

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»

УДК 539.1.074.3

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
УТОЧНЁННАЯ GEANT4-МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА ВВС  
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD**

Студент \_\_\_\_\_ Е. Н. Завидов

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н., доц. \_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**УТОЧНЁННАЯ GEANT4-МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА ВВС  
ЭКСПЕРИМЕНТА SPD**

Студент

\_\_\_\_\_ Е. Н. Завидов

Научный руководитель,

к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ Е. Ю. Солдатов

Рецензент,

к.ф.-м.н., доц.

\_\_\_\_\_ А. А. Савченко

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>5</b>
1.1 ВВС и SPD . . . . .	5
1.2 Конструкция ВВС . . . . .	5
<b>2 Моделирование</b>	<b>7</b>
2.1 Пакет Geant4 . . . . .	7
2.2 Геометрическое описание модели тайла . . . . .	8
2.3 Описание процессов и материалов . . . . .	9
2.4 Валидация модели тайла . . . . .	11
2.4.1 Модель с пропускающими поверхностями . . . . .	11
2.4.2 Модель с зеркальными поверхностями . . . . .	14
<b>3 Параметризация оптоволокна</b>	<b>17</b>
<b>4 Заключение</b>	<b>23</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>24</b>
<b>Приложение</b>	<b>25</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, остаётся открытым. Понимание структуры и фундаментальных свойств нуклона непосредственно из динамики его кварков и глюонов - одна из основных нерешённых 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 глюонов остаётся менее изученным. Одной из трудностей, препятствующих изучению, является отсутствие прямых способов определения содержания глюонов в высокоэнергетических частицах.

Коллаборация Spin Physics Detector (SPD) планирует установить универсальный детектор в южной точке взаимодействия коллайдера NICA, который строится в Объединённом 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].

Степень поляризации пучка напрямую влияет на спин-зависимые яв-

ления (например, спиновые асимметрии). При столкновении неполяризованных пучков все спин-зависимые взаимодействия усредняются, и эксперимент измеряет только полное (неполяризованное) сечение рассеяния. Когда пучки поляризованы (их спины выстроены продольно или поперечно оси движения), появляется возможность контролировать начальное спиновое состояние системы. Для контроля поляризации пучка, а также для измерения светимости в эксперименте симметрично относительно точки взаимодействия будут установлены две плоскости сцинтилляционного детектора Beam-Beam Counter (BBC).

На сегодняшний день нет по-настоящему полной модели, описывающей данный детектор, а существующие модели упрощённо отражают геометрию и материалы конструкции BBC, не давая отклика, приближённого к получаемому на эксперименте. С помощью точной модели можно будет учесть неопределённости, связанные с неидеальностью используемого детектора.

**Цель** данной работы заключается в создании уточнённой Geant4 модели детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) Разработка геометрических моделей элементов BBC;
- 2) Настройка материалов и поверхностей модели;
- 3) Параметризация оптоволокон;
- 4) Валидация модели на экспериментальных данных.

# 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. 1.1) [2].

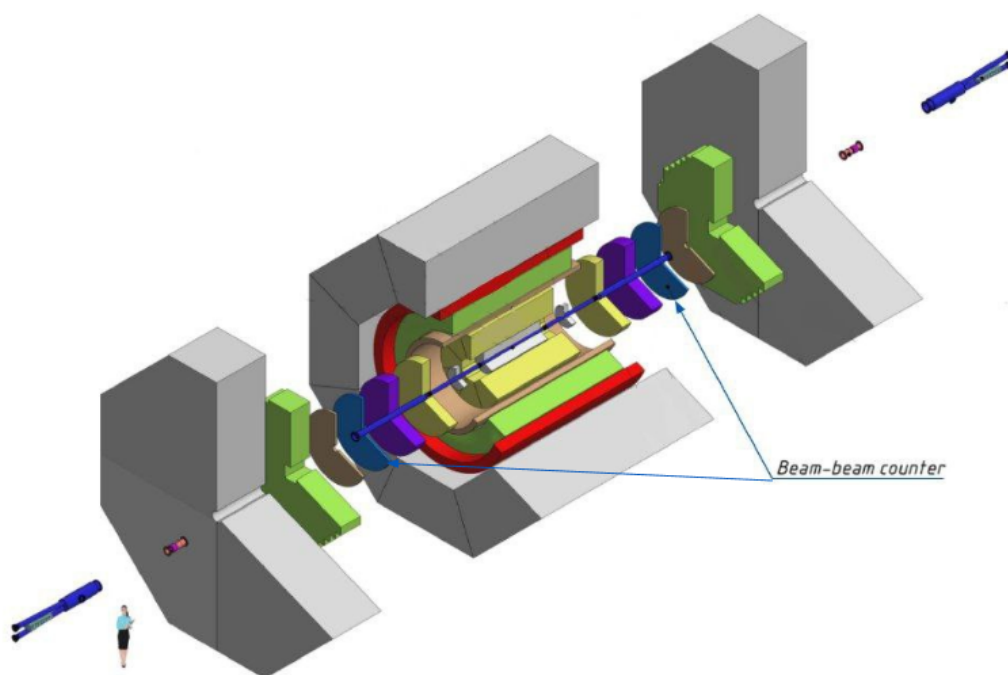


Рисунок 1.1 — Схема эксперимента SPD с отмеченным детектором BBC

## 1.2 КОНСТРУКЦИЯ BBC

BBC представляет собой сцинтилляционный детектор, состоящий из 16 секторов [2] (чертёж одного сектора изображён на Рис. 1.2). Один сектор включает в себя 13 рядов (в настоящее время планируется отказ от самого

дальнего от центра ряда). Первый и второй ряды (от центра, далее будет использована эта нумерация) содержат по одному тайлу, остальные ряды - по два зеркально симметричных. 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 сцинтилляционных фотонов клея. На данный момент идёт выбор оптоволокна, которое будет использовано на эксперименте, основными кандидатами являются: Kuraray Y11 S-типа, SG BCF-92 и Tver OSL8.

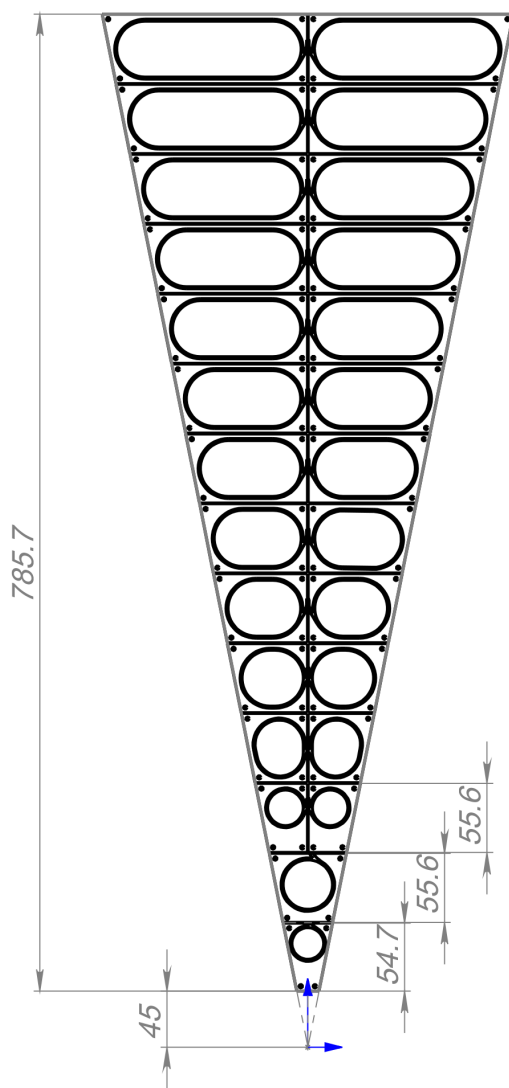


Рисунок 1.2 — Чертёж сектора детектора ВВС

## 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 также отбор вторичных частиц;

- 2) **Отслеживание частиц:** Классы Tracking и Track отвечают за отслеживание 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 геометрические тела 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 САД-модели. Её имплементация в Geant4 занимает несколько строк кода, в то время как описание тех же самых параметров напрямую примитивами занимает большее количество строк и времени их написания.

