

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 УТОЧНЁННОЙ  
GEANT4-МОДЕЛИ ДЕТЕКТОРА ВВС  
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

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

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Студент

\_\_\_\_\_ Е. Н. Завидов

Москва 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>5</b>
1.1 BBC и SPD . . . . .	5
1.2 Конструкция BBC . . . . .	5
<b>2 Моделирование</b>	<b>7</b>
2.1 Пакет Geant4 . . . . .	7
2.2 Геометрическое описание модели тайла . . . . .	8
2.3 Настройка материалов и поверхностей . . . . .	9
2.4 Симуляция попадания частиц в тайл . . . . .	9
2.5 Валидация модели тайла . . . . .	10
2.5.1 Тестирование рентгеновской трубкой . . . . .	10
2.5.2 Мюонный телескоп . . . . .	13
2.6 Оптоволокно . . . . .	14
<b>3 Заключение</b>	<b>16</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>17</b>

# ВВЕДЕНИЕ

По астрофизическим и космологическим данным относительная масса видимой барионной материи, свойства которой определяются сильным и электромагнитным взаимодействиями, составляет около 5% массы Вселенной. 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夸арков 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夸арками, являются фундаментальными составляющими нуклона. Спин нуклона зависит от собственного спина валентных и морских夸арков (спин-1/2), глюонов (спин-1) и их орбитальных угловых моментов. Несмотря на прогресс, достигнутый за последние десятилетия в понимании вклада夸арков в спин нуклонов, вклад же глюонов остаётся менее изученным. Одной из трудностей, препятствующих изучению, является отсутствие прямых способов определения содержания глюонов в высокоэнергетических процессах.

Коллаборация Spin Physics Detector (SPD) планирует 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 столкновений до 27 ГэВ и светимости до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [1].

Для контроля поляризации пучка, а также для измерения светимости в эксперименте симметрично относительно точки взаимодействия будут установлены две плоскости сцинтиляционного детектора Beam-Beam Counter (BBC).

**Цель** данной работы заключается в создании уточнённой Geant4 модели детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD.

**Задачи работы:**

1. Проверка модели тайла;
2. Создание и тестирование модели оптоволокна.

# 1. ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

## 1.1 BBC и SPD

Экспериментальная установка SPD спроектирована как универсальный  $4\pi$ -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].

