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

Прототипирование детектора поляризации пучка и плоскости событий для эксперимента SPD NICA

Студент	А. М. Захаров
Научный руководитель,	
к.фм.н.,	П. Е. Тетерин

СОДЕРЖАНИЕ

Bı	Введение 2						
	0.1	Пропорциональные детекторы	3				
	0.2	Сцинтилляционные детекторы	3				
1	Экс	сперимент SPD	6				
Э	Эксперимент SPD						
	1.1	Строение SPD	7				
	1.2	Счетчик пучков ВВС	8				
	1.3	Постановка задачи	10				
2	Пре	едставление результатов 1					
П	редс	гавление результатов	11				
	2.1	Проектирование тайл системы					
		2.1.1 Тайл система в геометрии SPD	13				
		2.1.2 Тайл система с Non-SPD геометрией	14				
	2.2	2 Оптические наполнители					
	2.3	3 Рентгеновский сканер					
		2.3.1 Модель координатного стола	20				
За	Заключение						
Cı	Список используемых источников						

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, потеряной частицей в объеме детектирующей установки. Их разделяют на два типа по энергии частицы: спектрометры (E ≤ 20 MэB) и калориметры (E ≥ десятки MэB);

- 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 интересующие 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 веществе 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-галоидные сцинтилляторы (NaI(Tl), CsI(Tl), LiI(Tl)), а также кристаллы, содержащие тяжелые элементы (Be4Ge3O12(BGO), LaBr3(Ce));
- Органические кристаллы: антрацен, стильбен
- Пластмассы (прозрачные): полистирол с р-терфенилом
- Жидкие органические сцинтилляторы
- Инертные газы (газообразные или жидкие, Ar, Kr, Xe)

Органические сцинтилляторы имеют высокую эффективность регистрации γ -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 γ -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 $10^{32} \ cm^{-2} \ c^{-1}$. 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 покроет кинематический разрыв между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE, 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 π -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 Т 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 π/K и K/p разделение на уровне 3σ 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 ~ $5\%/\sqrt{E}$ (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 поляриметрию 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 (BBC) 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 BBC 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÷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 BBC показан на рис. 1.3. Пурпурная часть представляет MCP 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 t0 для событий, в которых другие детекторы не могут быть использованы



Рисунок 1.3 — Строение ВВС в сечении

Сцинтилляционная часть BBC 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-overThreshold (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 прототипирование детектора поляризации пучка и плоскости событий для эксперимента SPD@NICA. В данной работе будут описаны подготовительные шаги, описание принимаемых моделей, параметров и методов. 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 с помощью рентгеновского сканера, исследование зависимости световыхода сцинтиллятора по каналам WLS-волокна от места прохождения излучения, вызвавшего сцинтилляцию. Завершающим шагом является изготовление детектора локальной поляриметрии.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТАЙЛ СИСТЕМЫ

Одним из первых шагов по проектированию детектора является моделирование тайлов с использованием различных геометрий. Тайлы выполнены в трапецевидной форме, между каждой трапецией предусмотрен разрыв на изоляцию. Изоляция необходима для того, чтобы тайлы не испытывали засвет друг от друга, при попадании частицы в один из них. Тайлы выполнены из быстрых сцинтилляторов, во внутренней части которых прокладывается спектросмещающее оптоволокно (WLS) для последующего анализа сигнала. На рисунке 2.1 представлена модель тайл системы для эксперимента STAR, RHIC [3].



Рисунок 2.1 — Тайл система на эксперименте STAR

Согласно последним данным концептуального дизайна счетчика пуч-

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°, ширина нижнего основания составляет около 35 мм (рис. 2.2).



BBC Sector zoom x2

Рисунок 2.2 — Предполагаемая система тайлов BBC SPD

В данной работе используется спектросмещающее оптоволокно диаметром 1 мм. Опытным путем было выяснено, что критическим диаметром 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 момент создания модели, данная тайл система полагалась наиболее подходящей. Поэтому, для данной геометрии был также смоделирован штатив - сборка, в которую должен был быть помещен один сектор тайла. Штатив 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 позволила бы 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 системы 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.

