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»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ПРОГРАММНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ МНОГОЭТАПНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ ФРЕЙМВОРКА GAUDI

Научный руководитель
доц. к.ф-м.н. _____ Е. Ю. Солдатов

Научный консультант
к.ф-м.н. _____ А. С. Жемчугов

Студент _____ Л. Л. Симбирятин

Москва 2024

Содержание

Введение

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) является проектом масштаба мегасайенс, реализуемым на базе ОИЯИ (Дубна, Россия). На коллайдере предусмотрены две точки пересечения пучков заряженных частиц, в одной из которых предполагается установить детектор SPD (Spin Physics Detector) с целью изучения спиновой структуры протона и дейтрона. Коллайдер предоставляет уникальную возможность для изучения поляризованных pp и dd столкновений с $\sqrt{s} = 27$ ГэВ и светимостью порядка 10^{32} см$^{-2}$с$^{-1}$.

Рисунок 1 — Ускорительный комплекс NICA

Как и любой крупный эксперимент, SDP предполагает разработку своего физического ПО. Такое ПО, главным образом, предназначено для реконструкции событий, генерации Монте-Карло наборов, а также для автономной обработки данных. Для каждой из перечисленных задач существуют специализированные библиотеки. Интеграция этих библиотек в общий фреймворк является важной задачей.

Текущим вариантом физического ПО эксперимента SPD является пакет SpdRoot, написанный на основе фреймворка FairRoot [1]. С его помощью рассчитывают физические показатели детектора, производят возможные оптимизации и прочие подготовительные мероприятия. Однако, являясь непосредственным наследником пакета Root, SpdRoot наследует, в том числе, и все его недостатки. Также в SpdRoot не поддерживаются методы многопоточного программирования.

По этим причинам к началу набора данных необходимо разработать фреймворк для физического ПО эксперимента SPD на базе Gaudi [2]. В рамках прошедшего семестра были выполнены следующие задачи:

- интеграция библиотеки Pythia8 (генерация первичных вершин);
- интеграция библиотеки GeoModel (описание геометрии детектора);
- начало интеграции пакета Geant4;

1 Эксперимент SPD

Несмотря на важность поиска проявлений частиц, выходящих за рамки Стандартной модели, в рамках барионной материи по-прежнему остается множество открытых вопросов. Даже протон не может считаться в полной мере изученной частицей. В наивной кварковой модели протон представляет собой комбинацию двух u и одного d кварка. Эта простейшая кварковая модель позволяет предсказать такие свойства как электрический заряд, изоспин, четность, магнитный момент. Этот результат является действительно удивительным, ведь такая модель не учитывает угловые моменты кварков, морские кварки, а также глюоны. КХД является современным инструментом описания сильного взаимодействия, она с успехом применяется для описания множества процессов. Основным нюансом КХД является ее непертурбативность на низких энергиях, в частности, одной из нерешенных проблем остается описание свойств адронов (в том числе и протона) напрямую из динамики составляющих их кварков и глюонов.

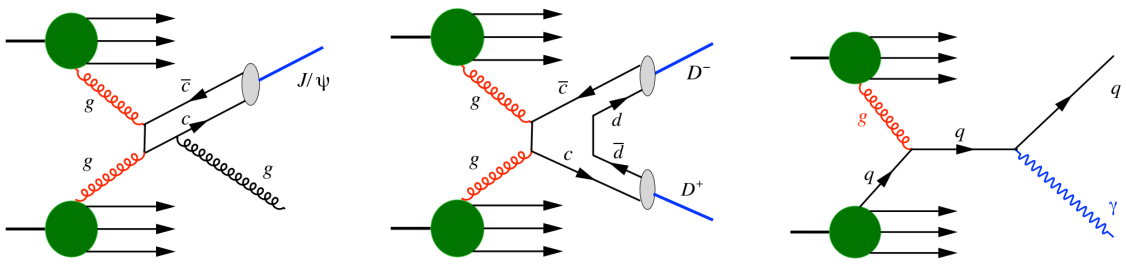
Детектор SPD (Spin Physics Detecror) будет размещен в одной из двух точек столкновения пучков коллайдера NICA (Дубна, Россия). Целью построения SPD является изучение спиновой структуры нуклонов в поляризованных pp ($\sqrt{s} < 27$ ГэВ) и dd ($\sqrt{s} < 13.5$ ГэВ) столкновениях.

