

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.1

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ В
ДЕТЕКТОРЕ SPD С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ SPDR00T

Научный руководитель
к.ф.-м.н., в.н.с.

_____ Е. Ю. Солдатов

Студент

_____ Е. Н. Завидов

Москва 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент SPD	5
1.1 Устройство детектора SPD	5
1.2 Идентификация J/ψ -мезонов	6
2 Моделирование	7
2.1 Среда SPDRoot	7
2.1.1 Компоненты кода	7
2.2 Моделирование в SPDRoot	7
3 Заключение	11
Список использованных источников	12

ВВЕДЕНИЕ

В южной точке пересечения пучков строящегося в Дубне коллайдера NICA предлагается установить универсальный детектор спиновой физики (SPD). С его помощью планируется нахождение функций распределения поперечных импульсов глюонов (TMD PDF) в нуклоне с использованием различных жестких проб.

Глюоны, наряду с кварками, являются фундаментальными составляющими нуклона. Спин нуклона зависит от собственного спина валентного и морского кварков (спин-1/2), глюонов (спин-1) и их орбитальных угловых моментов. Несмотря на прогресс, достигнутый за последние десятилетия в понимании вклада кварков в спин нуклонов, вклад же глюонов остаётся менее изученным. Одной из трудностей, препятствующих изучению, является отсутствие прямых проб для определения содержания глюонов в высокоэнергетических процессах.

По астрофизическим и космологическим данным относительная масса видимой барионной материи, свойства которой определяется сильным и электромагнитным взаимодействиями, составляет около 5% массы Вселенной. В отличие от тёмной материи и энергии кажется, что это хорошо изученная тема. Фактически, несмотря на большие достижения в квантовой хромодинамике (КХД), вопрос о том, почему нуклоны именно такие, какими мы их видим, остаётся открытым. Понимание структуры и фундаментальных свойств нуклона непосредственно из динамики его кварков и глюонов - одна из основных нерешенных проблем КХД. Важнейшей характеристикой нуклонов является их спин, равный $\hbar/2$. Он отвечает за такие фундаментальные явления, как магнитный момент протонов и нейтронов, различные фазы вещества при низких температурах, свойства нейтронных звезд и стабильность известной Вселенной.

С экспериментальной точки зрения в диапазоне энергий до 27 ГэВ для получения доступа к содержанию глюонов в адронах хорошо подходит процесс рождения J/ψ -мезонов (Рисунок 1), который свидетельствует о взаимодействии на глюоне. Получившийся чармоний можно идентифицировать по распаду $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$.

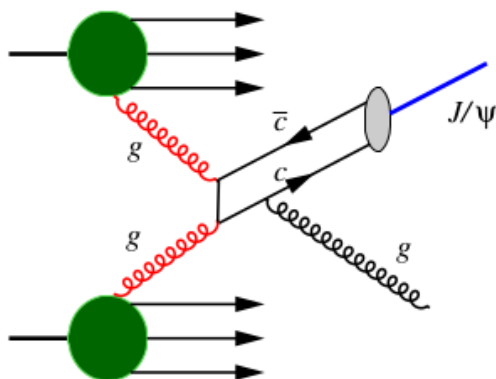


Рисунок 1 — Рождение чармония

Цель данной работы заключается в моделировании процесса распада $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в среде SPDRoot.

Задачи работы:

1. Изучение детекторов, входящих в SPD и их моделей в SPDRoot;
2. Написание программ для моделирования откликов в детекторах;
3. Обработка полученных данных.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

1.1 Устройство детектора SPD

Экспериментальная установка SPD спроектирована как универсальный 4π -детектор с возможностью идентификации частиц и отслеживания их треков. Ввод в эксплуатацию будет производиться в две стадии. В соответствии с техническим описанием [1] в Таблице 1 приведены основные составляющие детектора и их функции. Общая схема SPD представлена на Рисунке 2. Основными особенностями установки являются высокая триггерная частота (~ 4 МГц), необходимая для набора большой статистики (в связи с этим предполагается, что детектор будет работать с online-фильтром), низкая множественность частиц на событие (~ 10 треков). Отличительной чертой эксперимента можно назвать возможность рассмотрения перехода из области низких энергий в область высоких энергий.

