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 BBC 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

Введение **3**

1 Эксперимент SPD **4**
1.1 Ускоритель NICA 4
1.2 Эксперимент SPD. Цели и задачи 5

2 Детектор BBC **7**
2.1 Концепт детектора BBC 7

3 Моделирование детектора **9**
3.1 Описание геометрии 9
3.2 Материалы 12
3.3 Описание физического пакета 13
3.4 Результаты моделирования 16

Заключение **20**

Список используемых источников **21**

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 свавятся следующие задачи:

- измерения локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных асимметрий инклюзивного рождения заряженных частиц в протон-протонных поялризованных столкновениях
- мониторинг столкновений
- дополнение к ситеме 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 проектирвоании детектора необходимо определить его геометрию и используемые материалы в соответсвии 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.

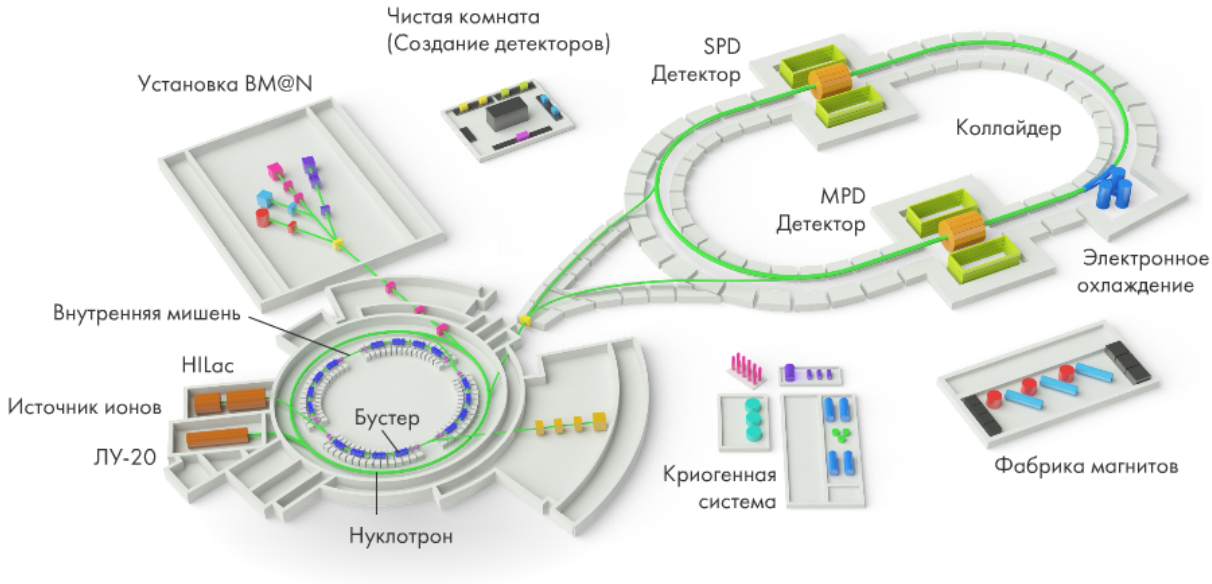


Рисунок 1.1 — Ускорительный комплекс NICA

Идея этого проекта заключаются в проведении фундаментальных исследований в области физики ядерных и атомных столкновений. Проект NICA предполагает создание ускорителя ионов на базе существующего ускорителя Нуклотрон в Объединенном 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 HILAc)

- 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 оснвоных детектора ускорительного комплекса: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector, схема установке представлена на рисунке 1.2).

