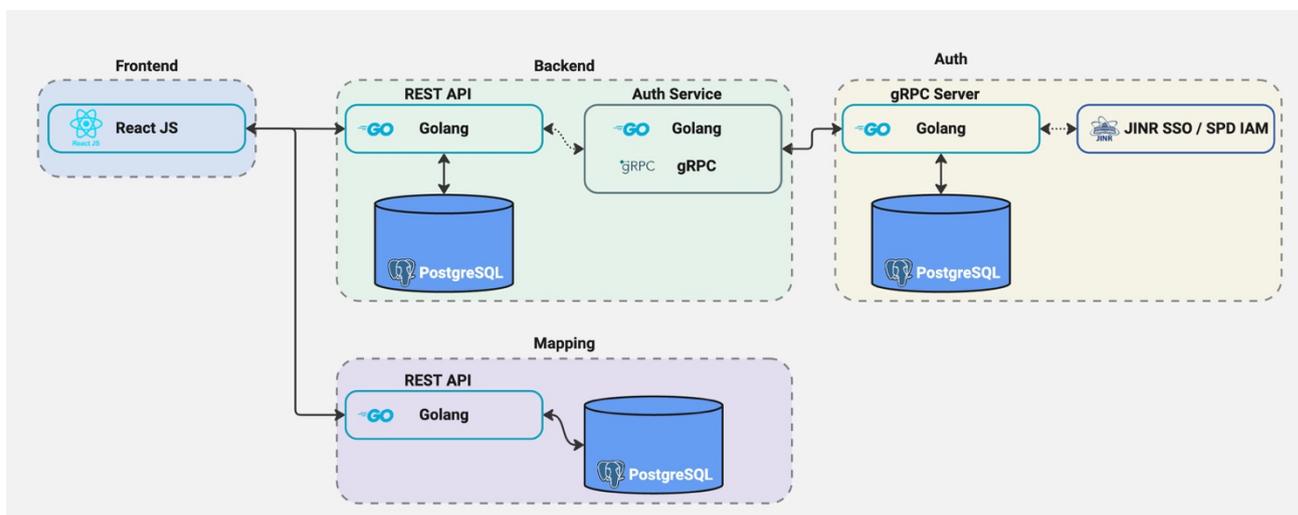


Рисунок 15. Архитектура системы SPD Metadata

HWDB разрабатывается в виде многокомпонентной системы (Рис. 15), которая включает в себя frontend-часть, backend-часть и систему аутентификации JINR SSO. Взаимодействие компонентов реализовано через REST и gRPC API.

Каждое устройство в системе имеет уникальный идентификатор (hardware ID) и относится к определённому типу. Сам тип устройства задаёт набор параметров и их допустимых значений, и может иметь иерархические связи с другими типами устройств. Это помогает формализовать конфигурации оборудования и применять общие правила валидации.

Так как SPD имеет сотни тысяч каналов передачи данных, ручное построение карты подключения невозможно. Поэтому необходима система сопоставления сигналов с аппаратными компонентами (DAQ Mapping), в которой предусмотрено автоматическое построение схемы на основе иерархии устройств и уникальных идентификаторов, передаваемых по каналу связи.

Такая архитектура ориентирована на масштабируемость, надёжность и автоматизацию процессов сопровождения сложной аппаратной инфраструктуры большого физического эксперимента.

3.2. Проектирование базы данных и реализация backend-части

Серверная часть разрабатываемой информационной системы имеет модульную архитектуру (Рис. 16), состоящую из трёх основных уровней [12]:

1. Уровень API Gateway служит единой точкой входа для всех внешних запросов и обеспечивает их маршрутизацию к соответствующим сервисам.

2. Уровень Business Logic реализует основную предметно-ориентированную логику, включая преобразования данных, выполнение сложных операций и оркестрацию процессов. Этот уровень организован в виде набора независимых модулей, что обеспечивает гибкость и адаптивность системы.

3. Уровень Database Requests абстрагирует работу с хранилищами данных, используя библиотеку pgx для эффективного взаимодействия с PostgreSQL.

