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 СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ДЕТЕКТОРА ВЕАМ-ВЕАМ COUNTER ЭКСПЕРИМЕНТА NICA SPD C ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА GEANT4

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

_____Е. Ю. Солдатов

Студент

____ Е. Н. Завидов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение					
1	Экс 1.1 1.2 1.3	перимент SPD BBC и SPD	5 5 5 6		
2	Moz 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5	целирование Пакет Geant4 Пакет Geant4 Описание геометрии Описание геометрии Настройка материалов и поверхностей Описание Симуляция попадания частиц в тайл Описание модели 2.5.1 Тестирование нулевого тайла 2.5.2 Сравнение экспериментальных и модельных данных	7 7 8 9 10 11 11 12		
3	Зак	лючение	15		
Cı	Список использованных источников				

введение

По астрофизическим и космологическим данным относительная масса видимой барионной материи, свойства которой определяется сильным и электромагнитным взаимодействиями, составляет около 5% массы Вселенной. В отличии 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, остается 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.

Глюоны, наряду с кварками, являются фундаментальными составляющими нуклона. Спин нуклона зависит от собственного спина валентных и морских 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.

Коллаборация Spin Physics Detector (SPD) предлагает установить универсальный детектор в южной точке взаимодействия коллайдера NICA, который строится в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна), для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других связанных со спином процессов и явлений на поляризованных пучках протонов и дейтронов при энергии столкновения до 27 ГэВ и светимости до 1032 см⁻² с⁻¹ [1].

Для контроля поляриметрии пучка, а такжке для мониторинга столкновений в эксперименте симметрично относительно точки взаимодействия будут установлены две плоскости сцинтиляционного детектора Beam-Beam Counter (BBC). Цель данной работы заключается в создании Geant4 модели детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD.

Задачи работы:

- 1. Создание модели детектора ВВС;
- 2. Настройка физических процессов, связанных с работой детектора;
- 3. Генерация моделированных данных;
- 4. Сравнение моделированных данных с экспериментальными.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

1.1 BBC и SPD

Экспериментальная установка SPD спроектирована как универсальный 4π -детектор с возможностью идентификации частиц и отслеживания их треков. Beam-Beam Counter будет располагаться симметрично относительно точки взаимодействия на расстоянии 1716 мм от неё (Рис. 1) [2].



Рисунок 1 - SPD и BBC

1.2 Конструкция ВВС

ВВС представляет собой сцинтиляционный детектор, состоящий из 16 секторов [2] (чертёж одного сектора изображён на Рис. 2). Один сектор включает в себя 13 рядов (в настоящее время планируется отказ от самого дальнего от центра ряда). Нулевой и первый ряды (от центра, далее будет использована эта нумерация) содержат по одному тайлу, остальные ряды - по два. Тайлы выполнены из пластикового сцинтиллятора, в состав которого входят полистирол - 98.0 - 98.5%, п-терфенил - 1.5 - 2.0%, РОРОР - 0.01 - 0.04%. Внутри каждого тайла сделаны углубления для спектросмещающего волокна, необходимого для переизлучения света одного диапазона длин волн в свет другого

диапазона, а также для транспортировки фотонов к регистрирующим элементам. Волокно внутри канавки закрепляется с помощью прозрачного для сцинтиляционных фотонов клея. В эксперименте будет использовано спектросмещающее волокно марки Kuraray Y11 S-типа с одинарной оболочкой и внешним диаметром в 1 мм.



Рисунок 2 — Чертёж ВВС

1.3 Физика ВВС

Для локальной поляриметрии пучка необходимо измерять азимутальные асимметрии, которые возникают при столкновении протонов, поляризованных перпендикулярно импульсу. Чтобы это сделать нужно посчитать число частиц, прилетевших в детектор при разных направлениях поляризации (N^{\uparrow} - поляризация «вверх» перпендикулярно спину, N^{\downarrow} - поляризация «вниз» перпендикулярно спину). По этим данным с помощью формулы (1) грубо рассчитываются асимметрии:

$$A_N^{raw} = \frac{N^{\uparrow} - N^{\downarrow}}{N^{\uparrow} + N^{\downarrow}} \tag{1}$$

Зная теоретическое значение A_N^{theor} , можно найти поляризацию:

$$P = \frac{A_N^{raw}}{A_N^{theor}} \tag{2}$$

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1 Пакет Geant4

Geant4 (от англ. GEometry ANd Tracking — «геометрия и трекинг») — это программный модуль, предназначенный для моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество с применением методов Монте-Карло [3].

Разработанный коллаборацией Geant4 Collaboration (CERN и другие научные институты), этот пакет написан на языке C++ с использованием объектно-ориентированного подхода. Первые версии Geant4 были выпущены в 1998 году и с тех пор активно применяются в физике высоких энергий, ядерных исследованиях, медицинской физике и других областях.

GEANT4 позволяет создавать детальные геометрические и физические модели детекторов частиц, состоящие из множества компонентов разной формы и материалов. Кроме того, GEANT4 поддерживает визуализацию результатов моделирования с помощью программы ROOT [4], включая построение графиков. Также в пакете реализованы инструменты для визуализации событий — отображения геометрии моделируемой установки, треков первичных и вторичных частиц, что помогает анализировать процессы взаимодействия.

