

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 531.3, 539.1.05

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Подбор материалов для детектора beam-beam counter  
эксперимента SPD**

Студент \_\_\_\_\_ А. М. Захаров

Научный руководитель,  
к.ф.-м.н., \_\_\_\_\_ П. Е. Тетерин

Москва 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
0.1 Пропорциональные детекторы . . . . .	3
0.2 Сцинтилляционные детекторы . . . . .	3
<b>1 Эксперимент SPD</b>	<b>6</b>
<b>Эксперимент SPD</b>	<b>6</b>
1.1 Строение SPD . . . . .	7
1.2 Счетчик пучков ВВС . . . . .	8
1.3 Постановка задачи . . . . .	10
<b>2 Представление результатов</b>	<b>11</b>
<b>Представление результатов</b>	<b>11</b>
2.1 Проектирование тайл системы . . . . .	11
2.1.1 Тайл система в геометрии SPD . . . . .	13
2.1.2 Тайл система с Non-SPD геометрией . . . . .	14
2.2 Оптические наполнители . . . . .	16
<b>Заключение</b>	<b>18</b>
<b>Список используемых источников</b>	<b>19</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Современные эксперименты физики высоких энергий невозможно представить без специальных детектирующих установок, выполняющих большое множество различных задач: регистрация факта прохождения частицы через объем детектора, регистрация энергии частицы, которую она потеряла в объеме детектора, регистрация времени прохождения частицы через детектор и т.д. Детектор - устройство, в котором происходит взаимодействие излучения с веществом детектора, приводящее к появлению сигнала на его выходе. Эксперименты завязаны на огромном количестве различных детектирующих установок, которые зачастую спроектированы исключительно под данный эксперимент. Среди детекторов разделяют:

- Счетчики

Счетчиками являются детекторы, главной задачей которых является подсчет частиц, прошедших сквозь него;

- Пропорциональные детекторы

Восстанавливают энергию прошедших частиц, так как она пропорциональна энергии, потерянной частицей в объеме детектирующей установки. Их разделяют на два типа по энергии частицы: спектрометры ( $E \leq 20$  МэВ) и калориметры ( $E \geq$  десятки МэВ);

- Координатные и трековые детекторы

Измеряют траекторию частицы в объеме детектора, позволяют увидеть трек частицы;

- Детекторы для временных измерений

Определяют момент прохождения частицы через детектор, используются во всех экспериментах.

## 0.1 ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

В современных экспериментах физики частиц наиболее используемым типом детекторов являются пропорциональные детекторы, так как они позволяют восстанавливать энергию частицы, ее импульс и другие интересные величины. По своему устройству пропорциональные детекторы отличаются механизмом взаимодействия частиц с веществом:

- Ионизационные потери

Частица теряет свою энергию на ионизацию атомов вещества детектора;

- Радиационные потери

Частица, замедляющаяся в поле ядра атома, теряет свою энергию на тормозное излучение. Свойственно частицам малой массы, например, электрону;

- Многократное рассеяние частиц на ядрах и электронах;

- Переходное излучение

Частицы, проходящие через границу раздела фаз, теряют свою энергию на электромагнитное излучение;

- Черенковское излучение

Если скорость частицы в веществе превышает скорость света в этом же веществе, то среда начинает излучать.

Важно отметить о существовании предельного разрешения искомой физической величины, которое может быть восстановлено с помощью пропорционального детектора. Временное, энергетическое или координатное разрешение во многом зависит от того, на основе чего выполнен детектор. Разделяют полупроводниковые, сцинтилляционные и другие типы детекторов.

## 0.2 СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Сцинтилляция – процесс люминесценции малой продолжительности (короткая вспышка света), вызванная прохождением ионизирующей частицы (быстрые электроны, протоны, гамма-кванты, альфа-частицы и другие з.ч.) через сцинтиллятор. Сцинтиллятор – одна из двух обязательных ча-

стей сцинтилляционного детектора. Второй частью является фотоприемник, регистрирующий вспышку света, которая состоит из  $10^3 - 10^6$  фотонов (видимого света или ультрафиолета) и преобразовывающий это в сигнал. Одна регистрируемая частица создает много фотонов в сцинтилляторе, но один сигнал на выходе. Для улучшения оптического контакта между сцинтиллятором и фотоприемником используется оптическая смазка. Процесс в неорганическом сцинтилляторе состоит из трех шагов: для начала, при прохождении заряженной частицы образуются возбужденные состояния основного вещества сцинтиллятора. Далее, происходит миграция возбужденных состояний по кристаллу - часть передает свою энергию центрам свечения, а другая часть центрам тушения (например, дефектам структуры кристалла, ловушкам). В конечном итоге происходит высвечивание центров свечения. Таким образом, в процессе сцинтилляции фотон вспышки может не покинуть сцинтиллятор, а попасть из центра свечения в центр поглощения. Проблема самопоглощения фотонов решается путем задания требований к веществу сцинтиллятора. Требования к сцинтиллятору:

- Прозрачность для фотонов видимого света или ультрафиолета;
- Спектр излучения сцинтиллятора должен быть смещен относительно спектра поглощения.