Перед использованием CADMesh следует преобразовать имеющуюся САД-модель, поскольку она имеет излишнее количество рёбер, что усложняет вычисления. Процесс оптимизации приведён на Рис. 2.1. Визуализация сгенерированного CADMesh объекта представлена в правом верхнем углу изображения. Как видно, модель всё ещё содержит большое количество рёбер. Для сравнения в правом нижнем углу Рис. 2.1 приведён тайл, описанный при помощи стандартных примитивов Geant4.

При облучении двух моделей моноэнергетическим пучком протонов получено, что при одинаковых геометрических параметрах тайл из встроенных объектов Geant4 показывает результаты, которые в большей степени

соответствуют экспериментальным данным, поэтому в дальнейшем в работе использовался этот способ задания геометрии.

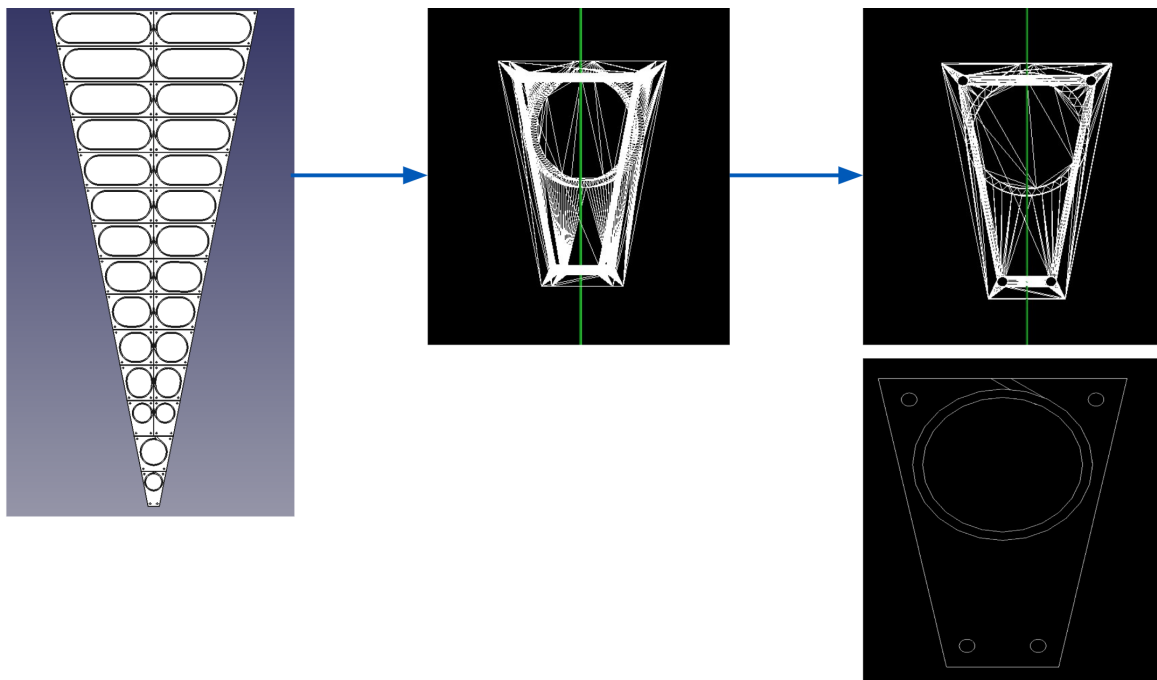


Рисунок 2.1 — Оптимизация CAD-модели и сравнение с примитивами Geant4

## 2.3 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

Настройка материалов детектора разделяется на два этапа. Изначально необходимо задать физические процессы, которые будут происходить при взаимодействии рабочего вещества с регистрируемыми частицами. В случае сцинтилляционного детектора основными являются электромагнитные процессы (пакет **FTFP\_BERT**) (в частности, ионизационные потери заряженных частиц при прохождении через объём сцинтиллятора) и оптические процессы (пакет **G4OpticalPhysics**). К последним относятся процессы, связанные с рождением и распространением оптических фотонов в сцинтилляторе, а именно высвечивание сцинтилляционных фотонов, их переизлучение и поглощение, отражение от поверхности, а также черенковское излучение. Второй этап заключается в описании характеристик материалов детектора. К ним относятся химический состав, плотность, а также оптические параметры, всё это представлено в Таблице 2.1. Значения величин получены из спецификации от производителя, а также из оцифровки

соответствующих спектров, приведённых в приложении (Приложение Рис. 4.1).

Таблица 2.1 — Параметры материала сцинтиллятора

Название параметра в Geant4	Описание	Значение
DENSITY	Плотность вещества	$1.05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
RINDEX	Показатель преломления	1.64
SCINTILLATIONYIELD	Световыход	$12000 \frac{1}{\text{МэВ}}$
SCINTILLATIONYIELD1	Доля быстрой компоненты в световыходе	1.0
SCINTILLATION-TIMECONSTANT1	Время высвечивания быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки	2.4 нс
SCINTILLATION-COMPONENT1	Спектр излучения быстрой компоненты	Задан двумя массивами (энергия фотонов - интенсивность)
ABSLENGTH	Спектр поглощения	Задан двумя массивами
RESOLUTIONSCALE	Размытие разрешения	1.0

## 2.4 ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ТАЙЛА

### 2.4.1 МОДЕЛЬ С ПРОПУСКАЮЩИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В лаборатории проведён эксперимент, в ходе которого тайл из пятого ряда (Рис. 1.2) облучался  $\gamma$ -квантами [6]. 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 считывающей электроники. Фотография установки показана на Рис. 2.2. В ней используются АМРТЕК Mini-X X-ray трубка (отмеченная стрелкой), шаговый двигатель NEMA17, микроконтроллер Arduino CNC Shield, источник питания CAEN DT5202. Вся конструкция помещена в изолирующий от света короб.

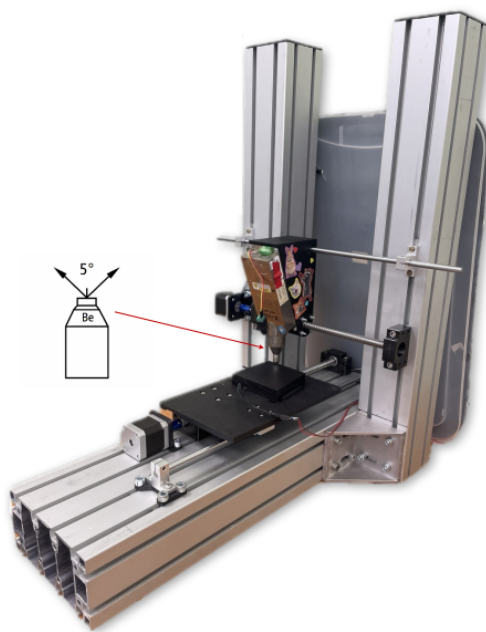


Рисунок 2.2 — Фотография экспериментальной установки

Моделирование выполнено в соответствии со схемой, представленной на Рис. 2.3 (а). По всей поверхности тайла с шагом 1 мм (далее - сетка) генерировались  $\gamma$ -кванты, энергетический спектр которых соответствовал спектру рентгеновской трубки. Одному событию соответствовал один  $\gamma$ -квант. Угол между вектором импульса частицы и нормалью к поверхности сцинтиллятора случайным образом изменялся в диапазоне от  $-2.5^\circ$  до  $2.5^\circ$ ,

расстояние от точки генерации излучения до поверхности рабочего вещества, как и в эксперименте, равно 4 мм. Для каждого узла сетки моделировалось по  $10^3$  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 точки генерации. Пример 100 изображённых на одной картинке событий для одного узла представлен на Рис. 2.3 (б).