GEANT4 реализует моделирование взаимодействия частиц посредством системы классов, сгруппированных по функциональному признаку. Основные категории включают:

- 1. Управление процессом моделирования: Классы Run и Event определяют последовательность операций на различных этапах симуляции. Они обеспечивают возможность промежуточного анализа данных, регистрации информации о событиях, а отбора вторичных частиц;
- 2. Отслеживание частиц: Классы Tracking и Track отвечают за трассировку траекторий частиц в пределах геометрической структуры детектора. Они включают механизмы транспортировки частиц, контроля их состояний и накопления данных о взаимодействиях с веществом;
- 3. **Физическое моделирование**: Класс Physics управляет всеми физическими процессами, происходящими при взаимодействии частиц с материалами;
- 4. **Геометрическое описание детектора**: Класс Geometry служит для задания геометрической структуры детектора, включая форму, размеры и пространственное расположение его элементов.

2.2 Описание геометрии

Для описания геометрии тайлов, из которых состоит BBC, изначально планировалось использовать пакет CADMesh [5]. Он позволяет создавать тела при инициализации геометрии напрямую из stl-файлов, созданных в САПР. Для полученного тела доступны любые стандартные процедуры в Geant4. Выбор этого пакета был обусловлен наличием сделанной заранее cad-модели. Её имплементация в Geant занимает несколько строк кода, в то время как описание тех же самых параметров напрямую примитивами занимает большее количество строк и времени их написания. Визуализация сгенерированного CADMesh объекта представлена на Рис. 3 (а). Как видно, модель содержит большое количество рёбер, что усложняет симуляцию и увеличивает время расчёта, также оказалось, что при одинаковых геометрических параметрах, тайл, описанный при помощи стандартных примитивов Geant4 (Puc. 3 (б)) показывает результаты, которые в большей степени соответствуют действительности, поэтому в дальнейшем в работе использовалась именно она.



Рисунок 3 — Модели тайла: (a) - CADMesh, (б) - Geant4 примитивы

2.3 Настройка материалов и поверхностей

Для моделирования процесса сцинтилляции необходимо подключить пакет физических процессов **G4OpticalPhysics**. Также требуется указать не только химический состав используемых материалов, но и их оптические характеристики. В Таблице 1 описаны оптические параметры материалов компонентов тайлов для моделирования прототипа BBC.

Название		2
параметра	Описание	Эпачение
Resolution Scale	Доля энергетического спектра, участвующего в	1.0
	генерации	
Scintillation Yield	Световыход на единицу	12000 <u>1</u> MəB
	энергопотерь	
Scintillation time constant 1	Время высвечивания быстрой	2.4 нс
	компоненты	
	сцинтилляционной вспышки	
Scintillation time constant 2	Время высвечивания	5 нс
	медленной компоненты	
	сцинтилляционной вспышки	
Scintillation Yield 1	Доля быстрой компоненты в	1.0
	генерации	
Scintillation Yield 2	Доля медленной компоненты	0.0
	в генерации	

Таблица 1 — Параметры материала сцинтиллятора

Помимо оптических свойств самого сцинтиллятора в Geant4 важно настроить физические свойста поверхностей раздела двух сред. Если этого не сделать, модель будет некорректно описывать распространение вторичных частиц. Для оптических фотонов, которые высвечиваются в тайле, настроены следующие коэффициенты прохождения: воздух - тайл - 0.99, тайл - воздух -0.8. Выбор различных коэффициентов, несмотря на отсутствие «физического смысла», был сделан с целью проверки отклика тайла на попавшую в него частицу без учёта влияния фотонов от соседних элементов сектора. В дальнейшем от такого трюка планируется отказаться, задав одинаковые значения коэффициентов.

2.4 Симуляция попадания частиц в тайл

Одним из ключевых этапов построения модели экспериментальной установки является задание физических процессов, происходящих в детекторе в процессе его работы. В Geant4 большинство таких процессов сгруппированы в программные пакеты, выбор которых зависит от специфики моделируемой задачи. В случае сцинтилляционного детектора основными являются электромагнитные процессы (в частности, ионизационные потери заряженных частиц при прохождении через объём сцинтиллятора) и оптические процессы, отвечающие за распространение оптических фотонов.

Для моделирования прототипа детектора BBC выбраны следующие модули:

- 1. **FTFP_BERT** пакет, рекомендованный для задач, связанных с физикой высоких энергий. В его состав входят стандартные электромагнитные процессы, реализованные через G4EmStandardPhysics_option4;
- 2. G4OpticalPhysics дополнительный пакет, предназначенный для описания оптических процессов, не входящий в состав FTFP_BERT и подключаемый отдельно.

После настройки геометрии, материалов и физических процессов произведены тестовые запуски протонов с различными энергиями в модель тайла нулевого ряда. Результаты взаимодействия показаны на Рис. 4.