Таблица 1 — Основные подсистемы детектора SPD

Подсистема	Стадии участия	Основная цель
Range System (RS)	I+II	Идентификация мюонов в адронном фоне, грубая адронная калориметрия
Electromagnetic Calorimeter (ECal)	II	детектирование γ -квантов
Time-of-Flight system (TOF)	II	идентификация частиц
Focusing Aerogel RICH (FARICH)	II	идентификация частиц
Straw Tracker (ST)	I+II	отслеживание треков, идентификация частиц
Silicon Vertex Detector (SVD)	II	вершинный анализ, отслеживание треков
Micromegas-based Central Tracker (MCT)	I	отслеживание треков
Beam-Beam Counter (BBC)	I+II	локальная поляриметрия, контроль светимости, временная разметка
Zero Degree Calorimeter (ZDC)	I+II	детектирование нейтронов и γ -квантов
Магнит	I+II	Создание магнитного поля 1.0 Тл

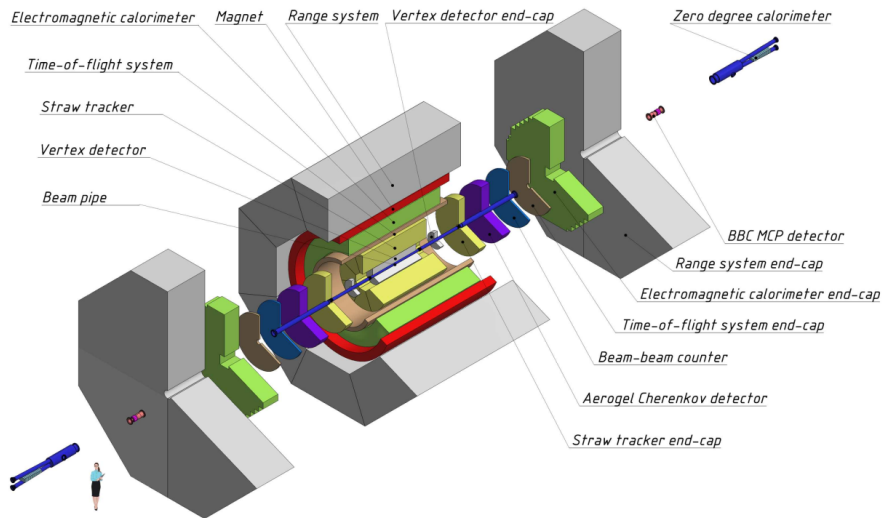


Рисунок 2 — Общая схема детектора SPD

1.2 Идентификация J/ψ -мезонов

Основным детектором, отвечающим за идентификацию J/ψ -мезона по распаду на два мюона является Range System. Он состоит из 20 слоёв железных листов (3 см толщина слоя, 3 см толщина зазора), чередующихся с мини-дрейфовыми трубками. Подобная конструкция хорошо показала свою эффективность на тестах (Рисунок 3). Из рисунка хорошо видно, что мюон, проходящий через детектор, оставляет после себя прямой трек, трек протона имеет прямолинейный участок и заканчивается ливнем, а нейтрон можно определить по отсутствующей траектории влёта.

