

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

УДК 539.120.71

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование детектора ВВС в эксперименте SPD с помощью  
программного пакета Geant4

Студент

\_\_\_\_\_ А. Н. Морозихин

Научный руководитель  
доц., к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ Г. А. Нигматкулов

Москва 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Введение</b>                                       | <b>3</b>  |
| <b>1 Эксперимент SPD</b>                              | <b>4</b>  |
| 1.1 Ускоритель NICA . . . . .                         | 4         |
| 1.2 Эксперимент SPD. Цели и задачи . . . . .          | 5         |
| <b>2 Детектор ВВС</b>                                 | <b>7</b>  |
| 2.1 Концепт детектора ВВС . . . . .                   | 7         |
| <b>3 Моделирование детектора</b>                      | <b>9</b>  |
| 3.1 Описание геометрии . . . . .                      | 9         |
| 3.2 Материалы . . . . .                               | 12        |
| 3.3 Описание физического пакета . . . . .             | 13        |
| 3.4 Результаты описания геометрии . . . . .           | 16        |
| <b>4 Оптимизация конфигурации детектора</b>           | <b>20</b> |
| 4.1 Карта исследования . . . . .                      | 20        |
| 4.2 Различная глубина канавки . . . . .               | 21        |
| 4.3 Различная глубина залегания оптоволокна . . . . . | 21        |
| 4.4 Различное число витков оптоволокна . . . . .      | 22        |
| <b>Заключение</b>                                     | <b>24</b> |
| <b>Список используемых источников</b>                 | <b>25</b> |

# ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron-based Ion facility)[1] – это новый ускорительный комплекс, который создается в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи. В данный момент идет строительство и разработка физических и инженерных решений для различных частей ускорительного комплекса. Его основным объектом является кольцевой ускоритель частиц, на котором будут расположены два детектора: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector).

В систему строящегося детектора SPD планируется установить счетчик столкновений пучков - Beam-Beam Counter (BBC)[2]. Перед проектируемым детектором сваятся следующие задачи:

- измерения локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных асимметрий инклюзивного рождения заряженных частиц в протон-протонных поляризованных столкновениях
- мониторинг столкновений
- дополнение к системе TOF - определение момента столкновения

Также использование данного детектора позволит ввести в эксперимент ионную программу измерений, реализовав решение следующих задач:

- оценка центральности столкновений
- восстановление плоскости реакции

При проектировании детектора необходимо определить его геометрию и используемые материалы в соответствии с решаемыми этой установкой проблемами. Для оптимизации процессов проектирования необходимо выполнить моделирование предполагаемого детектора.

# 1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

## 1.1 УСКОРИТЕЛЬ NICA

NICA (Nuclotron based Ion Collider facility)[2] – это новый ускорительный комплекс, который создаётся на базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) с целью изучения свойств плотной барионной материи.

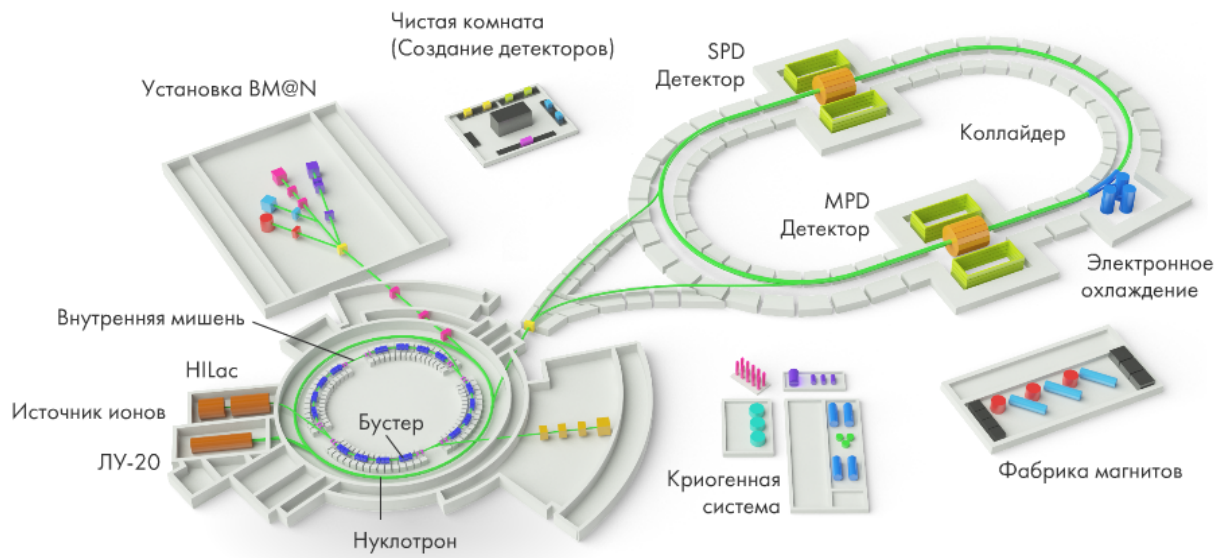


Рисунок 1.1 — Ускорительный комплекс NICA

Идея этого проекта заключается в проведении фундаментальных исследований в области физики ядерных и атомных столкновений. Проект NICA предполагает создание ускорителя ионов на базе существующего ускорителя Нуклотрон в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия), который позволит получать пучки тяжелых ионов.

Основными целями проекта являются[1]:

- изучение свойств кварковой материи при экстремальных условиях, таких как высокая плотность и температура. Это включает исследование кварк-глюонной плазмы (QGP) - состояния вещества, которое предположительно существовало первые несколько миллисекунд после Большого Взрыва;

- исследование критического поведения ядерного вещества при приближении к фазовому переходу и понимание механизмов образования ядер в коллапсирующих звездах;

- исследование спиновой структуры нуклонов, явления поляризации

В состав ускорительного комплекса входят как действующие объекты, так и создаваемые (рисунок 1.1):

- инжекционный комплекс поляризованных протонов и дейтронов (источник, линейный ускоритель ЛУ-20)

- инжекционный комплекс тяжёлых ионов (источник типа КРИОН, линейный ускоритель НИЛAc)

- бустерный синхротрон (предускорительное кольцо)

- Нуклотрон (предускорительное кольцо)

- сверхпроводящий коллайдер NICA

- криогенный комплекс

- экспериментальные установки MPD и SPD

- экспериментальные установки на канале выведенных пучков Нуклотрона (BM@N)

В своей работе NICA будет использовать взаимодействия пучков самых разных частиц: от протонов и поляризованных дейтронов до массивных ионов золота. Тяжелые ионы планируется разгонять до энергий 4,5 ГэВ (на нуклон), протоны – до 12,6 ГэВ. Регистрация параметров столкновений потоков частиц будет проводиться в двух точках. В них будут расположены проектирующиеся детекторы: MPD (Multi-Purpose Detector), предназначенный для проведения экспериментов в области релятивистской ядерной физики при столкновениях пучков ядер тяжелых элементов (до золота), ядер тяжелых элементов с протонами и протон-протонных столкновениях, а также SPD (Spin Physics Detector), предназначенный для проведения экспериментов по физике спина при столкновениях пучков ядер легких элементов.

## 1.2 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

На сверхпроводящем коллайдере NICA предусмотрены две точки столкновения пучков частиц, в которых расположены два основных детектора ускорительного комплекса: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector, схема установке представлена на рисунке 1.2).