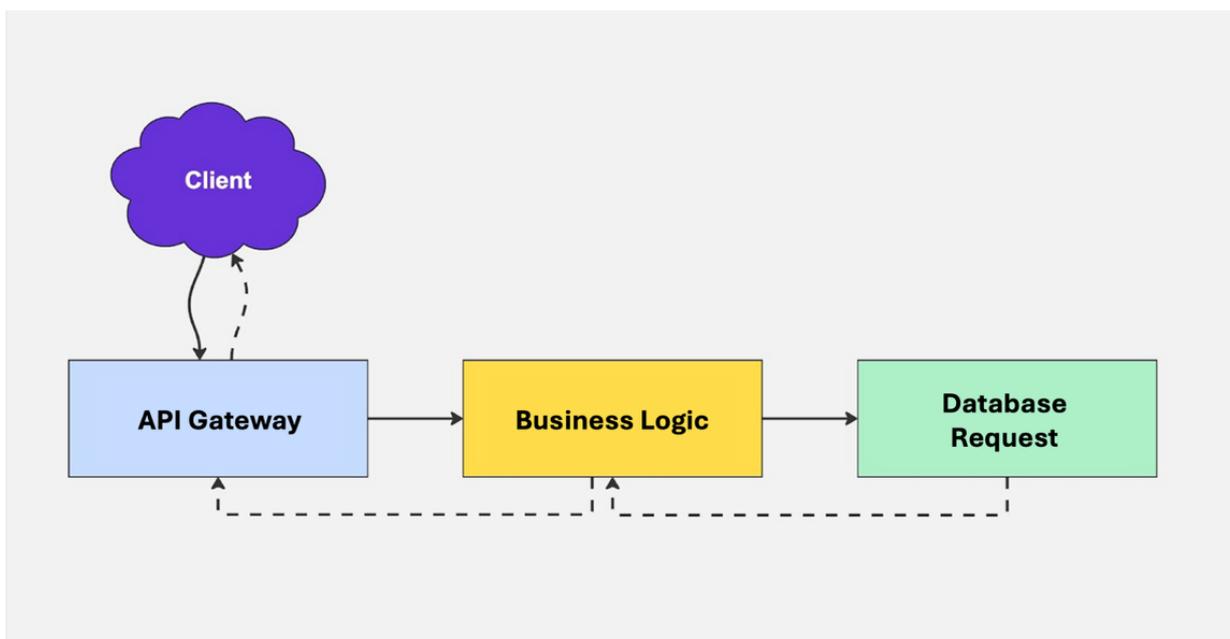


Рисунок 16. Схема уровней сервиса

Для обеспечения надёжности и согласованности данных применяется транзакционная модель, где каждая операция выполняется в рамках атомарной транзакции, что гарантирует целостность данных даже в случае ошибок. Архитектура системы построена с использованием паттернов проектирования (Абстракция и Фасад), что позволяет легко заменять компоненты и масштабировать систему. В качестве языка программирования выбран Golang, который обеспечивает высокую производительность и простоту синтаксиса, что идеально подходит для распределённых систем.

Система также включает в себя микросервис авторизации и аутентификации, который обеспечивает безопасность и контроль доступа. Аутентификация осуществляется через интеграцию сервиса JINR SSO и протоколы OpenID, что позволяет пользователям использовать единую учётную запись для доступа к различным приложениям. Процесс аутентификации включает в себя генерацию одноразовых кодов и JWT-токенов, которые обеспечивают безопасную передачу данных и управление сессиями без необходимости хранения состояния на сервере.

Авторизация реализована на основе ролевых моделей, где права пользователей определяются в зависимости от их роли и групповой принадлежности. Это позволяет гибко управлять доступом и минимизировать риски несанкционированного доступа. Микросервис также поддерживает механизм запроса и модерации прав, что обеспечивает дополнительный уровень контроля.

Технологии gRPC и Protocol Buffers используются для обеспечения эффективного межсервисного взаимодействия, обеспечивая высокую производительность и строгую типизацию контрактов. Это позволяет создавать надёжные и масштабируемые распределённые системы, способные адаптироваться к изменяющимся требованиям.

3.3. Hardware Mapping

Mapping-сервис информационной системы Hardware Database (HWDB) отвечает за координацию связей между компонентами детектора SPD, а также за обработку и хранение информации о портах данных компонентов [13]. К главным задачам этого сервиса относятся создание, хранение, редактирование, а также удаление записей о взаимосвязях и портах компонентов. Это обеспечивает точное отображение архитектуры системы.

Архитектура Hardware Mapping строится также, как и рассмотренная ранее серверная часть HWDB, на модульном подходе и состоит из трёх уровней: API Gateway, Business Logic и Database Requests (Пункт 3.2).