1.1 Основная цель эксперимента

Одним из способов описания внутренней партонной структуры нуклона является использование функций партонных распределений PDF (Parton Distribution Function). В неполяризованном простейшем случае эта функция описывает вероятность найти внутри нуклона партон, несущий определенную долю общего импульса. В общем же случае необходимо также учитывать не только продольную компоненту, но и поперечную (например, эффект Сиверса [3]), а также поляризацию как самого нуклона, так и партонов внутри него.

В то время как вклад кварков в общий спин нуклона был довольно точно измерен коллаборациями EMC, HERMES и COMPASS, измерения по глюонной компоненте либо являются менее точными, либо отсутствуют вовсе.

Основная цель эксперимента SPD - извлечь информацию о глюонных функциях распределения, зависящих от поперечного импульса (TMD PDFs), для протона и дейтрона, через измерение одинарных и двойных спиновых асимметрий в процессах рождения чармониев, очарованных частиц, а также прямых фотонов [4].



а б в

Рисунок 2 — Фейнмановские диаграммы процессов-пробников: рождение (а) чармониев, (б) очарованных частиц, (в) прямых фотонов

1.2 Детектор

Основной целью эксперимента является извлечение TMD PDF для глюонов через измерение спиновых асимметрий в процессах рождения чармониев, очарованных частиц, а также прямых фотонов. Поставленная цель, а также обозначенные процессы-пробники определяют вид и необходимые характеристики детектора SPD.

SPD представляет собой универсальный 4π детектор с характерной для коллайдерных экспериментов цилиндрической формой. Его компонентами являются:

- кремниевый вершинный детектор (VD) с разрешением выше 100 мкм для реконструкции вторичных вершин распадов D мезонов;
- трековая система (TS) $\sigma_{p_T}/p_T \approx 2\%$;
- время-пролетная система (TOF) с разрешением порядка 60 пс для разделения π/K и K/p;
- детектор FARICH 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 счетчиков столкновений (BBC) и калориметров нулевых углов (ZDC) для контроля поляризации и светимости;

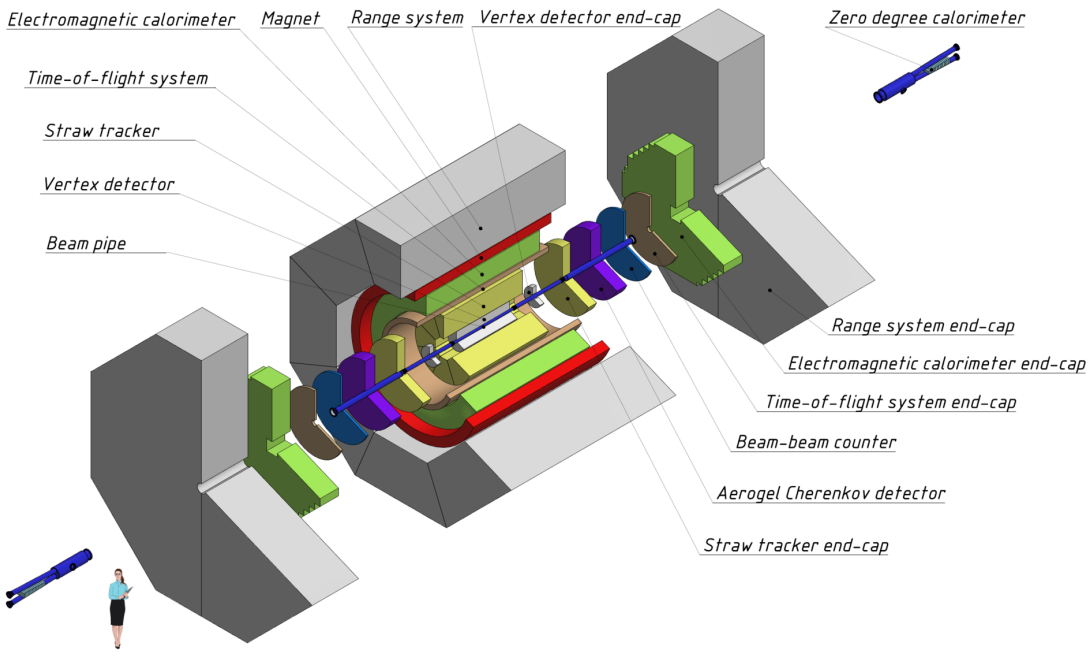


Рисунок 3 — Макет детектора SPD в полной сборке

В силу трудностей, возникающих при построении аппаратного триггера, для SPD предполагается безтриггерная система сбора данных. В совокупности с высокой частотой столкновений (до 12 МГц) и сотнями тысяч каналов детектора это представляет собой сложную задачу по разработке эффективной системы сбора и обработки данных.