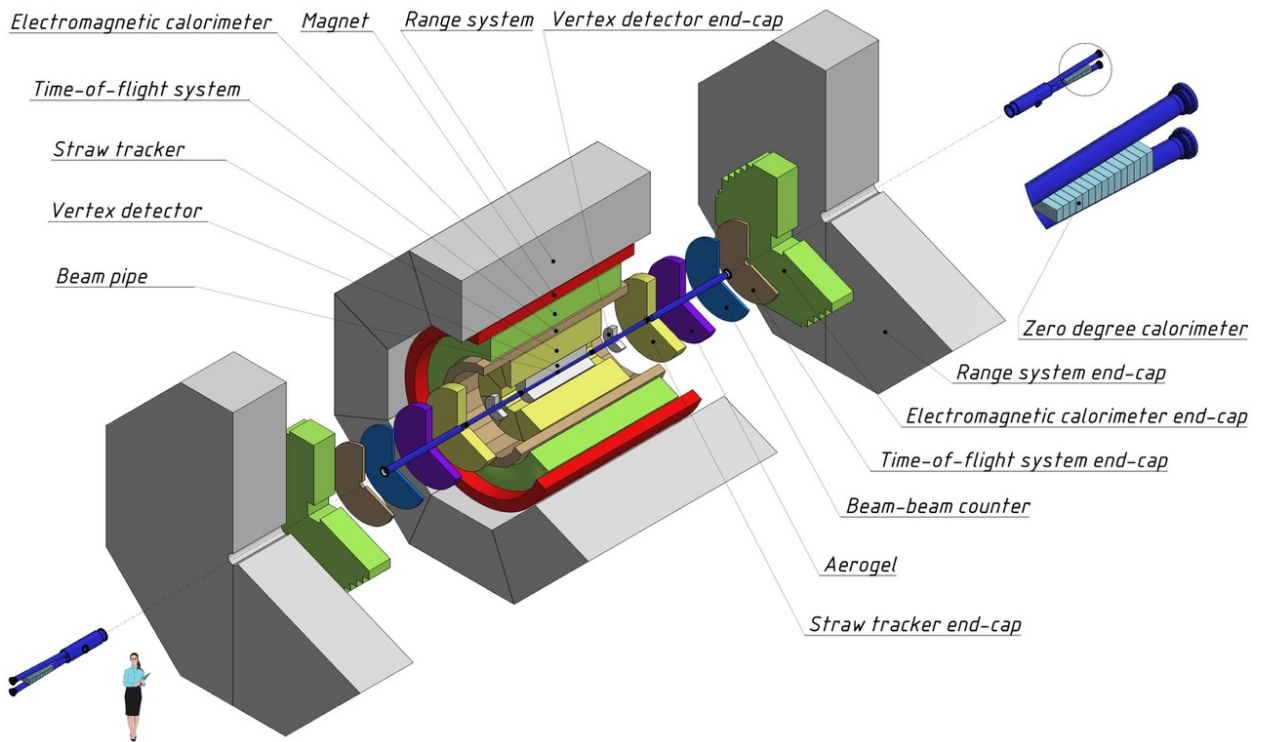


Рисунок 1.2 — Экспериментальная установка SPD

Основная цель эксперимента SPD[2] - проведение экспериментов по изучению спиновой структуры нуклонов и других процессов, зависящих от спина, путем измерений асимметрий в процессе Дрелла-Яна, процессы рождения  $J/\Psi$  частиц и прямых фотонов в столкновениях поляризованных протонов и дейтронов.

Текущий дизайн детектора SPD предусматривает три модуля: две торцевые крышки (end-caps) и центральную часть (barrel). Каждая секция имеет свою индивидуальную магнитную систему: end-caps - соленоидальные катушки, barrel - тороидальную магнитную систему. В основные системы детектирования входят:

- мюонный детектор (RS)
- электромагнитный калориметр (ECal)
- времяпролетный детектор (TOF)
- трековый детектор (TR)
- вершинный детектор (VD)
- счетчик столкновений (BBC)
- калориметр нулевых углов (ZDC)

Также, планируется ввести программу физических измерений по изучению процессов столкновений тяжелых релятивистских ионов (детектор BBC).

## 2 ДЕТЕКТОР ВВС

### 2.1 КОНЦЕПТ ДЕТЕКТОРА ВВС

Два счетчика столкновений (Beam-Beam Counter, ВВС) планируется разместить перед время-пролетной системой (TOF) в на торцах экспериментальной установки (end-caps). Схематический вид детектора, представлен на рисунке 2.1[2].

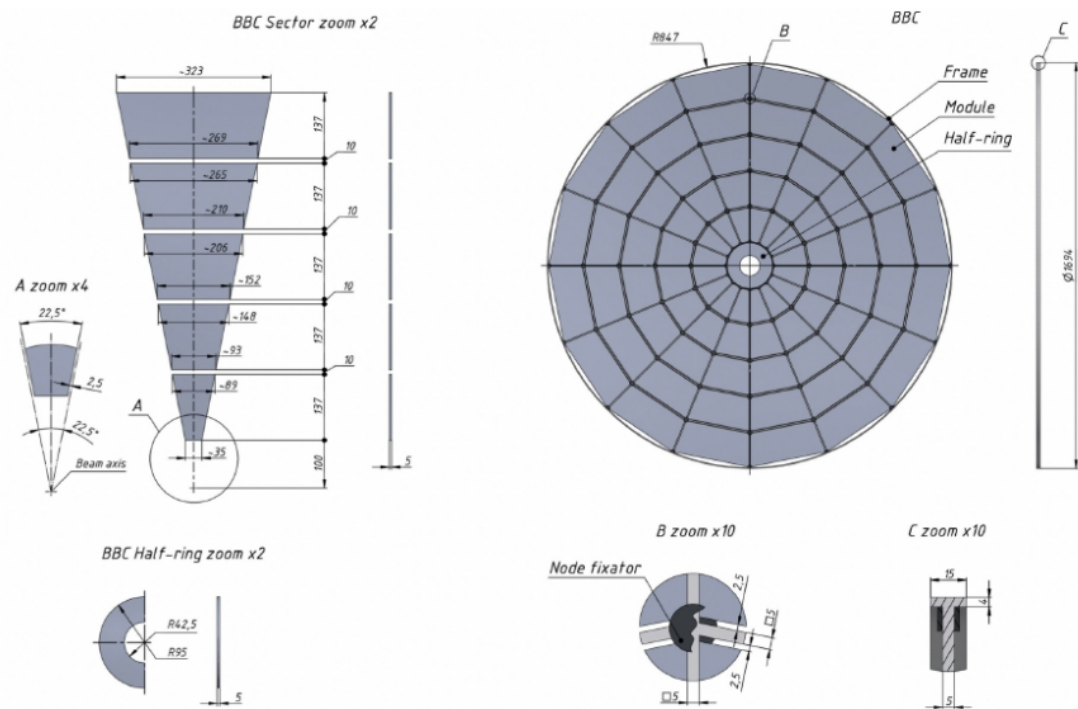


Рисунок 2.1 — Концептуальная схема ВВС

Данный прототип предложен в техническом отчете по SPD. Предполагается изготовить детектор из быстрого сцинтилляционного пластика. ВВС должен покрывать диапазон углов от 60 до 500 мрад. Для достижения необходимой степени гранулярности, детектор представляет собой (в соответствии с TDR SPD) 6 концентрических слоев, в каждом из которых 16 азимутальных секторов[3].