Модель сцинтилляционного детектора состоит из двух главных частей – сцинтиллятора и фотоприемника (рис. 1). Фотоприемником может служить фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), кремниевый ФЭУ (SiPM) или фотодиод. При попадании гамма-кванта на фотокатод ФЭУ, с его поверхности в силу фотоэффекта выбивается электрон, который под действием сильного электрического поля дрейфует к динодам. За счет вторичной электронной эмиссии на диноде происходит размножение электронов, которые впоследствии дрейфуют к следующему диноду и т.д. Коэффициент умножения ФЭУ - отношение числа электронов, достигших анода к числу электронов, выбитых с фотокатода - составляет  $M = 10^6 - 10^9$ .



Рисунок 1 — Модель сцинтилляционного детектора

Фотоэлектронные умножители страдают рядом недостатков: имеют большие размеры, большие напряжения питания и чувствительность к внешнему магнитному полю. В современных экспериментах чаще прибегают к SiPM - его ячейки одинаковы и независимы друг от друга, он имеет высокий коэффициент усиления, нечувствителен к внешним магнитным полям, а так же имеет хорошие временные разрешения.

Сцинтилляторы для детектирующих установок выполняются из различных материалов, среди которых:

- Неорганические кристаллы  
Щелочно-галлоидные сцинтилляторы ( $\text{NaI(Tl)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ,  $\text{LiI(Tl)}$ ), а также кристаллы, содержащие тяжелые элементы ( $\text{Be}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}(\text{BGO})$ ,  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ );
- Органические кристаллы: антрацен, стильбен
- Пластмассы (прозрачные): полистирол с p-терфенилом
- Жидкие органические сцинтилляторы
- Инертные газы (газообразные или жидкие, Ar, Kr, Xe)

Органические сцинтилляторы имеют высокую эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов, подходят для регистрации заряженных частиц и медленных нейтронов, однако они имеют и большой недостаток - большое время высвечивания ( $\tau \sim 10^{-7} - 10^{-6}$  с), что делает их медленными сцинтилляторами. Органические же, в свою очередь, являются быстрыми ( $\tau \sim 10^{-9} - 10^{-7}$  с), отлично подходят для временных измерений, используются для регистрации медленных и быстрых нейтронов (по протонам отдачи и по ядерным реакциям, соответственно), релятивистских частиц, однако не подходят для регистрации  $\gamma$ -квантов.

# 1 ЭКСПЕРИМЕНТ SPD

Коллаборация Spin Physics Detector (SPD) предлагает установить универсальный детектор во второй точке взаимодействия коллайдера NICA (ОИЯИ, Дубна) для изучения спиновой структуры протона, дейтрона и других явлений, связанных со спином, с помощью поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергии столкновения до 27 ГэВ и со светимостью до  $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$ . Основное внимание будет уделено изучению их поляризованной глюонной компоненты в реакциях инклюзивного рождения чармониев, открытого чарма и прямых фотонов. В поляризованных протон-протонных столкновениях данный эксперимент покрывает кинематический разрыв между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE II, и высокоэнергетическими измерениями, полученными на БАК (рис. 1.1).

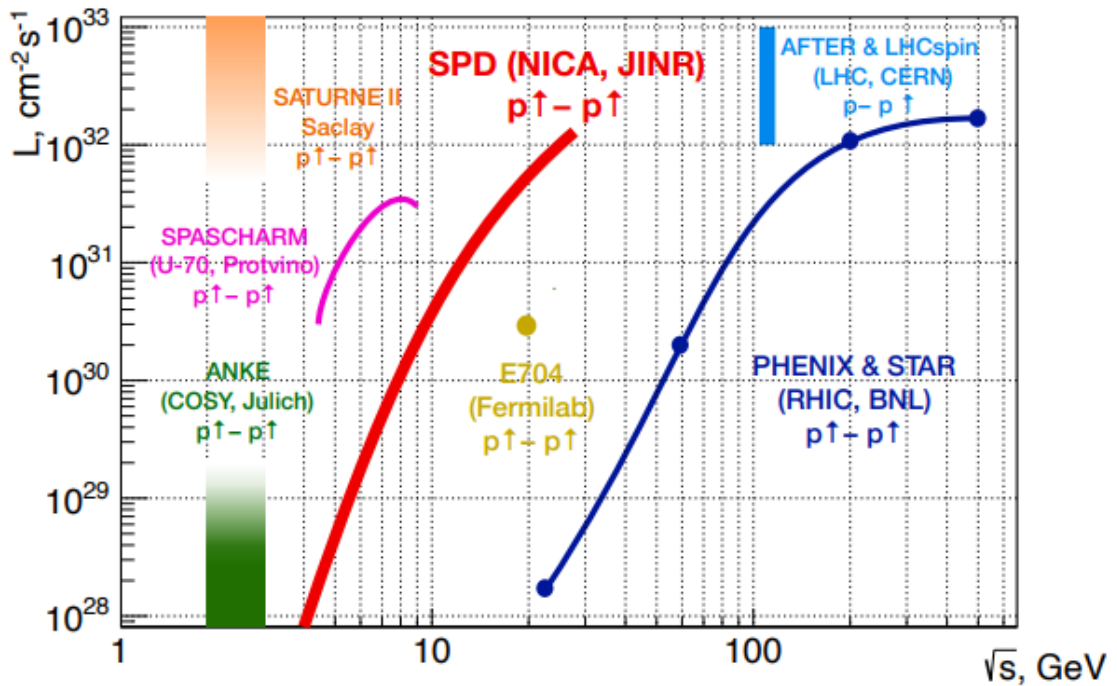


Рисунок 1.1 — SPD NICA и другие прошлые, современные и будущие эксперименты с поляризованными протонами