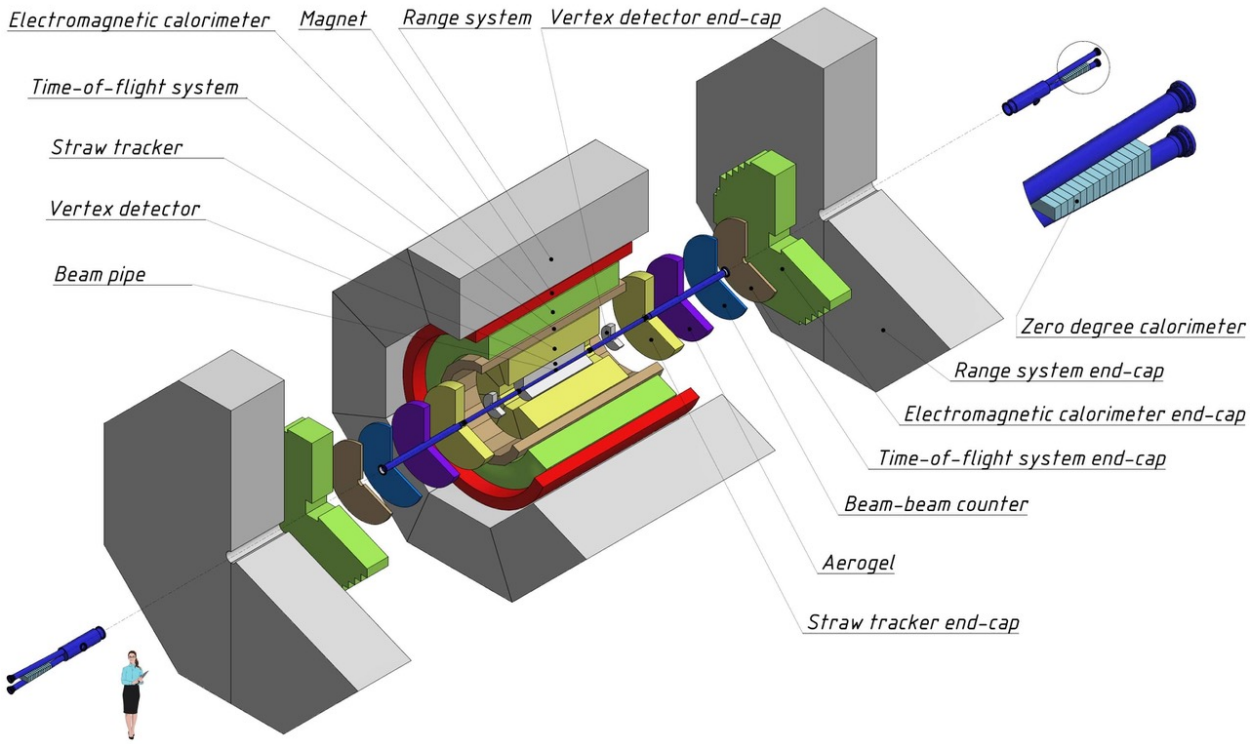


Рисунок 1.2 — Экспериментальная установка SPD

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/Ψ 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 (barell). Каждая секция имеет свою индивидуальную магнитную систему: end-caps - соленоидальные катушки, barell - торроидальную магнитную систему. В основные системы детектрирования 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 BBC