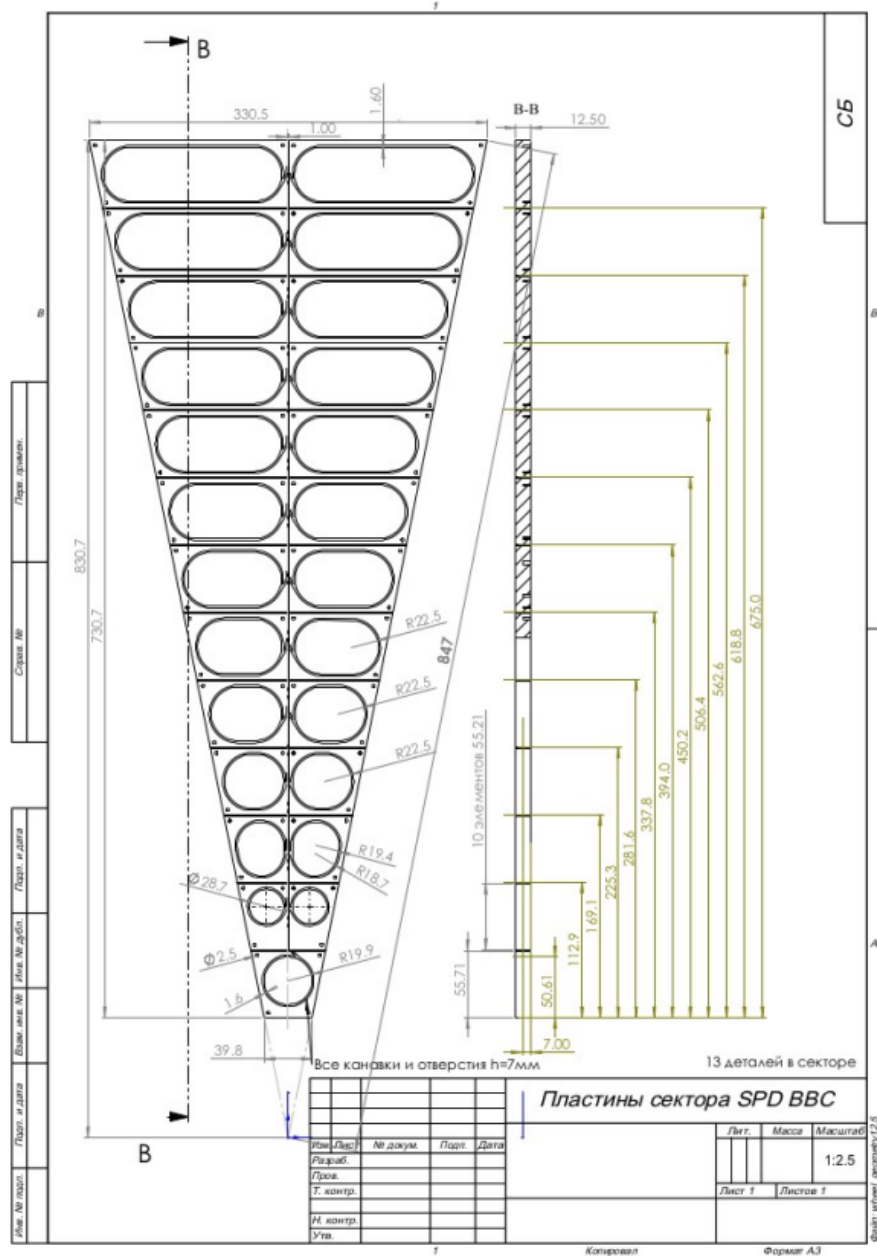


Рисунок 2.2 — Чертеж одного из секторов, концептуальная схема которого разрабатывается в МИФИ

Основные задачи ставящиеся перед ВВС[2]:

- измерения локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных асимметрий инклюзивного рождения заряженных частиц в протон-протонных полярризованных столкновениях
- мониторинг столкновений
- дополнение к ситеме TOF - определение момента столкновения

Также при использовании данного детектора, обеспечив высокую степень гранулярности, становится возможным ввод ионной программы физических измерений на SPD[4]. С помощью ВВС восстанавливать плоскость взаимодействия ядер.



## 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

### 3.1 ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ

На рисунке 3.1 представлен концепт детектора, геометрию которого необходимо перенести в Geant4. Для представления выбранного подхода к реализации выбран нижний элемент сектора.

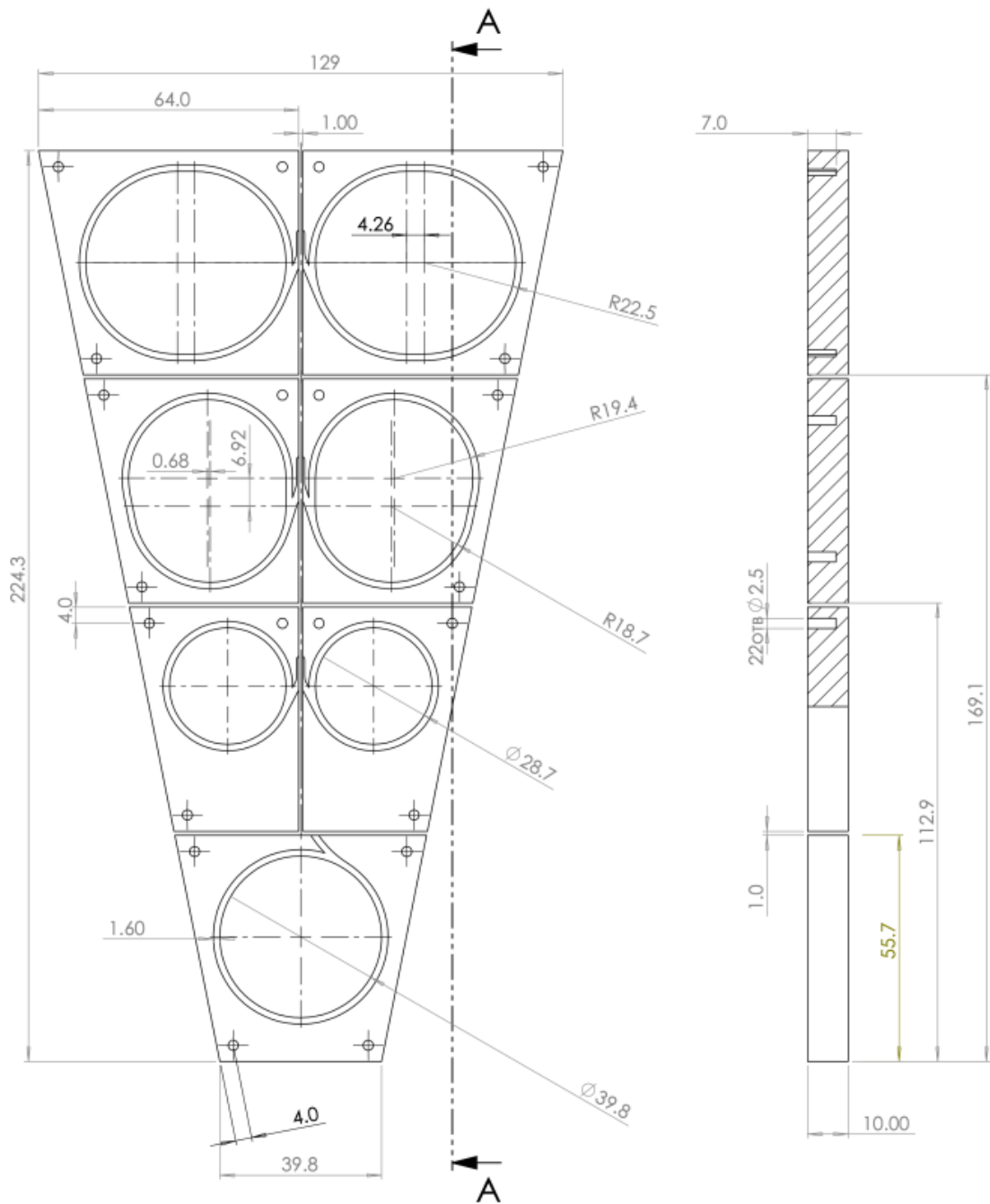


Рисунок 3.1 — Чертеж прототипа детектора

Для описания в программном пакете Geant4, с использованием внутренних инструментов, геометрия является нетривиальной (описание геометрии оптоволокна с учетом его размещения внутри соответствующего канала). Для описания используется программный пакет КОМПАС-3D (результат 3D-моделирования представлен на рисунке 3.2).