2 Offline программное обеспечение эксперимента SPD

Offline программное обеспечение предназначено для решения таких задач, как реконструкция событий, их моделирование, а также проведение физического анализа полученных в результате эксперимента данных. Схематично эти этапы жизненного цикла данных представлены на рисунке 4. Все эти этапы в рамках фреймворка должны быть объединены в единую инфраструктуру.

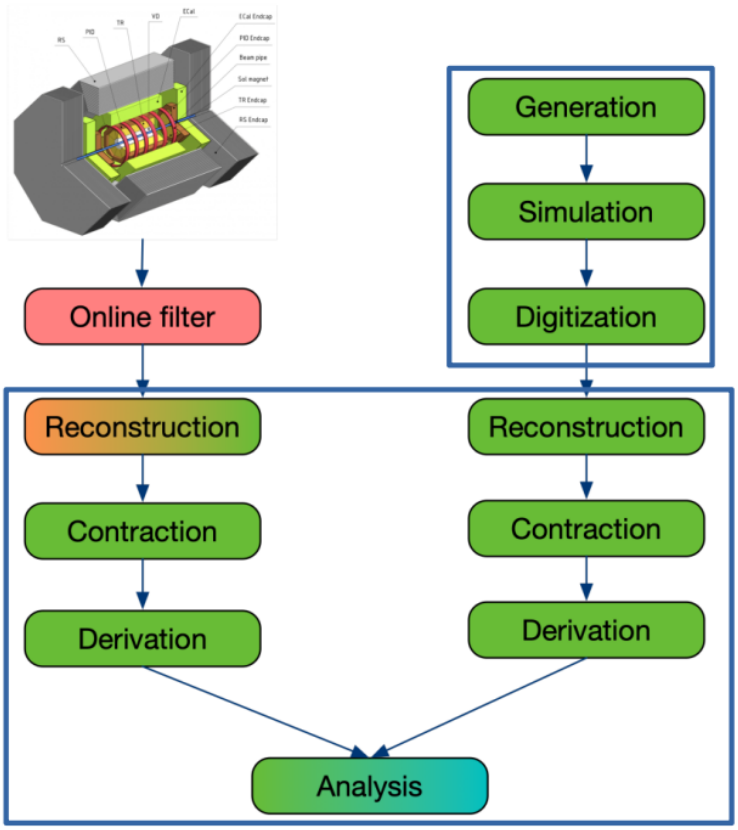


Рисунок 4 — Этапы обработки данных. За выделенные этапы отвечает offline ПО

2.1 Генерация и моделирование

Для моделирования протон-протонных столкновений используется генератор Pythia8 [5], дейтрон-дейтронные столкновения моделируются с помощью модели FRITIOF [6], а для моделирования ядро-ядерных столкновений используется генератор UrQMD [7]. Для моделирования распространения частиц в детекторе, а также формирования откликов в чувствительных элементах установки используется пакет Geant4 [8].

2.2 Описание детектора

Для описания геометрии детектора используется библиотека GeoModel [9]. Она позволяет хранить геометрию детектора как отдельный независимый компонент, в том числе записывать ее в базу данных SQLite. Выделение геометрии детектора в отдельный компонент обусловлено тем, что многие алгоритмы реконструкции должны взаимодействовать с ней. Геометрия внутри Geant4 будет создаваться путем конвертации геометрии из GeoModel.

3 Фреймворк Gaudi

Gaudi [2] представляет собой программный пакет, содержащий все необходимые интерфейсы и компоненты для написания на его основе фреймворков для экспериментов в области физики высоких энергий. Изначально Gaudi разрабатывался по внутренним нуждам коллаборации LHCb, однако вскоре после подключения к разработке коллаборации ATLAS стало ясно, что пакет может быть легко трансформирован и под любой другой эксперимент. Надежность пакета подтверждается его использованием в многочисленных коллаборациях по всему миру.