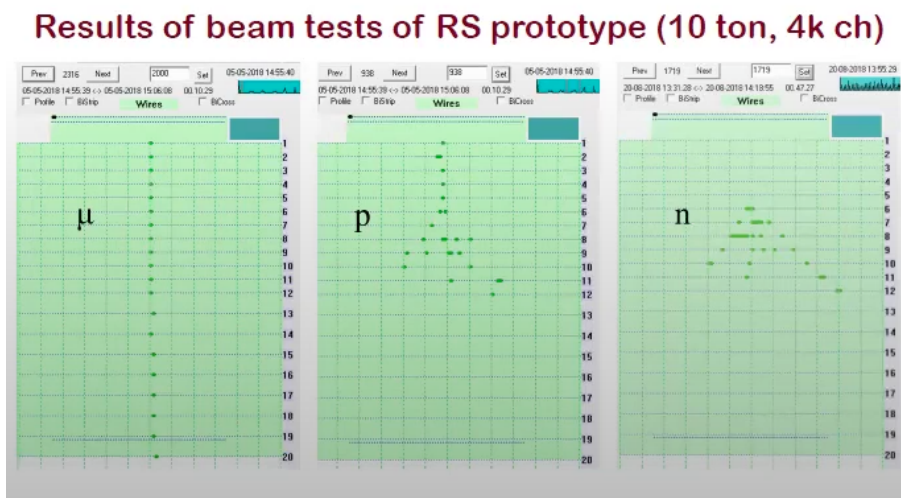


Рисунок 3 — Результаты тестов прототипа Range System

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1 Среда SPDRoot

Среда SPDRoot предназначена для Монте-Карло моделирования и анализа данных эксперимента SPD. Код написан на языке программирования C++ с использованием таких внешних пакетов, как ROOT [2], PYTHIA8 [3], Geant4 [4]. Он позволяет исследовать отклики подсистем в зависимости от энергии пучков, их состава, величины магнитного поля, определённого процесса рождения вторичных частиц.

2.1.1 Компоненты кода

Основными компонентами SPDRoot являются модули для симуляции, определяющие поведение частиц в детекторе. В них задействованы пакеты PYTHIA8 и Geant4. PYTHIA8 используется для генерации событий и, в частности, для выделения распада $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ из всех реакций, возникающих после столкновения. Geant же отвечает за геометрию и отклики детекторов, к каждому из которых написан свой класс. Также важной частью среды являются инструменты для визуализации полученных данных, использующие в качестве своей основы ROOT.

2.2 Моделирование в SPDRoot

В данной работе рассматривался процесс распада $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ при столкновении пучков протонов с $\sqrt{s} = 10$ ГэВ. Для анализа набиралась статистика в 10^5 событий. Собирались отклики во всех детекторах (кроме Straw Tracker, MCT и SVD, поскольку с их запуском разобраться не удалось).

По результатам моделирования обнаружены неточности в представлении мюонного детектора. Это видно по распределению сработавших трубок (Рисунок 4). Эту ошибку подтверждает и распределение частиц по псевдобыстроте, реконструированное по RS (Рисунок 5). На нём видно ещё одну проблему: количество мюонов, зарегистрированное детектором, намного превышает общее число рождённых модельных мюонов. Подобная аномалия обнаружена и во времяпролётной системе. Некорректная работа мюонной системы заметна и на распределение по азимутальному углу, которое сильно отличается от равномерного (Рисунок 6).

Есть проблемы также и с электромагнитным калориметром: ни одну частицу в нём зарегистрировать не удалось.

Распределение срабатываний для время-пролётной системы (Рисунок 7) проблем с геометрией, как с RS, не обнаруживает, однако число мюонов в детекторе превышает число изначально рождённых мюонов (Рисунок 8), что нуждается в корректировке. На последних

двух рисунках также видно, что на гистограмме присутствуют побочные пики, это связано с тем, что плоские камеры, из которых состоит детектор, крепятся «внахлѣст», из-за чего на одну частицу может приходиться несколько срабатываний с близкими координатами.