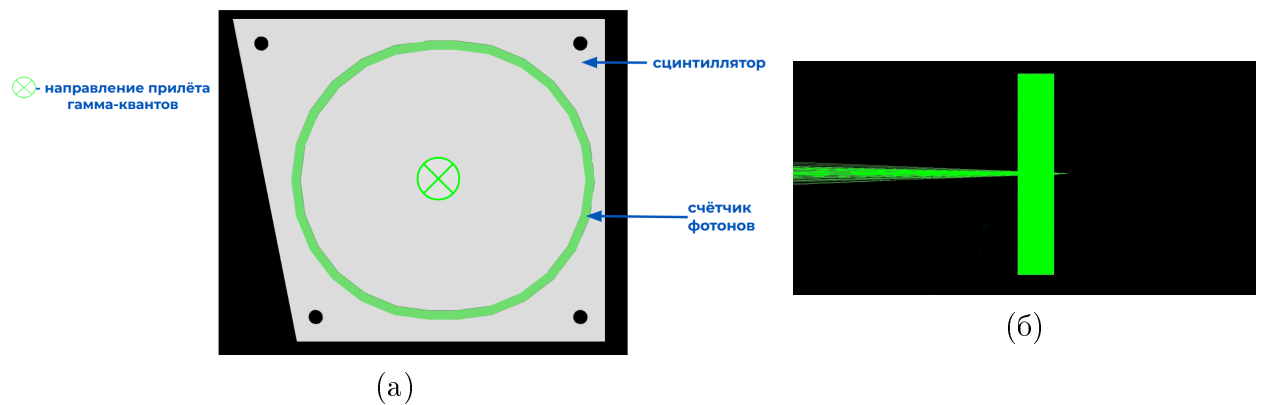


Рисунок 2.3 — (а) - Схема проведения моделирования облучения тайла  $\gamma$ -квантами, (б) - Иллюстрация попадания 100  $\gamma$ -квантов в сцинтиллятор

Внутреннее кольцо (обозначено зелёным цветом на Рис. 2.3 (а)), изготовленное из полиметилметакрилата (PMMA, материал внешней оболочки спектросмещающего волокна), выполняло роль детектора фотонов. Откликом модели считается число фотонов, попавших на оптоволокна.

Настройки материалов сцинтиллятора включали в себя спектр поглощения оптических фотонов (Таблица 2.1, параметр ABSLENGTH).

Исследование проведено для различных типов поверхности элемента сектора (гладкая - polished, шероховатая - ground), коэффициентов отражения фотонов на границе раздела сред сцинтиллятор-воздух: стандартный коэффициент отражения на границе раздела двух сред - вероятность прохождения фотонов сквозь границу сцинтиллятор-воздух считается на основе коэффициентов преломления сред, коэффициенты отражения в диапазоне от 0.7 до 0.9, а также для двух моделей обработки оптических поверхностей (glisur и unified). На основе анализа полученных откликов окончательно выбрана модель unified со стандартным коэффициентом отражения и гладкой поверхностью.

Результаты эксперимента и симуляции представлены на Рис. 2.4. На данных модели заметна корреляция отклика с положением прилёта частицы относительно канавки: в центре светосбор выше, чем на границах тайла. Подобная зависимость не наблюдается в эксперименте и может быть объяснена утечкой фотонов через поверхности рабочего вещества, поэтому в следующем разделе представлена модель, не выпускающая фотоны из сцинтиллятора.

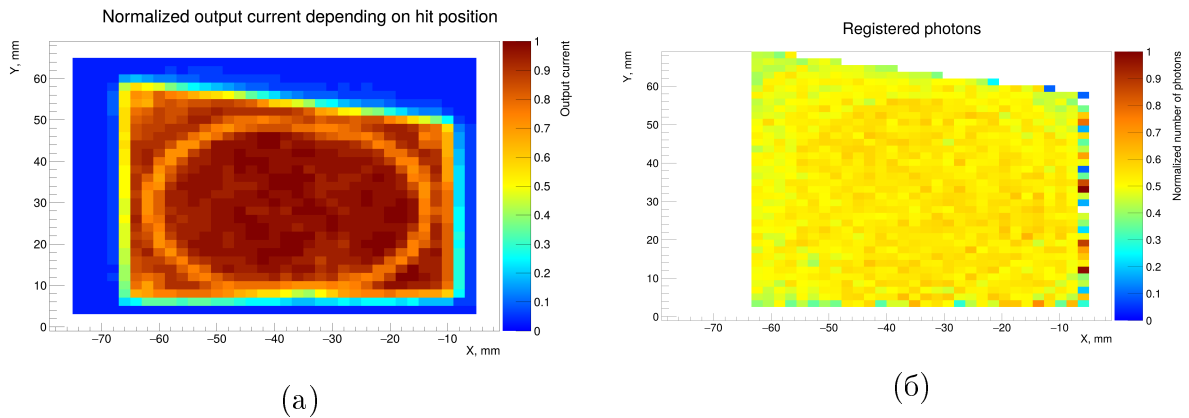


Рисунок 2.4 — (а) - экспериментальные данные, (б) - данные модели

Для количественной оценки расхождения между результатами моделирования и эксперимента полученные гистограммы были предварительно приведены к нормализованному виду для соблюдения масштаба (Рис. 2.4).

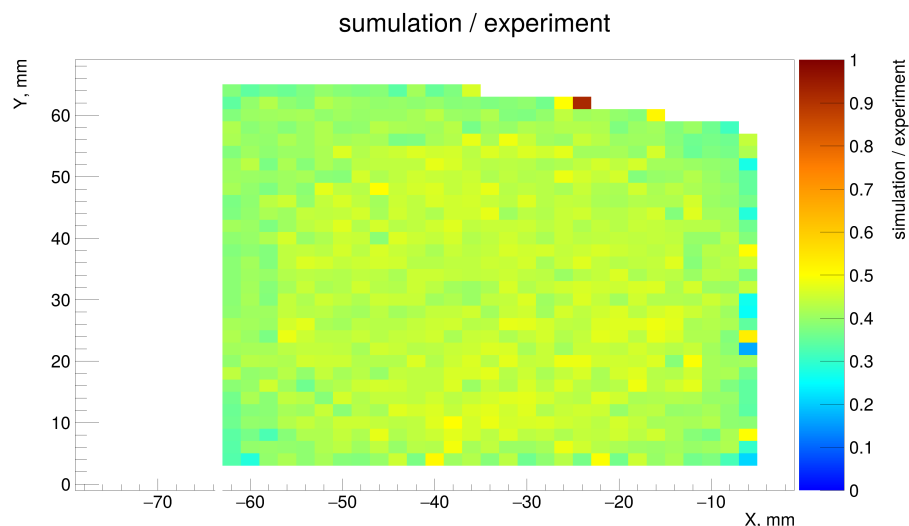


Рисунок 2.5 — Данные симуляции, нормированные на экспериментальные

Из-за углового разброса трубки на экспериментальных данных появляются граничные эффекты, выраженные заметным уменьшением выходного тока вблизи боковых поверхностей тайла. Чтобы в анализе избавиться

от их рассмотрения на токовой гистограмме (Рис. 2.4 (а)), выставлено пороговое значение, равное 0.4. Все выходные токи со значением меньше порога перезаписывались на пороговое, после чего данные симуляции и эксперимента пронормированы друг на друга. Результат представлен на Рис. 2.5. Заметно увеличение отношения в центре тайла, что обсуждено выше.