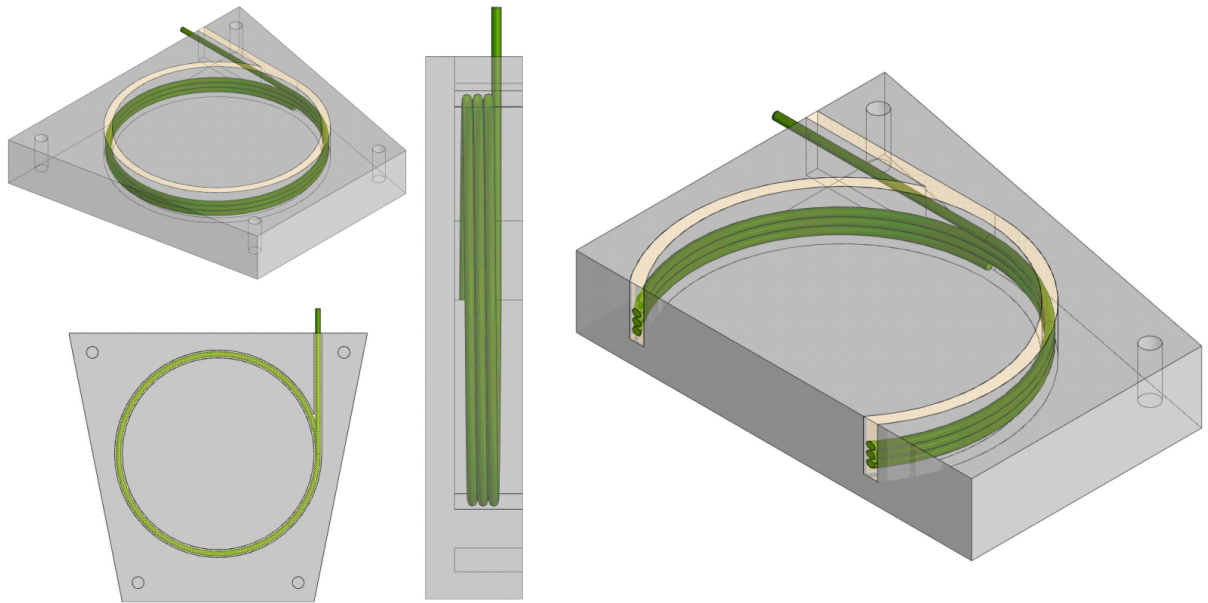


Рисунок 3.2 — 3D-модель прототипа детектора - первый элемент сектора (снизу) - различные проекции, в разрезе

С помощью библиотеки CADMesh реализован перенос геометрии из форматат stl в структуру Geant4 (рисунок 3.3) включающая в себя: объем сцинтиллятора, оптоволокно, оптический клей, фотокатод)

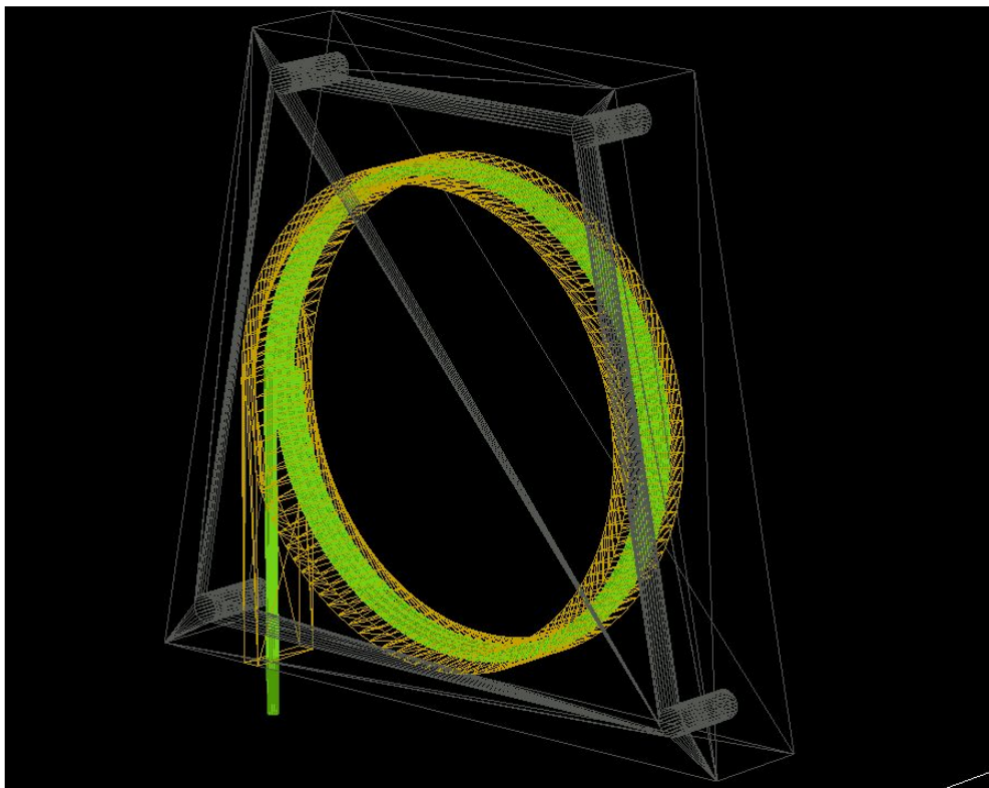


Рисунок 3.3 — Перенесенная 3D-модель в Geant4

Для сцинтилляционного детектора за основу выбрана геометрия первого элемента сектора прототипа детектора, с сохранением его исходных

размеров (трапеция с основаниями 35 мм и 60 мм, толщиной 10 мм). Незначительно изменен канал для укладки оптоволокна для упрощения выполнения условия пересечения объемов. Оптоволокно в конфигурации с одной обкладкой (single-cladding, KURARAY Y-11 диаметром 1 мм). Пространство между сцинтиллятором и оптоволокном планируется заполнять оптическим клеем. Объем имитирующий фото-катод расположен на конце оптоволокна соосно ему в торцевой части представленного элемента (на рисунке 3.3 внизу) диаметром совпадающим с оптоволокном (1 мм), толщиной 0.1 мм.

## 3.2 МАТЕРИАЛЫ

Программная модель прототипа позволяет осуществить подбор материалов, в соответствии со ставящейся перед детектором задачей. Для вещества детектора выбран органический тип сцинтиллятора, описанный в примере Geant4 (OpNovice), с характеристиками представленными в таблице 3.1.

| Название параметра            | Описание   | Значение               |
|-------------------------------|--|------------------------|
| Resolution Scale              | Доля энергетического спектра участвующего в генерации            | 1.0                    |
| Scintillation Yield           | Световыход на единицу энергопотерь                               | $1200 \frac{1}{MeV}$   |
| Scintillation time constant 1 | Время высвечивания быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки   | $2.4 ns$               |
| Scintillation time constant 2 | Время высвечивания медленной компоненты сцинтилляционной вспышки | $5 ns$                 |
| Scintillation Yield 1         | Доля быстрой компоненты в генерации                              | 1.0                    |
| Scintillation Yield 2         | Доля медленной компоненты в генерации                            | 0.0                    |
| Birks Constant                | Постоянная Биркса  | $0.126 \text{ мм/МэВ}$ |

Таблица 3.1 — Характеристики сцинтиллятора

Для большинства органических сцинтилляторов значение параметра световыхода на единицу потерянной энергии колеблется около  $12000 \text{ 1/МэВ}$ . Для оптимизации времени набора статистики, световыход уменьшен в 10 и 20 в зависимости от проводимых измерений. Это необходимо учитывать при построении распределений по множественности регистрируемых фотонов.

Представленное в работе оптоволокно выполнено из материалов, соответствующих модели KURARAY Y-11 [5]. Внутренняя часть оптоволокна состоит из полистерола. Для обкладки - полиметилметакрилат (органическое стекло).

Вещество выбранное в качестве оптического клея обладает следующими характеристиками:

| Название параметра       | Значение                 |
|--------------------------|--------------------------|
| Состав                   | $H_{102}C_{65}N_{20}O_7$ |
| Плотность                | 1.02 г/см <sup>3</sup>   |
| Коэффициент отражения    | 1.56                     |
| Длина полного поглощения | 5 м                      |

Таблица 3.2 — Характеристики оптического клея

В качестве вещества для фотокатода выбран алюминий, определние характеристик которого представленно в библиотеке G4NistManager.

### 3.3 ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПАКЕТА

Для моделирования сцинтилляционных детекторов обязательным является подключение пакета оптической физики, включающего в себя соответствующие процессы (Рэлеевское рассеяние, преломление и отражение на границах сред, поглощение, переизлучение со смещением длины волны). Полный список подключенных физических пакетов представлен ниже:

**FTFP\_BERT** - модульный физический пакет рекомендуемый для моделирования в области физики высоких энергий; включает в себя стандартные электромагнитные процессы (G4EmStandardPhysics\_option4);

**G4OpticalPhysics** - дополнительный пакет не входящий в FTFP\_BERT, в котором описана оптическая физика;

Первоначально была создана примитивная геометрия детектора - трапеция с основаниями 35 мм и 60 мм, длиной 51 мм и толщиной 10 мм, с прямоугольным каналом для укладки оптоволокна.