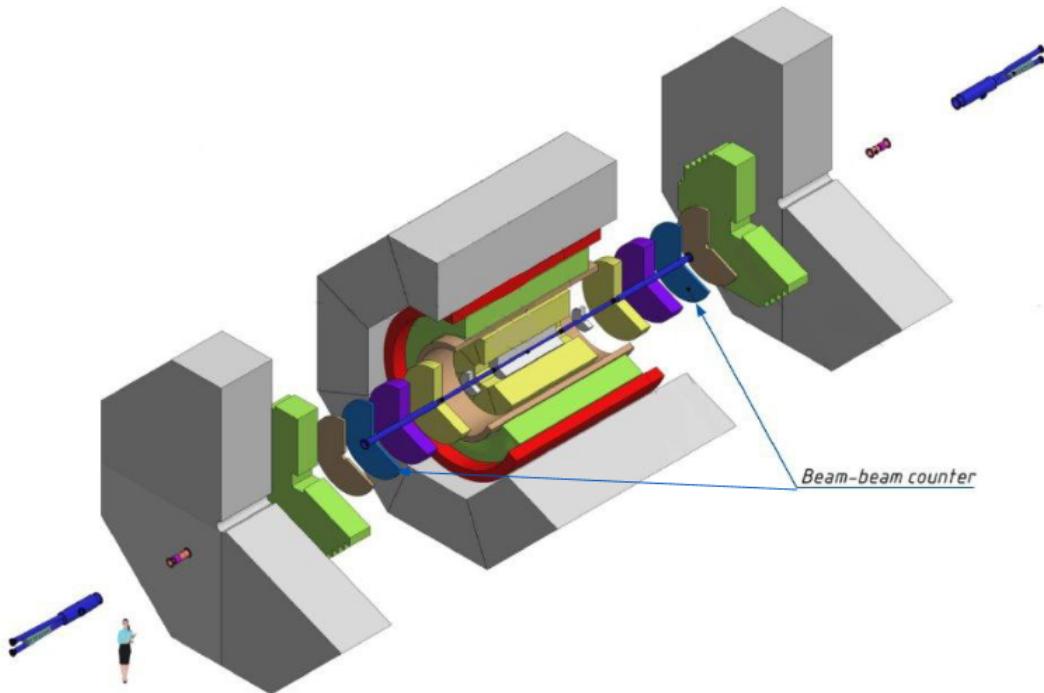


Рисунок 1 — Схема эксперимента SPD с отмеченным детектором BBC

## 1.2 Конструкция BBC

BBC 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%, POPOP - 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.

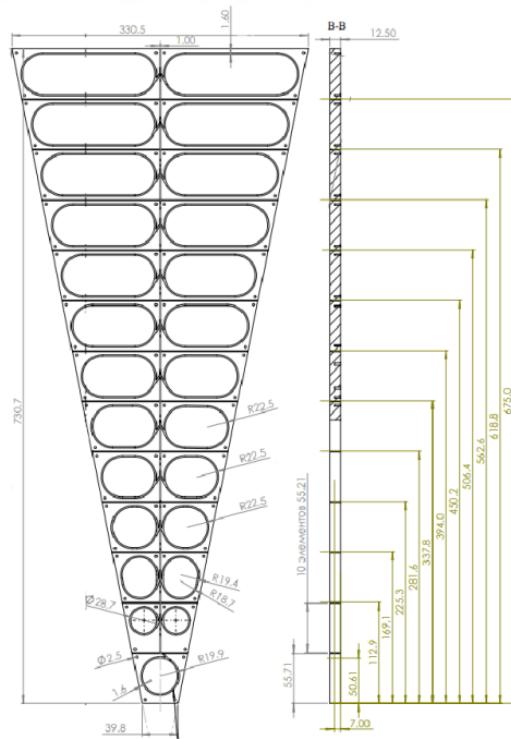


Рисунок 2 — Чертёж сектора детектора BBC

## 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 Геометрическое описание модели тайла

Для описания геометрии тайлов, из которых состоит ВВС, изначально планировалось использовать пакет CADMesh [5]. Он позволяет создавать тела при инициализации геометрии напрямую из stl-файлов, созданных в САПР. Для полученного из CADMesh объекта 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 (Рис. 3 (б)) показывает результаты, которые в большей степени соответствуют действительности, поэтому в дальнейшем в работе использовалась именно она.