Еще одна модель тайловой системы, выполненная без учета предлагаемой SPD conceptual design геометрией, считается основной и применяется в данной работе. На ее основе были выпилены сцинтилляторные тайлы из полистирола. Модель для четырех тайлов представлена на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 — Применяемая в данной работе модель тайл системы

Данная модель имеет сильные отличия от моделей, показанных выше. Во-первых, проточки под оптоволокно имеют не трапецевидную форму, а потому не охватывает всю геометрию тайлов, хоть и покрывают большую ее часть. Стремление покрыть большую часть вызвано желанием захватить как можно большое количество сцинтилляционных квантов, ведь чем больше длина оптоволокна, тем больше квантов попадут в него. Волокно наматывается в несколько слоев внутри проточки, чтобы охватить всю глубину. Полагается, что данная модель сможет собирать оптимальное количество квантов волокном, а подтверждение или опровержение этому будет увидено при тестировании. Во-вторых, система является более компактной: высота каждого тайла не превышает 56 мм, а глубина тайлов всего 10 мм.

2.2 ОПТИЧЕСКИЕ НАПОЛНИТЕЛИ

Как уже говорилось ранее, съем 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 Eljen 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 cPs;

17

диапазон рабочих температур - от -65° до +105°; удельное объемное электрическое сопротивление - 10^{14} Ом*см, и самое главное - спектральные характреристики - 60-95% при длине волны $\lambda = 300-350$ нм, и 95-100% при $\lambda = 350-600$ нм.

Среди всех существующих аналогов были выделены несколько вариантов, приведенных на таблице 2.1.

		1	1	
Марка	Вязкость,	Диапазон	Спектральные	Показатель
	cPs	рабочих	характеристики	преломления
		температур		
EJ-500	800	От -65	60-95% 300-350 nm,	1.574
		до +105 °C	95-100% 350-600 nm	
EPO-TEK	225 - 425	Комнатная	94% 320 nm,	1.5318
301-2		температура	$99\%~400\text{-}1200~\mathrm{nm},$	589 nm
		- +65 °C	98% 1200-1600 nm	
EPO-TEK	100 - 200	Комнатная	99% 382-980 nm,	1.519
301		температура	97%980-1640 nm,	589 nm
		- +65 °C	95% 1640-2040 nm	
Оптический		От -60	98% 400-950 nm	1.54
клей Луч-2		до +125 °C		
СКТН МЕД	$15 \cdot 10^3$		92-96%	1.606
Марки Е			500 nm	

Таблица 2.1 — Оптические наполнители и их характеристики

Наполнитель ЕРО-ТЕК 301-2 имеет наиболее схожие с ЕЈ-500 спектральные характеристики и малую вязкость, однако сильно разнится 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. Оптический наполнитель "Луч-2", по последним данным, больше не производится, а все аналоги марки ЕРО-ТЕК и ЕЈ-500 в современных условиях достаточно тяжело добыть, так как производятся только иностранными компаниями. Рассматривались также отечественные клеи ОК-50 и 2К-302, однако не подошли по ценовым соображениям. Исходя из всего вышесказанного, самой приемлимой оптической смесью для проектировки и тестирования детектора является низкомолекулярный каучук "СКТН-МЕД" марки Е [5]. Вопервых, его производством занимается Российская компания "СУРЭЛ", что обеспечивает уверенность в его доставке на место непосредственного использования. Во-вторых, стоимость СКТН МЕД на порядок меньше его аналогов. В данной работе будет использоваться именно этот наполнитель.

2.3 РЕНТГЕНОВСКИЙ СКАНЕР

Для исследования зависимости световыхода сцинтиллятора по каналам WLS-волокна от места прохождения излучения, вызвавшего сцинтилляцию, используется координатный стол с источником рентгеновского излучения. Координатный стол представляет из себя двигающийся источник в плоскости XOY, точно описывающий заданные ему координаты. Кванты рентгеновского источника, попадая в тайл, вызывают сцинтилляцию, которая собирается оптоволокном и направляется на SiPM. После считки сигнала проводится его анализ и строится распределение амплитуды считанного сигнала в зависимости от координаты источника. Ожидается, что распределения будут иметь характер, похожий на рис. 2.7, где распределения отражают эффективность детектирования на симулированных данных из другого эксперимента.



Рисунок 2.7 — Моделирование эффективности детектирования

В качестве источника рентгеновского излучения будет использована рентгеновская трубка. Она устойчиво крепится к двигующейся каретке, а программное обеспечение должно позволять управлять кареткой и задавать ей точные координаты, или двигаться по описаной траектории, одноврменно записывая как свое положение, так и амплитуду сигнала. Модель координатного стола, его характеристики и прочее описывается в разделе 2.3.1.