Посредством измерения соответствующих спиновых асимметрий будут получены данные по корреляциям между направлениями спина протона (дейтрона), его импульса, а также направлением спина, продольным и поперечным импульсами глюонов внутри протона (дейтрона) [1]. Функции, описывающие подобные корреляции, являются такими же фундаментальными величинами для адронов, как их масса, заряд, магнитный момент или формфактор. На первом этапе работы установки, до достижения проектных светимости и энергии столкновения, основное внимание планируется уделить изучению спиновых эффектов в упругих протон-протонных и дейтрон-дейтронных рассеяниях, поиску мультипартонных корреляций и новых связанных состояний, исследованию рождения чарма у порога, изучению поляризаций гиперонов и т.д.

## 1.1 СТРОЕНИЕ SPD

Экспериментальная установка SPD проектируется как универсальный  $4\pi$ -детектор с расширенными возможностями отслеживания и идентификации частиц на основе современных технологий. Кремниевый вершинный детектор (VD) обеспечит разрешение для положения вершины на уровне менее 100 мкм, необходимое для реконструкции вторичных вершин распадов D-мезонов. Straw трекинг система на основе трубок (ST), помещенная в соленоидальное магнитное поле до 1 Тл у оси детектора должна обеспечить разрешение по поперечному импульсу  $\sigma_{p_T}/p_T \approx 2\%$  для импульса частицы 1 ГэВ/с. Времяпролетная система (PID) с временным разрешением около 60 пс обеспечит  $\pi/K$  и  $K/p$  разделение на уровне  $3\sigma$  для энергий 1.2 ГэВ/с и 2.2 ГэВ/с, соответственно. Возможное использование аэрогелевого Черенковского детектора может расширить этот диапазон. Обнаружение фотонов будет обеспечиваться электромагнитным калориметром (ECal) с энергетическим разрешением  $\sim 5\%/\sqrt{E}$  (рис. 1.2). Для минимизации многократного рассеяния и конверсии фотонов, материал детектора будет сведен к минимуму во всей внутренней части детектора. Для идентификации мюонов планируется использовать мюонную систему (RS). Пара счетчиков пучков (Beam-Beam Counter, BBC) и калориметры нулевого угла будут отвечать за локальную поляризацию и контроль светимости. Для



минимизации возможных систематических эффектов, SPD будет оснащен безтриггерной системой DAQ. Высокая частота столкновений (до 4 МГц) и несколько сотен тысяч каналов детекторов представляют собой серьезную проблему для системы DAQ, онлайн мониторинга, автономной вычислительной системы и программного обеспечения для обработки данных [2].