Сервис Hardware Mapping является важной частью инфраструктуры HWDB. Он обеспечивает структурированное хранение данных о компонентах установки SPD и предоставляет инструменты для управления их взаимосвязями и портами, что важно для мониторинга и анализа модулей системы.

3.4. Разработка визуального интерфейса информационной системы Hardware Database

3.4.1. Выбор инструментов для реализации сервиса

Разработка визуального интерфейса информационной системы Hardware Database является важным этапом проекта, так как от удобства и интуитивности в его использовании напрямую зависит эффективность работы конечного пользователя.

В процессе работы над визуальной составляющей данного сервиса были использованы современные подходы и инструменты разработки, целью которых стало обеспечение удобства поддержки созданного веб-приложения и высокой производительности системы.

На первых этапах работа началась с использованием фреймворка Angular [14]. Этот выбор был обусловлен его структурированностью и наличием богатого выбора встроенных инструментов для создания масштабируемых приложений. Однако в ходе разработки интерфейса были выявлены ограничения фреймворка, связанные его производительностью, а также со скоростью обработки большого набора данных. Одним из основных несоответствий с требованиями проекта стала сложность поддержки приложения в долгосрочной перспективе, так как Angular не используется повсеместно, а порог входа для работы с ним достаточно велик. Также были выявлены некоторые трудности при интеграции приложения на базе данного фреймворка в общую систему сервиса. Angular, обладая строгой архитектурой, требовал значительных временных затрат на реализацию новых методов, функций и модификацию уже существующих. В связи с данными ограничениями было принято решение о переходе и полном дублировании интерфейса на библиотеку React [15].

React представляет собой декларированную компонентную JavaScript-библиотеку для построения пользовательских интерфейсов, обеспечивающую более высокую гибкость и удобство разработки. Одним из основополагающих преимуществ является виртуальный DOM, который позволяет существенно

повысить производительность за счёт минимизации операций с реальным DOM-деревом.

Компонентная архитектура, а также подгрузка только необходимых надстроек и зависимостей значительно упростили процесс разработки, поддержки и последующей интеграции с основным сервисом. Благодаря чёткому разделению на небольшие компоненты, стало проще управлять состоянием приложения, фиксировать ошибки и вносить изменения (доработки) без необходимости глубокого вмешательства в основной код приложения. Кроме того, React предоставляет большую свободу при выборе определённых инструментов и библиотек, как упоминалось ранее. Некоторые из основных надстроек, используемых на данный момент:

1. Redux для управления состояниями данных и определёнными функциями в приложении React;
2. Router для маршрутизации, что значительно облегчает создание и поддержку многофункциональных интерфейсов.

Как и в Angular, в React можно использовать TypeScript, что повышает надёжность и точность при обработке большого объёма поступающих данных. Одним из многочисленных плюсов языка является его строгая типизация, помогающая избегать незначительных ошибок, которые могут повлиять на дальнейшую работоспособность. Благодаря этому удалось сохранить строгость Angular, которая необходима в сервисах при работе с комплексными структурами данных, что особенно важно в контексте обширной базы аппаратного обеспечения.

Для оценки эффективности и производительности интерфейса были проведены тесты, направленные на измерение скорости обработки и выполнения запросов к серверу, а также времени преобразования и реструктуризации данных на стороне клиента. Основным тестом было нагрузочное испытание при одновременном выполнении запросов с большим объёмом данных.

Среднее время обработки запросов и обновления данных на стороне клиента сократилось на 25% по сравнению с предыдущей реализацией на Angular.

Таким образом, переход на React стал ключевым решением, существенно повлиявшим на качество и простоту поддержки информационной системы Hardware Database.

3.4.2. Авторизация и верификация на сервисе

Каждый работник ОИЯИ имеет учётную запись, зарегистрированную в общей системе института – JINR SSO, которая является первым этапом авторизация на сервисе Hardware Database. На этом этапе идёт проверка, является ли пользователь работником ОИЯИ или зарегистрированным в данной организации человеком.

При успешной авторизации наступает этап верификации. Система проверяет в отдельной таблице в базе данных сервиса его «permission» (разрешение), который соответствует правам доступа на сервисе. После этого человек, попадая на сервис, видит информацию, разрешённую ему в соответствии с ролью (уровнем доступа) в базе данных.