2.1 КОНЦЕПТ ДЕТЕКТОРА BBC

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

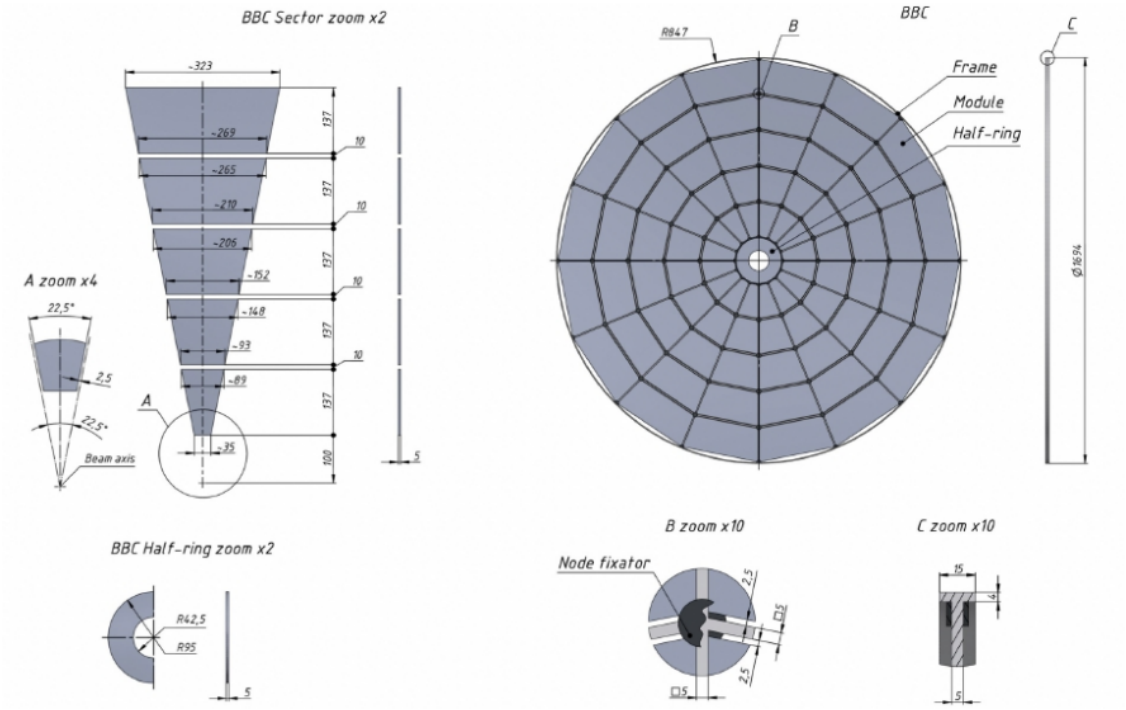


Рисунок 2.1 — Концпетуальная схема BBC

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

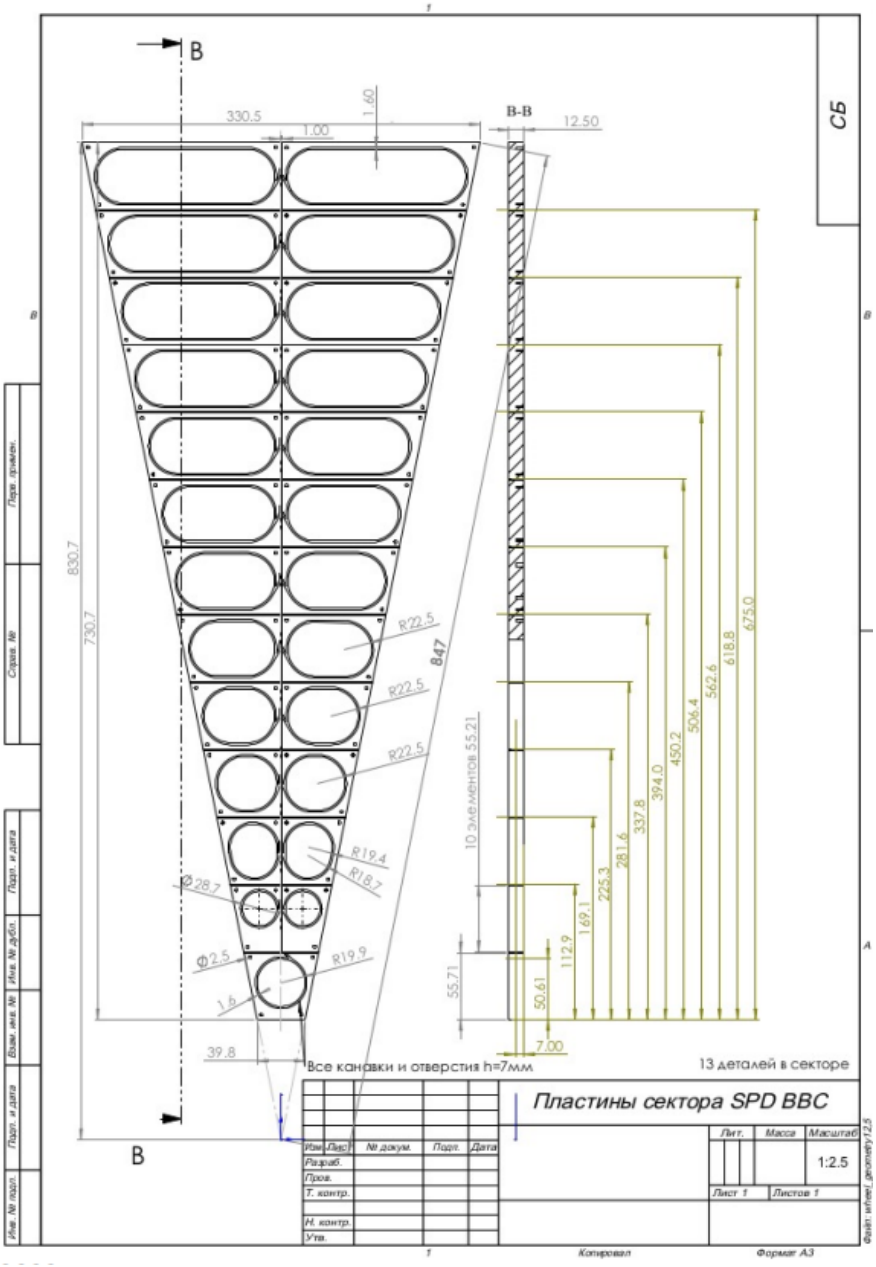


Рисунок 2.2 — Чертеж одного из секторов, концептуальная схема которого разрабатывается в МИФИ

Основные задачи ставящиеся перед BBC[2]:

- измерения локальной поляриметрии, на основе измерений азимутальных ассиметрий инклюзивного рождения заряженных частиц в протон-протонных поялризованных 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 BBC восстанавливать плоскость взаимодействия ядер.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Моделирование детектора является многопараметрической задачей. Одним из важнейших параметров является определение геометрии детектора. В данной работе, использовалось приметивное представление исходной геометрии, для подбора параметров в подключенных физических пакетах. Затем, была описана геометрия элемента прототипа детектора с некоторыми изменениями (раздел **Описание геометрии**).

Также важным набором параметров является перечень используемых материалов и их характеристик (**Материалы**). Так как в процессе моделирования, в некотором приближении, можно определить материалы для детектора, для формирования начальных результатов, такие структурные элементы как: сцинтиллятор, клей, тип оптического покрытия, оптоволокно были выполнены из веществ представленных в примерах из Geant4 (LXe, OpNovice, OpNovice2, wls)[5].

В разделе **Описание физического пакета** представлен перечень параметров выбранных при имплементации различных физических процессов в модель, например, оптический пакет.

Полученные результаты, позволяющие оценить дальнейшие перспективы для работы, представлены в разделе**Результаты моделирования**.

3.1 ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ

Одной из задач построения модели данного детектора является подбор оптимальной геометрии прототипа. Отправной точкой для данных исследований является концепт представленный на рисунке 3.1. Для работы выбран нижний элемент сектора.