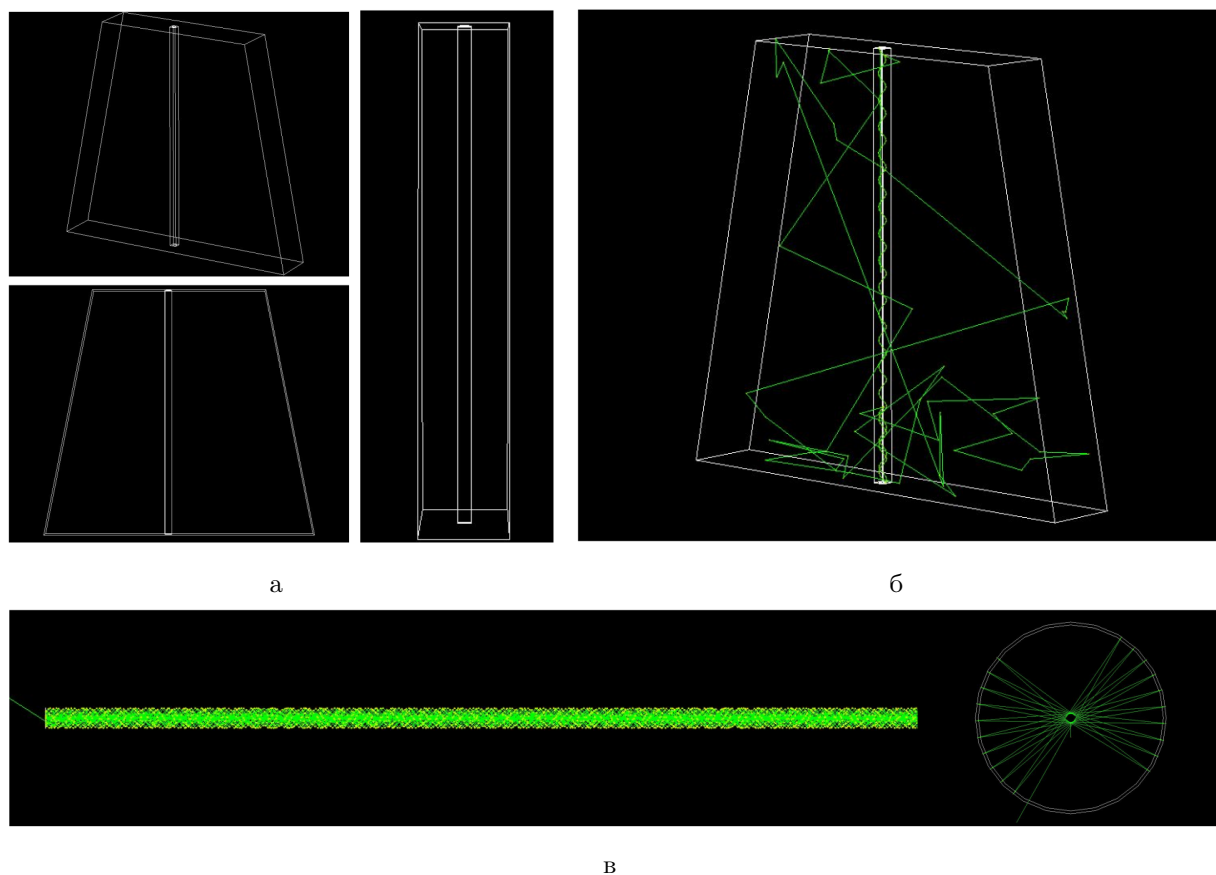


Рисунок 3.4 — Примитивное представление детектора: а - общий вид компоновки: трапециевидный сцинтиллятор, объем оптического клея, оптическое волокно; б - визуализация процесса распространения фотона в объеме (в том числе внутри оптоволокна); в - визуализация процесса переизлучения фотона и последующего его распространения в оптоволокне;

Для определения процессов преломления и отражения на границах сред были заданы следующие типы поверхностей между соответствующими парами:

| Пара поверхностей                | Тип поверхности         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Сцинтиллятор - воздух            | dielectric - dielectric |
| Клей - воздух                    | dielectric - dielectric |
| Ядро оптоволокна - фотокатод     | dielectric - metal      |
| Обкладка оптоволокна - фотокатод | dielectric - metal      |

Таблица 3.3 — Типы поверхностей между различными средами

Таким образом для пар сцинтиллятор - воздух и клей - воздух определено диффузное отражение фотонов (рисунок 3.4б).

В случае геометрии приближенной к реальной, компоновка оптоволокна имеет сложную спиралевидную структуру в 3 витка. С увеличением радиуса кривизны сгиба, фотон может вылетать из объема канала.

