

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ» (НИЯУ  
МИФИ)  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОБРАБОТКИ ДЛЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА  
SPD ONLINE FILTER**

Студент \_\_\_\_\_ А. В. Плотников

Научный консультант \_\_\_\_\_ Д. А. Олейник

Москва 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Цель и задачи работы.....	4
1. Изучение спиновой структуры нуклонов .....	5
2. Детекторы, используемые в физике высоких энергий.....	5
3. Spin Physics Detector (SPD).....	8
3.1 Основная цель эксперимента.....	8
3.2 Экспериментальная установка SPD .....	9
3.3 Объём данных эксперимента.....	10
3.4 Особенности сбора данных.....	11
4. SPD Online Filter .....	13
4.1 Принцип работы SPD Online Filter .....	13
4.2 Входные данные .....	15
5. Система управления процессами обработки (WfMS) .....	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	21

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время практически любой физический эксперимент предполагает проведения большого количества измерений, порождающего, в результате, гигантский объём данных. При этом данные нужно принимать, систематизировать, обрабатывать и сохранять.

Остро данный аспект ощущается в том числе и в сфере физики высоких энергий. При экспериментах на коллайдере во время столкновения пучков частиц могут происходить сотни тысяч событий в секунду. И хоть на данный момент детекторные системы позволяют регистрировать подобные события с достаточно высокой точностью, всё также остаётся необходимость эффективно управлять большим потоком данных с детекторов.

Учитывая, что системы хранения имеют ограниченный размер, существует необходимость отсеивать ненужные, в том числе и фоновые, события. Чаще всего в таких случаях применяют аппаратные триггерные системы, но в некоторых ситуациях подобные конструкции невозможны из-за особенностей эксперимента. В частности, необходимой может оказаться частичная реконструкция событий, для которой предполагается создание фильтров, обрабатывающих данные в режиме реального времени.

В данной работе будет рассмотрена подобная система для разрабатываемого эксперимента SPD на коллайдере NICA (Дубна, Россия) [1]. А также будет спроектирована одна из подсистем – система управления процессами обработки.

## Цель и задачи работы

Цель работы: разработка системы (Workflow management system), позволяющей параллельно и наиболее результативно управлять большим количеством процессов обработки данных и контролировать статусы выполнения цепочек обработки для физического эксперимента SPD.

Задачи:

1. изучить общее устройство современной экспериментальной установки ФВЭ;
2. ознакомиться с экспериментом SPD и особенностями его экспериментальной установки;
3. изучить основные принципы работы SPD Online Filter;
4. ознакомиться с прототипом системы Workflow management system (WfMS): определить основные сервисы WfMS, изучить их основной функционал и принцип взаимодействия с другими системами SPD Online Filter;
5. изучить выбранное программное обеспечение, по необходимости дополнить/переработать стек;

## **1. Изучение спиновой структуры нуклонов**

Несмотря на значительные достижения квантовой хромодинамики при описании взаимодействия кварков и глюонов, остаётся неразрешённым вопрос о том, почему нуклоны такие, какими мы их наблюдаем. Понимание структуры и фундаментальных свойств нуклона на основе динамики его составляющих - кварков и глюонов, остаётся одной из основных нерешенных проблем квантовой хромодинамики.

Модель кварков успешно предсказывает большинство основных характеристик адронов, таких как заряд, чётность, изоспин и свойства симметрии, а также взаимосвязи между ними. Некоторая динамика взаимодействий частиц также может быть качественно понята в рамках этой модели. Однако она не даёт объяснения спиновым свойствам адронов с точки зрения их составляющих. Со времен «спинового кризиса», обозначенного в 1987 году, проблема спиновой структуры нуклонов остается загадкой современной физики высоких энергий. Одной из главных задач, привлекающих огромные теоретические и экспериментальные усилия, является вопрос о том, как спин нуклона формируется из спинов и орбитальных моментов его составных частей - валентных кварков, "морских" кварков и глюонов. Полное объяснение можно получить через так называемые функции распределения партонов, зависящих от их поперечного импульса.