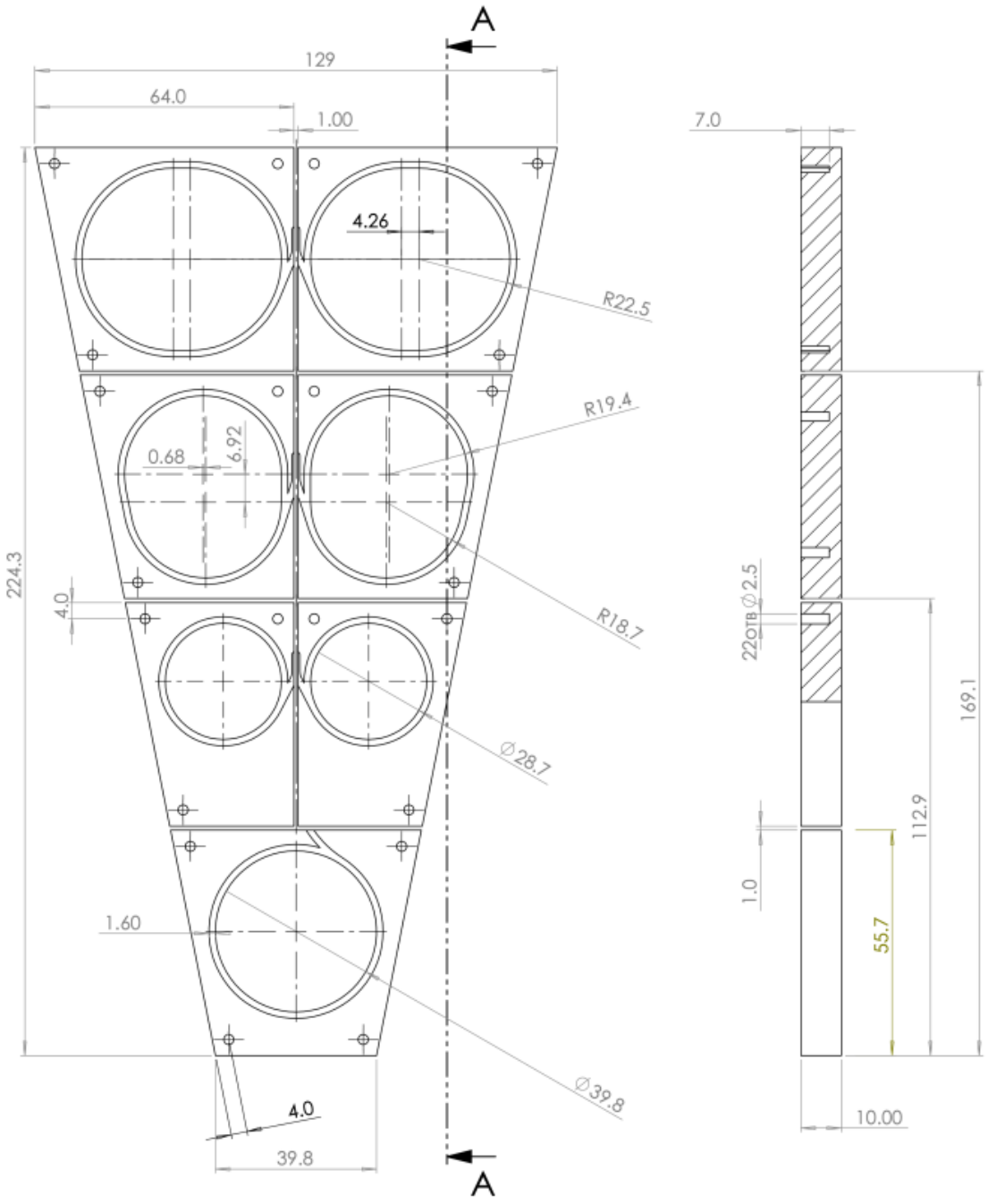


Рисунок 3.1 — Чертеж прототипа детектора

Для описания в программном пакете Geant4, с использованием внутренних инструментов, геометрия является нетривиальной (описание геометрии оптоволкна с учетом его размещения внутри соответсвующего канала). Было принято решение импортировать предварительно созданную трехмерную модель детектора, для сборки которой использовался покет КОМПАС-3D (результат 3D-моделирвоания представлен на рисунке 3.2).

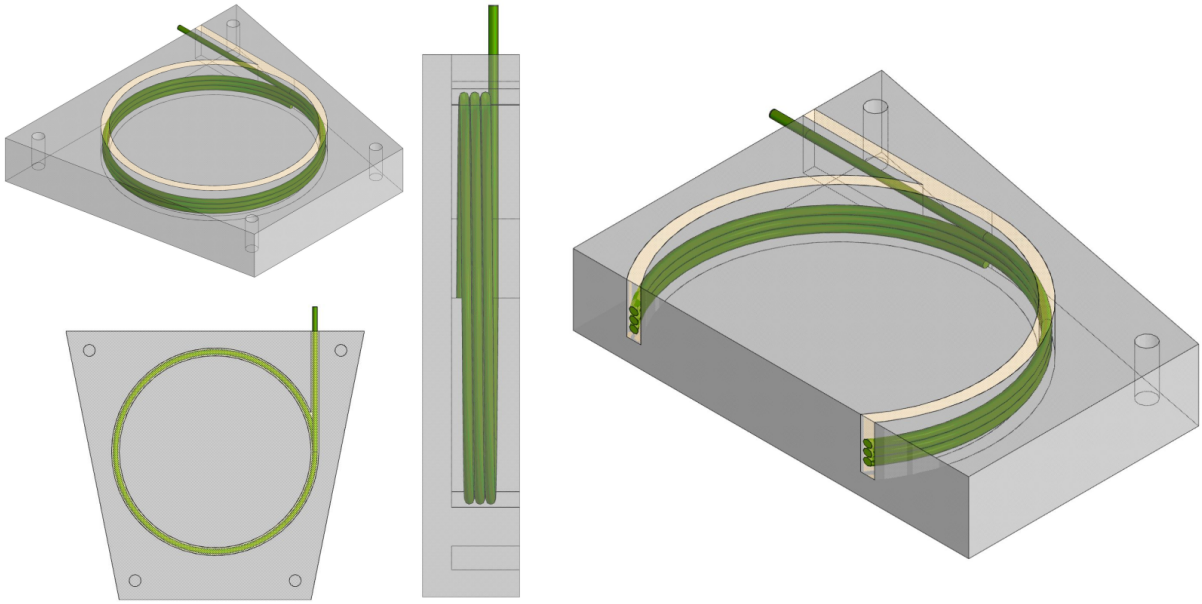


Рисунок 3.2 — 3D-модель прототипа детектора - первый элемент сектора (снизу) - различные проекции, в разрезе

Таким образом при использовании пакета 3D-моделирования КОМПАС-3D, а также библитеки CADMesh реализована модельная структура (рисунок 3.3) включающая в себя: объем сцинтиллятора, оптоволкно, оптический клей, фотокатод.