3.4.3. Уровни доступа на сервисе

На данный момент реализованы четыре основных уровня доступа к сервису:

1. Guest (гость) – человек, который только что зашёл на сервис и не может видеть информацию предоставляемую на нём, так как не обладает никакими правами. На данном уровне пользователю предлагается сформировать запрос на повышение роли на сервисе администратору, который рассматривает его, и может ответить на него как положительно, так и отрицательно.

2. Restricted Access (ограниченный доступ) – уровень, на котором пользователь может только просматривать информацию о группах и об

оборудовании, относящемуся к определённой группе. С данной ролью работник не может изменить данные, во избежание ошибок и несоответствия исходным параметрам.

3. Full Access (полный доступ) – уровень, пользователь которого может редактировать, создавать, удалять и дублировать как группы, так и информацию о оборудовании на сервисе. В данном случае у человека есть доступ к определённым диалоговым окнам.

4. Administrator (администратор) – уровень, на котором пользователь имеет те же права, что и пользователь с ролью Full Access, а также может регулировать работоспособность и безопасность сервиса (как было описано выше). Также у администраторы есть информация о всех пользователях, которые когда-либо заходили на сервис.

3.4.4. Веб-интерфейс

На данный момент разработан веб-интерфейс, который включает в себя несколько основных страниц:

1. На станицы «Groups» представлена информация о созданных группах устройств детектора (Рис. 17). Пользователь может конфигурировать таблицу с учётом нужной информации о группе при нажатии на кнопку «Columns», при котором будет показываться выпадающее меню для выбора отображаемых колонок в таблице. Также предоставляется возможность экспорта (сохранения) как всех, так и отдельных записей из этой таблицы. Дополнительно пользователю даётся возможность создания новой группы устройств, а также редактирование или удаление выбранной группы.

2. На странице «Groups-properties» указана информация л группе устройств (например, HDD Seagate Barracuda 7200.12ST31000528AS), где также, как и в основной таблице групп, можно конфигурировать и управлять данными, находящимися в ней (Рис. 18).

3. На странице «Devices» пользователь может увидеть добавленные устройства, относящиеся к заранее созданным группам (Рис. 19).

4. На странице «Devices-properties» указана информация о характеристиках взятого за пример устройства (HDD ST31000528AS 79BSL), записанных с учётом доступных характеристик вышеуказанной группы HDD Seagate Barracuda 7200.12ST31000528AS (Рис. 20).