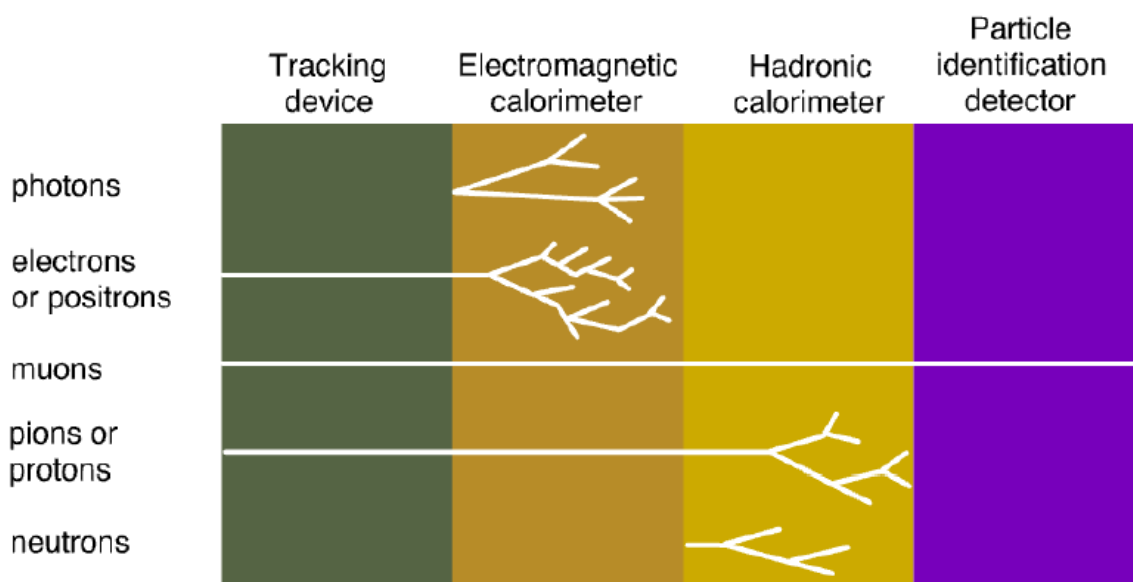
Эксперименты по поляризованному глубоконеупругому рассеянию (CERN, DESY, JLab, SLAC) и высокоэнергетические поляризованные протон-протонные столкновения (RHIC в BNL) являются основным источником информации о спин-зависимых структурных функциях нуклонов. Тем не менее наши знания о внутренней структуре нуклона все еще ограничены. Особенно это касается глюонного вклада [2].

## **2. Детекторы, используемые в физике высоких энергий**

Детекторы, используемые в физике высоких энергий для регистрации частиц, обычно представляют собой комплексы из нескольких структур. Каждая структура спроектирована для обнаружения частиц с определенными

характеристиками. Они размещены таким образом, чтобы различные типы частиц, проходя через них последовательно, оставляли характерные следы. Исходя из этой информации, можно восстановить такие параметры частицы, как её тип, энергия, импульс и характеристики распада.

Принципы организации такого комплексного детектора иллюстрируются рис. 1. Частицы зарождаются в левой части в результате взаимодействия сталкивающихся пучков коллайдера или одного пучка ускоренных частиц с неподвижной мишенью. После образования, эти частицы проходят через различные структуры детектора. Заряженные частицы, такие как протоны, пионы и каоны, детектируются трековым детектором (он расположен ближе всего к точке реакции) и далее – электромагнитным и адронным калориметрами. Электроны детектируются трековым детектором и электромагнитным калориметром. Нейтральные частицы, такие как нейтроны и фотоны, не детектируются в трековом детекторе. Фотоны обнаруживаются электромагнитным калориметром, а нейтроны идентифицируются по энергии, которую они выделяют в адронном калориметре.



**Рис. 1** Регистрация различных частиц детектором [3]

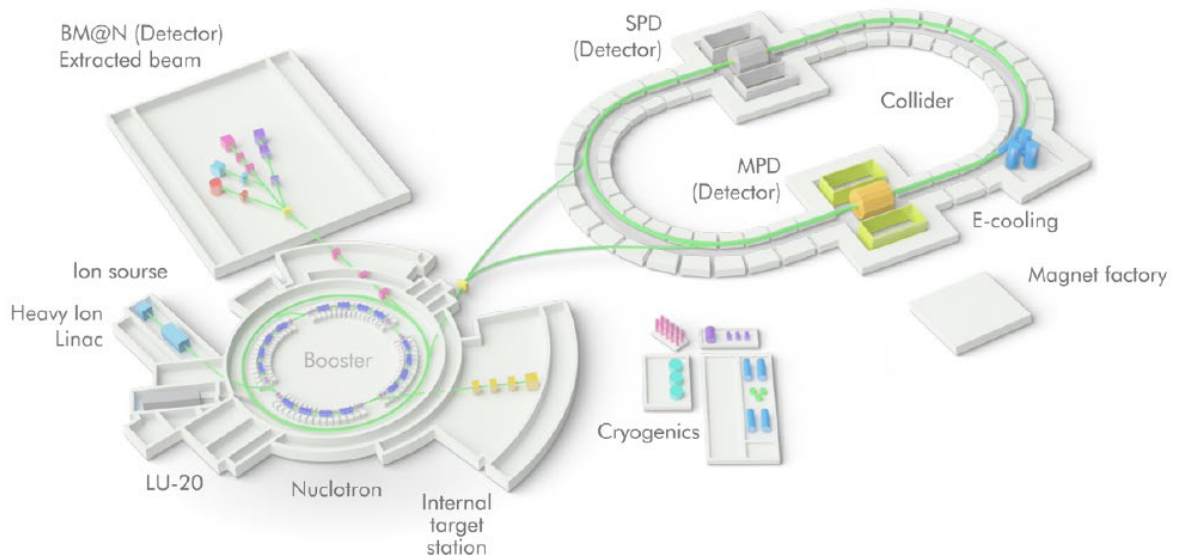
Мюоны обладают самым большим пробегом в материале детектора среди всех регистрируемых частиц, поэтому для их обнаружения обычно используют внешние участки детектора – мюонный детектор.