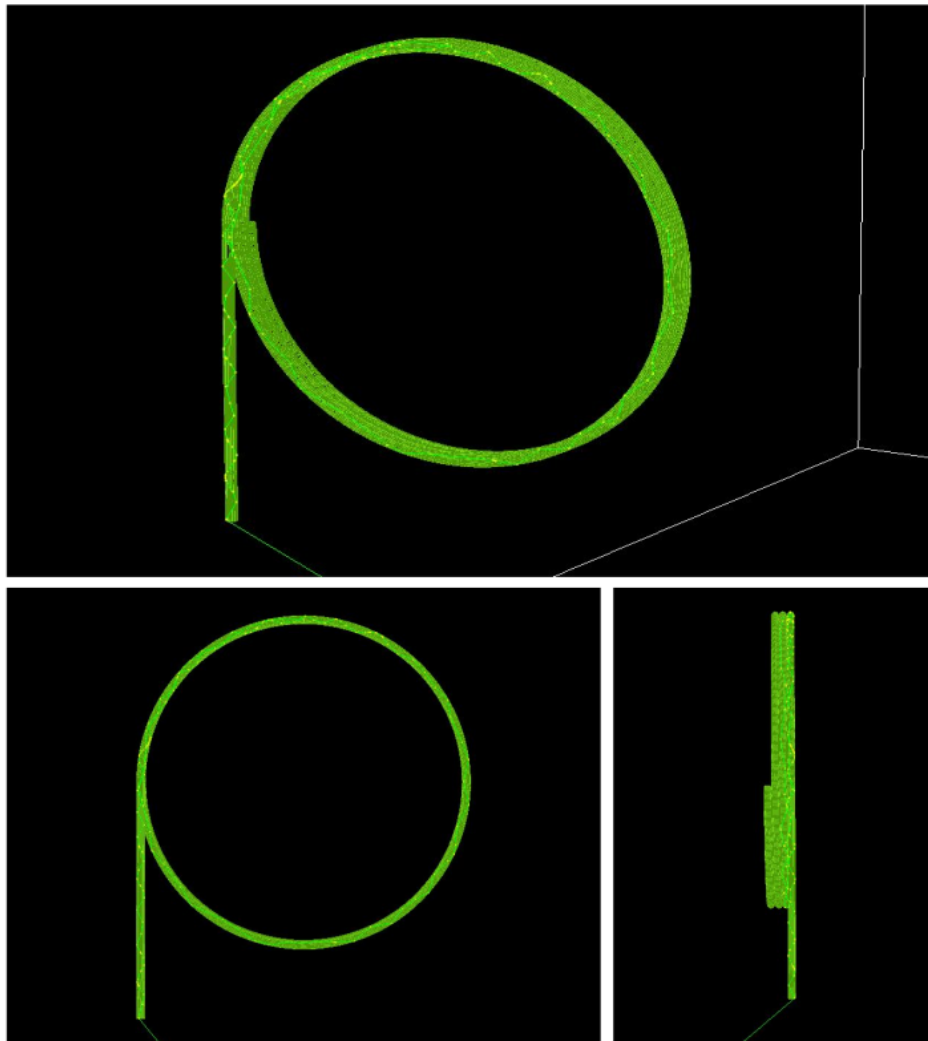


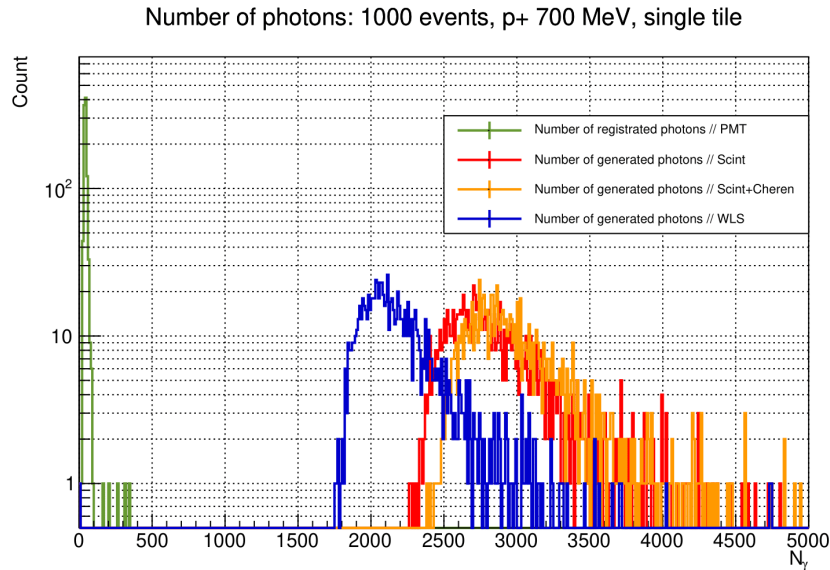
Рисунок 3.5 — Распространение переизлученного фотона в объеме оптоволокна с геометрией приближенной к реальной

Для проверки, внутри оптоволокна генерировался фотон с энергией соответствующей пику поглощения (для single-cladding KURARAY Y-11  $\sim 2.8$  кэВ), фиксировался факт регистрации фотокатодом соответствующей частицы, а также визуально оценивался процесс распространения фотона (рисунок 3.5)

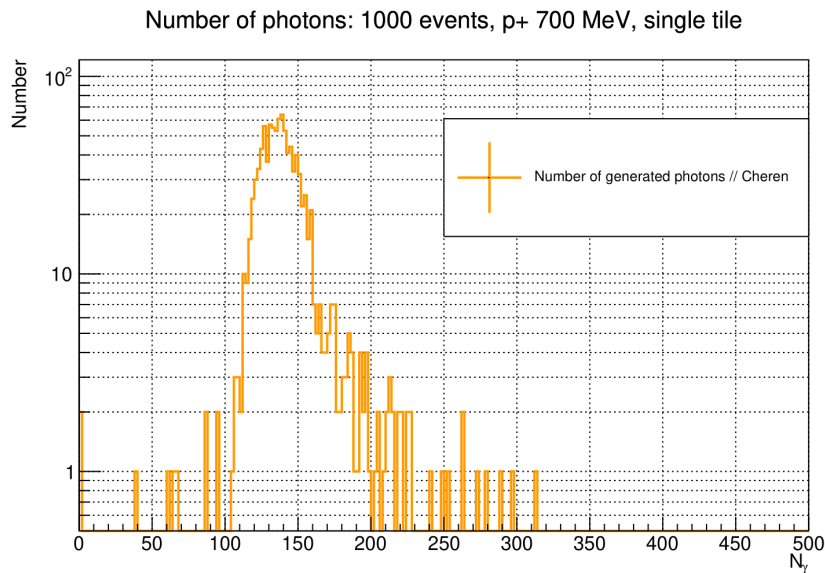
В Geant4 для оптических фотонов не определен процесс конверсии в электрон. Описанный в модели фотокатод является чувствительным детектором (G4SensitiveDetector) и регистрация частиц происходит через процесс соударения фотонов с его поверхностью. Энергия упавшего на фотокатод фотона фиксируется как зарегистрированная, а его трэк уничтожается.

### 3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ ОПИСАНИЯ ГЕОМЕТРИИ

Для созданной конфигурации модели детектора была получена статистика в размере 1000 событий с протонами энергией 700 МэВ. Для генерации первичной частицы использовался класс G4ParticleGun. Событием в данном случае называется пролет одной первичной частицы через сцинтилляционный детектор.



а



б

Рисунок 3.6 — Распределение по числу генерируемых в объеме детектора фотонов за одно событие: а - общее распределение: сцинтилляционных фотонов, переизлученных в оптоволокне фотонов, суммарное распределение для фотонов Черенкова-Вавилова и сцинтилляционных; б - распределение по числу генерируемых фотонов излучения Черенкова-Вавилова;



Для оптимизации скорости вычислений световыход для представленного сцинтиллятора был уменьшен в 10 раз (необходимо умножать соответствующие значения по оси  $X$  для распределения 3.6б на 10). Данный параметр определяет число генерируемых сцинтилляционных фотонов при взаимодействии первичной частицы с объемом детектора, на излучение Черенкова-Вавилова он не влияет. Таким образом, при пролете одного протона в среднем рождается порядка 27000 сцинтилляционных фотонов и 140 от эффекта Черенкова-Вавилова (на один фотон Черенкова-Вавилова  $\sim 200$  сцинтилляционных фотонов).

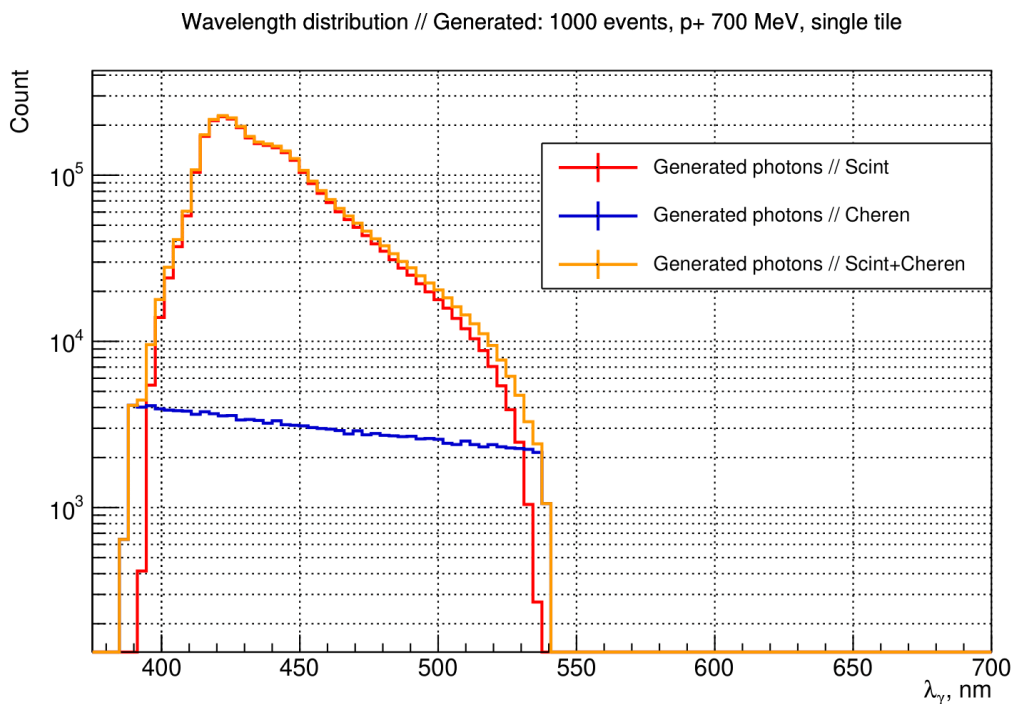


Рисунок 3.7 — Спектр по длинам волн генерируемых в объеме сцинтиллятора фотонов: сцинтилляционных фотонов, фотонов излучения Черенкова-Вавилова, суммарное распределение для фотонов Черенкова-Вавилова и сцинтилляционных

Энергетический спектр генерируемых сцинтилляционных (рисунок 3.7) фотонов полностью определяется параметрами задаваемыми при описании материала детектора. При подборе материала для прототипа необходимо иметь спектр излучаемых при вспышке фотонов, определенный экспериментально.