2.3.1 МОДЕЛЬ КООРДИНАТНОГО СТОЛА

Перед сборкой непосредственно координатного стола, необходимо его смоделировать. На этом этапе принимаются самые важные решения - выбор комплектующих, их характеристики, размеры, питание. На рисунке 2.8 представлена модель сканера - прямоугольник размерами 486х336 mm^2 в основании, выполненного на основе 20х20 mm^2 профилей, с креплением 6 вертикальных держателей движущихся кареток. Модель выполнена на основе ЧПУ станков - механика с прецезионным координатным разрешением, управляемая АЦП-ЦАП микроконтроллером Arduino.



Рисунок 2.8 — Модель координатного стола в сборке

Для фиксации профилей в исходном положении с каждой стороны используются стальные соединительные пластины и наружные уголки, крепящиеся на болтах и Т-гайках (рис.2.9). Движение кареток осуществляется за счет их крепления к гайке шарико-винтовой передачи SFU1204 (ШВП). ШВП является наиболее прицезионной передачей и позволяет добиться координатного разрешения от 20 до 2.5 мкм.



Рисунок 2.9 — Соединительная пластина и наружный уголок

В свою очередь, трапециевидные винты позволяют добиваться такой же точности, однако не будут использованы в данной работе. Во-первых, физика процесса просто не требует такого координатного разрешения. Рентгеновская трубка используется вместе с коллиматором, ограничивающим область облучения квантов до отверстия диаметром 2 мм, внутренняя часть которого выполнена из алюминиевого цилиндра, хорошо рассеивающего кванты. Допустимое разрешение составляет от десятой миллиметра, то есть разрешение 20 мкм просто не внесет вклада. Во-вторых, трапециевидные винты имеют большое количество недостатков. Для начала, их КПД составляет около 50%, так как механизм основан на трении скольжения, а не на трении качения, как в ШВП. В следствие этого требуются более мощные двигатели и большее время исполнения команд, а также дополнительные затраты на электроэнергию. Принимая во внимание так же то, что для трапециевидных винтов повышен износ, люфт и нагрев рабочей области, выбор в пользу ШВП становится очевиден. ШВП плохо работают с вертикальными перемещениями: в силу особенности данной передачи, гайка не может находиться в фиксированном положении, и поэтому она самопроизвольно, под действием силы тяжести, начинает движение. Однако в данной работе проводится исследование зависимости световыхода от положения источника в плоскости XOY, а потому этот недостаток можно игнорировать. КПД шарико-винтовой передачи составляет от 90%, передача дает дополнительную жесткость конструкции, а как следствие - основание для более редкой калибровки установки. Последним достоинством выбора ШВП является тот факт, что собираемый координатный стол может в будущем быть использован для других целей, требующих такие координатные разрешения, либо же может быть пересобран в ЧПУ фрезер.

Однако, шарико-винтовые передачи имеют и недостатки, касающиеся данной работы. В силу большой тяжести ШВП, по его краям располагаются опорные подшипники, занимающие много места (рис. 2.10a, 2.10б) и требующие фиксации. В обратном случае, если их не использовать, ШВП будет нагружать подшипники шагового двигателя, что потенциально приводит к уменьшению сроку службы последнего, а также и к другим проблемам, связанных с провисанием гайки ШВП.



(б) ШВП SFU1204 с опорными подшипниками BK10 и BF10

Крепление опор осуществляется с помощью держателей. Держатели двигателей представляют из себя вертикальные объекты с креплениями не только под опоры, но также под шаговый двигатель и муфту (рис. 2.11). Опоры выполнены на основе PETG пластика на 3D-принтере, с высокой степенью заполнения для большей прочности. В основании держателя выполнены отверстия для крепления к профилям; В задней части держателя выполнены отверстия под гайки М5 для поддержки опор ШВП, а так же углубление для улучшенной фиксации шагового двигателя и опоры с подшипником. В передней части выполнено углубление для расположения

Рисунок 2.10 — Модели шарико-винтовой передачи



Рисунок 2.11 — Модель держателя двигателя



Рисунок 2.12 — Модель держателя опоры с подшипником

муфты, соединяющей пяти миллиметровый вал шагового двигателя и восьми миллиметровый вал ШВП. Также, выполнено сквозное отверстие для воьми миллиметровой направляющей. Она фиксирует каретку, так как в плоскости Z она должна сохранять вертикальное положение.