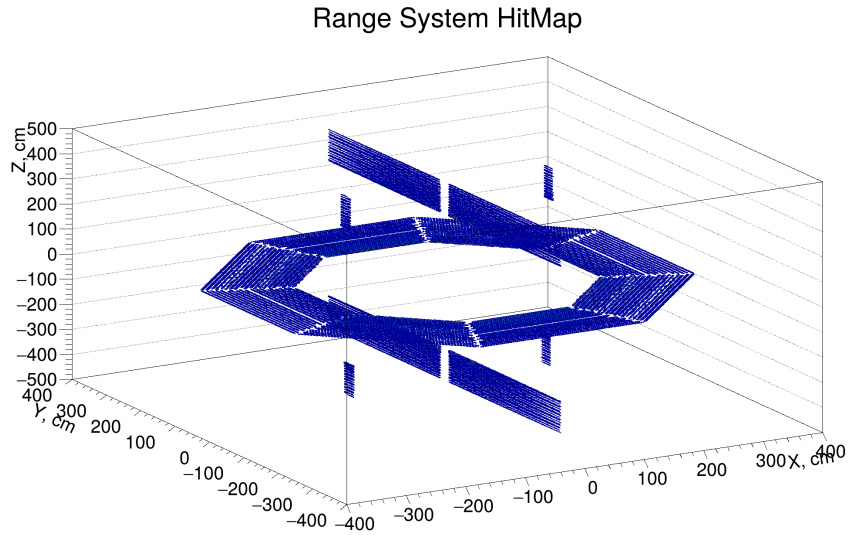


Рисунок 4 — Range System HitMap

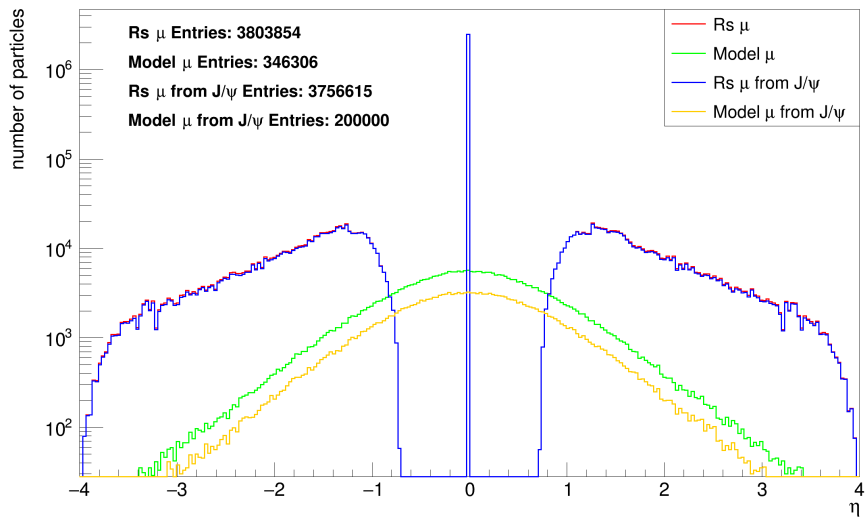


Рисунок 5 — Распределение мюонов в RS по псевдобыстроте

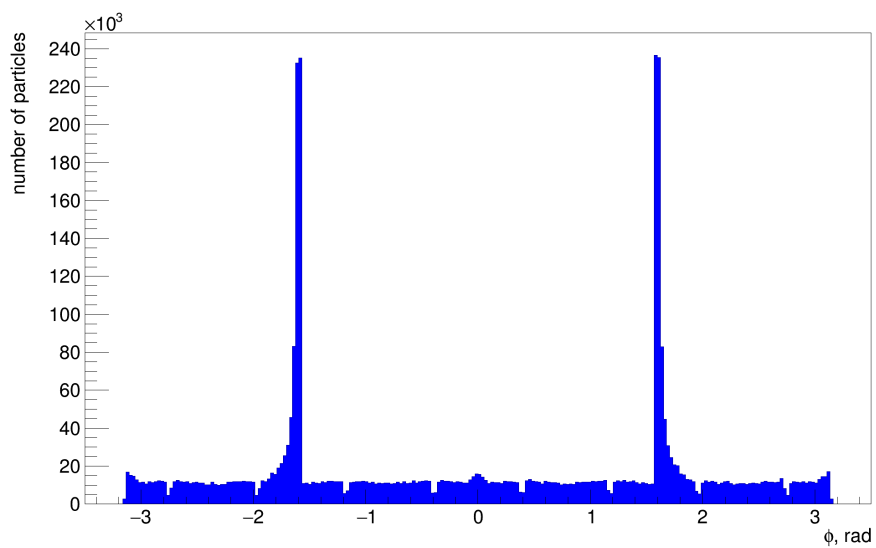


Рисунок 6 — Распределение мюонов в RS по азимутальному углу

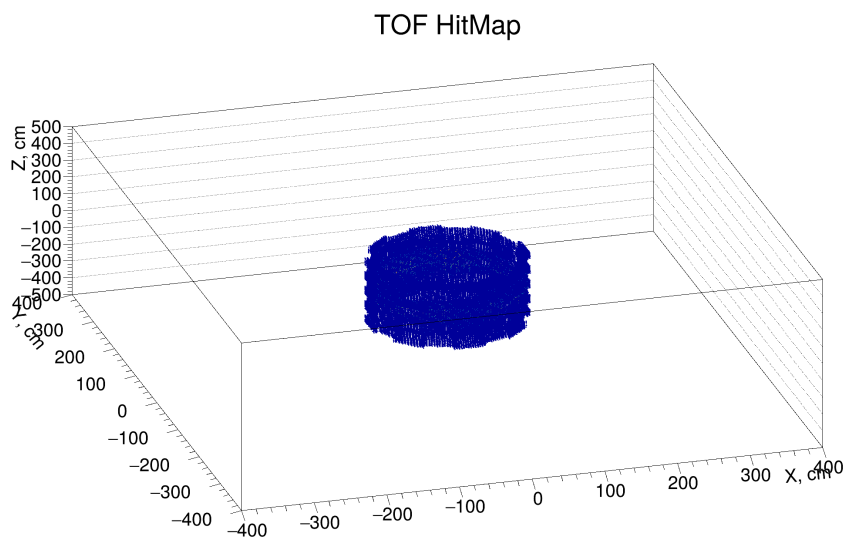


Рисунок 7 — TOF HitMap

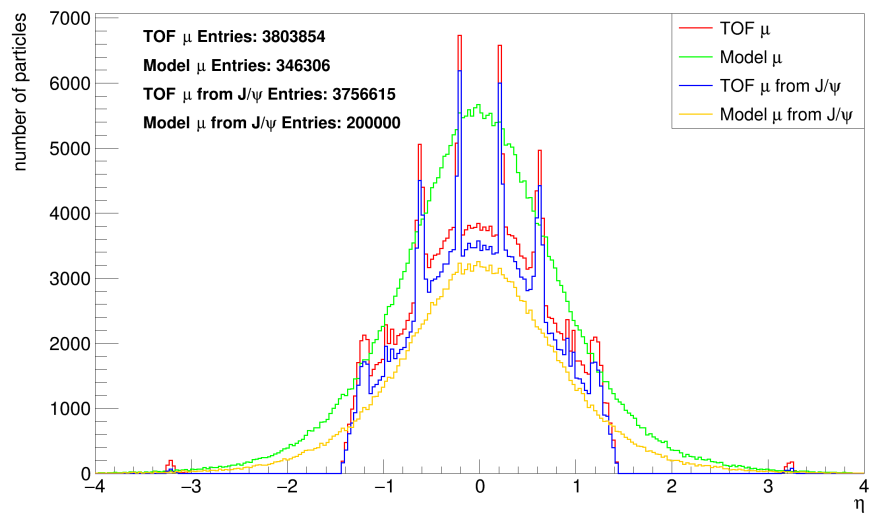


Рисунок 8 — Распределение мюонов в TOF по псевдобыстроте

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы рассмотрен процесс моделирования распада $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ в среде SPDRoot. Успешно сгенерировано 10^5 событий и получены отклики основных подсистем детектора SPD. Результатами данной работы являются:

1. Тестирование Geant4 моделей основных детекторов эксперимента SPD;
2. Обнаружение некорректной модели геометрии Range System.

Дальнейший стадии работы:

1. Детальное изучение работы детекторов SPD, алгоритмов реконструкции частиц в SPDRoot;
2. Корректировка моделей геометрии подсистем в соответствии с результатами тестирования;
3. Комбинирование откликов детекторов для восстановления частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. V. Abazov et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. 4 2024.
2. R. Brun and F. Rademakers. ROOT: An object oriented data analysis framework. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 389:81–86, 1997.
3. Torbjörn Sjöstrand, Stephen Mrenna, and Peter Skands. A brief introduction to pythia 8.1. *Computer Physics Communications*, 178(11):852–867, June 2008.
4. Tullio Basaglia, Zane W. Bell, Daniele D’Agostino, Paul V. Dressendorfer, Simone Giani, Maria Grazia Pia, and Paolo Saracco. Geant4: a game changer in high energy physics and related applicative fields, 2024.