## 2.4.2 МОДЕЛЬ С ЗЕРКАЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

В связи с недостаточным качеством модели с пропускающими поверхностями предложен новый способ проведения симуляции. Его схема представлена на Рис. 2.6. Границы раздела сред сцинтиллятор-воздух настроены таким образом, чтобы фотоны от сцинтилляционной вспышки не выходили из тайла. Покидать рабочее вещество детектора они могут только через канавку для оптоволокон (в Geant4 это реализовано с помощью заполнения канавки специальным материалом, идентичным по оптическим параметрам сцинтиллятору, но не излучающим фотоны). В данной конфигурации модели также отключено поглощение фотонов сцинтиллятором. Благодаря подобным настройкам все фотоны, рождённые в тайле, собираются оптоволоконном вне зависимости от положения трека, что устраняет изъян предыдущей версии.

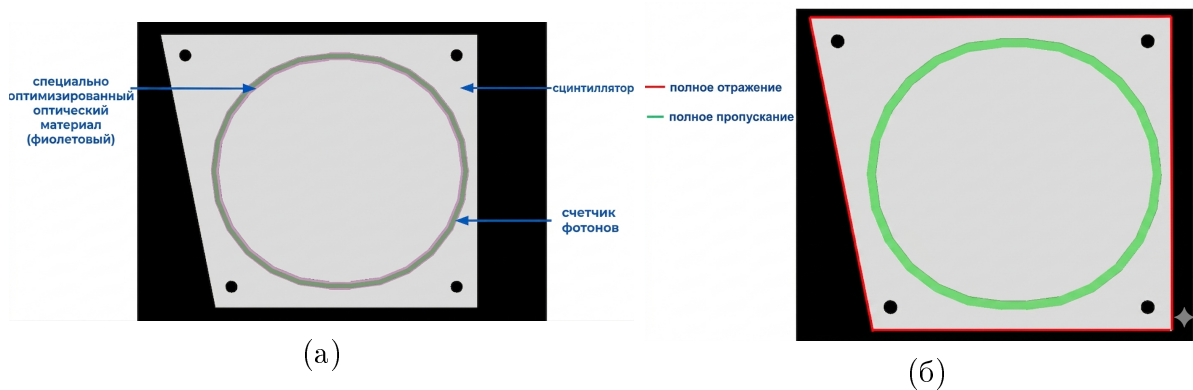


Рисунок 2.6 — (а) - Конфигурация новой модели, (б) - Иллюстрация настройки поверхностей

Карта откликов новой модели на Рис. 2.7 подтверждает всё вышесказанное.

Также явно заметно улучшение при нормировке модельных данных на экспериментальные (Рис. 2.8). Отношение по всей поверхности тайла

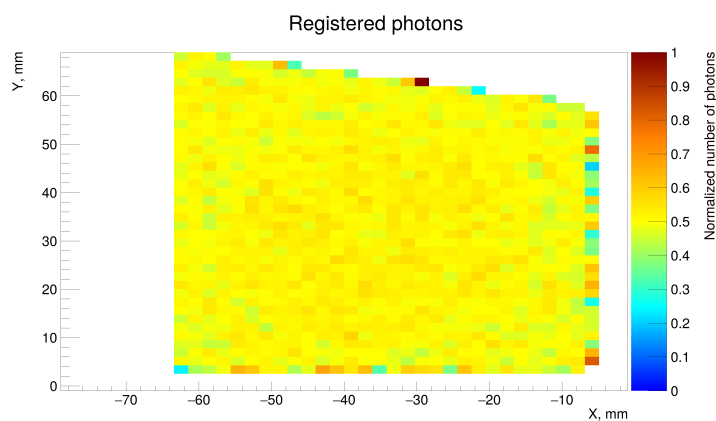


Рисунок 2.7 — Карта откликов новой модели

стало равномерным и имеет незначительные вариации. Данный факт свидетельствует о качественном соответствии эксперимента и симуляции.

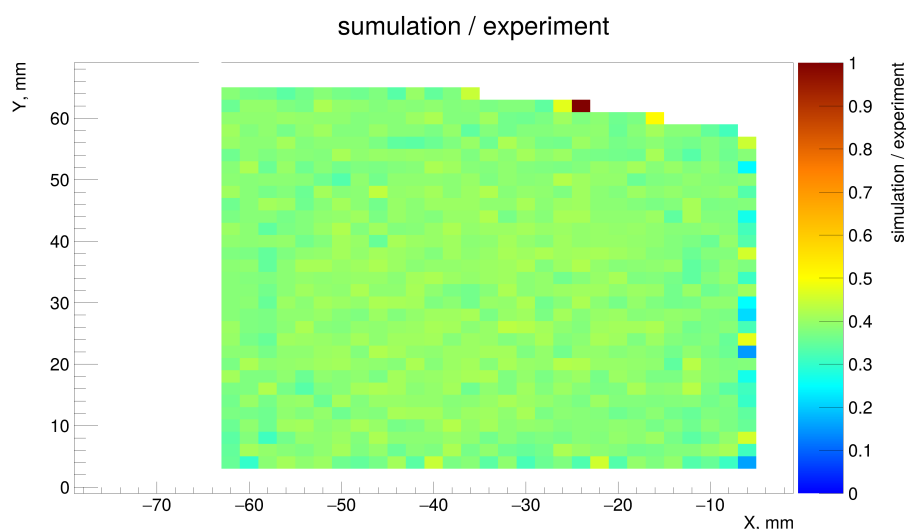


Рисунок 2.8 — Нормирование модельных данных на экспериментальные: модель без поглощения

После первого тестирования в модель введён спектр поглощения сцинтиллятора. Различие в числе собранных на оптоволоконке фотонов представлено на Рис. 2.9. На этом же графике указаны основные процессы, отвечающие за образование пиков. Видно, что поглощение вносит малый вклад в светосбор, что ожидаемо из-за небольшого перекрытия эмиссионного спектра и спектра поглощения сцинтиллятора. Получено, что число фотонов, собираемых волокном, в среднем уменьшается на 2%. Для сравнения на гистограмме также отображено распределение собранного числа фотонов для модели, описанной в предыдущем разделе (фотоны могут покидать объём сцинтиллятора через его поверхность), здесь потери достигают уже

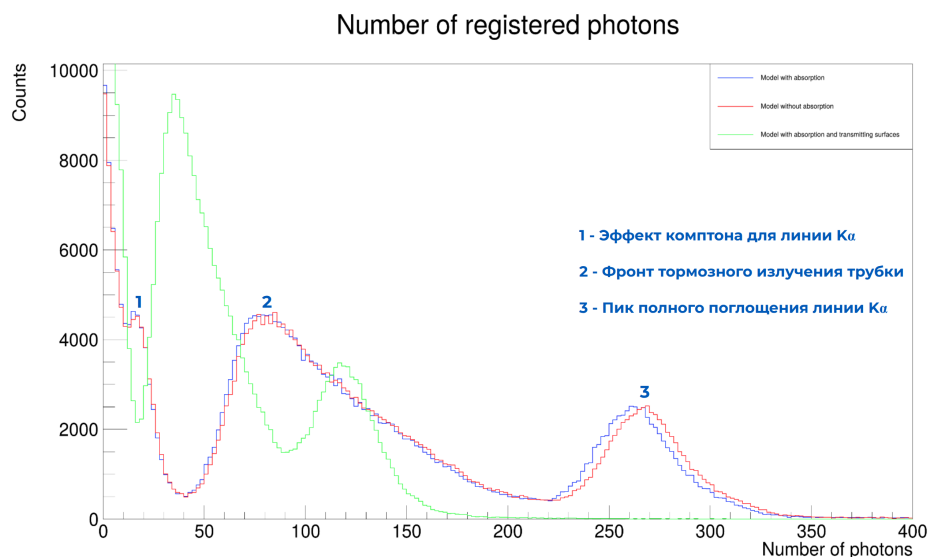


Рисунок 2.9 — Сравнение трёх конфигураций модели

56%.