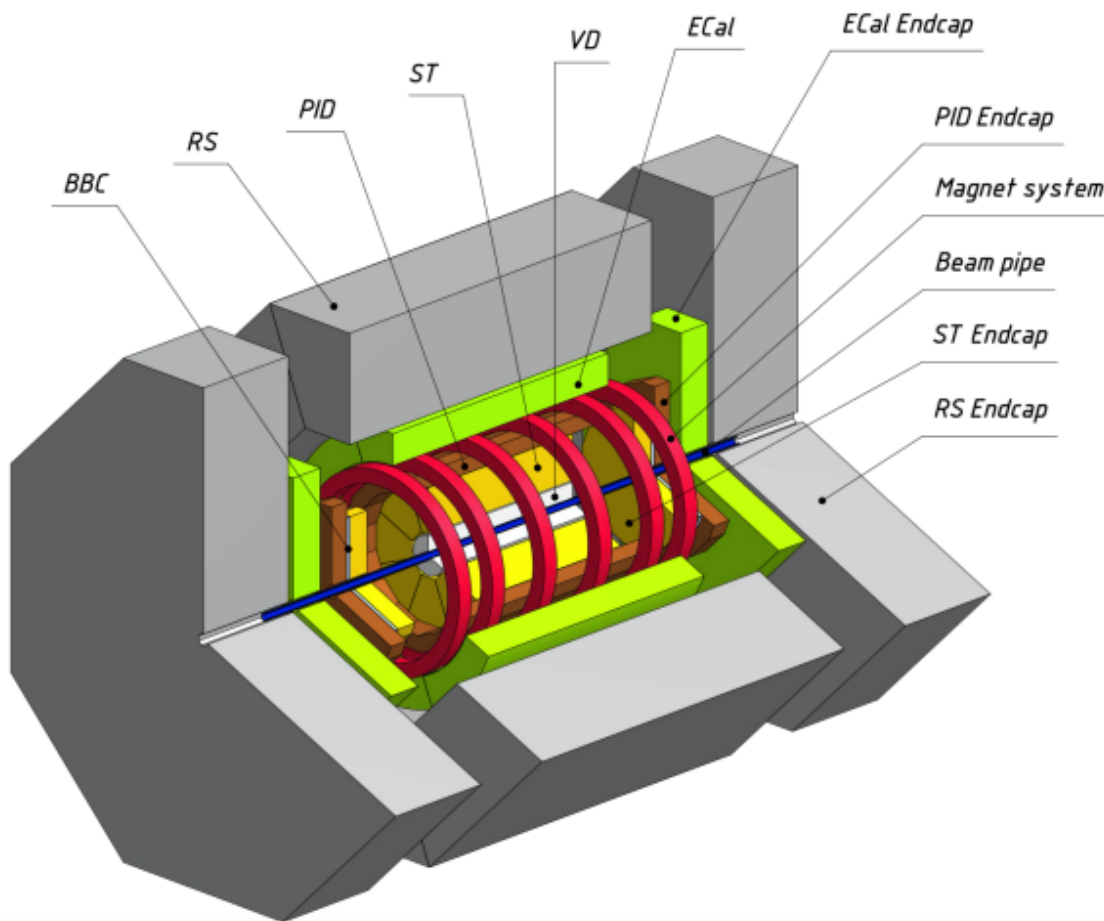


Рисунок 1.2 — Строение детектора SPD

## 1.2 СЧЕТЧИК ПУЧКОВ ВВС

Два счетчика пучков (ВВС) планируется разместить непосредственно перед времяпролетной системой PID в торцевых камерах установки SPD. Детектор должен состоять из двух частей: внутренней и внешней, которые основаны на разных технологиях. Внутренняя часть ВВС будет использовать быстрые сегментированные детекторы MicroChannel Plate (MCP) и должна работать внутри пучковой трубы, а внешняя часть будет изготовлена из быстрых пластиковых сцинтилляторных плиток. Внутренняя

часть охватывает прием  $30 \div 60$  мрад и должна быть разделена на 4 слоя, состоящих из 32 азимутальных секторов. Внешняя часть, охватывающая полярные углы между 60 и 500 мрад, будет разделена на 5 или 6 концентрических слоев с 16 азимутальными секторами в каждом из них. Окончательная гранулярность является вопросом дальнейшей оптимизации для всего энергетического диапазона столкновений на SPD. Концепт ВВС показан на рис. 1.3. Пурпурная часть представляет МСР детектор, а внутренний слой внешней части показан красным цветом. Основными целями счетчика пучков являются:

- Локальная поляриметрия в SPD на основе измерений азимутальных асимметрий в инклюзивном производстве заряженных частиц в столкновениях поперечно поляризованных пучков протонов
- Мониторинг столкновений пучков
- Участие в точном определении времени столкновения  $t_0$  для событий, в которых другие детекторы не могут быть использованы

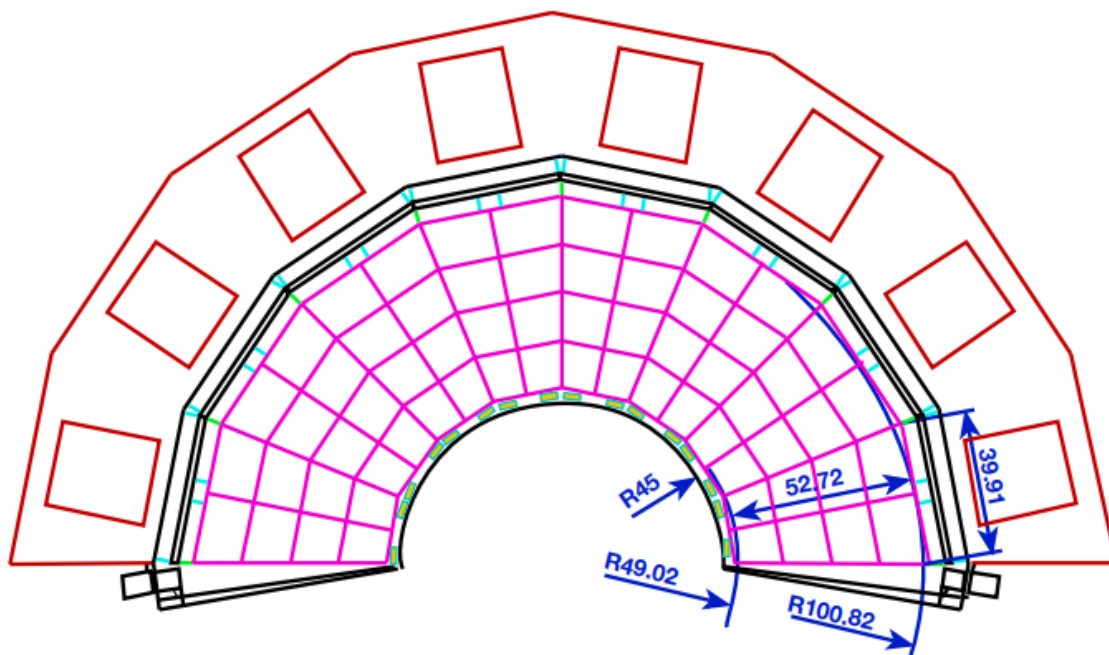


Рисунок 1.3 — Строение ВВС в сечении

Сцинтилляционная часть ВВС будет состоять из тайлов, сигнал с которых будет поступать на SiPM. Измерение амплитуды сигнала необходимо для улучшения временного разрешения.