В свою очередь, держатели опоры с подшипником повторяют форму держателя двигателя, за исключением углубления под двигатель. Мощности небольшого двигателя вполне хватит для вращения ШВП, а потому нет необходимости использовать более трех двигателей (рис. 2.12).

Каретки, обеспечивающие движение рентгеновского источника вдоль оси ОҮ, выполнены практически по такому же принципу, что и держатели. Однако, нижняя часть каретки выполнена с учетом экономии пространства, соответственно, для увеличения рабочей области (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 — Модель кареток ОҮ

Движение передачи осуществляется с помощью шаговых двигателей 17HS4401 (42HS4401) 1,7А. Они оптимальны для ШВП SFU1204, имеют сравнительно небольшие размеры (рис. 2.14) и массу. Характеристики двигателя:

- Угол одного шага: 1.8°
- Номинальный рабочий ток: 1700 мА
- Момент удержания: 4 кг х см
- Диаметр оси: 5 мм
- Номинальный рабочий ток: 1700 мА
- Масса: 280 грамм



Рисунок 2.14 — Шаговый двигатель 17HS4401

Управление двигателями осуществляется с помощью АЦП-ЦАП микроконтроллера Arduino Uno с платой CNC Shield (рис. 2.15). Драйвера, располагаемые на шилде, позволяют управлять шаговыми двигателями после преобразования сигнала от компьютера (рис. 2.15б). Arduino имеет большое количество уже написанных библиотек для различных целей, а также имеет удобную среду для собственных разработок. Питаются микроконтроллер и двигатели от блока питания 12В 10А, он оптимально работает с несколькими двигателями. Изначально, блок был подобран при условии 2 двигателей в сборке, однако он сможет работать и с 3. В будущем не исключена замена на более мощный блок питания. Софт для управления двигателями существует, однако для данной задачи он сырой. Подходящее исполнение библиотеки находится в разработке.



(a) Arduino (снизу) b CNC Shield (сверху)



(б) Драйвер А4988 для Arduino с радиатором

Рисунок 2.15 — Модель кареток ОУ

На данный момент координатный стол находится в сборке. Приобретены все комплектующие - в том числе элеткроника - модели держателей и кареток находятся в печати. Так как размеры в сборке и наяву могут меняться, было решено сначала собрать сканер без основания, а после измерения размеров заказать профили, ведь даже один лишний миллиметр может нарушить симметрию сборки, либо же помешать жесткому фиксированию.

На рисунке 2.16 изображена модель координатного стола, вид сверху. Розовым цветом схематично отображена система из четырех тайлов. Рабочая область стола (модельная) - 230 x 222.5 mm^2 , расчетная (с учетом более длинных ШВП) - 317.5 x 217.5 mm^2 . Следовательно, для исследований на системе из 4 тайлов, размеры которой 224.3 x 129 mm^2 (рис. 2.6) сканер подходит по любой системе исчисления рабочей области.



Рисунок 2.16 — Модель координатного стола, вид сверху

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводится прототипирование и тестирование детектора поляризации пучка и плоскости событий для эксперимента SPD NICA.

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 также приведена итоговая геометрия тайлов. Также, в процессе работы были изучены тонкости строения детекторов и отобраны наиболее подходящие оптические наполнители для улучшения светосбора. В работе описаны методы по оценке эффективности светосбора детектора в зависимости от положения источника, приведена модель рентгеновского сканера и его достойнства для проведения исследований.

В будущем планируется итоговая сборка рентгеновского сканера и проведение на его основе исследований зависимости световыхода сцинтиллятора по каналам WLS-волокна от места прохождения излучения от рентгеновской трубки с коллиматором, построение на основе исследований тепловой карты, а также контроль качества сцинтилляторных тайлов на предмет шероховатостей, тестирование различных оптических клеев с целью добиться максимальной эффективности прототипа детектора BBC.

28

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Karpishkov A., Saleev V. On transverse single-spin asymmetries in Dmeson production at the SPD NICA experiment. -2022.
- 2. Conceptual design of the Spin Physics Detector / V. M. Abazov [и др.]. 2021.
- 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.
- 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. — Т05003—Т05003.
- 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. — T. 930. — C. 87—94.