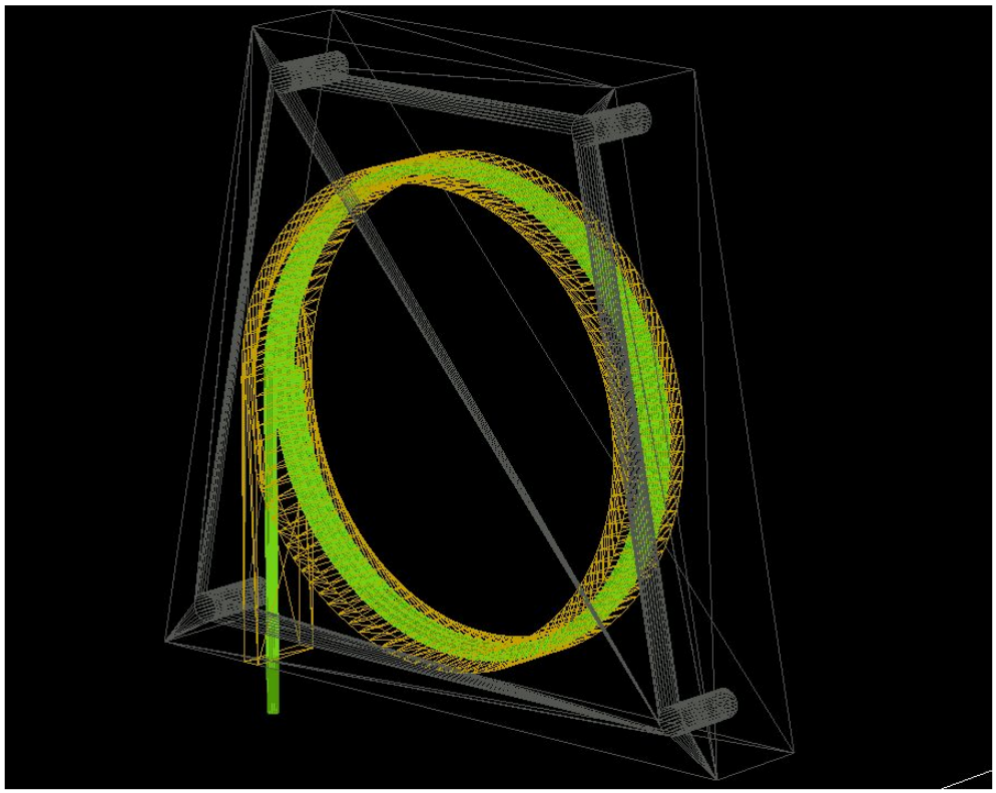


Рисунок 3.3 — Перенесенная 3D-модель в Geant4

Для сцинтилляционного детектора за основу выбрана геометрия пер-

вого 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 оптоволкна для упрощения выполнения условия пересечения объемов. Оптоволкно в конфигурации с одной обкладкой (single-cladding, KURARAY Y-11 диаметром 1 мм) планируется укладывать в три витка по спирали, что отражено в геометрии модели. Пространство между сцинтиллятором и оптволокном планируется заполнять оптическим клеем. Объем имитирующий фото-катод расположен на конце оптоволкна соосно ему в торцевой части представленного элемента (на рисуноке 3.3 внизу) диаметром совпадающим с оптоволкном (1 мм), толщиной 0.1 мм.

Описание харктеристик материалов, из которых выполнены перчисленные выше элементы, представлено в следующем разделе.

3.2 МАТЕРИАЛЫ

Программная модель прототипа позволяет осуществить подбор материалов, в соответсвии 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 мм/МэВ

Таблица 3.1 — Характеристики сцинтиллятора

Для большинства органических сцинтилляторов значение параметра

световыхода на единицу потерянной энергии колеблется около 12000 1/МэВ. Для оптимизации времени набора статистики, световыход уменьшен в 10 раз. Это необходимо учитывыть при построении распределний по множественности регистрируемых фотонов.

Представленное в работе оптоволокно выполнено из соответствующих спецификации для модели KURARAY Y-11 [6] материалов. 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^3
Коэфициент отражения	1.56
Длинна полного поглащения	5 м

Таблица 3.2 — Характеристики оптического клея

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

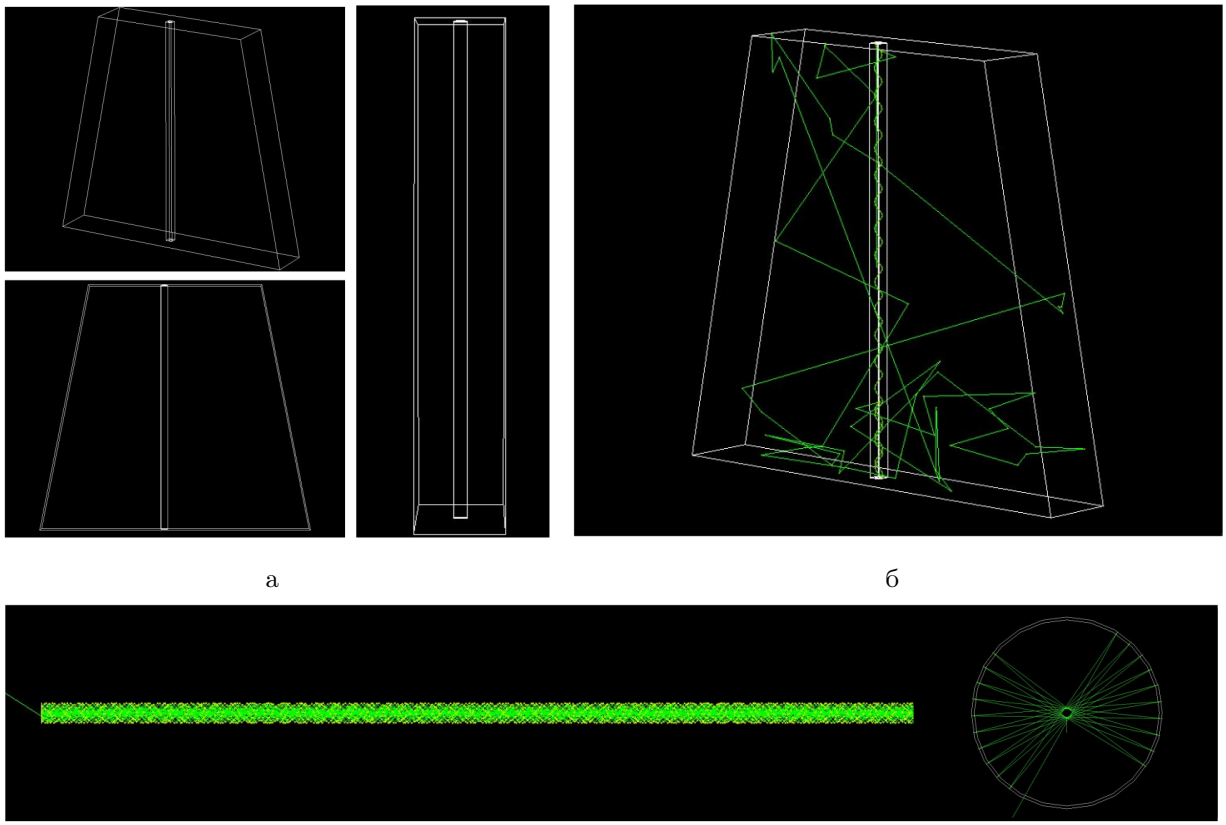
3.3 ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПАКЕТА

Для моделирования сцинтилляционных детекторов обязательным является подключение пакета оптической физики, включающего в себя соответсвующие 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 - доплнительный 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, длинной 51 мм и толщиной 10 мм, с прямоугольным каналом для укладки оптоволокна.



