

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Подбор материала сцинтиллятора для детектора
плоскости событий эксперимента SPD на NICA**

Научный руководитель
к.ф.-м.н., ведущий инженер

_____ П. Е. Тетерин

Выполнил

_____ А. Д. Манаконов

Москва 2023

Оглавление

1	Цели работы	3
2	BBC и SPD	3
3	Сцинтилляторы	5
4	Оптоволокно	7
4.1	Механизмы потери света	7
5	Экспериментальная часть и результаты обработки	10
5.1	Установка	10
5.2	Ход работы	13
5.3	Результат обработки	14
6	Итоги	17
	Список использованных источников	18

1 Цели работы

Основной задачей является проведение подбора материалов для сцинтилляционного детектора для эксперимента SPD на коллайдере NICA в Дубне. Освоить сцинтилляторы, которые уже есть, а затем образцы других. В дальнейшем задача заключается в подборке оптоволоконна, клея и фотоумножителя, для данного проекта.

2 ВВС и SPD

Два счетчика лучей (ВВС) будут расположены непосредственно перед системой PID в торцевых чашках установки SPD. Детектор должен состоять из двух частей: внутренней и внешней, которые на основе разных технологий. Внутренняя часть ВВС будет использовать быстросегментированную пластину MicroChannel. Концептуальный проект Детектора спиновой физики 99 (МСР) детекторы и должны работать внутри лучевой трубы, в то время как внешняя часть ВВС будет производиться из быстрых пластиковых сцинтилляционных плиток. Внутренняя часть охватывает приемку $30 \div 60$ мрад и должна быть разделен на 4 слоя, состоящих из 32 азимутальных секторов.

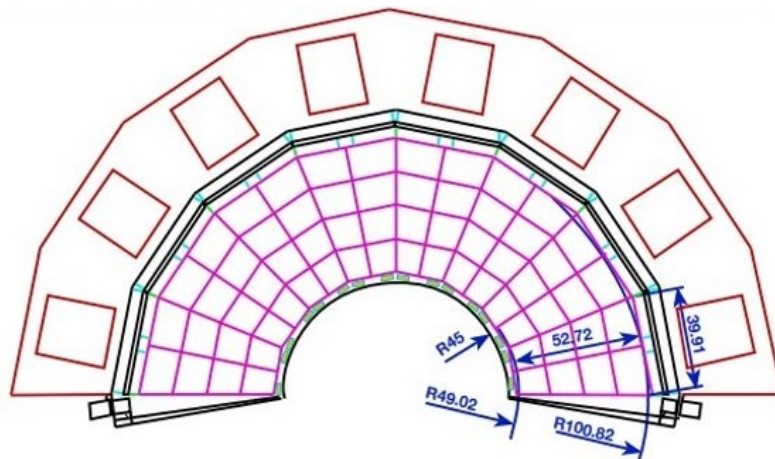


Рисунок 1 – ВВС: сегментизация по азимуту и полярному углу. Все размеры в миллиметрах.[2]

Внешняя часть, закрывающая полярные углы от 60 до 500 мрад будут разделены на 5 или 6 концентрических слоев с 16 азимутальными секторами в каждый из них. Окончательная степень детализации зависит от дальнейшей оптимизации для всего диапазона энергий. столкновения на SPD. Пурпурная часть представляет МСР детектор, в то время как внутренний слой внешней части показан красным цветом. Основными задачами Beam-Beam Counters являются:

1. Локальная поляриметрия в SPD на основе измерений азимутальных асимметрий в инклюзивном рождении заряженных частиц в столкновениях;

2. Мониторинг столкновений пучков ;
3. Участие в точное определение времени столкновения t_0 для событий, в которых другие детекторы не могут быть использованы для этого (например, в случае упругого рассеяния) ;[4]