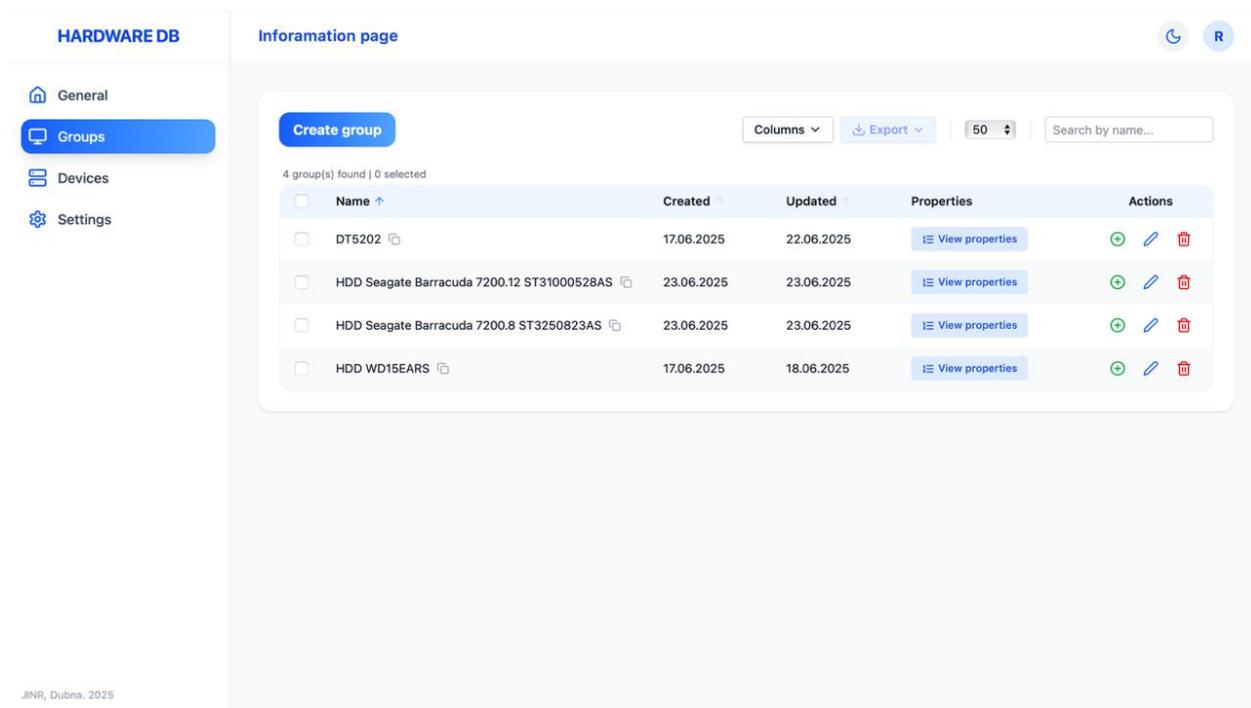


Рисунок 17. Страница Groups

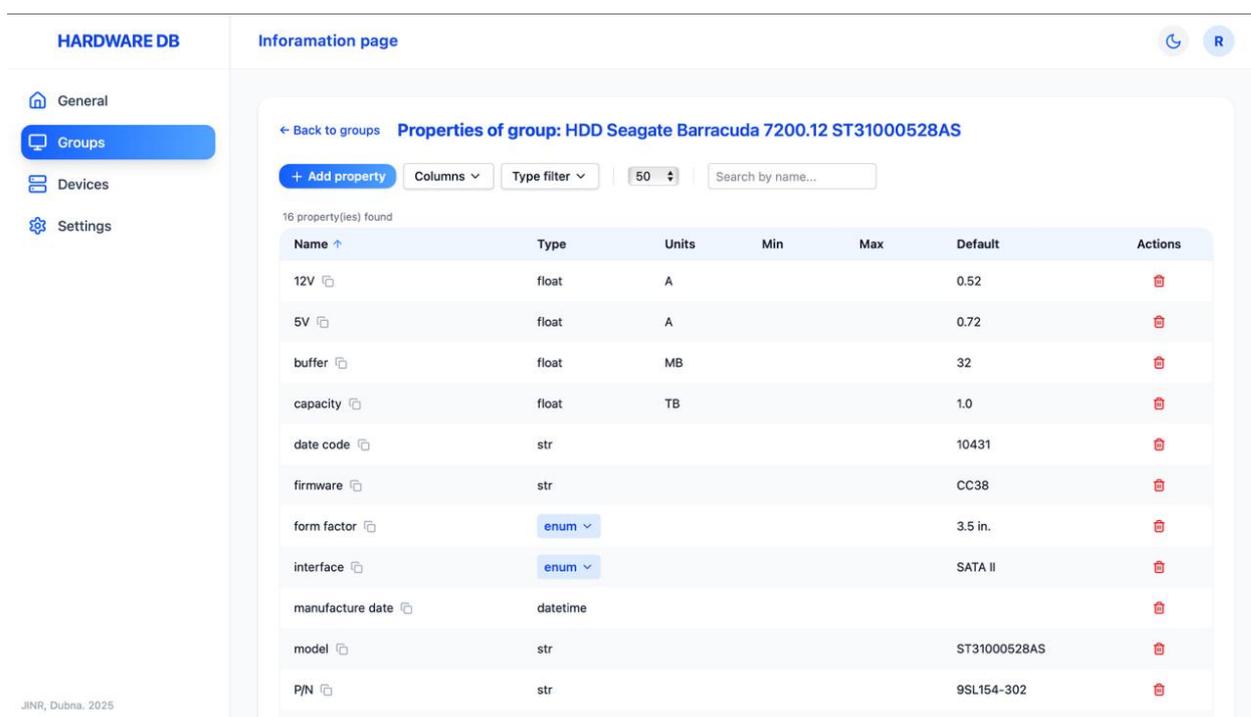


Рисунок 18. Страница Groups-properties

HARDWARE DB Information page 🔄 R

General
Groups
 Devices
 Settings

← Back to groups **Properties of group: HDD Seagate Barracuda 7200.12 ST31000528AS**

+ Add property Columns ▾ Type filter ▾ 50 ▾ Search by name...