Многослойная структура детектора позволяет восстановить траекторию частицы и определить точку её образования с высокой точностью, до нескольких микрон. Каждый тип частиц оставляет свой уникальный "след" в детекторе. Например, если частица обнаруживается только в электромагнитном калориметре, это, скорее всего, фотон. Мюон оставляет информацию во всех структурах детектора, что позволяет его идентифицировать. Это различие в поведении разных частиц позволяет определить их тип с высокой степенью достоверности.

### 3. Spin Physics Detector (SPD)

#### 3.1 Основная цель эксперимента

Экспериментальная установка SPD, которую планируется разместить в одной из двух точек пересечения пучков коллайдера NICA (рис. 2), предназначена для всестороннего изучения спиновой структуры протона и дейтрона в поляризованных p-p, d-d и p-d-столкновениях. 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  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .



**Рис. 2** Комплекс NICA [4]

Эксперимент SPD планирует получить данные о спиновых асимметриях для анализа корреляций между направлением спина протона (дейтрона), его импульсом и направлением спина, связанным с продольным и поперечным импульсами глюонов внутри протона (дейтрона). В начальной фазе работы установки, до достижения проектных светимости и энергии столкновения, основное внимание планируется уделить изучению спиновых эффектов в упругих p-p и d-d рассеяниях, поиску мультипартонных корреляций и новых связанных состояний, исследованию рождения чарма у порога, изучению поляризаций гиперонов и т.д [5].



Новые данные о спиновой структуре протона и дейтрона, которые будут получены на установке SPD, приблизят нас к пониманию фундаментальных основ квантовой хромодинамики.

Исследования на установке SPD с использованием поляризованных протонных пучков позволят заполнить пробелы между измерениями на низких энергиях на ускорителях ANKE-COSY и SATURNE и измерениями на высоких энергиях на коллайдере RHIC и планируемых на LHC экспериментах с неподвижной мишенью. Важно отметить, что возможность работать с поляризованными пучками дейтронов в этом диапазоне энергий является уникальной особенностью данного эксперимента.

### **3.2 Экспериментальная установка SPD**

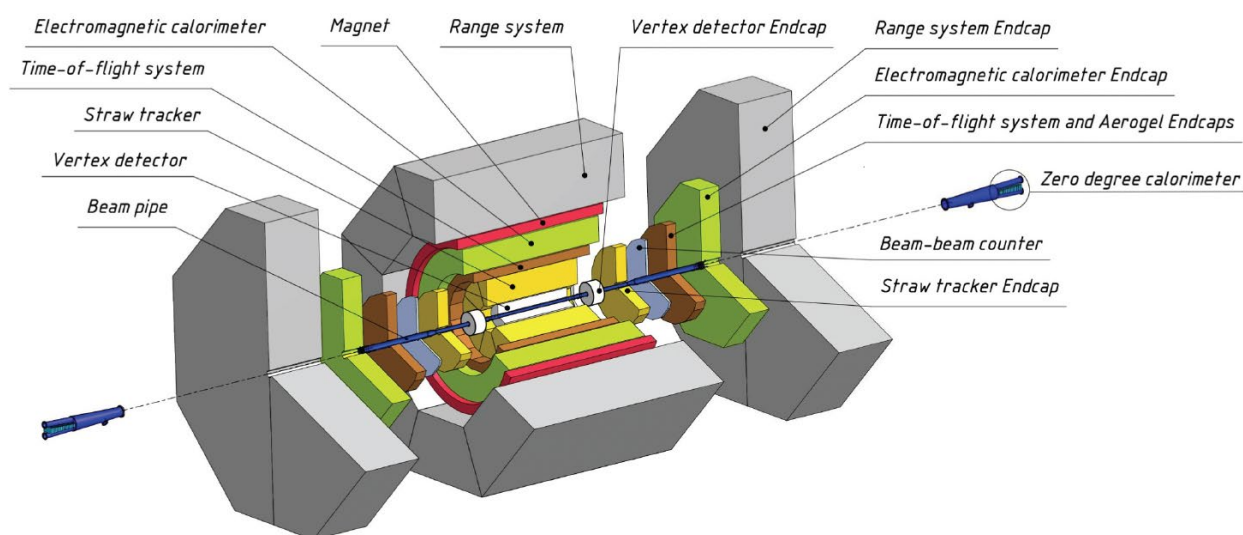
Экспериментальная установка, изображенная на рисунке 3, будет обладать широким геометрическим охватом, приблизительно равным  $4\pi$ , продвинутой системой для восстановления треков и вершин, а также разнообразными возможностями по идентификации частиц, основанными на передовых технологиях.