3.1 Архитектура Gaudi

Одним из принципиальных решений при создании Gaudi стала изоляция пользователя от деталей внутреннего устройства фреймворка. Достигается такая изоляция за счет построения архитектуры, представляющей собой набор компонентов и правил их взаимодействия. У каждого компонента есть свой интерфейс и функционал. Задача же пользователя сводится к доопределению функционала конкретного компонента с сохранением его интерфейса. Программно это осуществляется путем наследования от одного из базовых классов.

Другим принципиальным решением стало явное разделение между данными и алгоритмами, оперирующими этими данными. Такое разделение обусловлено естественным подходом: данные - это набор чисел, который не стоит перегружать каким-либо дополнительным функционалом, а алгоритмы - это математические процедуры, проводимые с этими числами. Также для хранения данных на диске необходимо предоставить соответствующие конвертеры. Таким образом, в Gaudi представлены следующие базовые классы, предназначенные для пользователя:

- DataObject
- Algorithm
- Converter

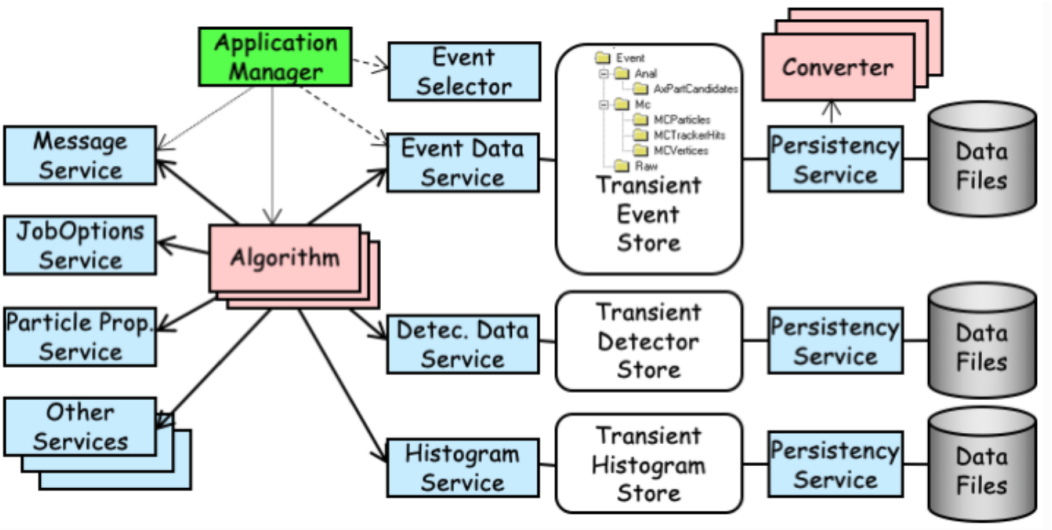


Рисунок 5 — Основные компоненты архитектуры Gaudi

3.2 Алгоритмы

Алгоритмы главным образом производят определенные действия с данными (генерация, реконструкция и т. п.), основная часть модификации фреймворка под нужды конкретного эксперимента заключается в написании алгоритмов.