Потери фотонов в 2% не ухудшают описательных свойств модели, что подтверждается при сравнении данных эксперимента и симуляции (Рис. 2.10).

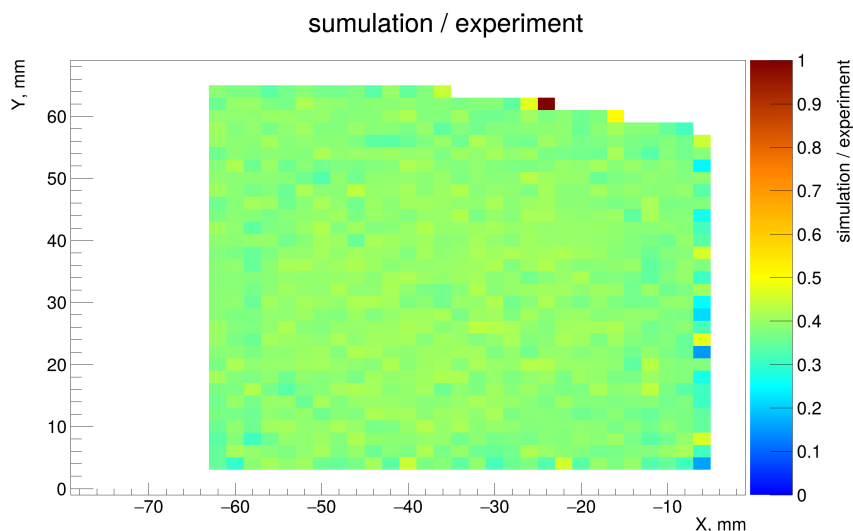


Рисунок 2.10 — Нормирование модельных данных на экспериментальные: модель с поглощением

Чтобы учесть в большей степени процессы, влияющие на светосбор в детекторе, в дальнейшей работе используются настройки материалов, включающие в себя спектр поглощения. Таким образом, получена модель, которая с точностью до постоянной описывает результаты эксперимента. Нахождение этой постоянной сопряжено с моделированием оптоволокна, что рассмотрено в следующем разделе.

## 3 ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОПТОВОЛОКНА

Для моделирования распространения фотонов в волокне в Geant4 выполнена его геометрическая модель. Её структура и прототип представлены на Рис. 3.1. Однако в ходе исследований выявлен ряд недостатков данного подхода к симуляции:

- 1) Оптическое волокно укладывается в канавку в тайле тремя витками. «Пружинная» структура данной укладки не имеет отражения в стандартных примитивах Geant4, поэтому геометрическая модель может быть реализована только с помощью пакета CADMesh.
- 2) В качестве входного файла для описания геометрии CADMesh использует формат .stl. Для описания трёхмерных объектов этот формат использует тесселяцию (разбиение сложной поверхности на множество мелких, простых геометрических фигур - обычно треугольников). Точность такого отображения объекта ограничена качеством его разбиения, что вызывает линейные и угловые отклонения от истинной геометрии.
- 3) Помимо отклонений от истинной геометрии из-за тесселяции возникают неточности в описании распространения фотонов по волокну, из-за чего становится невозможным учесть потери на изгибах, которые для самых близких к центру колеса тайлов составляют примерно 10% [7].

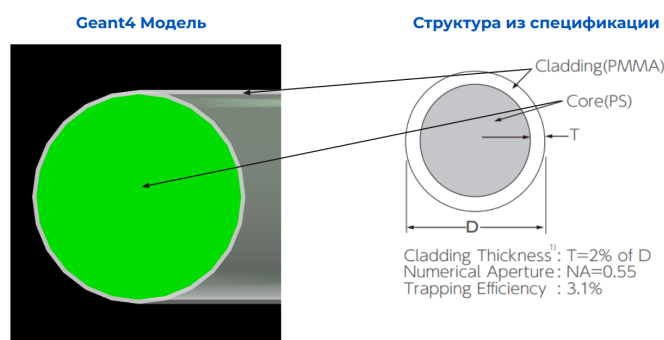


Рисунок 3.1 — Структура оптического волокна и модели

Ввиду невозможности полностью корректного описания волокна в Geant4 для моделирования его влияния на работу детектора предложено провести его параметризацию на основании имеющихся экспериментальных данных [7] и параметров от производителя. Огромным достоинством этого метода является его линейная асимптотическая сложность по времени обработки данных, описывающих спектры оптоволокна.

Параметризацию волокна можно разбить на несколько этапов:

- 1) Моделирование собирания рождённых от сцинтилляционной вспышки фотонов (выполняется непосредственно с помощью Geant4);
- 2) Оценка количества захваченных фотонов на основе спектра поглощения оптоволокна (Приложение Рис. 4.2) и параметра эффективности захвата;
- 3) Разыгрывание с помощью метода кумулятивных сумм эмиссионного спектра волокна (Приложение Рис. 4.2);
- 4) Учёт потерь на длине волокна и изгибах;
- 5) Учёт потерь при переходе фотонов из оптоволокна в воздух (потери на отражение Френеля).

Оценка качества параметризации произведена на основании сравнения с экспериментальными данными по регистрации космического излучения восьмитайловым телескопом.

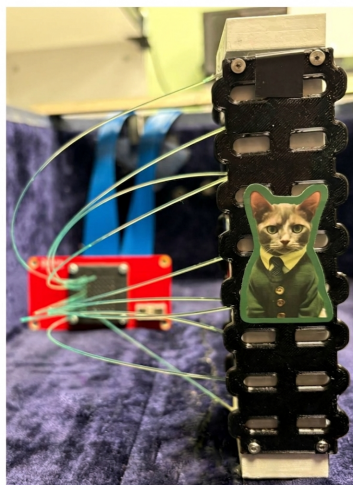


Рисунок 3.2 — Восьмитайловый телескоп

Телескоп состоит из восьми тайлов пятого ряда (Рис. 3.2). Сбор света с рабочего вещества детектора происходит с помощью волокна SG BCF-92.

Основные частицы, с которыми происходит взаимодействие сцинтиллятора в рассматриваемом эксперименте, - мюоны. Поэтому модель тайла облучалась именно ими. Энергетический спектр, а также спектр зенитных углов мюонов на уровне моря получены из книги [8]. На Рис. 3.3 представлено выбранное распределение. Видно, что пик интенсивности приходится на околоразительные мюоны с энергией порядка 1 ГэВ.