Кремниевый вершинный детектор (VD) обеспечит координатное разрешение при восстановлении вершины лучше 100 микрон, что критически важно для точной реконструкции вторичных вершин распада D-мезонов. Трековая система, использующая строу-трубки (ST) в соленоидальном магнитном поле до 1 Тл, позволит определить поперечные импульсы вторичных частиц с точностью до 2%.

Времяпролетная система (PID) с временным разрешением 60 пс обеспечит разделение пионов, каонов и протонов в широком кинематическом диапазоне. Использование черенковских детекторов на основе аэрогеля позволит расширить этот диапазон. Для регистрации фотонов будет использован электромагнитный калориметр типа «шашлык» (ECal). Для уменьшения эффектов многократного рассеяния и конверсии фотонов минимизировано количество вещества во внутренней части установки.

Мюонная (пробежная) система (RS) предназначена для идентификации мюонов. Она также может служить в качестве грубого адронного калориметра. Пара пучковых счетчиков (BBC) и калориметров нулевого угла (ZDC) будут отвечать за локальную поляриметрию и контроль светимости.

Высокая частота столкновений (до 4 МГц) и большое количество каналов электроники определяют высокие требования к системе сбора данных, онлайн-мониторингу, компьютерной системе последующей обработки данных и программному обеспечению для реконструкции и анализа данных.



**Рис. 3** Экспериментальная установка SPD [6]

### 3.3 Объём данных эксперимента

В физике высоких энергий события, регистрируемые детектором, обрабатываются независимо, поэтому их можно считать наименьшей единицей данных. А значит, зная размер одного события, сложность обработки событий и ожидаемое количество событий для обработки, можно оценить требования к вычислительной системе для эксперимента.

Исходя из приблизительных оценок на SPD будет приходиться 20 ГБ/с (или 200 ПБ/год) «необработанных» данных, что соответствует  $\sim 3 \cdot 10^{13}$  событий/год.

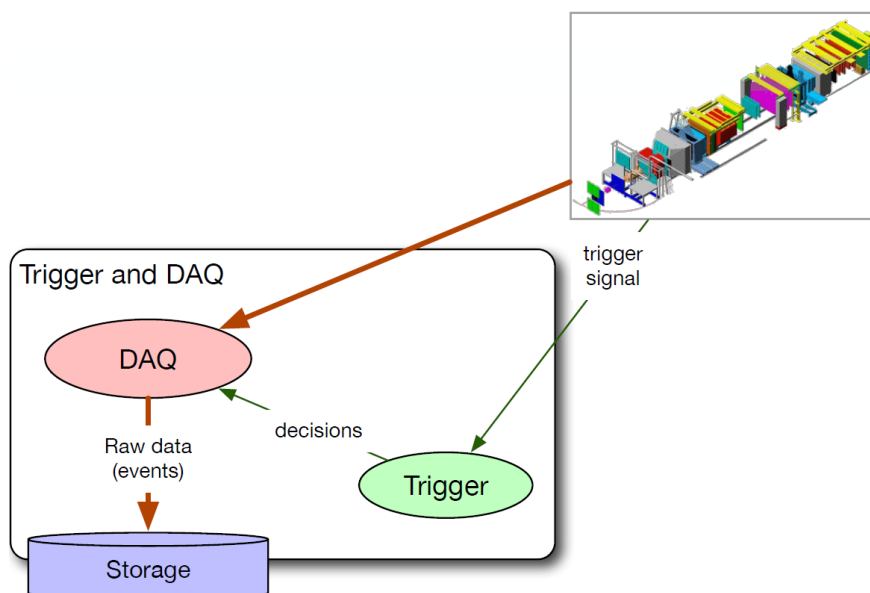
Сбор, обработка и хранение такого объема данных представляет собой серьезную проблему для вычислительной инфраструктуры эксперимента и

требует разработки новых методов и подходов для реконструкции событий, моделирования и физического анализа данных с использованием высокопроизводительных и распределенных вычислений.