С одноканальным прототипом детектора можно измерить амплитуду с помощью разработанного FEE, основанного на технике Time-over-

Threshold (ToT). Эта техника является хорошо известным методом, который позволяет измерить энергию, потерянную в тайле, путем реконструкции заданного свойства выходного импульса тока - общий собранный заряд, амплитуда импульса и т.д. Метод ToT преобразует высоту импульса сигнала в цифровое значение на ранней стадии, что значительно упрощает систему по сравнению с аналоговыми детекторами с последовательным считыванием через АЦП.

### **1.3 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Глобальной задачей работы является проектирование счетчика пучков для эксперимента SPD, NICA. В данной работе будут описаны подготовительные шаги, описание принимаемых моделей, параметров и так далее. Подбор материалов включает в себя выбор быстрого органического сцинтиллятора, из которого будут выполнены тайлы; выбор модели или геометрии, в которой будут выполнены тайлы, а также подбор оптической смеси, которой будет наполнен тайл для эффективного светосбора. Следующим шагом является изготовление прототипов, смоделированных на предыдущем этапе, а так же тестирование прототипов на реальных источниках ионизирующего излучения, с целью оптимизации будущего детектора.



ков, предлагается выполнить тайлы в следующей геометрии: пять трапецевидных тайлов, высота которых должна составлять 137 мм, расположены на расстоянии 10 мм друг от друга. Угол раствора составляет  $22.5^\circ$ , ширина нижнего основания составляет около 35 мм (рис. 2.2).

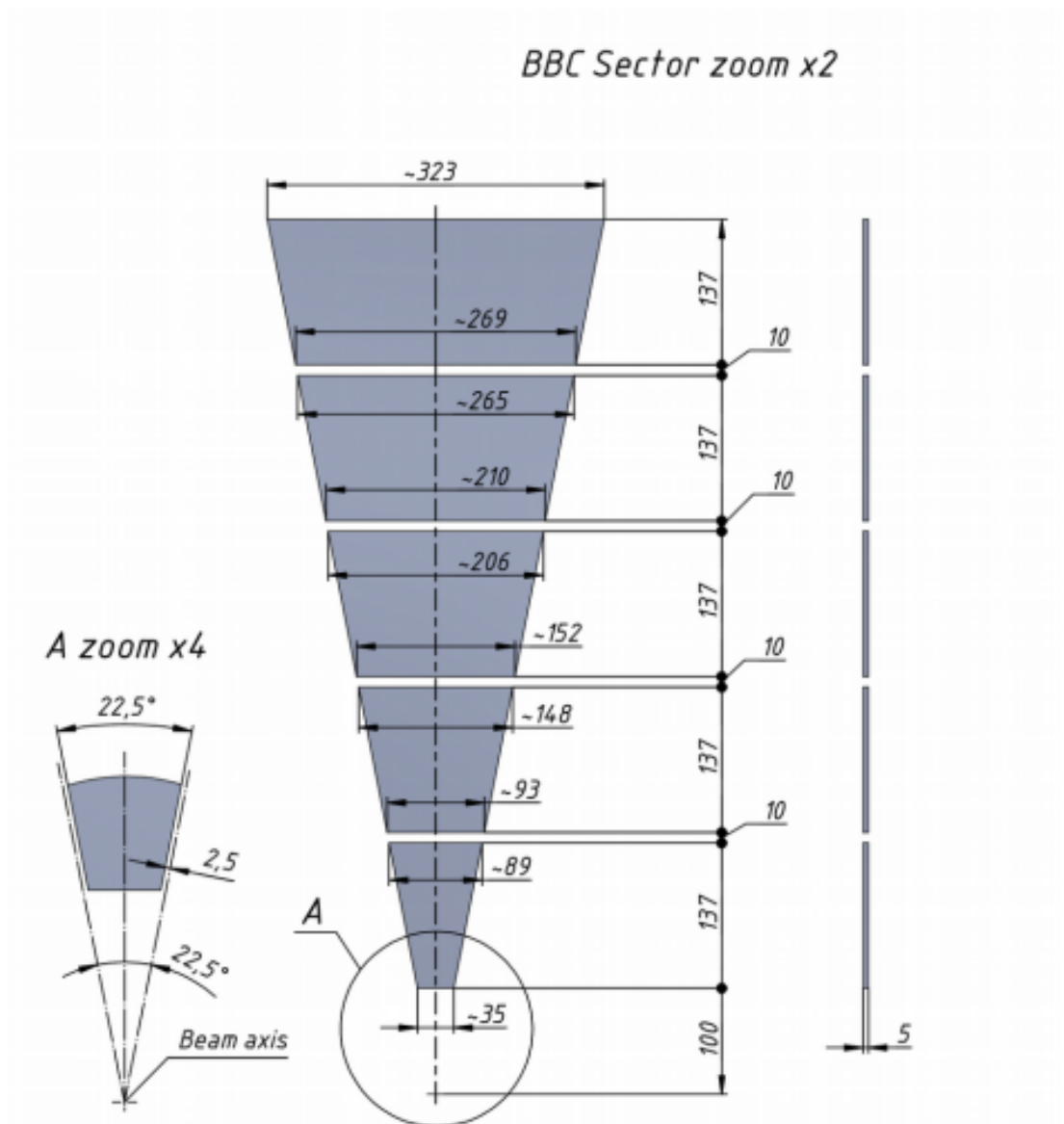


Рисунок 2.2 — Предполагаемая система тайлов BBC SPD

В данной работе используется спектросмещающее оптоволокно диаметром 1 мм. Опытным путем было выяснено, что критическим радиусом скругления для данного вида оптоволокна является 25 мм - при скруглении менее 25 мм оптоволокно трескается и сигнал, снимаемый им, искажается. С помощью пакета моделирования КОМПАС была построена 3D модель и чертежи в нескольких геометриях.