а б

в

Рисунок 3.4 — Примитивное представление детектора: а - общий вид компановки: трапецивидный сцинтиллятор, объем оптического клея, оптическое волкно; б - визуализация процесса распространения фотона в объеме (в том числе внутри оптоволкна); в - визуализация процесса переизлучения фотона и последующего его распространения в оптоволкне;

Для определния процессов преломления и отражения на границах сред были заданы следующие типы поверхностей между соответсвующими 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 поврехностей 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, компановка оптволокна имеет сложную спираливидную структуру в 3 витка. С увеличением радиуса кривизны сгиба фотон может вылетать из объема канала.

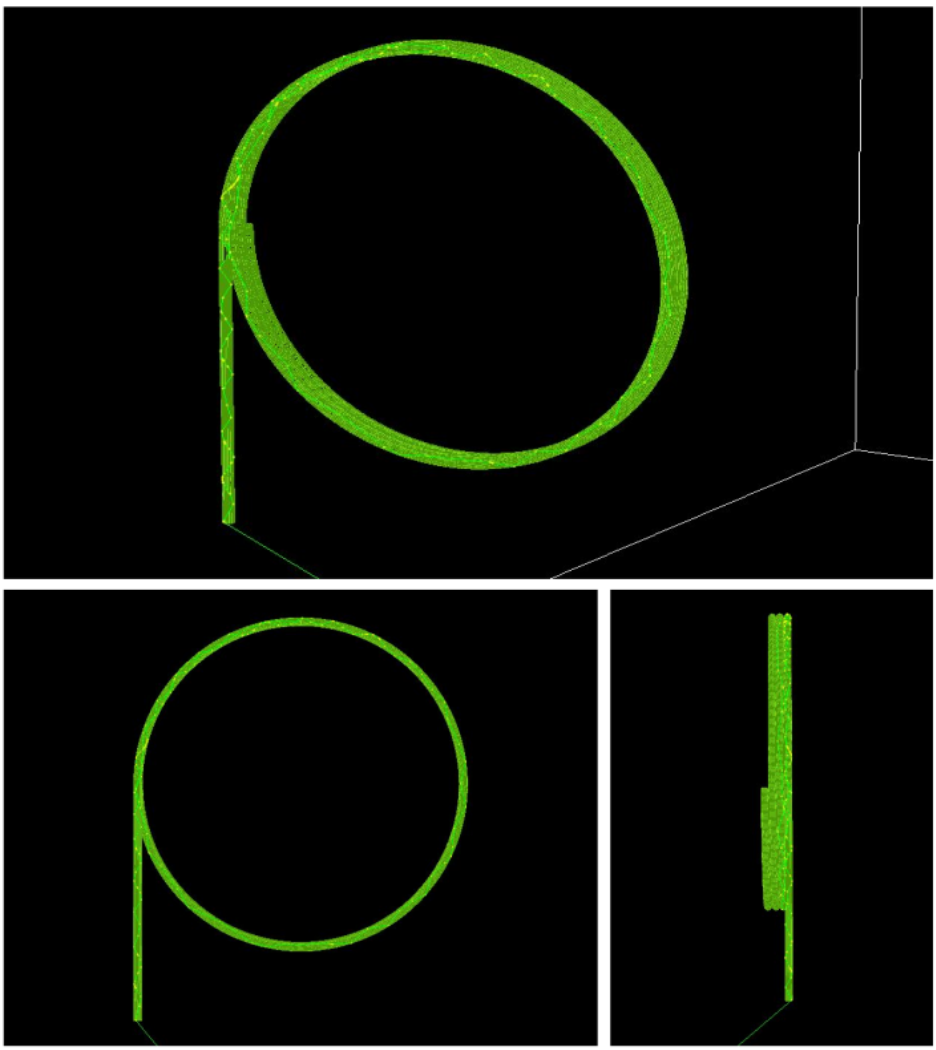


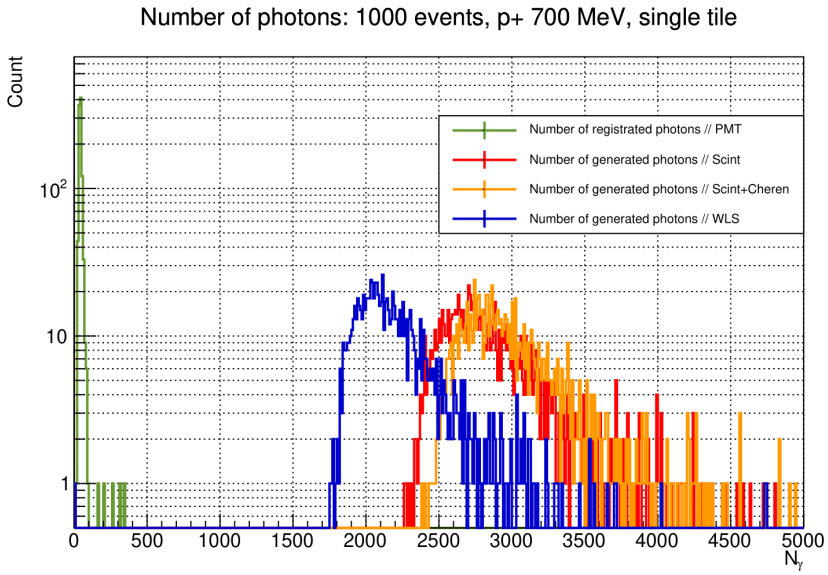
Рисунок 3.5 — Распространение переизлученного фотона в объеме оптоволкна с геометрией приближенной к реальной

