

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 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент SPD	5
1.1 ВВС и SPD	5
1.2 Конструкция ВВС	5
2 Моделирование	7
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 Модель с пропускающими поверхностями	10
2.5.2 Модель с зеркальными поверхностями	13
3 Заключение	14
Список использованных источников	15

ВВЕДЕНИЕ

По астрофизическим и космологическим данным относительная масса видимой барионной материи, свойства которой определяется 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 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 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.

Задача работы:

1. Разработка геометрической модели тайла;
2. Валидация модели на экспериментальных данных.

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].

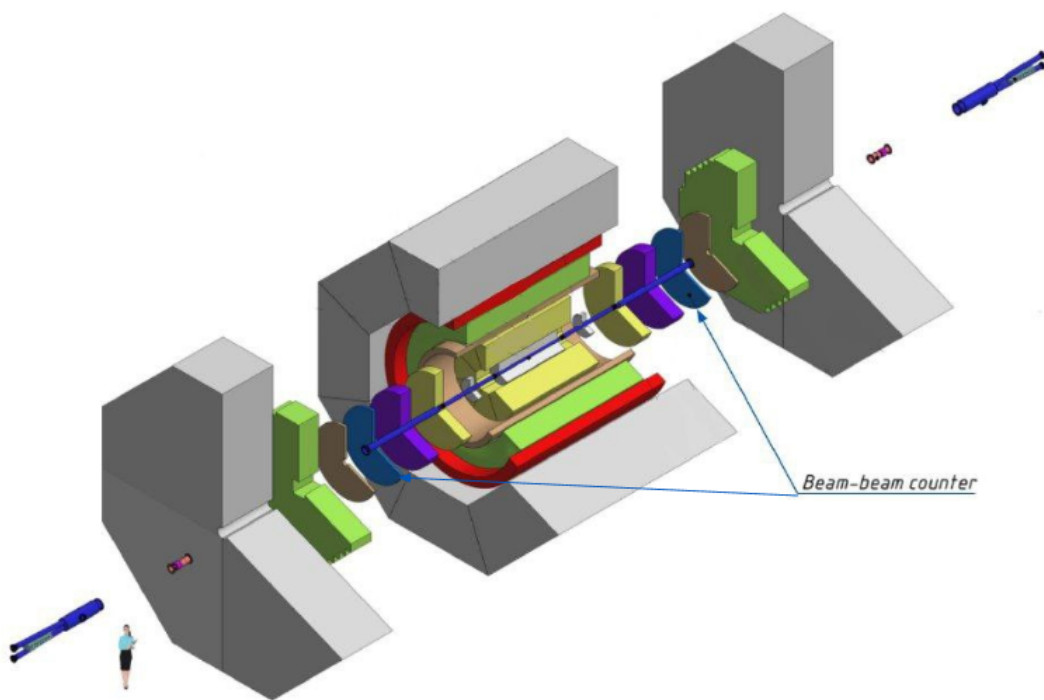


Рисунок 1 — Схема эксперимента SPD с отмеченным детектором BBC

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%, 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.