## 2.1.1 ТАЙЛ СИСТЕМА В ГЕОМЕТРИИ SPD

Для первого варианта тайл системы была выбрана геометрия, используемая в концептуальном дизайне. Форма проточек практически повторяет форму трапеции, однако имеет скругление в углах. Важной деталью данной модели является то, что проточка покрывает максимально доступную площадь тайла, с учетом критического радиуса скругления.

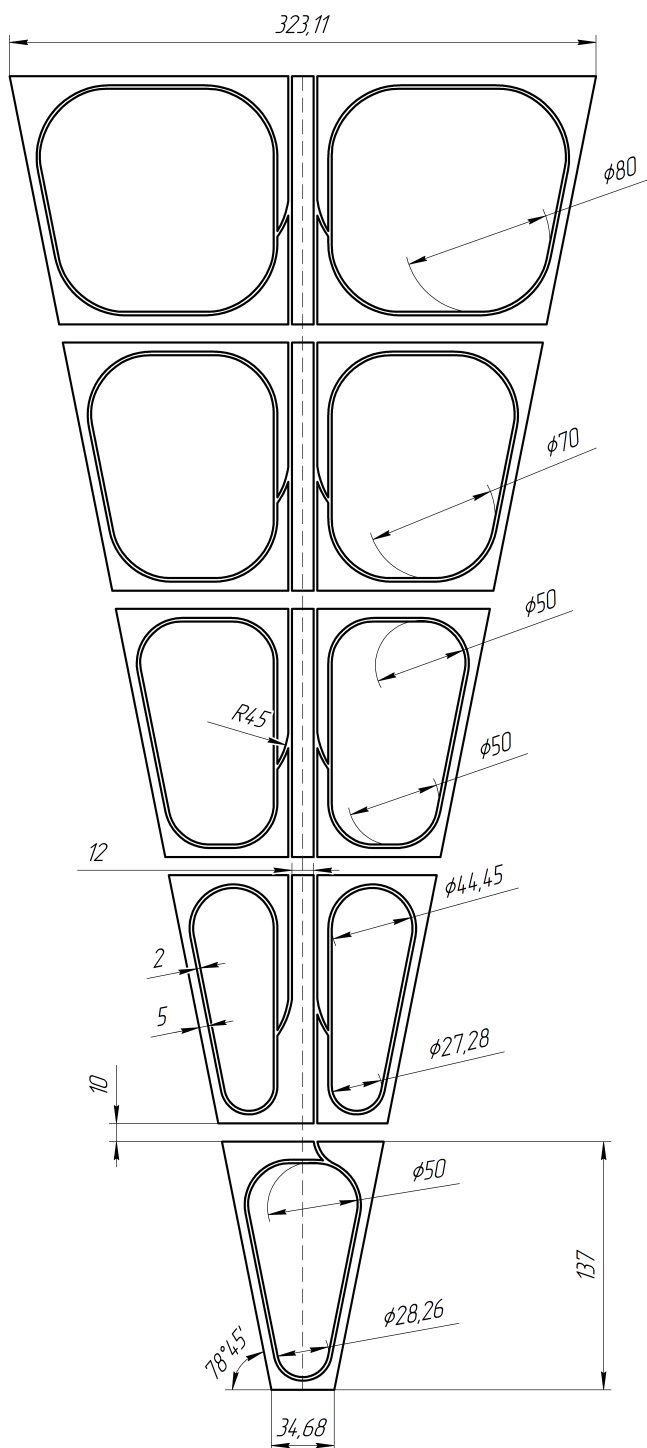


Рисунок 2.3 — Модель тайл системы в геометрии SPD

Ширина проточки составляет 2 мм - это оптимальный размер для расположения внутри волокна и оптического наполнителя (см. 2.2). Расстояние между гранями тайла и проточкой, а так же между центральной осью симметрии и положением проточки, выходящей из тайла и направляющей волокно в SiPM составляет 5 и 6 мм соответственно. Также, учтено скругление при выходе волокна из трапецевидной в вертикальную проточку (рис. 2.3). Глубина тайла составляет 12.5 мм, а глубина проточки - 7 мм.

На текущий момент, данная тайл система полагается наиболее подходящей. Поэтому, для данной геометрии был также смоделирован штатив - сборка, в которую будет помещен один сектор тайла. Штатив будет выполнен из PLA-пластика, герметично утоплен под крышкой, чтобы не пропускать внутрь свет. Нижняя часть штатива также имеет проточку под оптоволокно, а верхняя - место под источник, диаметром 29 мм и глубиной 1 мм (рис. 2.4). Подобная сборка позволит не только провести тестирование сцинтиллятора, из которого выполнен тайл, но также подобрать более подходящий оптический цемент.