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

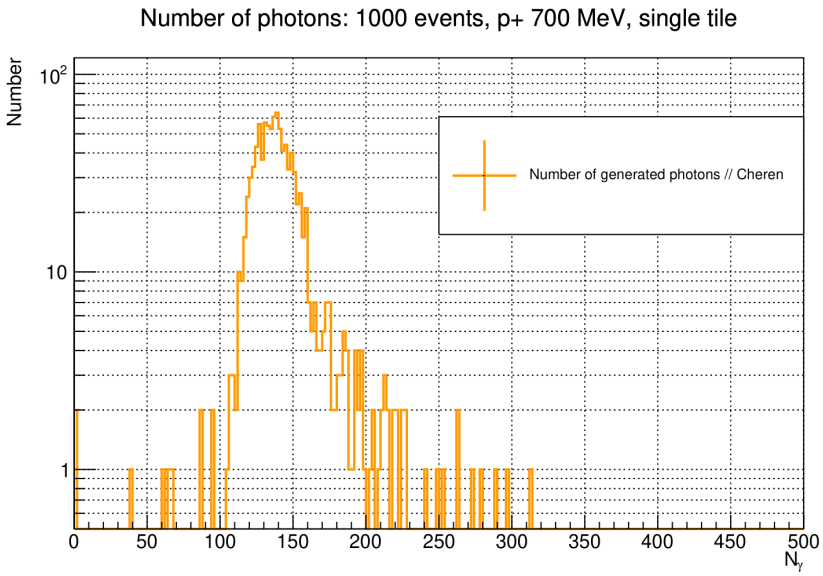
В Geant4 для оптических фотонов не определен процесс конверсии в электрон. Описанный в модели фотокатод явялется чувствительным детектором (G4SensetiveDetector) и регистрация частиц происходит через процесс соударения фотонов с его поверхностью. Энергия упавшего на фотокатод фотона фиксируется как зарегистрированная, а его трэк уничтожается.

3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

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 распределние: сцинтилляционных фотонов, переизлученных в оптоволокне фотонов, суммарное распределение для фотонов Черенкова-Вавилова и сцинтиляционных; 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 распределния 3.6б на 10). Данный параментр 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).

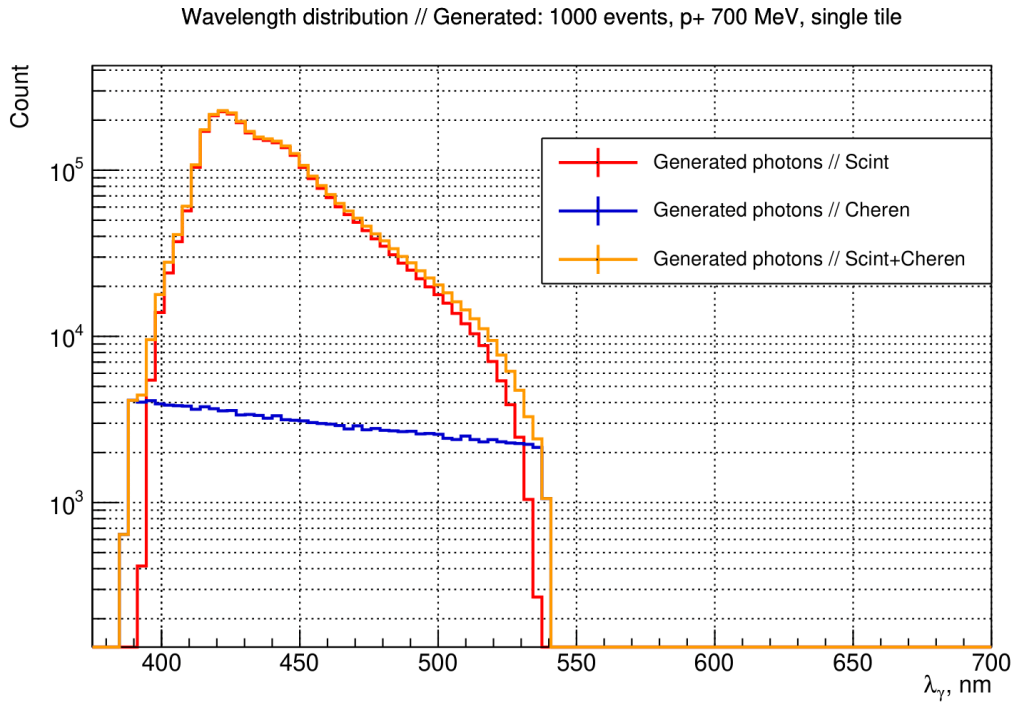


Рисунок 3.7 — Спектр по длинам волн генерируемых в объеме сцинтиллятора фотонов: сцинтилляционных фотонов, фотонов излучения Черенкова-Вавилова, суммарное распределение для фотонов Черенкова-Вавилова и сцинтиляционных

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, определнный экспериментально.

В процессе моделирования часть фотонов от сцинтилляционных выспышек, а также возникающих вследствии эффекта Черенкова-Вавилова попадает в объем оптоволкна, переизлучается со вдигом длинны волны в большую сторону и, затем, перемещается к концам канала, на одном из которых находится фотокатод. Так как количесвто генерируемых сцинтилляционных фотонов в модели уменьшено в 10 раз, то для получения

действительноый картины необходимо представленное распределение на рисунке 3.8 по шкале X умножить на 10. Таким образом за одно событие, в среднем, на фотокатод падает ~ 400 фотонов.