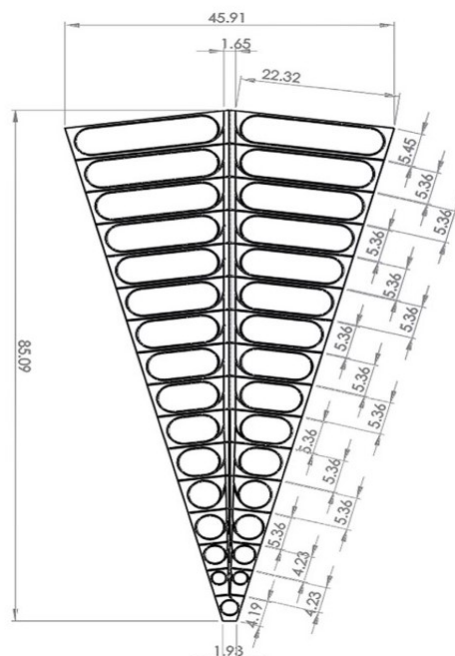


Рисунок 2 – Детальный эскиз одного сектора с масштабом в см [1]

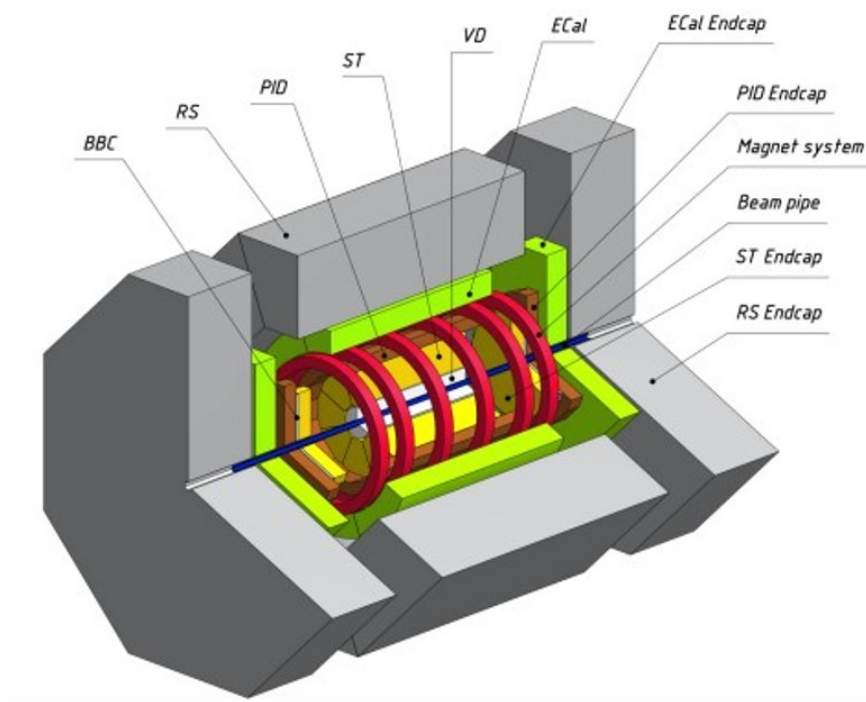


Рисунок 3 – Общий план SPD [2]

Пояснение к Рисунку 3.

1. BBC – луч-луч счетчик
2. RS – мюонная система детектирования
3. PID -Система учета времени полета
4. ST- Система слежения на основе тонкой трубки
5. VD – детектор амплитуд
6. Ecal -пробоотборным электромагнитным калориметром
7. Ecal Endcap –торцевая крышка Ecal
8. PID Endcap - торцевая крышка PID
9. Magnet system –магнитная система
10. ENDcap – торцевая крышка системы слежения на основе тонкой трубки

3 Сцинтилляторы

Сцинтилляторы — это особые вещества, обладающие способностью излучать свет при поглощении ионизирующего излучения, например, гамма-кванты. В отличие от, например, люминесценции, здесь возбуждение происходит именно за счет ионизации, а не за счет механического воздействия. Высвечивание света происходит быстро, в форме мгновенной вспышки. Также особенностью сцинтилляторов является то, что излучаемое количество фотонов для данного типа излучения имеет близкую к пропорциональной зависимость от поглощённой энергии излучения. Благодаря этим свойствам можно выделить энергетические спектры излучения по энергии вспышек.