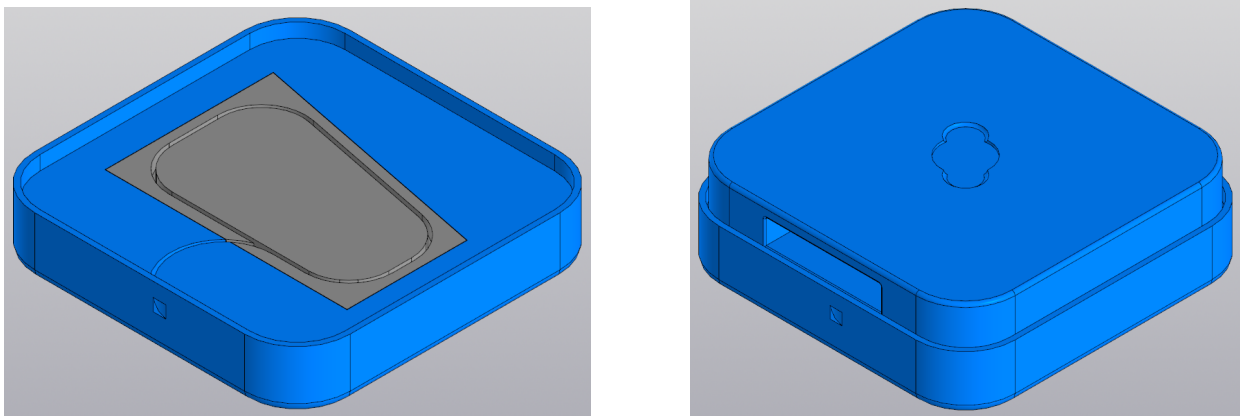


Рисунок 2.4 — Модель штатива с тайлом

### 2.1.2 ТАЙЛ СИСТЕМА С NON-SPD ГЕОМЕТРИЕЙ

Для другого варианта тайл системы был выбран более компактный вариант геометрии: предлагалось уменьшить высоту трапеций до 54 мм, при этом сохраняя предыдущие условия на угол раствора, расстояние между трапециями, расстояние между гранями и проточками и т.д. Несмотря

на компактность данной модели и ее удобства (с точки зрения проектирования детектора), модель не является подходящей. Главная причина в том, что стремясь покрыть максимальную площадь тайла, скругление проточек выполнено в около критических значениях диаметра скругления. Подобная модель является неоправданным риском, потому были приняты попытки внести коррекции - объединить центральные проточки в одну.

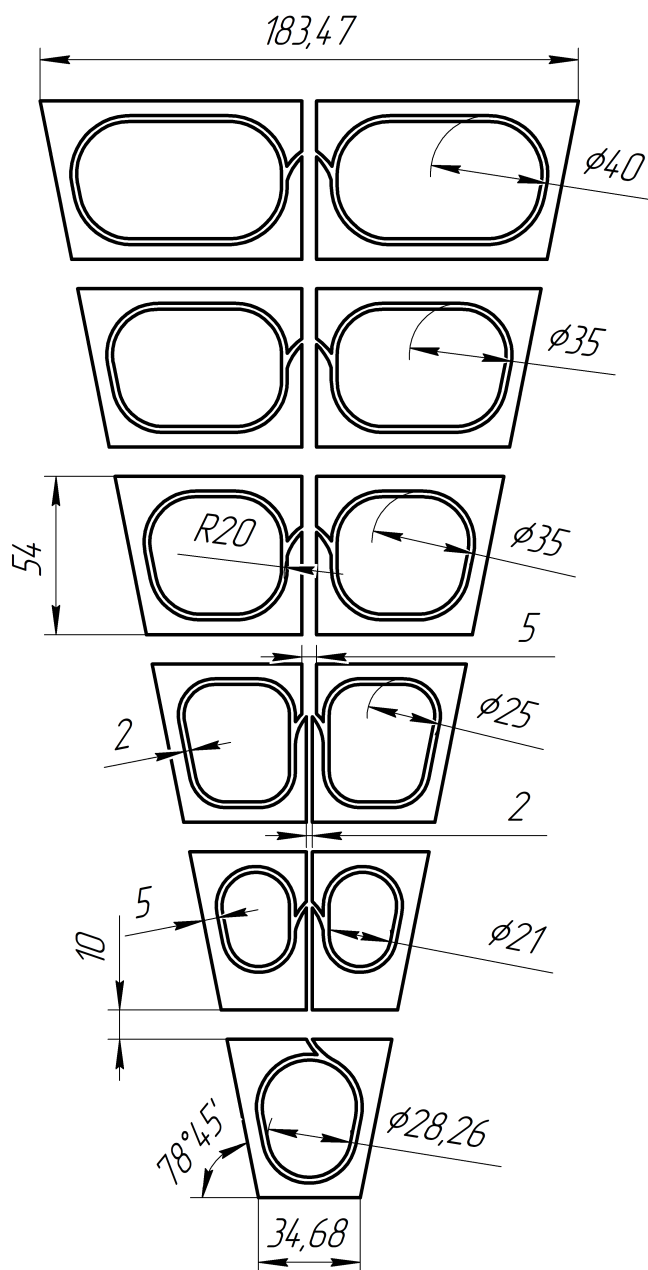


Рисунок 2.5 — Модель тайл система в Non-SPD геометрии и общей проточкой

Как видно из рис. 2.5, объединение центральных проточек не приводит к желаемому результату: диаметры скруглений в нижних тайлах все



еще имеют около критические значения. По этой причине было принято решение отбросить данную модель.