16 property(ies) found

Name ↑	Type	Units	Min	Max	Default	Actions
12V	float	A			0.52	🗑️
5V	float	A			0.72	🗑️
buffer	float	MB			32	🗑️
capacity	float	TB			1.0	🗑️
date code	str				10431	🗑️
firmware	str				CC38	🗑️
form factor	enum ▾				3.5 in.	🗑️
interface	enum ▾				SATA II	🗑️
manufacture date	datetime					🗑️
model	str				ST31000528AS	🗑️
P/N	str				9SL154-302	🗑️

JINR, Dubna. 2025

Рисунок 19. Страница Devices

HARDWARE DB Information page 🔄 R

General
 Groups
Devices
 Settings

← Back to devices **Properties of device: HDD ST31000528AS 79BSL**

Columns ▾ 50 ▾ Search by name...

16 property(ies) found

Name ↑	Units	Value	Edit
12V	A	0.52	✎
5V	A	0.72	✎
buffer	MB	32	✎
capacity	TB	1	✎
date code		10431	✎
firmware		CC38	✎
form factor		3.5 in.	✎
interface		SATA II	✎
manufacture date		2010-04-22	✎
model		ST31000528AS	✎
P/N		9SL154-302	✎

JINR, Dubna. 2025

Рисунок 20. Страница Devices-properties

В дальнейшем планируется доработать функционал, связанный с ролью администратора и выводить полную информацию об изменениях в данных, предоставленных на сервисе Hardware Database.

Вывод к главе 3

Разработка информационной системы аппаратного обеспечения детектора SPD представляет собой комплексный процесс, направленный на создание централизованного инструмента для управления данными об оборудовании, обеспечивающего надёжность, масштабируемость и автоматизацию ключевых процессов эксперимента. Архитектура системы Hardware Database (HWDB) включает в себя frontend, backend, mapping-сервис и механизмы аутентификации, объединённые через REST и gRPC API. Использование JINR SSO для авторизации гарантирует безопасность доступа, а гибкая система уровней привилегий обеспечивает дифференцированное управление правами пользователей, минимизируя риски несанкционированного вмешательства в данные. Это особенно важно в условиях работы с сотнями тысяч каналов передачи данных, где человеческий фактор может стать источником критических ошибок.

Центральным элементом системы является структура базы данных, построенная вокруг уникальных идентификаторов (hardware ID) и иерархии типов устройств. Такой подход позволяет формализовать конфигурации оборудования, автоматизировать валидацию параметров и отслеживать историю изменений, что существенно упрощает техническое обслуживание. Например, предлагаемое автоматическое построение Hardware Mapping исключает необходимость ручного сопоставления сигналов, что в условиях масштаба эксперимента SPD становится незаменимым, так как это сокращает временные затраты и повышает точность конфигураций.

Реализация backend-части системы ориентирована на обеспечение стабильности и производительности при работе с большими объёмами данных. Использование модульной архитектуры позволяет масштабировать функционал без нарушения работы существующих компонентов. Это важно для экспериментов, где требования к инфраструктуре могут динамически изменяться в зависимости от этапов исследований.

Особое внимание уделено разработке визуального интерфейса, который играет ключевую роль во взаимодействии пользователей с системой. Первоначально для реализации был выбран Angular, однако обнаружились ограничения в производительности и сложность долгосрочной поддержки. Переход на React позволил существенно улучшить скорость обработки данных (сокращение времени запросов на 25%) и упростить разработку за счёт изоляции компонентов и гибкости в выборе инструментов. Интеграция TypeScript обеспечила строгую типизацию, повысив надёжность кода при работе с комплексными структурами данных, такими как параметры оборудования или карты подключений.

Система авторизации и верификации, интегрированная с JINR SSO, не только обеспечивает безопасность, но и упрощает управление доступом для сотрудников ОИЯИ. Четыре уровня безопасности позволяют гибко распределять права, ограничивая возможность случайных изменений данных.

Важным результатом стало успешное проведение нагрузочных тестов, подтвердивших способность системы обрабатывать значительные объёмы данных в реальном времени. Это особенно актуально для экспериментов, где задержки в обработке информации могут привести к потере данных или к их некорректной интерпретации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные физические эксперименты такие, как проводимые на комплексе NICA в ОИЯИ, требуют не только применение передовых детекторных установок, но и сложных информационных систем, способных обеспечить мониторинг и управление аппаратного обеспечения, обработку данных и поддержку принятия решений в режиме реального времени. Детектор SPD ориентирован на изучение спиновой структуры материи и является примером установки, где объединение инженерных решений и цифровых инструментов становится ключевым фактором успеха. Его работа связана с обработкой огромных массивов данных, генерируемых сотнями тысяч каналов передачи сигналов, что приводит к необходимости использования автоматизированных информационных системы для эффективного управления оборудованием.