Сцинтилляторы бывают разных типов в зависимости от вещества, из которого они сделаны. В целом это деление на типы можно представить как деление в органические и неорганические сцинтилляторы. Неорганические сцинтилляторы — это чаще всего неорганические монокристаллы. Есть также еще газовые сцинтилляторы и стекла. Органические сцинтилляторы — это органические кристаллы, а также пластики и жидкие сцинтилляторы. Все эти типы характеризует, прежде всего, разный механизм сцинтилляций. Неорганические сцинтилляторы характеризуются большим световыходом, однако, также и большим временем высвечивания (порядка микросекунд).

Органические же наоборот характеризуются небольшим световыходом, но их время высвечивания мало (порядка десятков наносекунд). Примером неорганического сцинтиллятора является NaI(натрий-йод), гигроскопичное вещество, с огромным световыходом. Пример органических —

антрацен (C_4H_{10}). Кроме различных свойств светимости есть и другое важное практическое отличие. Неорганические кристаллы трудно вырастить большого размера. Как и кристаллы вообще.

Таблица 1: Характеристики неорганических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [3]

Вещество	Световыход,	τ , нс	t , нс	λ_{max} , нм	n	ρ , $g/(cm)^3$
CsI(Na)	54	45	630	420	1,84	4,51
CsI(Ti)	41	85	1000	550	1,79	4,51
LYSO	33	87	36	420	1,81	7,1
BGO	8-10	20	300	480	2,15	7,13
CdWO ₄	12-15	14000	1,9	475	2,3	7,9

Так же нужно рассказать о том, что представляют собой органические сцинтилляторы - это виды органических материалов, которые обеспечивают обнаружение фотонов в видимой части светового спектра после прохождения заряженной частицы или фотона. Механизм сцинтилляции в органических материалах сильно отличается от механизма в неорганических кристаллах. В неорганических сцинтилляторах, например, NaI, CsI, сцинтилляция возникает из-за структуры кристаллической решетки. Механизм флуоресценции в органических материалах возникает в результате переходов энергетических уровней одной молекулы. Следовательно, флуоресценцию можно наблюдать независимо от физического состояния (пар, жидкость, твердое вещество).

Таблица 2: Характеристики органических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [5]

Вещество	Световыход,	τ , нс	t , нс	λ_{max}	n	ρ , $g/(cm)^3$
Нафталин	$4 * 10^3$	45	11	348	1,58	1,15
Антрацен	$4 * 10^4$	85	30	448	1,59	1,25
n-Терфенил	$1.2 * 10^4$	87	6-12	391	1,65	1,23
Полистирол	$1.2 * 10^4$	20	2,2	400	1,58	1,06-1,15

Органические сцинтилляторы обычно имеют быстрое время затухания (обычно 10^{-8} с), в то время как неорганические кристаллы обычно

работают намного медленнее (10^{-6} с), хотя у некоторых также есть быстрые компоненты в их реакции. Существует три типа органических сцинтилляторов:

1. **Чистые органические кристаллы.** Чистые органические кристаллы включают кристаллы антрацена, стильбена и нафталина. Время распада этого типа люминофора составляет приблизительно 10 наносекунд. Этот тип кристалла часто используется для обнаружения бета-частиц. Они долговечны, но их реакция анизотропна (что ухудшает разрешение по энергии, когда источник не коллимирован). Они не поддаются легкой механической обработке и не могут быть выращены в больших размерах. Поэтому они не очень часто используются.;
2. **Жидкие органические растворы.** Жидкие органические растворы получают путем растворения органического сцинтиллятора в растворителе.;
3. **Пластиковые сцинтилляторы.** Пластиковые люминофоры изготавливаются путем добавления сцинтилляционных химикатов в пластиковую матрицу. Константа затухания является самой короткой из трех типов люминофоров, приближаясь к 1 или 2 наносекундам. Пластиковые сцинтилляторы больше подходят для использования в средах с высоким потоком и для измерения мощности высокой дозы. Пластик имеет высокое содержание водорода. Поэтому он полезен для детекторов быстрых нейтронов. Для получения детектируемого фотона в сцинтилляторе требуется значительно больше энергии, чем в электронно-ионной паре путем ионизации (обычно в 10 раз). Поскольку неорганические сцинтилляторы излучают больше света, чем органические, они лучше подходят для применения при низких энергиях.;