В процессе моделирования часть фотонов от сцинтилляционных вспышек, а также возникающих вследствие эффекта Черенкова-Вавилова попадает в объем оптоволокна, переизлучается со сдвигом длины волны в большую сторону и, затем, перемещается к концам канала, на одном из которых находится фотокатод. Таким образом за одно событие, в среднем, на фотокатод падает  $\sim 400$  фотонов.

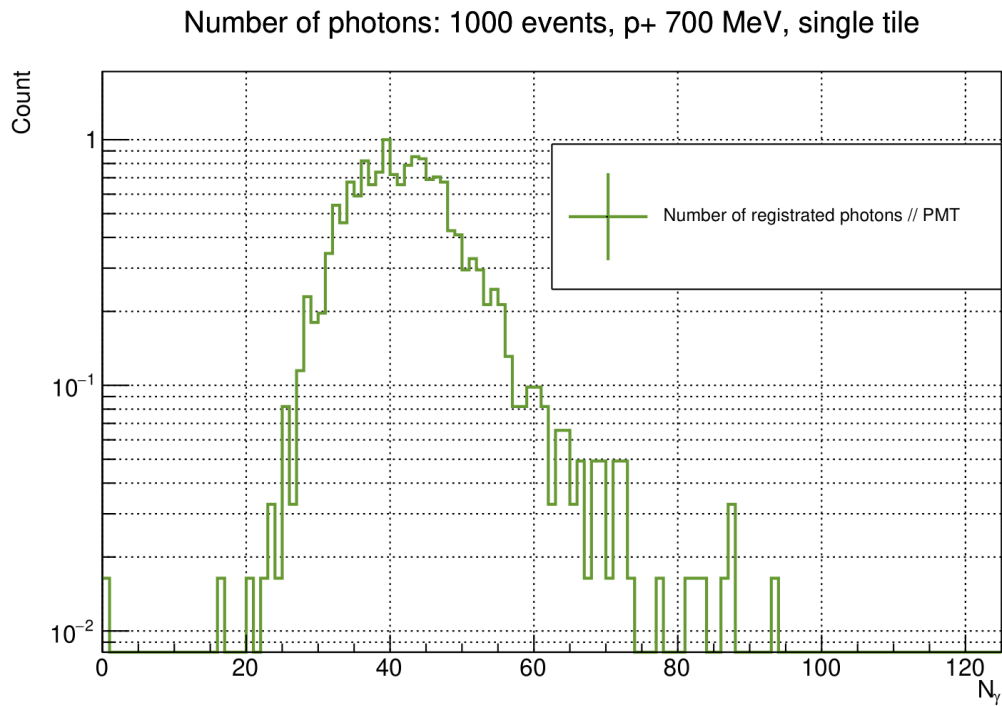


Рисунок 3.8 — Распределение по множественности зарегистрированных на фотокатоде фотонов

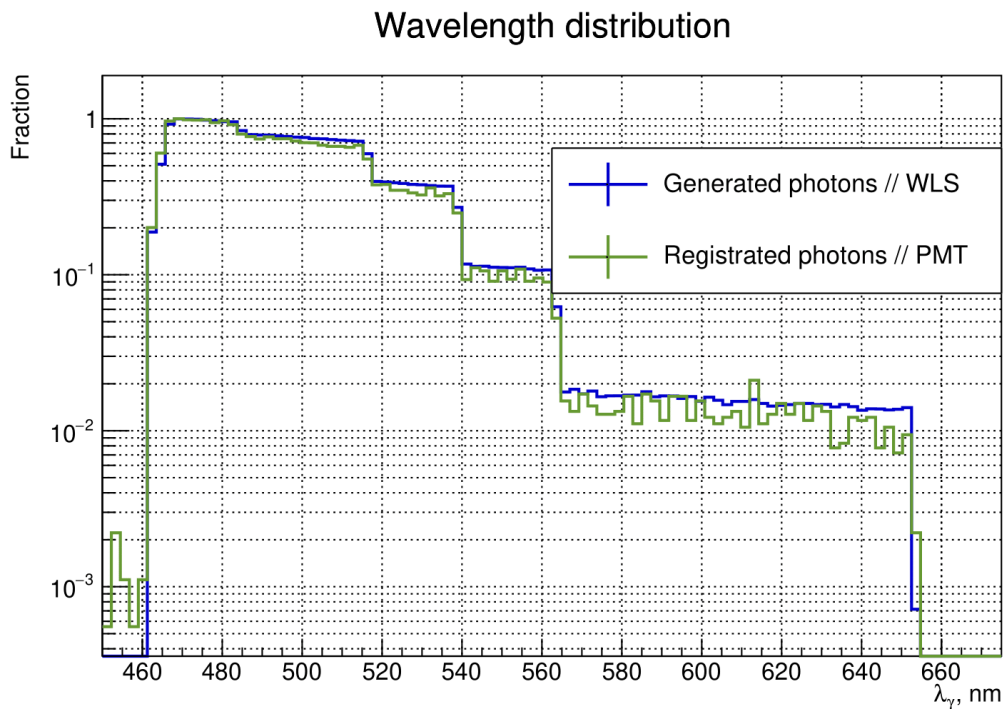


Рисунок 3.9 — Спектры по длинам волн регистрируемых на фотокатоде фотонов и генерируемых от переизлучения в оптоволокне

Зарегистрированный фотокатодом энергетический спектр полностью определяется параметрами задаваемыми при описании материалов для оптоволокна. На рисунке 4.1 представлено сравнение двух распределений по дли-

нам волн для фотонов упавших на фотокатод и генерируемых в объеме оптоволокна. Данные спектры нормированы на соответствующий максимум для наглядности сравниваемых форм. В среднем, на  $\sim 50$  генерируемых фотонов приходится один зарегистрированный.

# 4 ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ДЕТЕКТОРА

## 4.1 КАРТА ИССЛЕДОВАНИЯ



Рисунок 4.1 — Карта исследования по оптимизации геометрии элементов детектора ВВС

На данном этапе работы основной задачей была оптимизация конфигурации детектора, а также подготовительная работа для дальнейших исследований связанных с быстрым моделированием оптоволоконных каналов.

Для оптимизации геометрии элементов, с помощью программы 3D-моделирования КОМПАС-3D были созданы несколько конфигураций различных элементов прототипа детектора ВВС:

- Конфигурации с различной глубиной канавки для оптоволокну - исследование зависимости числа генерируемых, захватываемых оптоволокну, регистрируемых фотонов
- Конфигурации с различной глубиной залегания оптоволокну в элементах - исследование зависимости числа генерируемых, захватываемых оптоволокну, регистрируемых фотонов

- Конфигурации с различным числом витков оптоволокна - исследование зависимости числа захватываемых оптоволокном и регистрируемых фотонов
- Конфигурации с различной формой витков оптоволокна - исследование зависимости числа захватываемых оптоволокном и регистрируемых фотонов

## 4.2 РАЗЛИЧНАЯ ГЛУБИНА КАНАВКИ

Одним из измерений, связанных с оптимизацией конфигурации геометрии детектора, является исследование зависимости числа рождаемых сцинтилляционных фотонов в объеме детектора от глубины канавки, в которую укладывается оптоволокно.

Для нулевого элемента сектора детектора были созданы три 3D-модели различных канавок отличающихся по высоте: 4, 5.5, 7 миллиметров. Одиночный виток оптоволокна был независимо зафиксирован на глубине в 2.5 миллиметра от поверхности элемента. Результаты измерений приведены в таблице 4.1.

| Глубина канавки, мм | Число SC, x20 | Число WLS, x20 | Число REG, x20 |
|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| 4                   | 1432.81       | 972.101        | 18.4094        |
| 5.5                 | 1414.72       | 962.013        | 17.5168        |
| 7                   | 1435.04       | 976.831        | 18.736         |

Таблица 4.1 — Зависимости числа генерируемых сцинтилляционных, числа переизлученных оптоволокном, регистрируемых фотонов от глубины канавки

Исходя из полученных результатов, зависимости числа генерируемых, переизлучаемых, а также регистрируемых фотонов от глубины канавки нет.