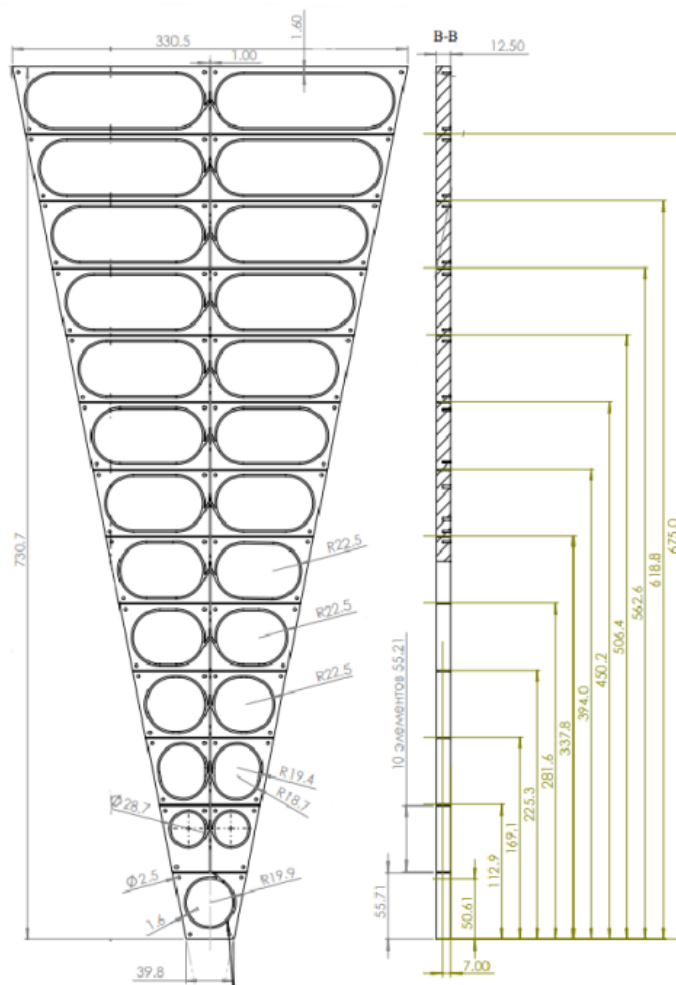


Рисунок 2 — Чертёж сектора детектора ВВС

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 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.

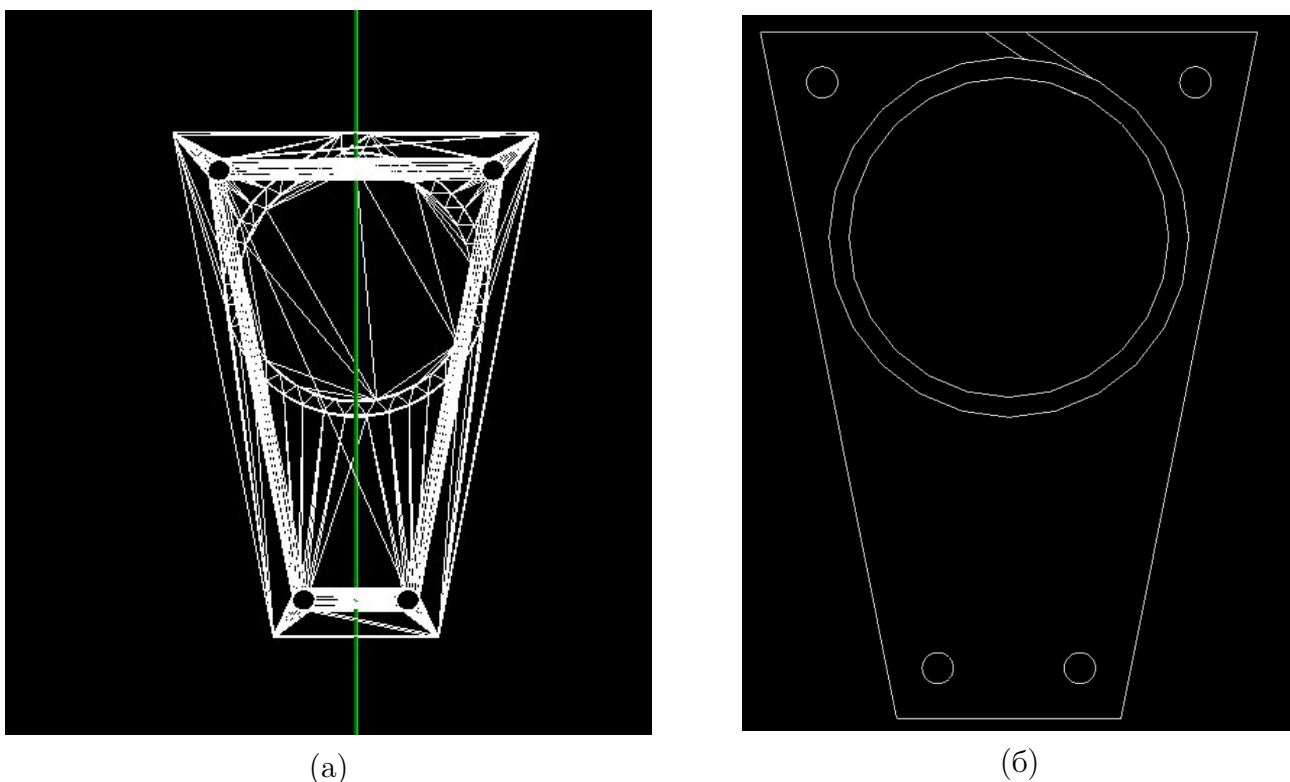


Рисунок 3 — Модели тайла: (а) - CADMesh, (б) - Geant4 примитивы

2.3 Настройка материалов и поверхностей

Для моделирования процесса 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 ВВС.