4 Оптоволокно

Существуют разные типы оптоволокон, соответственно разные характеристики материала и потери при изгибах и сферы применения. Нас интересует количество потерь в сцинтилляторе при фотосборе благодаря fiber.

4.1 Механизмы потери света

Поглощение

Поглощение равномерное. Одинаковое количество одного и того же материала всегда поглощает одинаковую долю света с одинаковой длиной волны. Если у вас есть три блока из стекла одного типа толщиной в 1 сантиметр каждый, все три будут поглощать одинаковую долю проходящего через них света. Поглощение также является кумулятивным, поэтому оно

зависит от общего количества материала, через который проходит свет. Если поглощение составляет 1

Внутреннее поглощение материала

Внутреннее поглощение вызвано взаимодействием распространяющейся световой волны с еще одним, более важным компонентом стекла, составляющим материальный состав волокна. Эти потери представляют собой фундаментальный минимум достижимых потерь и могут быть преодолены только путем замены материала волокна. Примером такого взаимодействия является инфракрасная полоса поглощения SiO_2 , показанная на приведенном выше рисунке. Однако в областях длин волн, представляющих интерес для оптической связи (0,8-0,9 мкм и 1,2-1,5 мкм), инфракрасные хвосты поглощения вносят незначительный вклад.

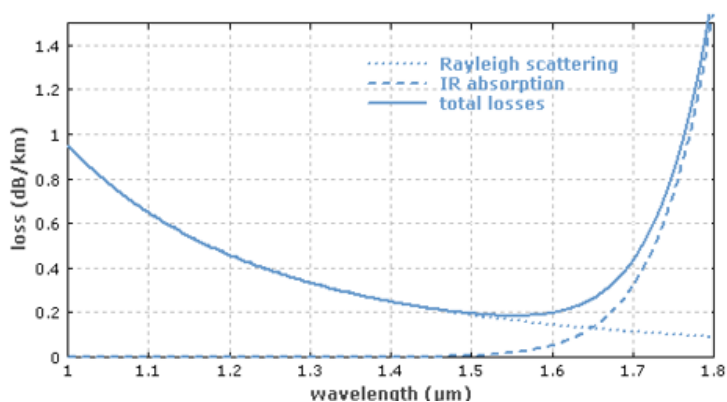


Рисунок 4 – График зависимость потерь света в оптоволокне от длины

Поглощение внешних примесных ионов

Поглощение внешних примесных ионов вызвано присутствием незначительного количества ионов металлов (таких как Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+}) и иона OH^- из воды, растворенной в стекле. Затухание от этих примесных ионов показано в следующей таблице.

Таблица 3: Характеристики органических сцинтилляторов. Время затухания (τ), длина волны максимального излучения (λ_{max}), коэффициент преломления (n), плотность (ρ) [5]

Примесный ион	Потери 1 ppm примеси /(),	λ_{max}
Fe^{2+}	0.68	1.1
Fe^{2+}	0.15	0.4
Cu^{2+}	1.1	0.85
Cr^{3+}	1.6	0.625

Рассеяние

Потери при рассеянии возникают, когда волна взаимодействует с частицей таким образом, что энергия в направленной распространяющейся волне удаляется и переносится в другие направления. Свет не поглощается, а просто направляется в другом направлении. Однако различие между рассеянием и поглощением не имеет большого значения, поскольку свет теряется из волокна в любом случае. Существует два основных типа рассеяния: линейное рассеяние и нелинейное рассеяние.