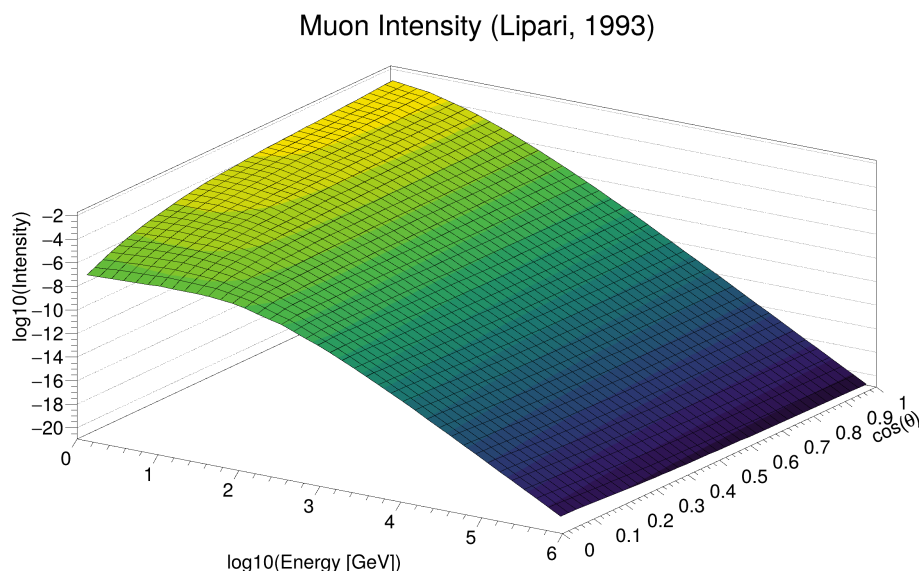


Рисунок 3.3 — Распределение мюонов по энергии и зенитному углу на уровне моря

Из данных на Рис. 3.3 получены отдельные спектры по энергии и косинусу зенитного угла, которые использованы при проведении симуляции, они изображены на Рис. 3.4.

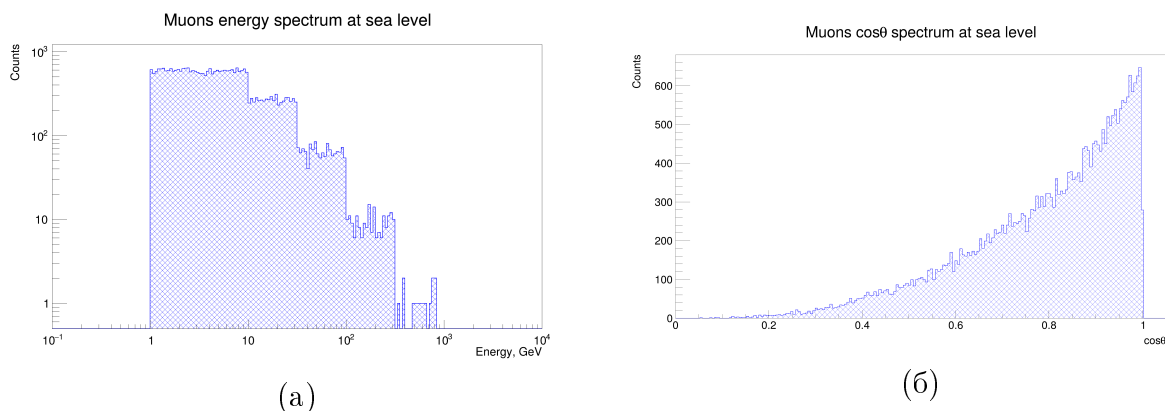


Рисунок 3.4 — (а) - Энергетический спектр мюонов на уровне моря, (б) - Спектр зенитных углов мюонов на уровне моря

Чтобы сравнить результаты симуляции с экспериментом, предварительно необходимо учесть эффективность регистрации SiPM в зависимости от длины волны падающих на него фотонов (Рис. 4.3), а также потери Френеля на отражения ( $\approx 10\%$ ). После учёта всего вышеперечисленного получен спектр числа фотоэлектронов (Рис. 3.5).

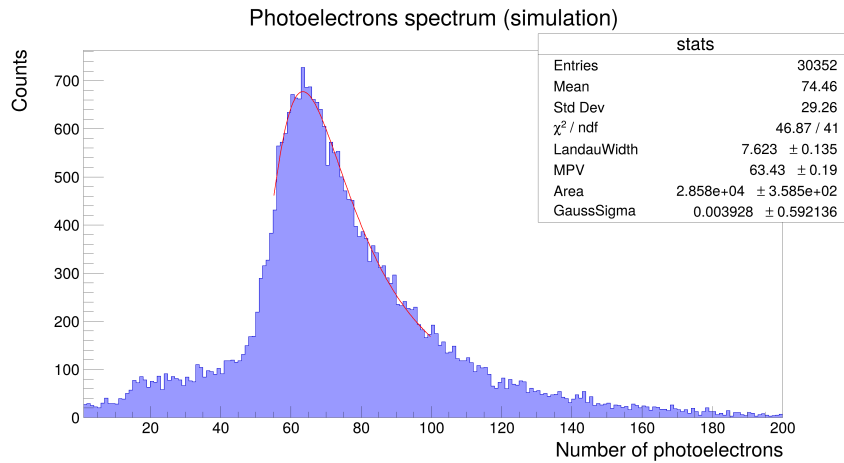


Рисунок 3.5 — Спектр фотоэлектронов: данные модели

На Рис. 3.5 облучение проходило по всей поверхности тайла, поэтому в области 0-40 фотоэлектронов возникает плато, связанное с попаданием мюонов в канавку для оптоволоконна. Такого эффекта не наблюдается при генерации мюонов вблизи центра тайла, на Рис. 3.6 представлено сравнение двух этих случаев.

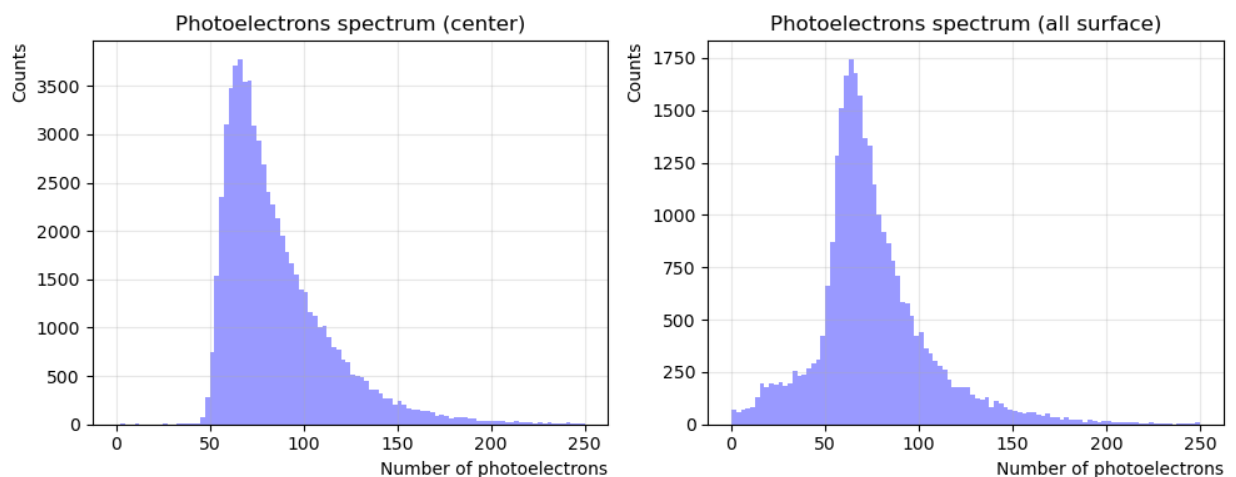


Рисунок 3.6 — Спектры фотоэлектронов для различных положений треков мюонов в тайле

Спектр фотоэлектронов, наблюдаемый на эксперименте, представлен на Рис. 3.7.