### 3.4 Особенности сбора данных

Системы сбора данных в большинстве подобных экспериментов используют триггеры (рис. 4) для отбора и записи только тех событий, которые являются интересными для дальнейшего анализа. Триггеры – управляющий сигнал, по которому осуществляется запись с детекторных систем.

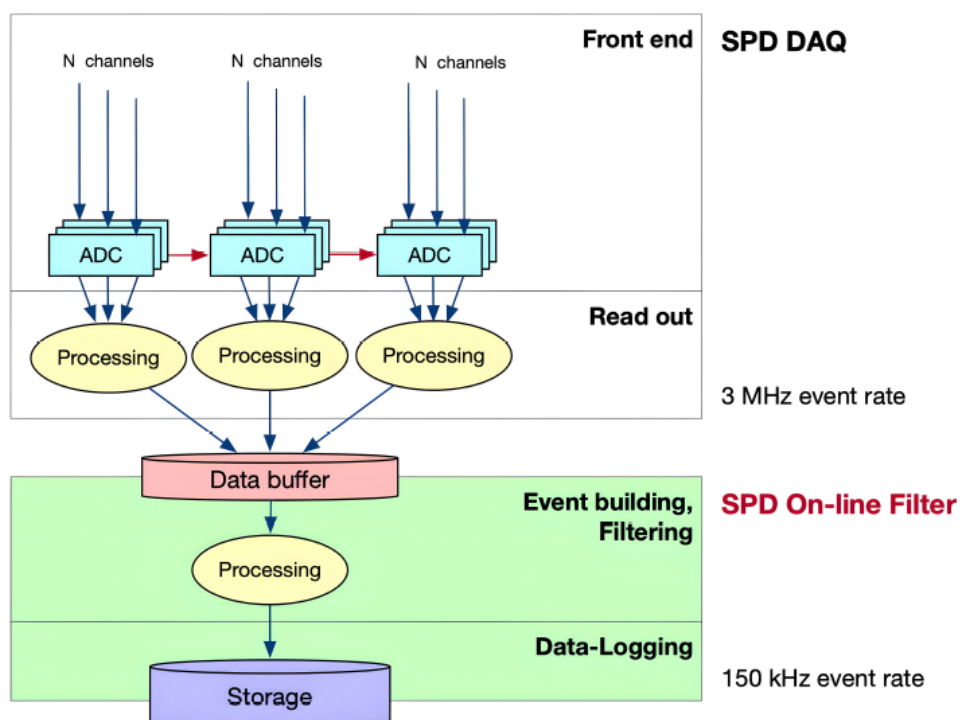
Триггеры могут быть настроены на различные критерии, например, на обнаружение определенных типов частиц, особенных шаблонов распределения энергии, наличие определенных вершин или корреляций между различными частицами. Такие системы триггеров позволяют экономить ресурсы хранения и обработки данных, фокусируясь только на событиях, которые соответствуют определенным критериям или интересам исследования.



**Рис. 4** Триггерная система сбора данных [7]

Однако ввиду сложности и широты изучаемых процессов (выбор физического сигнала требует реконструкции импульса и вершины) невозможно построить критерии отбора данных на аппаратном уровне,

поэтому для минимизации возможных систематических эффектов SPD будет оснащен бестриггерной системой сбора данных (рис. 5).



**Рис. 5** Бестриггерная система SPD [7]

Система сбора данных предоставляет данные, организованные по временным интервалам и разбитые на файлы разумного размера (несколько ГБ). При таком подходе отдельные файлы могут обрабатываться параллельно, что повышает эффективность работы системы. Каждый файл может быть независимо обработан как часть общей цепочки процессов, что упрощает процесс и не требует обмена информацией между отдельными файлами во время их обработки.

Такой подход особенно полезен, когда нет необходимости в обмене информацией между файлами на этапе обработки, и результаты обработки одного файла могут быть использованы как входные данные для следующего этапа. Это позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы и ускоряет процесс анализа данных в целом.

## 4. SPD Online Filter

### 4.1 Принцип работы SPD Online Filter

SPD Online Filter — это высокопроизводительная вычислительная система для высокопропускной первичной обработки данных эксперимента SPD.

Эта вычислительная система должна осуществлять следующее преобразование данных: идентифицировать физические события во временных интервалах; реорганизовать данные в событийно-ориентированном формате; отфильтровать события, оставляя только интересные с точки зрения эксперимента; согласовывать выходные данные, объединять события в файлы и файлы в наборы данных для будущей обработки.