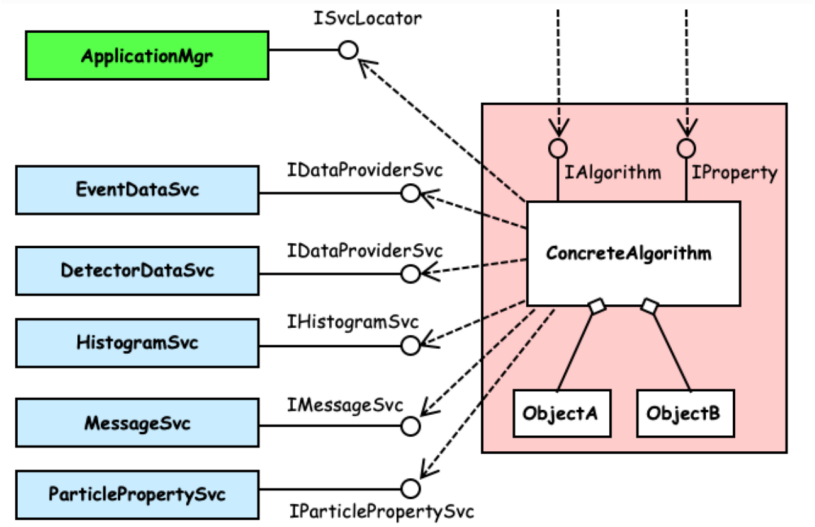


Рисунок 6 — Взаимодействие алгоритма с фреймворком в процессе работы

Алгоритм взаимодействует с элементами фреймворка посредством их интерфейсов. Например, доступ к данным и их запись во временное хранилище осуществляется посредством интерфейса IDataProviderSvc, а в случае необходимости вывода алгоритмом какой-либо информации можно воспользоваться MessageSvc, обращение к которому реализуется через интерфейс IMessageSvc.

Алгоритм является конфигурируемым. Так, перед запуском можно установить значения для внутренних переменных (например, пороговые значения для отборов событий). Это возможно благодаря тому, что базовый класс Algorithm реализует сразу два интерфейса, в том числе IProperty, что дает возможность сервису JobOptionSvc в момент конфигурирования обращаться к полям алгоритма и задавать их значения. Вторым интерфейсом, который реализуется базовым классом Algorithm, является IAlgorithm. IAlgorithm используется для управления алгоритмом в процессе работы фреймворка. Также этот интерфейс содержит три чисто виртуальных метода, реализация которых целиком ложится на конечного пользователя:

- **Initialize**, который может быть использован для создания выходных гистограмм, конфигурирования побочных алгоритмов и т.п.
- **Execute**, который вызывается единожды на событие и совершает соответствующие какой-либо физической задаче преобразования над данными, относящимися к этому событию. Для побочных алгоритмов execute можно вызывать более одного раза.
- **Finalize**, который вызывается в конце работы программы и может быть использован для подведения итоговой статистики, фитирования итоговых гистограмм и т.п.

3.3 Сервисы

Сервисы предназначены для решения общих задач, возникающих в ходе работы приложения. К таковым можно отнести чтение и запись данных в Transient Data Store, вывод сообщений, генерацию случайных чисел, получение свойств частиц и т. д. Сервисы не относятся к какому-то конкретному алгоритму, они наравне с алгоритмами являются самостоятельными компонентами фреймворка. Так, например, за создание конкретного набора алгоритмов на основе конфигурационного файла отвечает сервис JobOptionSvc.

Сервисы создаются единожды в начале работы приложения и затем вызываются другими компонентами фреймворка. При этом при создании используется ленивая инициализация. По умолчанию Application Manager создает только JobOptionsSvc и MessageSvc.

Обращение к сервису должно осуществляться через его интерфейс. Для того чтобы какой-либо компонент имел доступ к определенному сервису, компонент нужно снабдить ссылкой или указателем на этот сервис. Для этого внутри фреймворка существует функция serviceLocator.

Помимо создания алгоритмов, Gaudi также позволяет пользователю создавать собственные сервисы. Для этого необходимо предоставить интерфейс нового сервиса, также новый сервис должен быть наследником базового класса Sevice.

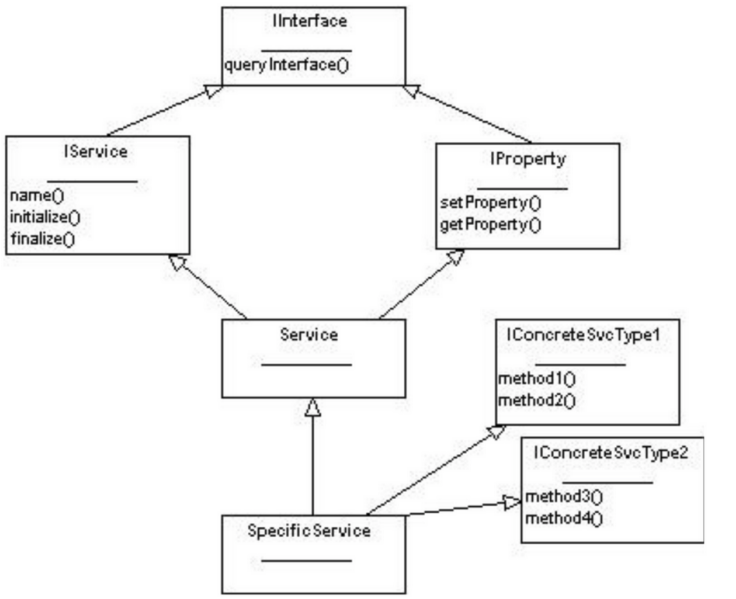


Рисунок 7 — Схема создания пользовательского сервиса.