## 2.2 ОПТИЧЕСКИЕ НАПОЛНИТЕЛИ

Как уже говорилось ранее, съём света с тайлов происходит с помощью спектросмещающих волокон WLS, которые поглощают свет, излучаемый сцинтиллятором, и переизлучают его в диапазоне, близком к максимуму спектральной чувствительности фотоприемника. При использовании достаточно длинных сцинтилляционных стрипов с WLS-волокнами, вставленными в проточки, может оказаться недостаточным количество света, поступающего на фотоприемник, так как свет из сцинтиллятора захватывается волокнами через воздушный зазор. Вклеивание волокон внутри проточек увеличивает светосбор, однако высокая вязкость и ограниченное время использования двухкомпонентного клея делают задачу заполнения отверстий трудно выполнимой. Тогда проточки сцинтилляторов наполняют жидкостью с низкой вязкостью, либо используют клей без отвердителя. То, чем наполняют проточки и называется оптическими наполнителями, либо оптическими цементами (клеями) [4].

Анализируя тайл систему эксперимента STAR (рис. 2.1), было принято решение использовать в данной работе такой же, либо схожий оптический наполнитель. Так как заказать оптический цемент Eijen EJ-500, использовавшийся в STAR не представляется возможным, необходимо изучить его характеристики и подобрать максимально похожий.

EJ-500 - это прозрачный и бесцветный эпоксидный цемент с показателем преломления  $n = 1,57$ . Он идеально подходит для оптического склеивания пластиковых сцинтилляторов и акриловых (ПММА) световодов. Он одинаково эффективен при работе со сцинтилляторами на основе поливинилтолуола (PVT) или полистирола, а также может быть уверенно использован для создания стыковых соединений оптических волокон с полистироловыми сердечниками. Вязкость EJ-500 составляет около 800 сPs; диапазон рабочих температур - от  $-65^{\circ}$  до  $+105^{\circ}$ ; удельное объемное электрическое сопротивление -  $10^{14}$  Ом\*см, и самое главное - спектральные характеристики - 60-95% при длине волны  $\lambda = 300-350$  нм, и 95-100% при

$\lambda = 350-600$  нм.

Среди всех представленных вариантов, были отобраны три потенциальных наполнителя. Их характеристики приведены на таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Оптические наполнители и их характеристики

Марка	Вязкость, сPs	Диапазон рабочих температур	Спектральные характеристики	Показатель преломления
EJ-500	800	От -65 до +105 °С	60-95% 300-350 нм, 95-100% 350-600 нм	1.574
ЕРО-ТЕК 301-2	225 - 425	Комнатная температура - +65 °С	94% 320 нм, 99% 400-1200 нм, 98% 1200-1600 нм	1.5318 589 нм
ЕРО-ТЕК 301	100 - 200	Комнатная температура - +65 °С	99% 382-980 нм, 97% 980-1640 нм, 95% 1640-2040 нм	1.519 589 нм
Оптический клей Луч-2	—	От -60 до +125 °С	98% 400-950 нм	1.54

Наполнитель ЕРО-ТЕК 301-2 имеет наиболее схожие с EJ-500 спектральные характеристики и малую вязкость, однако сильно различается в диапазоне рабочих температур. Наполнитель марки ЕРО-ТЕК 301 имеет еще более низкую вязкость и более хорошее разрешение для малых длин волн  $\lambda = 380$  нм, но имеет худший показатель преломления. В свою очередь "Луч-2" имеет более устойчивый диапазон температур, чем EJ-500, самый близкий к искомому показатель преломления, однако сильно проигрывает спектральным характеристикам. Так как ЕРО-ТЕК 301 является менее удовлетворяющим аналогом 301-2, в будущем планируется заменить его на низкомолекулярный каучук "СКТН-МЕД" марки Е [5] и провести детальное сравнение наполнителей, с целью выявить наиболее подходящий для данной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводился подбор материалов для детектора beam-beam counter эксперимента SPD.

В рамках данной работы была изучена теория о работе детекторов, в частности - сцинтилляционных детекторов, были освещены задачи, строение Spin Physics Detector, а так же строение счетчика пучков. В качестве подготовительной работы к подбору сцинтилляторов для счетчика пучков, были построены несколько моделей тайл системы счетчика, а так же смоделирован штатив для проведения будущего анализа. Также, в процессе работы были изучены тонкости строения детекторов и отобраны наиболее подходящие оптические наполнители для улучшения светосбора.

В будущем планируется провести детальный анализ и подбор сцинтиллятора для счетчика пучков, а также сравнить и подобрать наиболее подходящий оптический наполнитель для тайл системы при помощи снятия спектров, используя подобранный сцинтиллятор, смоделированный штатив и источник ионизирующего излучения. Также планируется смоделировать установку в программном пакете GEANT4.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Karpishkov A., Saleev V.* On transverse single-spin asymmetries in  $D$ -meson production at the SPD NICA experiment. — 2022.
2. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [и др.]. — 2021.
3. The STAR event plane detector / J. Adams [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Т. 968. — С. 163970.
4. Optimization of light yield by injecting an optical filler into the co-extruded hole of the plastic scintillation bar / A. Artikov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2016. — Т. 11, № 05. — T05003—T05003.
5. Light yield and radiation hardness studies of scintillator strips with a filler / A. Artikov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Т. 930. — С. 87—94.