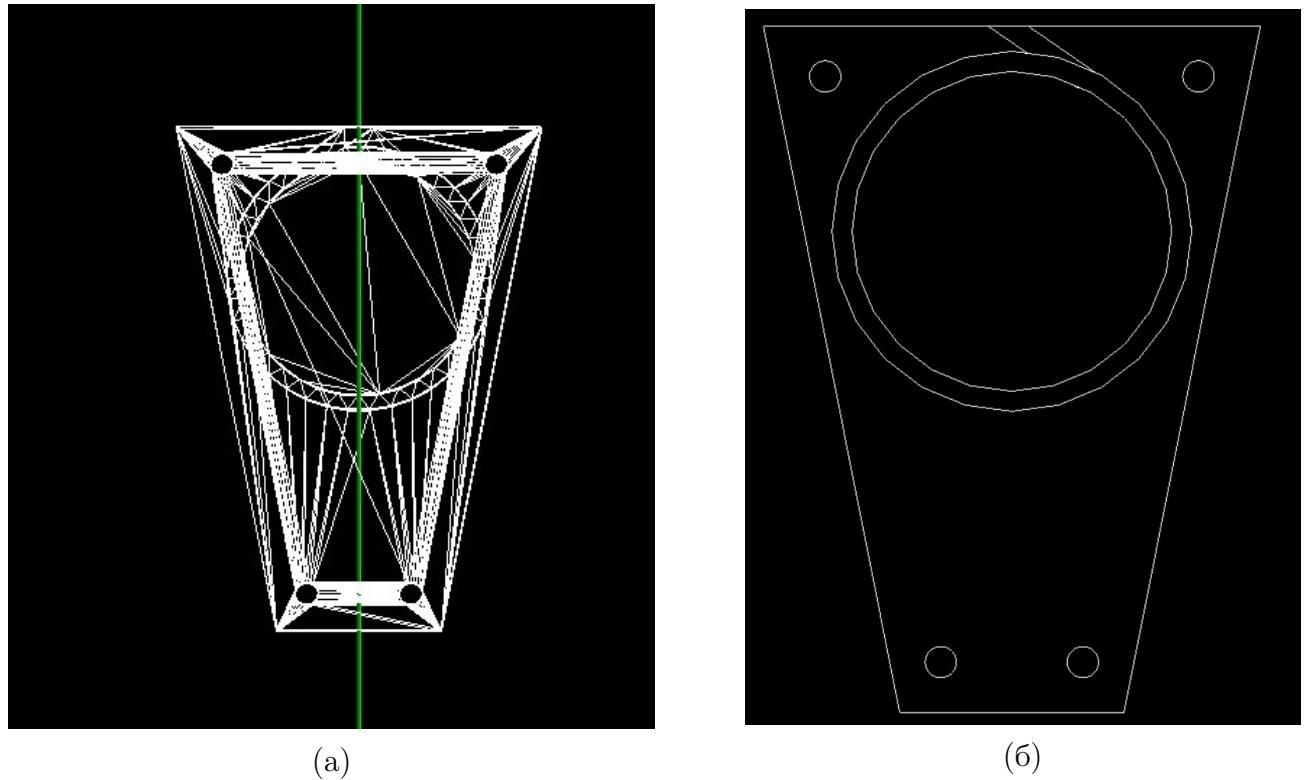


Рисунок 3 — Модели тайла: (а) - CADMesh, (б) - Geant4 примитивы

## 2.3 Настройка материалов и поверхностей

Для моделирования процесса сцинтиляции 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.

Таблица 1 — Параметры материала сцинтиллятора

Название параметра	Описание	Значение
Resolution Scale	Доля энергетического спектра, участвующего в генерации	1.0
Scintillation Yield	Световойход на единицу энергопотерь	$12000 \frac{1}{\text{МэВ}}$
Scintillation time constant 1	Время высвечивания быстрой компоненты сцинтиляционной вспышки	2.4 нс
Scintillation time constant 2	Время высвечивания медленной компоненты сцинтиляционной вспышки	5 нс
Scintillation Yield 1	Доля быстрой компоненты в генерации	1.0
Scintillation Yield 2	Доля медленной компоненты в генерации	0.0

## 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 сцинтиляционного 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 ВВС 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.

## 2.5 Валидация модели тайла

### 2.5.1 Тестирование рентгеновской трубкой

В лаборатории проведён эксперимент, в ходе которого тайл из чётвёртого ряда (Рис. 2) облучался рентгеновскими  $\gamma$ -квантами. Цель измерений — изучение среднего/максимального отклика тайла на частицы в зависимости от положения точки взаимодействия. Для этого с шагом 1 мм изменялось положение рентгеновской трубки, и измерялся выходной ток, полученный с кремниевых фотоумножителей и дальнейшей фронтенд электроники. Фотография установки показана на Рис. 4. В ней используются АМРТЕК Mini-X X-ray трубка (отмечена стрелкой), шаговый двигатель NEMA17, микроконтроллер Arduino CNC Shield, источник питания CAEN DT5202. Вся конструкция помещена в изолирующий от света короб.