3.4 Конфигурирование приложения. Job opotions

Под понятием *Job* имеется в виду запуск программы в определенной конфигурации на определенных входных данных. Для того чтобы сконфигурировать *Job*, в Gaudi предусмотрен механизм *JobOptions* файлов, представляющих собой набор команд, интерпретируемых Gaudi. На языке этих команд описывается последовательность алгоритмов, их параметры, используемы сервисы, входные данные и многое другое.

Однако большинство современных экспериментов использует другой подход. Он подразумевает конфигурирование задач с помощью скриптов на языке *Python*.

3.5 Работа Gaudi-приложения

Общая схема работы приложения, написанного на базе Gaudi, представлена на рисунке 8:

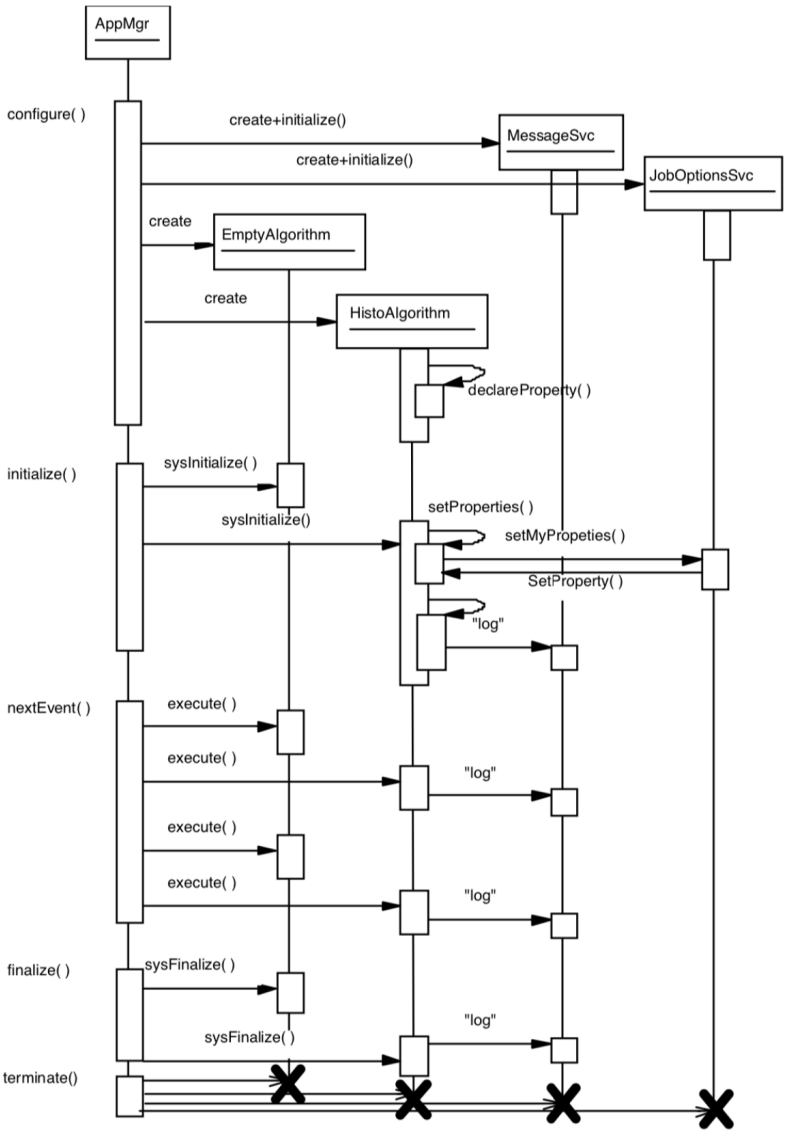


Рисунок 8 — Общая схема работы Gaudi-приложения

Порядок работы следующий:

- Application manager создает и инициализирует необходимые сервисы;
- создаются алгоритмы, указанные в JobOptions;
- устанавливаются свойства алгоритмов;
- Application manager начинает цикл обработки событий. Для каждого события вызываются алгоритмы в установленном порядке;
- по завершении цикла обработки событий алгоритмы завершаются;
- сервисы завершаются;
- освобождаются все ресурсы, программа завершается;

4 Gaudi в SPD

В рамках разработки фреймворка на основе Gaudi было принято решение идти в соответствии с циклом жизни данных, то есть в порядке генерация-моделирование-реконструкция.