Рисунок 4 — Взаимодействие первичного протона с энергией 30 МэВ с элементом сектора

Видно, что рождённые в правом сцинтилляторе фотоны, не переходят в соседний тайл, что соответствует ожидаемому результату.

2.5 Тестирование модели

2.5.1 Тестирование нулевого тайла

Для нулевого тайла проведена симуляция, в ходе которой последний перпендикулярно поверхности облучался протонами с энергией 4 ГэВ. Схема проведения «эксперимента» представлена на Рис. 5. В качестве регистрирующего элемента использовался сам объём элемента сектора. В коде это реализуется присваиванием объёму тайла так называемого чувствительного объёма, с помощью которого можно получить информацию о проходящих через данную область пространства частицах (в частности, о высвеченных фотонах). Стрелкой на изображении показано направление движения протонов (перпендикулярно поверхности).



Рисунок 5 — Схема проведения моделирования

Таким спобом получены распределения рождённых в тайле фотонов по их числу и длинам волн (Рис. 6). Распределение числа фотонов соответствует ожидаемому виду свёртки распределений Ландау и Гаусса для ионизационных потерь частиц в слое сцинтиллятора. Эмисионный спектр, также соответствует экспериментальным данным, полученным ранее для сцинтилляторов на основе полистирола [6].



Рисунок 6 — Распределения из симуляции: (а) - по числу фотонов, (б) - по длинам волн

2.5.2 Сравнение экспериментальных и модельных данных

В лаборатории проведён эксперимент, в ходе которого тайл из четвёртого ряда (Рис. 2) облучался рентгеновскими γ-квантами. Цель измерений - изучение среднего/максимального отклика тайла на частицы в зависимости от положения точки взаимодействия. Относительно быстрый способ это сделать - пройтись по тайлу «решёткой» с заданным шагом и измерить выходной ток, полученный с кремениевых фотоумножителей и дальнейшей фронтенд электроники. Схема установки показана на Рис. 7. В ней используются АМРТЕК Mini-X X-гау трубка (отмеченая стрелкой), шаговый двигатель NEMA17, микрокотроллер Arduino CNC Shield, источник питания САЕN DT5202. Вся конструкция помещена в изолирующий от света короб.



Рисунок 7 — Схема экспериментальной установки

По полученным данных построена карта откликов (Рис. 8). По осям X и Y отложены координаты в миллиметрах, по оси Z - выходной ток в микроамперах. Шаг, с которым проводились измерения, составляет 1 мм.



Рисунок 8 — Карта откликов тайла

Аналогичным образом построена модель эксперимента, использованная в симуляции (Рис. 9). Она также облучалась γ -квантами с энергией 50 кЭв, но в отличие от эксперимента в симуляции измеряемым параметром было число фотонов, попавшее в «счётчик».



Рисунок 9 — Схема модели

Для каждой точки проводилась серия из 10⁴ измерений, после чего бралось среднее значение числа фотонов зарагистрированных фотонов. По полученным данным построена карта откликов модели (Рис. 10).



Рисунок 10 — Карта откликов тайла

Видна корреляция данных из симуляции с экспериментальными данными, что на качественном уровне подтверждает корректность модели.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе реализованы модели двух тайлов сцинтилляционного детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD на коллайдере NICA с использованием программного пакета Geant4. Основное внимание было уделено созданию геометрии элементов детектора, настройке физических процессов и параметров материалов, а также проверке корректности работы модели путём анализа результатов симуляции экспериментальных данных.

На начальном этапе были изучены конструктивные особенности детектора BBC, включая состав и структуру тайлов, используемые материалы и оптические компоненты. Затем реализованы геометрические модели элементов сектора BBC, причём были рассмотрены два подхода: с использованием пакета CADMesh и стандартных примитивов Geant4. По результатам тестов был выбран второй подход, обеспечивающий большую физическую достоверность и меньшее время симуляции.

В рамках тестирования модели были проведены симуляции попадания протонов в нулевой тайл. Полученные распределения по числу и энергиям сцинтилляционных фотонов соответствовали ожидаемым физическим закономерностям и показали корректную работу модели.

Дополнительно проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях при облучении тайла рентгеновским излучением. Полученные результаты качественно согласуются с модельными предсказаниями, что подтверждает реалистичность построенной симуляции.

Дальнейшеие этапы работы:

- 1. Реализация остальных элементов сектора детектора;
- 2. Добавление к модели спектросмещающего волокна и его настройка;
- 3. Создание упрощённой модели электроники для снятия сигнала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. V. M. Abazov et al. Conceptual design of the Spin Physics Detector. 1 2021.
- 2. V. Abazov et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. 4 2024.
- 3. 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.
- 4. R. Brun and F. Rademakers. ROOT: An object oriented data analysis framework. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 389:81–86, 1997.
- 5. C. M. Poole, I. Cornelius, J. V. Trapp, and C. M. Langton. A CAD Interface for GEANT4. Australasian Physical & Engineering Science in Medicine, 2012.
- Marliyadi Pancoko, Hafni Lissa Nuri, Azwar Manaf, Arbi Dimyati, and Abdul Jami. Synthesis and characterization of a polystyrene-based scintillator for gamma detection. vol, 25:2023, 2023.