Моделирование выполнено в соответствии со схемой, представленной на Рис. 5. По всей поверхности тайла в направлении, перпендикулярном её плоскости, с шагом 1 мм (далее — базисная сетка) генерировались  $\gamma$ -кванты, энергетический спектр которых соответствовал спектру рентгеновской трубы. Для каждого узла сетки моделировалось по  $10^4$  событий. В целях увеличения однородности облучения всей поверхности тайла координаты точки входа фотона в каждом событии дополнительно размывались путём добавления случайного смещения в пределах круга радиусом 2.5 мм относительно узла сетки.

Исследование проведено для различных типов поверхности элемента сектора (гладкая, шероховатая), коэффициентов отражения фотонов на внутренней границе (в диапазоне от 0.7 до 0.9), а также для двух моделей обработки оптических границ (glisur и unified). На основе анализа результатов окончательно была выбрана модель unified с ненастроенным коэффициентом отражения и шероховатой поверхностью.

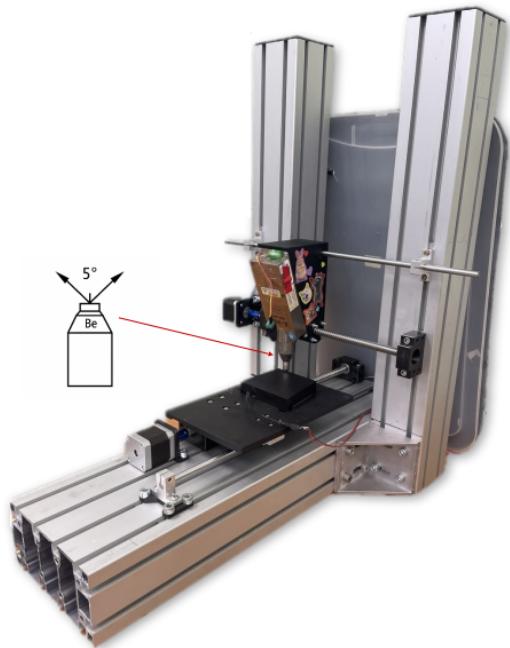


Рисунок 4 — Фотография экспериментальной установки

Внутреннее кольцо (обозначено зелёным цветом на Рис. 5), изготовленное из полиметилметакрилата (PMMA, материал внешней оболочки спектротометра), выполняло роль детектора фотонов.