## 4.3 РАЗЛИЧНАЯ ГЛУБИНА ЗАЛЕГАНИЯ ОПТОВОЛОКНА

Отсутствие зависимости числа генерируемых, переизлучаемых, а также регистрируемых фотонов от глубины канавки позволяет расположить оптоволокно на любой требуемой глубине. Ее значение может определяться наиболее оптимальным положением витка в объеме элемента детектора.

Для исследования зависимости количества захватываемых оптоволокном фотонов от глубины его залегания был проведен ряд измерений

с нулевым элементом детектора и одиночным витком, который закладывался на различной высоте от дна 7 миллиметровой канавки. Результаты измерений приведены в таблице 4.2.

| Отступ, мм | Число WLS, x20 | Число Регистрируемых, x20 |
|------------|----------------|---------------------------|
| 1          | 1008.69        | 19.2651                   |
| 1.5        | 991.109        | 18.5202                   |
| 2          | 1017.58        | 19.1174                   |
| 2.5        | 995.403        | 19.2621                   |
| 3          | 990.092        | 19.204                    |
| 3.5        | 988.12         | 18.8                      |
| 4          | 976.831        | 18.736                    |

Таблица 4.2 — Характеристики оптического клея

Исходя из полученных результатов, зависимости числа переизлучаемых, а также регистрируемых фотонов от глубины залегания оптоволоконна нет.

#### 4.4 РАЗЛИЧНОЕ ЧИСЛО ВИТКОВ ОПТОВОЛОКНА

В качестве оптимизации конфигураций элементов детектора можно исследовать зависимость числа переизлучаемых, а также числа регистрируемых фотонов от количества витков оптоволоконна.

Для нулевого элемента детектора были созданы две конфигурации оптоволоконна: с одним витком и двумя. Глубина для укладки оптоволоконна установлена в 7 миллиметров. При сравнении распределений по количеству зарегистрированных в событии фотонов видно, что зависимости от числа витков нет (рисунок 4.2).

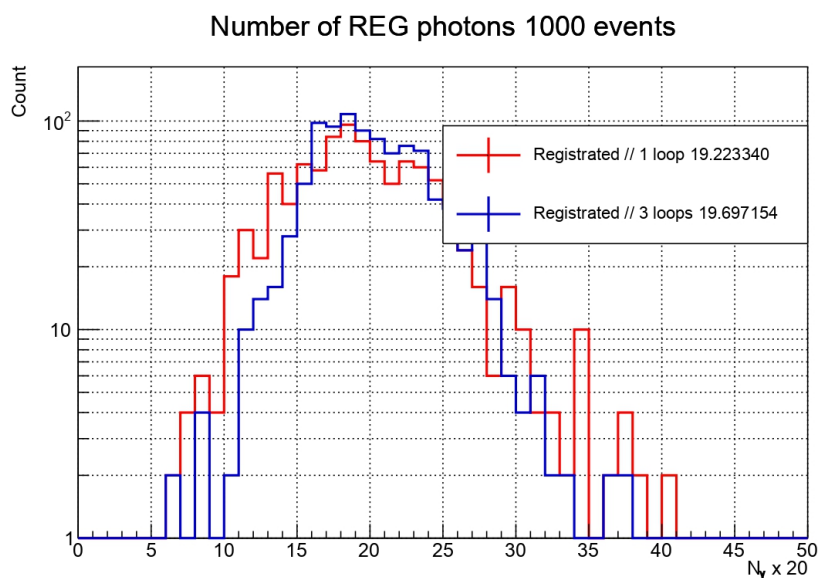


Рисунок 4.2 — Сравнение распределений числа регистрируемых фотонов в одном событии для двух конфигураций оптоволоконна

При более детальном рассмотрении результатов (рисунок 4.3) видно, что ожидаемого соотношения числа захватываемых фотонов относительно количества витков нет (предполагается, что конфигурация с тремя витками будет эффективнее в 3 раза). Этот факт требует дополнительных измерений.

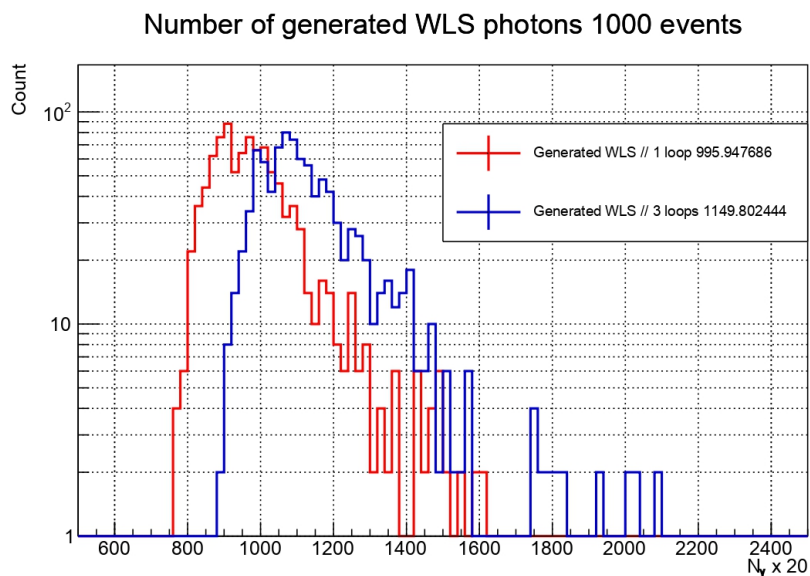


Рисунок 4.3 — Сравнение распределений числа захватываемых фотонов в одном событии для двух конфигураций оптоволоконна

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом семестре была проведена подготовительная работа для моделирования детектора BBC SPD. Отработан процесс описания, наиболее приближенной в реальной, геометрии элементов детектора, а также процесс получения результатов моделирования при работе с оптическими фотонами в Geant4. Решены следующие задачи:

- Разработан детальный план реализации моделирования;
- Проведено исследование зависимости числа регистрируемых и генерируемых WLS фотонов от числа витков оптоволоконна
- Проведено исследование зависимости числа генерируемых SC, WLS, регистрируемых от глубины канавки
- Проведено исследование зависимости числа WLS и регистрируемых фотонов от глубины залегания оптоволоконна
- Подготовлены исследования связанные с формой укладки оптоволоконна для оптимизации процесса моделирования

Дальнейшие планы направлены на уточнение результатов приведенных исследований (генерация первичной частицы из области, а не из одной точки). Также планируется продолжить измерения связанные с зависимостью числа зарегистрированных и WLS фотонов от формы укладки оптоволоконна для оптимизации дальнейших вычислений.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мегапроект NICA. — 2023. — URL: <https://nica.jinr.ru/ru/> (дата обр. 26.05.2023).
2. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [и др.]. — 2021.
3. *Nigmatkulov G.* Beam-Beam Counter (BBC) design proposal for relativistic ion-ion physics program at SPD. — 2023. — URL: [https://indico.jinr.ru/event/3575/contributions/20479/attachments/15241/25727/Nigmatkulov\\_BBC\\_for\\_HI\\_20230425.pdf](https://indico.jinr.ru/event/3575/contributions/20479/attachments/15241/25727/Nigmatkulov_BBC_for_HI_20230425.pdf) (дата обр. 26.05.2023).
4. *Nigmatkulov G.* Relativistic ion-ion physics program at SPD. — 2023. — URL: [https://indico.jinr.ru/event/3782/contributions/21069/attachments/15486/26366/Nigmatkulov\\_SPD\\_PhysicsAndMC\\_20230524.pdf](https://indico.jinr.ru/event/3782/contributions/21069/attachments/15486/26366/Nigmatkulov_SPD_PhysicsAndMC_20230524.pdf) (дата обр. 26.05.2023).
5. Plastic Scintillating Fibers. — 2017. — URL: [https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf) (дата обр. 26.05.2023).