Концепция базовой обработки:

- Реконструкция треков и связывание их с вершинами;
- Связывание срабатываний электромагнитного калориметра и пробегной системы с каждой вершиной по времени;
- Определение несвязанных срабатываний детектора;
- Объединение с необработанными сигналами от других субдетекторов;
- Формирование блоков данных и сохранение частично реконструированных событий.

Так как SPD Online Filter предназначен для обработки большого потока данных. Данные объединяются в наборы файлов в зависимости от стадии их обработки. Каждый файл в наборе может быть обработан независимо, однако наборы обрабатываются в некоторой заданной последовательности. Каждый файл можно обработать за некоторое разумное время на ограниченном вычислительном ресурсе (вычислительном узле).

Разбиение данных на более мелкие части позволяет управлять объемом обработки и минимизировать последствия при возникновении ошибок при обработке больших объемов данных. Работа с отдельными частями позволяет

изолировать ошибки, которые могут возникнуть в процессе обработки, и снизить их воздействие на всю систему.

Такой подход также обеспечивает масштабируемость системы: добавление дополнительных вычислительных ресурсов позволяет обрабатывать еще большие объемы данных без значительного изменения общей архитектуры системы. Это особенно полезно для систем, работающих с высокочастотными данными или при необходимости быстрой обработки информации в режиме реального времени.

По результатам анализа первичных требований к системе были выделены основные компоненты:

1. Workflow management system
2. Data management system
3. Workload management system & pilot

Архитектура системы SPD Online Filter приведена на рис. 6.

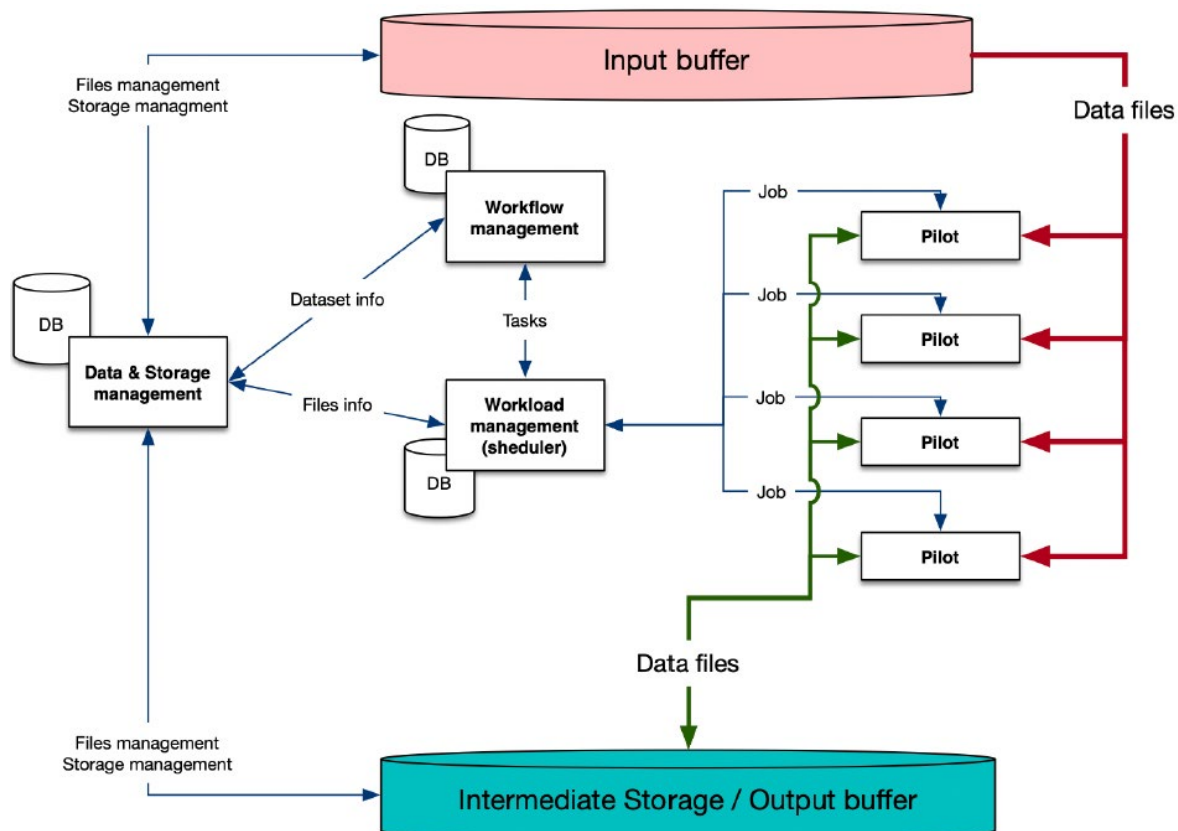


Рис. 6 Архитектура SPD Online Filter

## 4.2 Входные данные

Входные данные, приходят из системы сбора данных (DAQ) во входной буфер.