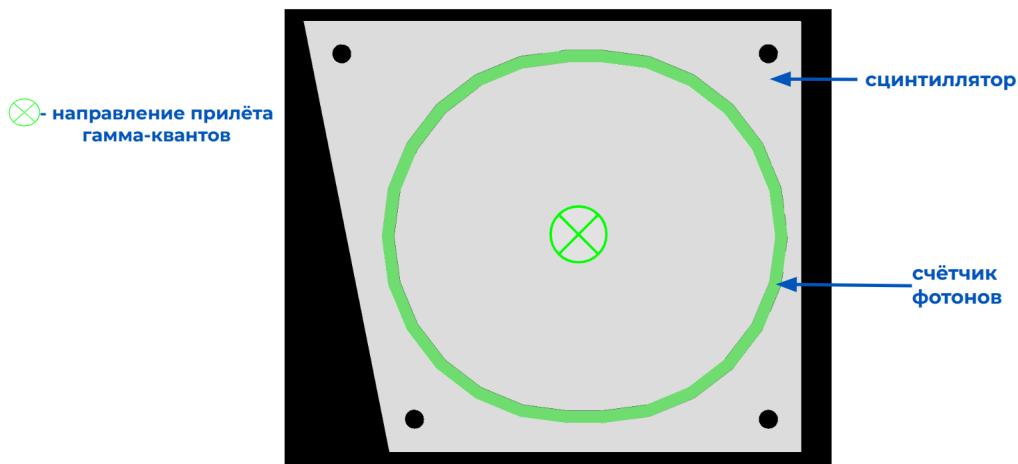


Рисунок 5 — Схема проведения моделирования облучения тайла  $\gamma$ -квантами

Результаты эксперимента и моделирования представлены на Рис. 6

Для количественной оценки расхождения между результатами моделирования и эксперимента полученные гистограммы были пронормированы друг на друга, результат представлен на Рис. 7. На распределении отношения наблюдаются краевые эффекты, обусловленные, вероятно, погрешностью позиционирования тайла в ходе эксперимента. Также по поверхности сцин-

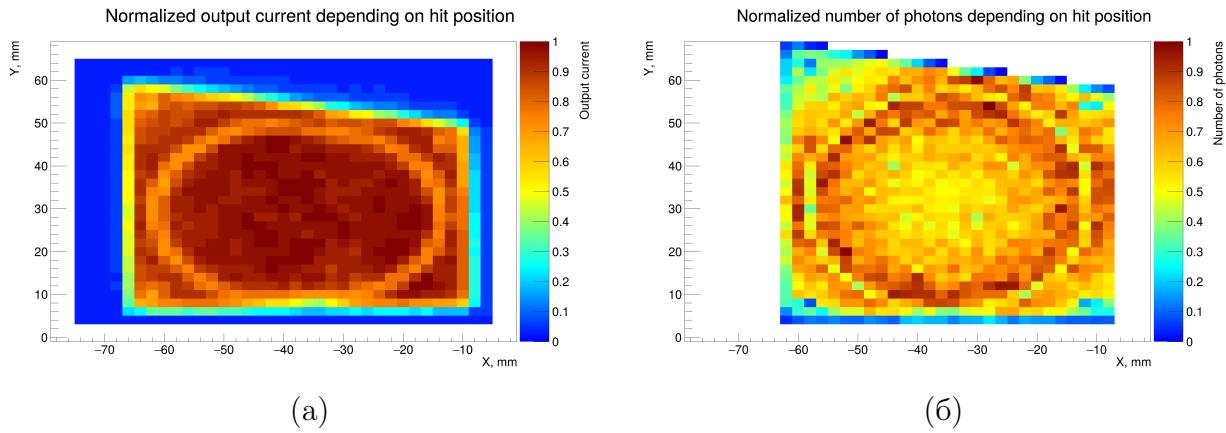


Рисунок 6 — (а) - экспериментальные данные, (б) - данные модели

тиллятора заметна неоднородность значений. Её однозначная интерпретация затруднена из-за одновременного влияния множества факторов, включая упомянутые погрешности позиционирования.

Тем не менее, среднее значение отношения по всей площади тайла близко к единице, что на качественном уровне свидетельствует о согласии между моделью и экспериментом.