4.1 Интеграция Pythia8

Pythia8 [5] является универсальным Монте-Карло генератором событий для физики высоких энергий. Задачей генератора является создание коллекции выходных частиц, формирующих событие, в соответствии с некоторой физической моделью, начальными частицами и их характеристиками.

Задать начальные параметры Pythia8 можно двумя способами: построчно вызывать pythia.readString(...) или же один раз считать конфигурационный файл с помощью pythia.readFile(...). Второй способ выбирается в качестве основного, так как не требует перекомпилляции проекта, а также позволяет сохранить настройки генератора, которые в дальнейшем могут понадобиться.

Сгенерированные события необходимо хранить на диске. В некоторых случаях можно формировать комплексные задачи и одновременно с записью сразу же передавать сформированные события следующему в цепочке алгоритму моделирования. В любом случае необходимо учесть, что сгенерированные события должны быть представлены в некотором универсальном виде. В качестве такого представления выбирается HepMC3. Pythia8 оснащена встроенным конвертером, переводящим внутреннее представление события в HepMC3.

Генераторы событий, в соответствии с ходом их работы, в контексте Gaudi логично представить в виде алгоритма. В ходе проделанной работы был разработан класс Pythia8_i. Основными его методами являются:

- **initialze**. Задает начальные параметры Pyhtia8, используемый генератор случайных чисел, открывает файлы для записи сгенерированных событий;
- **execute**. Однократно вызывает генератор, проверяет корректность сгенерированного события, конвертирует событие в HepMC3, записывает событие в файл и возможно передает его следующему алгоритму;
- **finalize**. Собирает статистику проведенной генерации, закрывает файлы;

4.2 HepMC3

Библиотека HepMC3 [10] предназначена для хранения событий, создаваемых генераторами. Запись HepMC3 состоит из двух частей. Первая хранит информацию о параметрах генератора, вторая содержит вершины и ассоциированные с ними частицы. Частицы без конечной вершины считаются финальными.

Записи представлены объектами класса GenEvent. GenEvent может быть сериализован в простую структуру GenEventData, которую легко записать на диск. Для записи и чтения используются наследники классов HepMC3::Reader и HepMC3::Writer. Библиотека поддерживает несколько форматов записи. Наиболее производительным и экономным с точки зрения используемой памяти является формат ROOTTree - бинарный формат, основанный на использовании TTree из пакета ROOT [11]. Поддерживается также запись и в простые текстовые ASCII файлы.

4.3 Интеграция GeoModel

GeoModel [9]- это библиотека с минимальным числом зависимостей, предназначенная для описания детектора и хранения этого описания в базе данных. В рамках GeoModel объекты детектора хранятся в виде дерева объектов, корнем которого является так называемый мировой объем. Таким образом, принцип представления геометрии полностью аналогичен тому, как это реализовано в Geant4. Библиотека GeoModel снабжена конверторами, переводящими представление геометрии в формат, используемый в Geant4.

Так как описание геометрии может потребоваться многим компонентам фреймворка, то внутри Gaudi GeoModel реализуется в виде сервиса. В рамках проделанной работы был разработан соответствующий сервис GeoModelSvc, основными задачами которого являются:

- Обеспечение подключения к базе данных с описанием геометрии, проверка корректности подключения;
- Выгрузка элементов геометрии из базы данных (по первому запросу), создание дерева объектов;
- Предоставление мирового объема по запросу;

4.4 Интеграция Geant4

Geant4 [8] предназначен для моделирования прохождения частиц через вещество детектора. Работой Geant4-приложения управляет G4RunManager. Инициализация осуществляется путем предоставления G4RunManager Initialization-классов, содержащих информацию о геометрии детектора, учитываемых физических процессах и т.д. Также предусмотрены механизмы вмешательства пользователя в типичный ход работы приложения посредством спецификации Action-классов. Обязательным Action-классом является G4VUserPrimaryGeneratorAction, определяющий создание первичных вершин.