- Период набора – ассоциирован с физической задачей. Состоит из набора ранов (run). Имеет дату начала, дату окончания.

- Ран – интервал, когда условия эксперимента неизменны (калибровки, например). Измеряется часами. Состоит из фреймов.

- Фрейм – нумерованный блок данных с детектора. Может содержать информацию о множестве событий. Продолжительность секунды.

- Датасет – логическое объединение файлов в наборы для обработки. Датасет является единицей обработки для одного задания.

- Файл – количество данных для обработки одной задачей.

## 5. Система управления процессами обработки (WfMS)

После попадания в SPD Online Filter, данные регистрируются в системе управления данными. После этого данные готовы к последующей обработке при помощи системы управления процессами обработки (Workflow Management System - WfMS).

WfMS принимает эти зарегистрированные данные и сопоставляет их с определенным шаблоном цепочки обработки, который предоставлен оператором обработки данных. Каждый этап этой цепочки обработки генерирует соответствующие задачи для выполнения. Эти задачи затем направляются в систему управления нагрузкой (Workload Management System), где они распределяются на вычислительные ресурсы для выполнения.

Этот процесс позволяет эффективно организовать и контролировать обработку данных по заданной цепочке этапов. Задания каждого этапа обработки создаются автоматически и передаются в систему управления нагрузкой для выполнения на доступных вычислительных ресурсах. Такой подход обеспечивает систему планирования и контроля рабочих процессов, что улучшает эффективность обработки данных и ускоряет процесс анализа.

Система управления рабочим процессом (WfMS) имеет ряд функциональных требований, чтобы эффективно организовать и контролировать последовательности обработки данных:

### 1. Организация последовательностей обработки данных:

- **Последовательность:** состоит из логически связанных шагов обработки данных, где результат одного шага является входными данными для следующего.
- **Шаг обработки:** представляет собой действие, которое выполняется над набором данных. Эти шаги могут быть типа "map" (однотипная обработка для каждого элемента данных) или "merge" (объединение гомогенных данных).
- **Описание шаблона:** выражается с помощью CWL (Common Workflow Language).



## 2. Формирование запроса на обработку данных:

- Задание значений переменных: Для каждого шага обработки определяются:
  - Входные данные.
  - Тип обработки (map, reduce).
  - Обработчик (приложение или инструмент).
  - Шаблон входных параметров для обработчика.
  - Выходные данные.
  - Граничные условия: минимальный и достаточный порог выполнения работы от объема обрабатываемых данных.
  - Количество повторений в случае ошибки.

## 3. Выполнение запроса на обработку данных:

- Формирование задач на обработку: создание задач для каждого шага обработки данных на основе заданных параметров.
- Передача задач в систему управления нагрузкой: отправка созданных задач в систему управления нагрузкой для выполнения.
- Контроль выполнения: осуществление контроля выполнения обработки данных путем опроса системы управления ресурсами.

Эти функциональные требования позволят системе WfMS эффективно управлять процессами обработки, обеспечивая оптимизацию обработки данных, контроль ошибок и достижение заданных целей обработки.

В основном процессе обработки данных в SPD Online filter можно выделить следующие шаги:

1. Декодирование данных;
2. Выявление событий и реструктуризация данных;
3. Фильтрация выявленных событий;
4. Верификация данных;
5. Объединение файлов (уменьшение количества файлов, увеличение размера файлов);