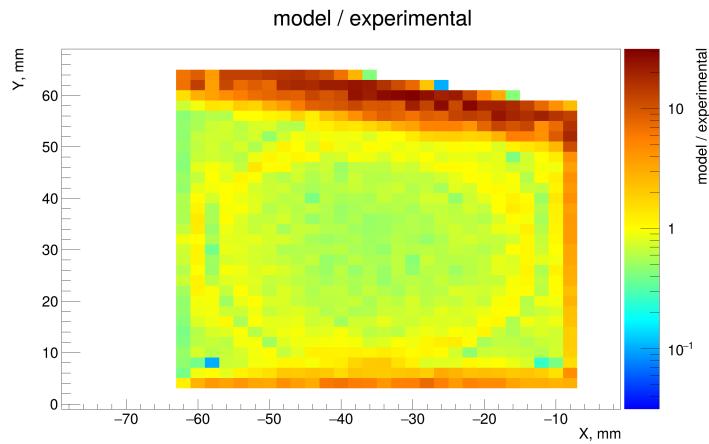


Рисунок 7 — Модельные данные, нормированные на экспериментальные

## 2.5.2 Мюонный телескоп

С целью валидации модели выполнено моделирование процесса регистрации мюонов с энергией 1 ГэВ. В симуляции тайл, конфигурация которого идентична приведённой на Рис. 5, облучался пучком мюонов под различными углами. Полученное в результате распределение событий по энерговыделению сравнивалось с экспериментальными данными, набранными восьмитайловым телескопом. Для корректного сравнения смоделированное энерговыделение было пересчитано в эквивалентное число фотоэлектронов с учётом коэффициентов потерь в волокне [6]. Как видно из Рис. 8, наблюдаемое распределение (б) демонстрирует качественное совпадение с экспериментальным профилем (а). Наличие же в модельных данных второго пика связано с мюонами, попавшими в канавку, толщина которой примерно в три раза меньше толщины тайла. Данное согласие свидетельствует о корректности описания процессов взаимодействия в рамках разработанной модели.

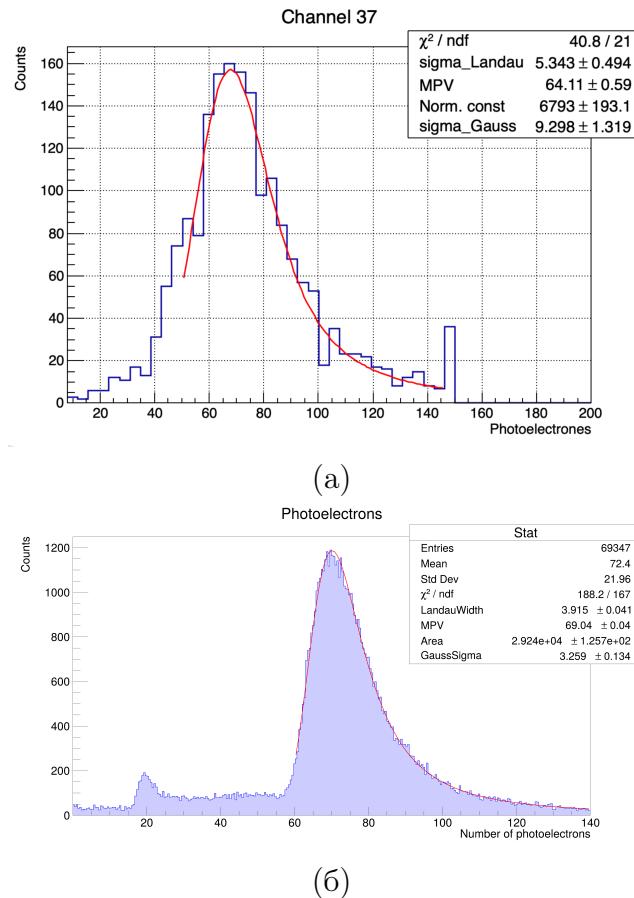


Рисунок 8 — (а) - экспериментальные данные, (б) - данные модели

## 2.6 Оптоволокно

Начата работа с оптоволокном. Его структура и созданная Geant4 модель приведены на Рис. 9. Оптическое волокно марки Kuraray Y-11 представляет собой двухслойный сцинтиляционный волновод, широко применяемый в физике высоких энергий, ядерной медицине и экспериментальной физике для регистрации ионизирующего излучения. Его конструкция и состав оптимизированы для эффективного сбора и передачи слабых световых сигналов.

Волокно имеет коаксиальную структуру. Сердцевина (core) диаметром 1.0 мм изготовлена из полистирола (PS), легированного пара-терфенилом (pTr, 1%) и 3-hydroxyflavone (3HF, 0.01%), который выступает в роли первичного сцинтиллятора. Этот состав обеспечивает конверсию энергии ионизирующей частицы в сцинтиляционный свет с максимумом излучения в сине-фиолетовой области спектра ( $\lambda_{em} \approx 476$  нм). Оболочка (cladding) толщиной  $\approx 0.02$  мм выполнена из полиметилметакрилата (PMMA) с более низким показателем преломления ( $n_{clad} \approx 1.49$ ), что создает условие для полного внутреннего отражения на границе раздела сердцевина-оболочка ( $n_{core} \approx 1.59$ ).