В рамках интеграции Geant4 необходимо учесть следующее:

- В разрабатываемом фреймворке за геометрию детектора отвечает GeoModelSvc, так что необходимо обеспечить механизмы взаимодействия этого сервиса и Gean4-специфичных классов;
- Необходимо обеспечить механизм переноса сгенерированных Pythia8 первичных вершин в Geant4;
- Action-классы можно оформить в виде сервисов;
- Geant4 позволяет менять логику работы G4RunManager. По умолчанию она подразумевает использование Geant4 в виде отдельного приложения, однако при использовании его как части программного стека необходимо будет внести соответствующие изменения;

5 Заключение и дальнейшие планы

Данная работа посвящена разработке offline программного обеспечения для эксперимента SPD на базе платформы Gaudi. Были рассмотрены основные компоненты и архитектура Gaudi, а также основные этапы жизненного цикла данных в физическом эксперименте. Каждый из этапов требует использования специализированных библиотек, которые необходимо интегрировать в общий фреймворк.

Результатами проделанной работы стали:

- интеграция генератора Pythia8 в инфраструктуру Gaudi в виде соответствующего алгоритма. Значимость этого шага состоит в том, что получен прикладной алгоритм, на примере которого можно строить другие алгоритмы. Аналогичным образом можно интегрировать остальные генераторы;
- обеспечение записи сгенерированных событий на диск в формате HepMC;
- интеграция библиотеки GeoModel в инфраструктуру Gaudi в виде соответствующего сервиса. Значимость этого шага состоит в том, что получен прикладной сервис, на примере которого можно строить другие сервисы;
- начат процесс интеграции библиотеки Geant4 в инфраструктуру Gaudi. Создание первичных вершин осуществляется переводом событий из HepMC формата во внутренний формат Geant4, описание детектора создается на базе GeoModel;

Дальнейшие планы:

- завершить интеграцию Geant4. Этот шаг может подразумевать пересмотр внутренней логики работы Geant4-приложений;
- разработать инструмент логгирования выполняемых задач;
- приступить к разработке прикладных алгоритмов реконструкции;
- ознакомиться со средствами распараллеливания, предоставляемыми Gaudi и применить их к конкретным алгоритмам;

Список использованных источников

1. The FairRoot framework / M. Al-Turany [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2012. — Дек. — Т. 396, № 2. — С. 022001.
2. *Mato P.* GAUDI-Architecture design document. — 1998. — Нояб.
3. *Sivers D. W.* Single Spin Production Asymmetries from the Hard Scattering of Point-Like Constituents // Phys. Rev. D. — 1990. — Т. 41. — С. 83.
4. On the physics potential to study the gluon content of proton and deuteron at NICA SPD / A. Arbuzov [и др.] // Prog. Part. Nucl. Phys. — 2021. — Т. 119. — С. 103858. — arXiv: 2011.15005 [hep-ex].
5. An introduction to PYTHIA 8.2 / T. Sjöstrand [и др.] // Comput. Phys. Commun. — 2015. — Т. 191. — С. 159—177. — arXiv: 1410.3012 [hep-ph].
6. *Andersson B.*, *Gustafson G.*, *Nilsson-Almqvist B.* A model for low-pT hadronic reactions with generalizations to hadron-nucleus and nucleus-nucleus collisions // Nuclear Physics B. — 1987. — Т. 281, № 1. — С. 289—309. — ISSN 0550-3213.
7. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions / S. A. Bass [и др.] // Prog. Part. Nucl. Phys. — 1998. — Т. 41. — С. 255—369. — arXiv: nucl-th/9803035.
8. GEANT4–a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — Т. 506. — С. 250—303.
9. Going standalone and platform-independent, an example from recent work on the ATLAS Detector Description and interactive data visualization / S. A. Merkt [и др.] // European Physical Journal Web of Conferences. Т. 214. — 07.2019. — С. 02035. — (European Physical Journal Web of Conferences).
10. The HepMC3 event record library for Monte Carlo event generators / A. Buckley [и др.] // Comput. Phys. Commun. — 2021. — Т. 260. — С. 107310. — arXiv: 1912.08005 [hep-ph].
11. ROOT: A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization / I. Antcheva [и др.] // Comput. Phys. Commun. — 2009. — Т. 180. — С. 2499—2512. — arXiv: 1508.07749 [physics.data-an].