Таблица 1 — Параметры материала сцинтиллятора

Название параметра	Описание	Значение
Resolution Scale	Размытие разрешения	1.0
Scintillation Yield	Световыход на единицу энергопотерь	$1200 \frac{1}{\text{МэВ}}$
Scintillation time constant 1	Время высвечивания быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки	2.4 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 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 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 Модель с пропускающими поверхностями

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. 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 (отмеченная стрелкой), шаговый двигатель NEMA17, микроконтроллер Arduino CNC Shield, источник питания CAEN DT5202. Вся конструкция помещена в изолирующий от света короб.

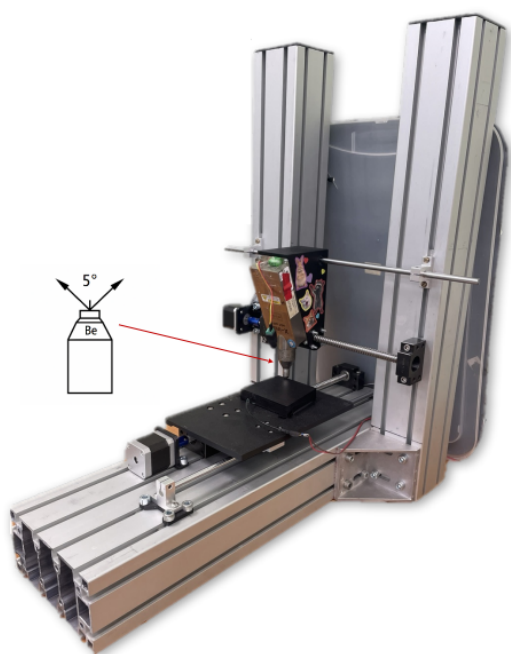


Рисунок 4 — Фотография экспериментальной установки

Моделирование выполнено в соответствии со схемой, представленной на Рис. 5. По всей поверхности тайла с шагом 1 мм (далее - сетка) генерировались γ -кванты, энергетический спектр которых соответствовал спектру

рентгеновской трубки. Угол между вектором импульса и нормалью к поверхности сцинтиллятора случайным образом изменялся в диапазоне от -2.5° до 2.5° . 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 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.

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

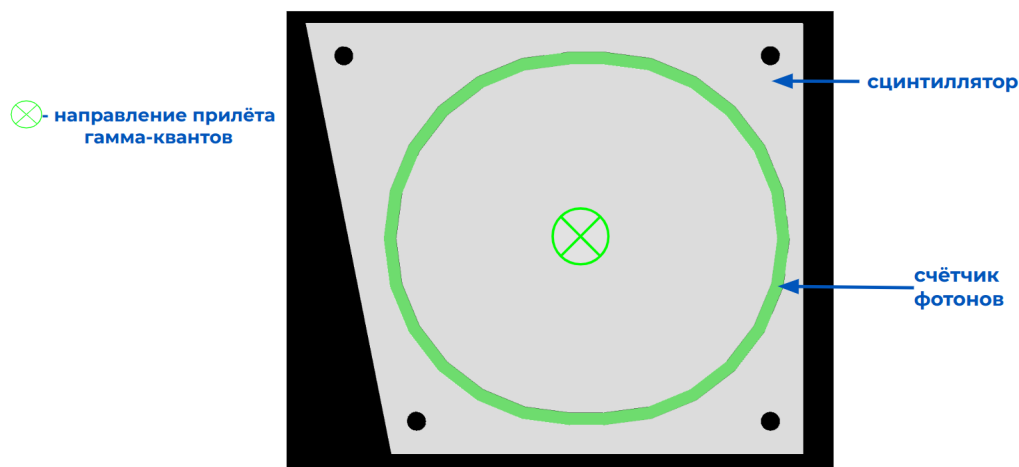


Рисунок 5 — Схема проведения моделирования облучения тайла γ -квантами

Результаты эксперимента и моделирования представлены на Рис. 6. На данных модели заметна сильная корреляция отклика с положением прилёта частицы, что не наблюдается в эксперименте. Как выяснилось позже данное явление связано с утечкой сцинтилляционных фотонов через поверхность тайла.