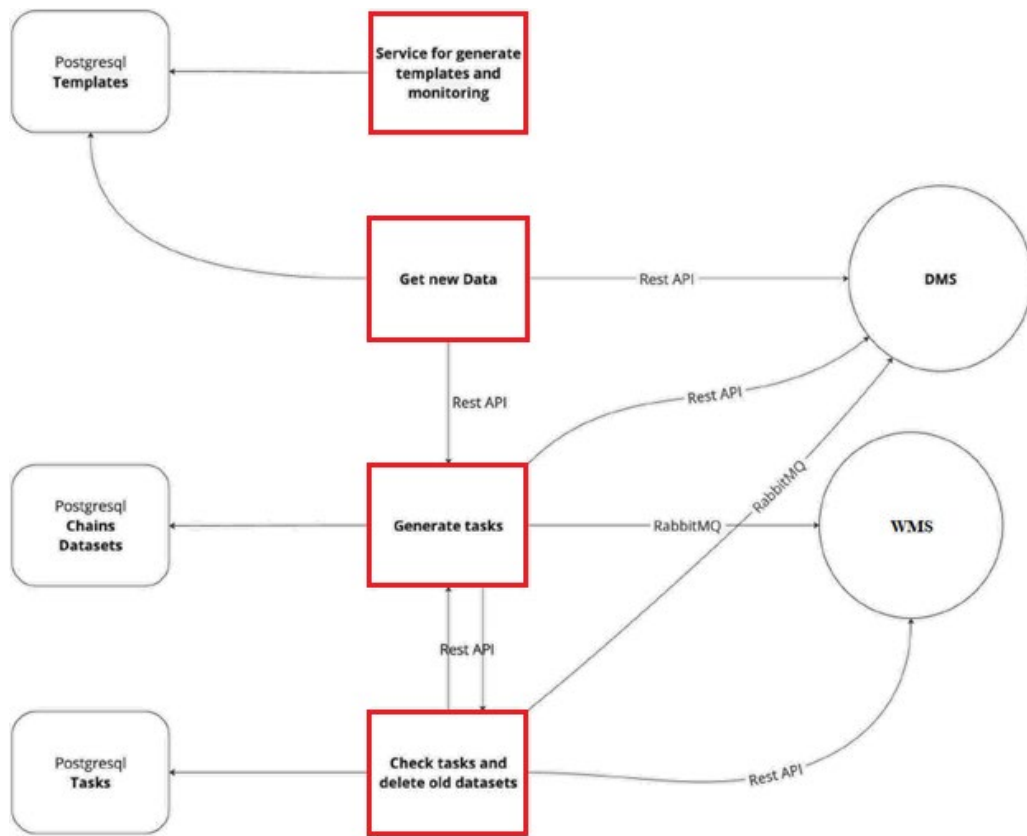
Такой набор последовательных шагов обработки будет называться цепочкой обработки. Каждый из шагов в такой цепочке может быть определен шаблоном.

Во время работы системы предполагается создание промежуточных данных, которые будут удаляться после получения выходного набора данных.

В результате проектирования были определены основные сервисы системы WfMS:

- Сервис для взаимодействия с оператором обработки данных:
  - 1) вывод информации о заданиях;
  - 2) изменение приоритетов заданий или их отмена.
- Сервис для опроса DMS:
  - 1) получение данных из DMS (информация о датасетах);
  - 2) передача промежуточных и выходных данных, а также логов в DMS.
- Сервис генерации заданий:
  - 1) определение последовательностей обработки данных;
  - 2) запрос шаблонов;
  - 3) создание заданий (tasks) по шаблонам для последовательностей.
- Сервис для работы с WMS:
  - 1) отправление заданий на обработку в WMS;
  - 2) периодический опрос WMS для отслеживания статуса.

Архитектура системы управления процессами обработки приведена на рис. 7.



**Рис. 7** Архитектура Workflow Management System

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Современные эксперименты в области физики высоких энергий, сталкиваются с необходимостью эффективной обработки огромных объемов данных, генерируемых детекторными системами. Эксперимент SPD на коллайдере NICA предъявляет высокие требования к системе фильтрации данных в реальном времени, учитывая интенсивность событий и необходимость оперативной обработки информации. В этом контексте проектирование системы управления процессами обработки данных становится не просто задачей, а ключевым фактором для достижения успешных результатов в исследованиях физики высоких энергий. Эффективное управление процессами обработки данных в вычислительных комплексах имеет ключевое значение для обеспечения производительности и надежности системы.

В ходе работы был рассмотрен эксперимент SPD, основные аспекты функционирования системы SPD Online Filter и её подсистемы - системы управления процессами обработки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. International spin physics collaboration at the collider NICA URL: <http://spd.jinr.ru/>
2. Abazov V. M. [и др.] Conceptual design of the Spin Physics Detector. 2021. arXiv: 2102.00442 [hep-ex].
3. Детекторные комплексы физики высоких энергий. — URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/dsystem.htm>.
4. Комплекс NICA. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/complex.php>.
5. Arbuzov A. [и др.]. On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. arXiv: 2011.15005 [hep-ex].
6. Экспериментальная установка SPD. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/projects/spd.php>.
7. Oleynik D. Data processing in HEP experiments. — URL: [https://lit.jinr.ru/sites/lit.jinr.ru/files/pdf/HEPNICA\\_computing\\_2022\\_OleynikD.pdf](https://lit.jinr.ru/sites/lit.jinr.ru/files/pdf/HEPNICA_computing_2022_OleynikD.pdf).