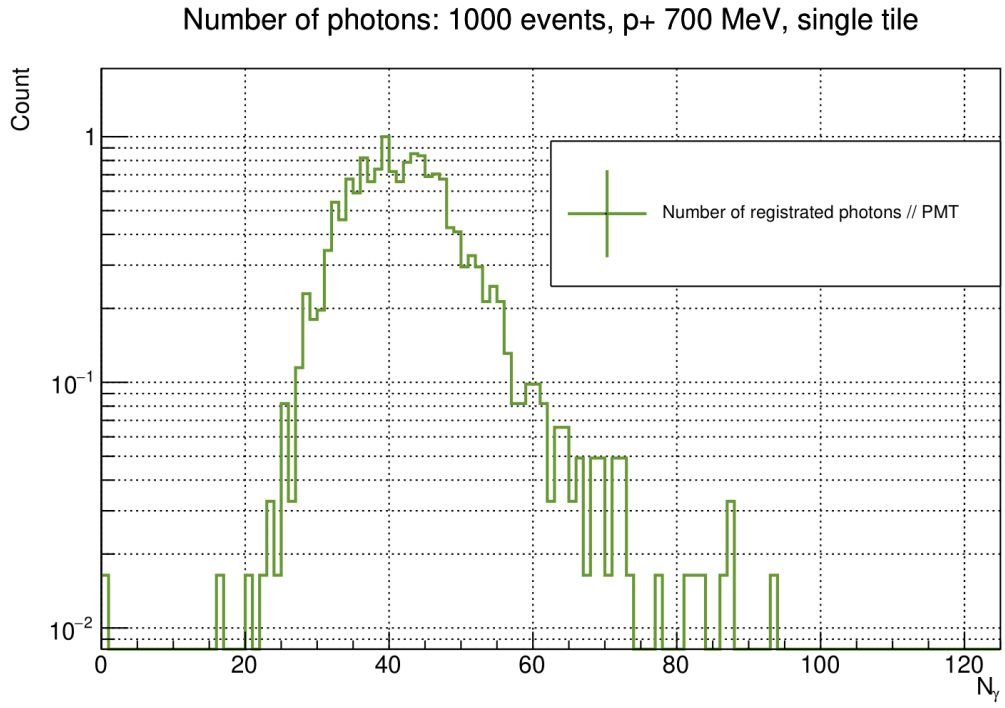


Рисунок 3.8 — Распределение по множетсвенности зарегистрированных на фотокатоде фотонов

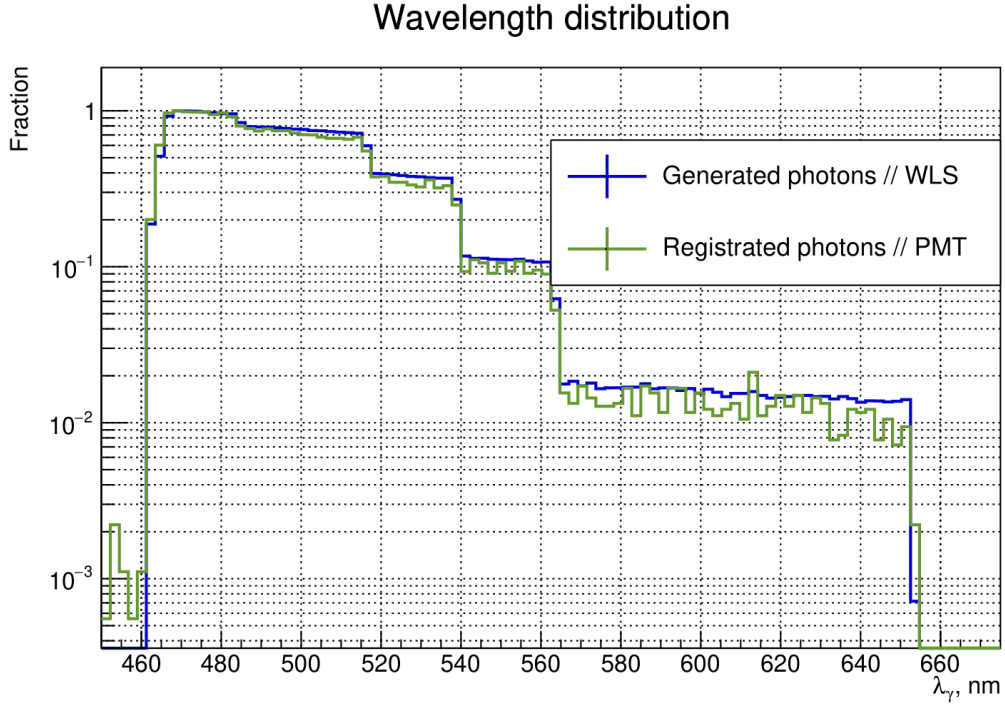


Рисунок 3.9 — Спектры по длинам волн регистрируемых на фотокатоде фотонов и генерируемых от переизлучения в оптоволокне

Зарегистрированный фотокатодом энергетический спектр полностью определяется параметрами задавемыми при описании материалов для оптоволкна. На рисунке 3.9 представлено сравнение двух распредлений по длинам волн для фотонов упавших на фотокатод и генерируемых в объеме оптоволкна. Данные спектры нормированы на соответствующий максимум для наглядности сравниваемых форм. В среднем, на ~ 50 генерируемых фотонов приходится один зарегистрированный.

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:

- описана геометрия одного элемента прототипа детектора наиболее приближенная к реальной
- описаны используемые в конструкции детктора материалы и необходимые для моделирования характеристики
- для заданной геометрии и материала сцинтиллятора вычислены выходы фотонов (сцинтилляционных и черенковских)
- выполнена оценка спектра генерируемых фотонов от различных процессов

В дальнейшем планируется реализовать и выполнить следующие задачи:

- создание модели прототипа сектора BBC
- исследования связанные с определнием оптимальной геометрии детектора
- подбор и оптимизация выбора материалова детектора
- введение в моделирование квантовой эффективности фотокатода

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 (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 (дата обр. 26.05.2023).
5. Book for application Developers. — 2017. — URL: https://indico.cern.ch/event/647154/contributions/2714212/attachments/1529029/2397032/BookForApplicationDevelopers.pdf (дата обр. 26.05.2023).
6. Plastic Scintillating Fibers. — 2017. — URL: https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf (дата обр. 26.05.2023).