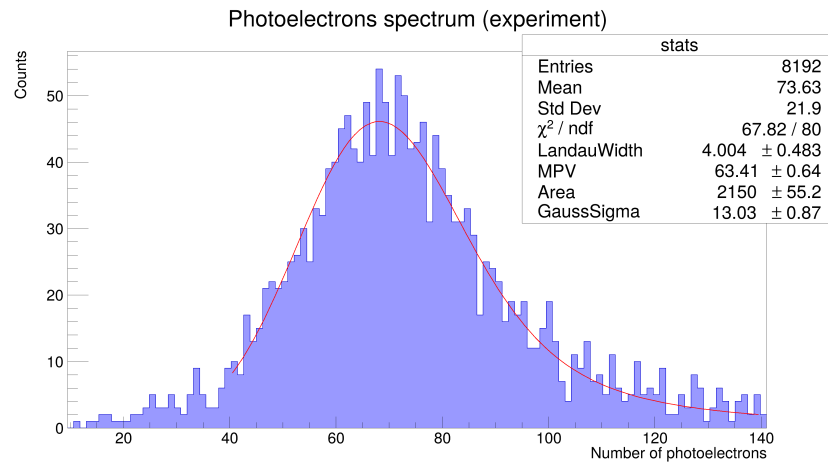


Рисунок 3.7 — Спектр фотоэлектронов: экспериментальные данные

Наиболее вероятное число фотоэлектронов совпадает с модельным значением в пределах погрешности, однако на экспериментальных данных заметно больше параметр  $\sigma_G$ . Для устранения неточности добавляется дополнительное размытие: к каждому значению из данных симуляции прибавляется значение из распределения Гаусса (шумы электроники). Стандартное отклонение этого распределения получается из фитирования экспериментальных данных с фиксированной шириной распределения Ландау (Приложение Рис. 4.4), а среднее значение равно 0 ( $N_{\text{smearred}} = N_{\text{model}} + \text{Norm}(0, \sigma_{\text{fit}})$ ). Значение из фита  $\sigma_{\text{fit}} = 3.255$  фотоэлектронов. Итоговое распределение приведено на Рис. 3.8.

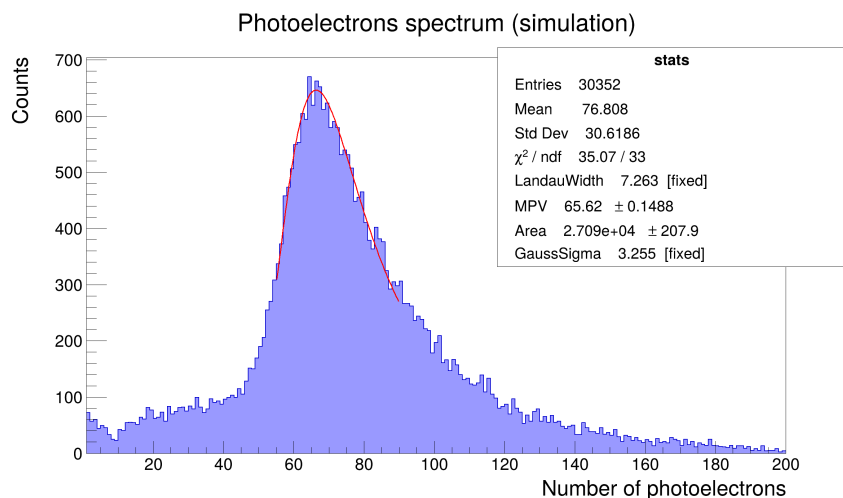


Рисунок 3.8 — Спектр фотоэлектронов: зашумлённые данные модели

Параметр  $\chi^2/ndf$  близок к единице, что свидетельствует о хорошем качестве аппроксимации, при этом ширина распределения Ландау и  $\sigma_G$  совпадают с экспериментальными данными.

Таким образом, полученная модель, включающая в себя описание геометрии детектора, настройки материалов и оптических поверхностей, а также параметризованное оптоволокно, с достаточной точностью описывает экспериментальные данные и может в дальнейшем быть использована для проведения симуляций.

Все использованные настройки и методы применимы к модели детектора ВВС «нулевой» фазы, состоящего из 5 рядов тайлов (Приложение Рис. 4.5). Анализ её работы можно выполнить на основании сравнения с данными облучения детектора на тестовом пучке коллайдера.

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке и валидации Geant4-модели элементов сектора детектора Beam-Beam Counter эксперимента SPD.

В ходе исследования выбран метод описания геометрии на основании Geant4 примитивов, дающий наиболее совпадающий с экспериментальными данными результат. Протестированы различные типы поверхностей сцинтиллятора, и выбрана оптимальная конфигурация. Проведена валидация модели на основании сравнения с экспериментами по облучению детектора рентгеновским излучением и космическими лучами.

Основными результатами работы являются:

- 1) Геометрическая модель детектора ВВС «нулевой» фазы;
- 2) Настройки материалов и поверхностей детектора, позволяющие получать достаточную степень согласия симуляции и эксперимента;
- 3) Разработанный метод параметризации оптоволокон на основе экспериментальных данных.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [и др.]. — 2021. — arXiv: [2102.00442](https://arxiv.org/abs/2102.00442) [hep-ex].
2. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA / V. Abazov [и др.]. — 2024. — arXiv: [2404.08317](https://arxiv.org/abs/2404.08317) [hep-ex].
3. Geant4: a Game Changer in High Energy Physics and Related Applicative Fields / T. Basaglia [и др.]. — 2024. — arXiv: [2405.12159](https://arxiv.org/abs/2405.12159) [physics.comp-ph].
4. *Brun R., Rademakers F.* ROOT: An object oriented data analysis framework // Nucl. Instrum. Meth. A / под ред. M. Werlen, D. Perret-Gallix. — 1997. — Т. 389. — С. 81—86.
5. A CAD Interface for GEANT4 / C. M. Poole [и др.] // Australasian Physical & Engineering Science in Medicine. — 2012.
6. Study of the Uniformity of Plastic Scintillators of the Beam-Beam Counter Local Polarimetry Detector Prototype for the SPD Experiment via X-ray Beam Scanning / A. M. Zakharov [и др.] // LXXV International Conference “NUCLEUS-2025. Nuclear Physics and Elementary Particle Physics. Nuclear Physics Technologies”: Book of Abstracts / под ред. V. N. Kovalenko, E. V. Andronov. — Saint Petersburg, Russia, 2025. — С. 99. — ISBN 978-5-86763-496-4.
7. Study of Wave Length Shifters for SPD BBC Scintillation Tiles Readout / F. A. Dubinin [и др.] // Physics of Atomic Nuclei. — 2025. — Т. 88, № 2. — С. 312—316.
8. *Grieder P. K. F.* Cosmic Rays at Earth: Researcher’s Reference Manual and Data Book. — Amsterdam : Elsevier Science, 2001. — 1112 с. — ISBN 978-0-444-50710-5.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