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 и угловым разбросом рентгенов-

ской трубки. Также заметна общая неоднородность отношения вблизи канавки для оптоволокна, что свидетельствует о зависимости отклика модели от положения трека в детекторе.

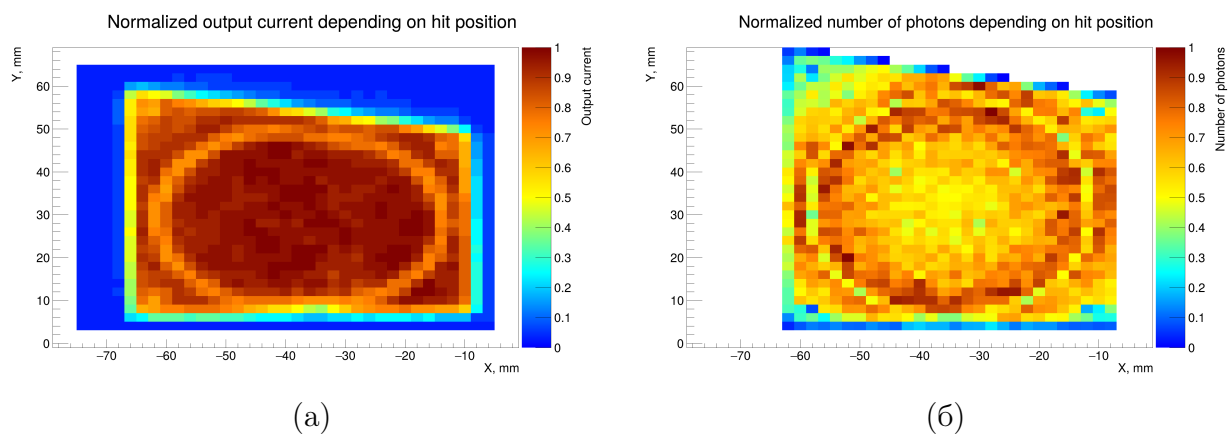


Рисунок 6 — (а) - экспериментальные данные, (б) - данные модели

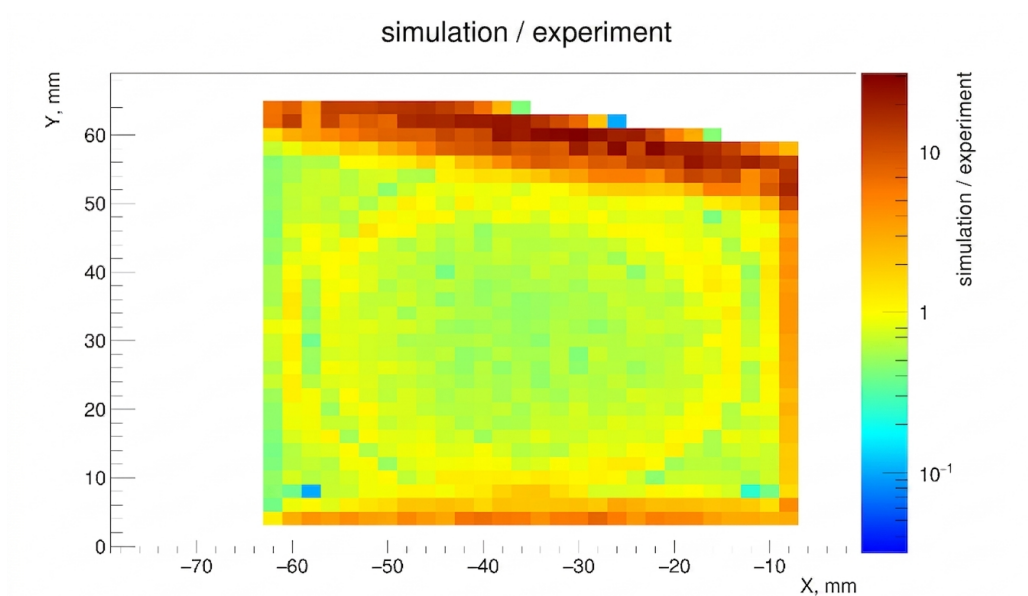


Рисунок 7 — Модельные данные, нормированные на экспериментальные

2.5.2 Модель с зеркальными поверхностями

В связи с недостаточным качеством полученной модели предложен новый способ проведения симуляции. Его схема представлена на Рис. 8. Поверхности раздела сред сцинтиллятор-воздух настроены таким образом, чтобы фотоны не выходили из тайла. Они могут проходить только через канавку для оптоволоконна (в Geant4 это реализовано с помощью заполнения канавки специальным материалом, идентичным по оптическим параметрам сцинтиллятору, но не излучающий фотоны). Благодаря такой конфигурации все фотоны, рождённые в тайле, собираются