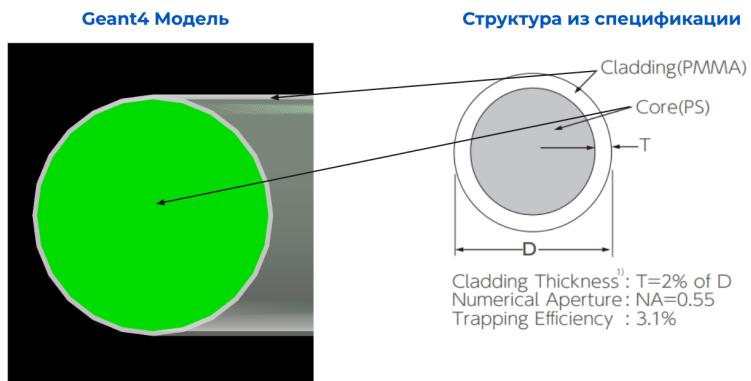


Рисунок 9 — Структура оптоволокна и модели

С использованием разработанной модели прямого участка волокна был проведён эксперимент, схема которого представлена на Рис. 10. В торцевую часть оптоволокна подавалось излучение, спектр которого соответствовал спектру сцинтиляции, возникающей при взаимодействии сцинтиллятора с протоном. Для исключения фоновых фотонов, изначально не попавших в волокно, использовалась свинцовая защитная пластина.

Для количественной оценки светопередачи в каждом сантиметре длины волокна задавался чувствительный объём, регистрирующий поток фотонов, прошедших через соответствующее поперечное сечение. Это позволило рассчитать удельные оптические потери в материале волокна. На основании полученных экспериментальных данных построена зависимость числа фотонов от длины пройденного в волокне пути (Рис. 11).

Наблюдаемая зависимость демонстрирует существенное расхождение с ожидаемым экспоненциальным законом затухания, описанным в литературе [6]. В ходе серии дополнительных моделей с вариацией параметров установлено, что основным фактором, влияющим на форму данной зависимости, может являться значение параметра WLSABSLLENGTH, определяющего длину поглощения в шифтере. Корректировка данного параметра, а также последующая оцифровка спектров оптических потерь, предоставляемых производителем волокна, запланированы для выполнения в следующем семестре.