Разработанная в рамках дипломного проекта информационная система аппаратного обеспечения SPD (Hardware Database, HWDB) решает критически важные задачи централизации данных об оборудовании, минимизации человеческого фактора и обеспечения масштабируемости инфраструктуры. Интеграция современных технологий, таких как PostgreSQL, React и протоколы REST/gRPC, позволила создать гибкую платформу, сочетающую в себе надёжность хранения данных, высокую производительность обработки запросов и интуитивность пользовательского интерфейса. Архитектура системы, построенная вокруг уникальных идентификаторов и иерархии типов устройств, обеспечивает автоматизацию валидации параметров, отслеживание истории изменений и генерацию карт подключения, что необходимо для экспериментов с динамически меняющейся конфигурацией.

Успешное проведение нагрузочных тестов подтвердило способность HWDB работать в условиях, приближённых к эксплуатационным, обрабатывая потоки данных без существенных задержек.

Разработка HWDB вносит вклад не только в решение текущих задач эксперимента, но и формирует основу для будущих модернизаций. Уже сейчас

HWDB демонстрирует потенциал для адаптации к новым типам детекторов и интеграции с другими сервисами NICA.

В более широком смысле создание HWDB подчёркивает роль цифровизации в современных мегасайенс-проектах. Автоматизация управления оборудованием и минимизация рутинных операций позволяет учёным сосредоточиться на анализе результатов, а не на технической поддержке инфраструктуры. Для SPD, где изучение спиновой структуры нуклонов требует исключительной точности измерений, такие преимущества становятся определяющими.

Таким образом, дипломная работа демонстрирует, что эффективное управление аппаратным обеспечением современных физических установок невозможно без специализированных информационных систем, сочетающих передовые IT-решения с глубоким пониманием инженерных и научных задач. Реализация HWDB для детектора SPD подтвердила, что даже в условиях высоких требований к надёжности и производительности возможно создание гибких, масштабируемых инструментов, которые не только решают текущие проблемы, но и формируют основу для инноваций. Этот опыт может быть применен в других экспериментах класса мегасайенс, способствуя прогрессу в изучении фундаментальных свойств материи и укрепляя позиции отечественной науки на мировой арене.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Весенняя школа по информационным технологиям ОИЯИ 2024. – Режим доступа: <https://indico.jinr.ru/event/4432/contributions/>
2. Детекторы частиц. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/sem2/ad05.htm>
3. Сцинтилляционные детекторы. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/scint.htm>
4. . – Режим доступа: [Черенковские детекторы - http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/cherenk.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/cherenk.htm)
5. . – Режим доступа: [Детекторы ионизационного типа - http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/itype.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/itype.htm)
6. . – Режим доступа: [Калориметры - http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/calorim/index.html](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/calorim/index.html)
7. . – Режим доступа: [Трековые детекторы - http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/track_coord.htm](http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/track_coord.htm)
8. Курс лекций «Metascience project NICA: collider». – Режим доступа: <https://edu.jinr.ru/courses/course/view.php?id=44>
9. NICA Spin Physics Detector (SPD). – Режим доступа: <https://nica.jinr.ru/projects/spd.php>
10. Олейник Д.А. / SPD Online Filter. Первичная обработка экспериментальных данных эксперимента SPD. – Режим доступа: https://indico-hlit.jinr.ru/event/394/contributions/2339/attachments/681/1147/19-10_05_JINR_IT_school_SPD_Online_Filter_2023_.pdf
11. Прокошин Ф.В., SPD EventIndex / Ф.В. Прокошин, И.В. Тваури, З.А. Будтуева, Р.З. Гурциев, А.В. Газзаев // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2024 – Т. 55, № 3 – С. 717-721
12. Двизов Б.П. / Back-End информационной системы оборудования установки SPD. – Режим доступа: <https://indico.jinr.ru/event/4432/contributions/25918/>

13. Гуссалов С.В. / Back-End информационной системы маппинга устройств DAQ SPD. – Режим доступа:

<https://indico.jinr.ru/event/4432/contributions/25920/>

14. Angular. – Режим доступа: <https://angular-doc.ru/docs>

15. React. – Режим доступа: <https://react.dev/learn>