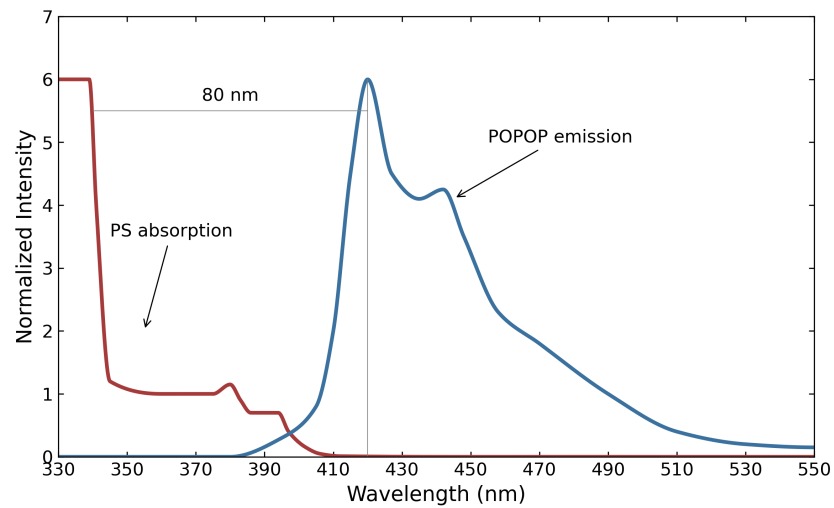


Рисунок 4.1 — Спектр излучения и поглощения сцинтиллятора на основе полистирола

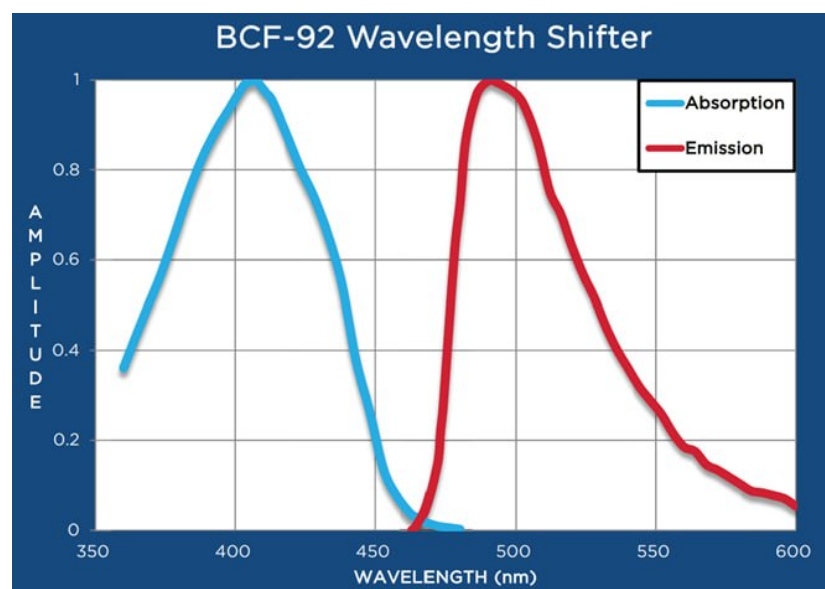


Рисунок 4.2 — Спектр излучения и поглощения оптоволокна BCF-92

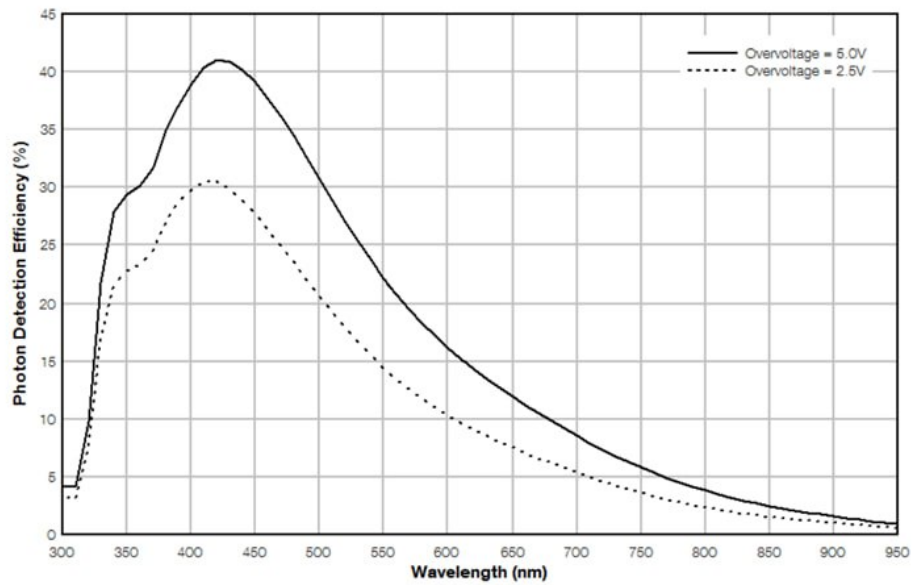


Рисунок 4.3 — Эффективность SiPM в зависимости от длины волны падающего на него фотона

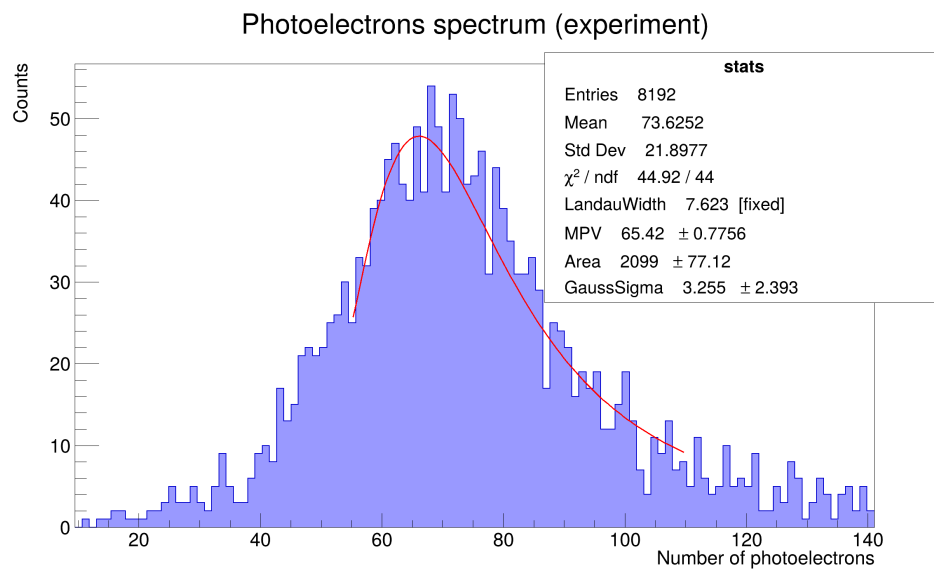


Рисунок 4.4 — Фитирование с фиксированной шириной распределения Ландау

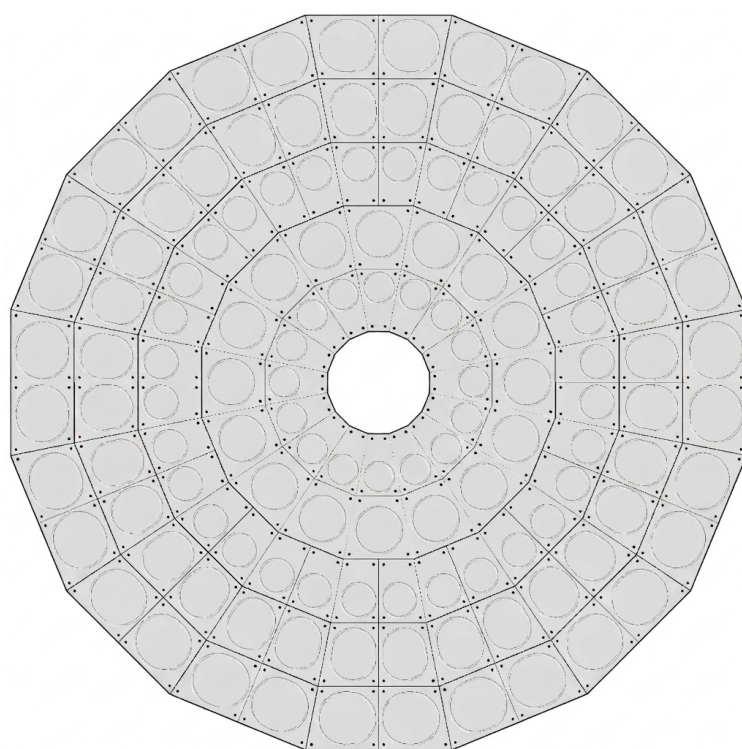


Рисунок 4.5 — Geant4 модель детектора BBC: «нулевая» фаза