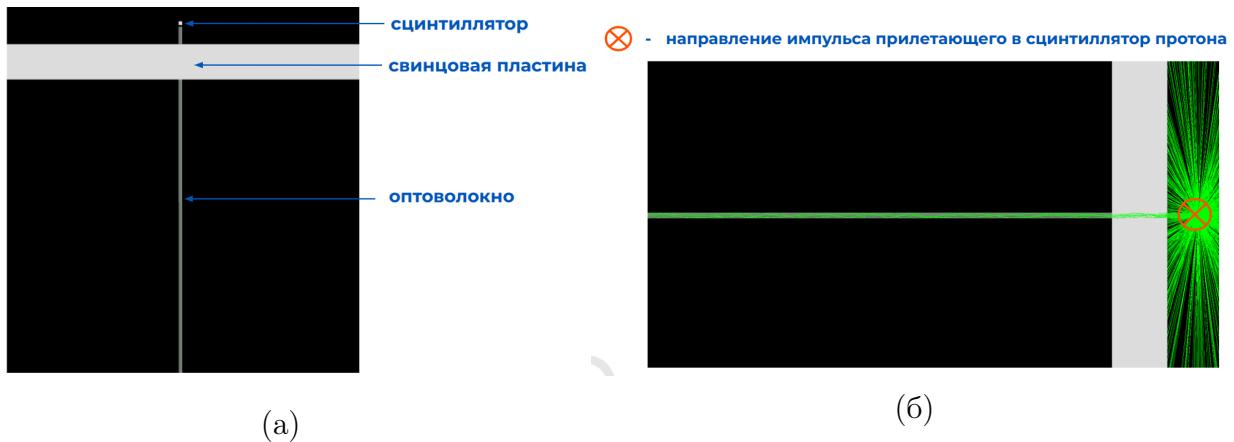


Рисунок 10 — (а) - общая схема модели, (б) - получение света сцинтиллятора

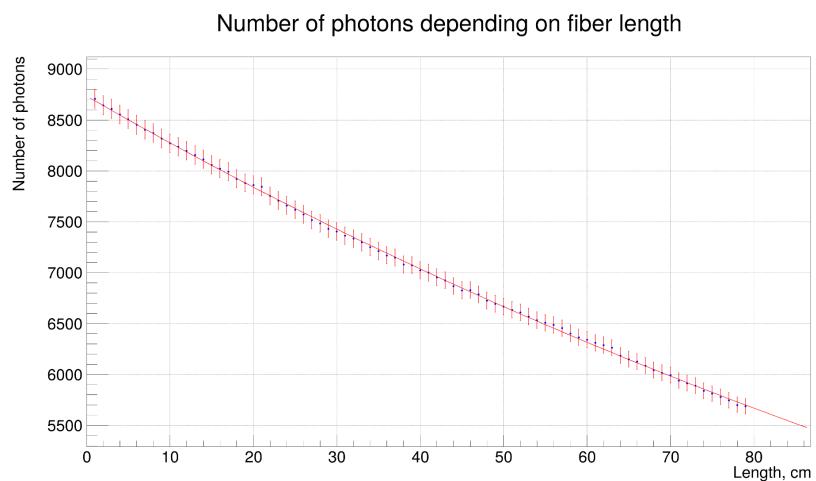


Рисунок 11 — Светопотери в оптоволокне

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была проведена разработка и валидация уточнённой Geant4-модели элементов сектора детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD. Основные результаты работы заключаются в создании и успешной валидации геометрической и физической модели сцинтилляционного тайла. В качестве основы была выбрана модель, построенная с использованием стандартных примитивов Geant4, как более эффективная и точная по сравнению с альтернативной CADMesh-моделью. Проведена комплексная валидация модели тайла. Сравнение с экспериментальными данными, полученными при облучении прототипа рентгеновской трубкой, показало хорошее качественное и количественное согласие распределений сбора света по поверхности тайла. Моделирование прохождения мюонов через тайл продемонстрировало корректность описания энерговыделения и последующего пересчёта в число фотоэлектронов, что также согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Эти результаты подтверждают адекватность выбранных геометрических параметров, оптических свойств материалов и физических процессов для моделирования отклика детектора. Также разработана и протестирована начальная модель спектросмещающего оптоволокна Kuraray Y-11. Построена коаксиальная структура волокна (сердцевина и оболочка) и проведено первичное моделирование транспорта света. В ходе тестов выявлено существенное расхождение полученной зависимости светопотерь от длины с ожидаемым экспоненциальным законом, что указывает на необходимость уточнения ключевых оптических параметров материала, в первую очередь, длины поглощения (WLSABSLLENGTH).

Дальнейшие этапы работы:

1. Настройка и тестирование моделей тайлов оставшихся рядов;
2. Создание геометрии оптоволокна (сравнение двух вариантов CADMesh и Geant4 примитивы);
3. Настройка параметров распространения фотонов в волокне;
4. Создание геомодели BBC для Sampo.

# 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. T. Basaglia et al. 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.
6. F. A. Dubinin et al. Study of wave length shifters for spd bbc scintillation tiles readout. *Physics of Atomic Nuclei*, 88(2):312–316, 2025.