оптоволоконном, что решает проблему зависимости отклика от положения трека. Карта откликов новой модели подтверждает вышеуказанное предположение (Рис. 9 (а)). Также явно заметно улучшение при нормировании модельных данных на экспериментальные (Рис. 9 (б)). Отношение по всей поверхности тайла стало равномерным и имеет незначительные вариации. Данный факт свидетельствует о качественном соответствии эксперимента и симуляции.

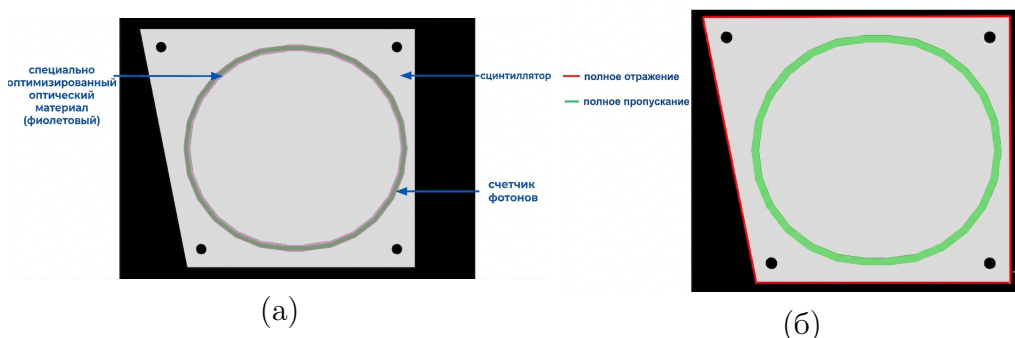


Рисунок 8 — (а) - Конфигурация новой модели, (б) - Иллюстрация настройки поверхностей

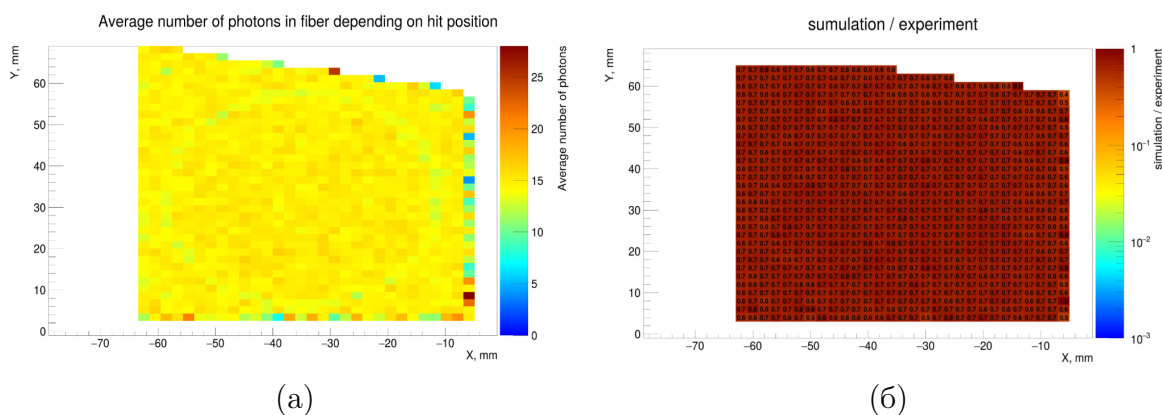


Рисунок 9 — (а) - Карта откликов новой модели, (б) - Нормирование модельных данных на экспериментальные

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 согласие распределений сбора света по поверхности тайла.

Дальнейшие этапы работы:

1. Настройка и тестирование моделей тайлов оставшихся рядов;
2. Параметризация оптоволокна;
3. Уточнение разрешения модели на основе экспериментальных данных.

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.