Для линейное рассеяние количество световой мощности, которая передается от волны, пропорционально мощности в волне. Он характеризуется отсутствием изменений в частоте рассеянной волны. С другой стороны, нелинейное рассеяние сопровождается сдвигом частоты рассеянного света. Нелинейное рассеяние вызвано высокими значениями электрического поля внутри волокна (от небольшой до высокой оптической мощности). Нелинейное рассеяние приводит к рассеиванию значительной мощности в прямом, обратном или боковом направлениях.

Потеря макроизгиба

Макросгиб происходит, когда волокно изгибается с большим радиусом кривизны относительно диаметра волокна (большие изгибы). Эти изгибы становятся отличным источником потерь мощности, когда радиус изгиба составляет менее нескольких сантиметров. В лотке для сращивания или в согнутом оптоволоконном кабеле может находиться макрогиб. Макроперегиб не приведет к значительным потерям излучения, если он имеет достаточно большой радиус. Однако, когда волокна изгибаются ниже определенного радиуса, излучение вызывает большие потери мощности света, как показано на рисунке ниже.

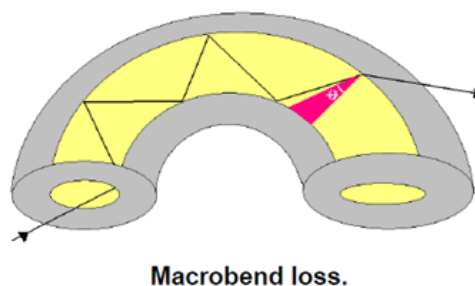


Рисунок 5 – Потеря при изгибе

Потеря макроизгиба

Микроизгибы - это небольшие изгибы на границе раздела сердцевина-оболочка. Эти локальные изгибы могут возникать во время разворачивания волокна или могут быть вызваны локальными механическими нагрузками на волокно, такими как напряжения, вызванные прокладкой кабеля или намоткой волокна на катушку. Микроизгибание также может происходить в процессе производства волокна. Это резкие, но микроскопические изгибы,

которые создают локальное осевое смещение на несколько микрон (мкм) и пространственное смещение длины волны на несколько миллиметров.

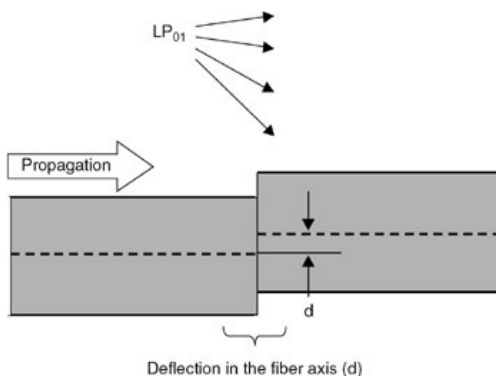


Рисунок 6 – Потеря при изгибе

5 Экспериментальная часть и результаты обработки

5.1 Установка

Данная установка на которой производились измерения состоит из цифровизатора, разделителя, усилителя и спектрометра. Спектрометр детектирует частицу и посылает аналоговый сигнал на разделитель, он в свою очередь разделяет его на два. Один из них попадает на усилитель другой на цифровизатор, последний преобразует кодирует цифровой сигнал из аналогового, только когда придет на цифровизатор сигнал с усилитель, затем данные отправляются на ПК с усилителя и цифровизатора. Так же перечислены характеристики указанных установок. Что мы видим ниже.

Данный способ сбора данных применялся в предыдущих этапах работы, на настоящий момент она была модифицирована на 2 типа, они усиливают сигнал с детектора, что позволяет собрать спектр быстрее и иметь более полноценную картину, чем при классическом методе сбора.

В начальной фазе эксперимента на установке CAEN + усилитель мы проводили измерения на одном сцинтилляторе, в частности базовый с кафедры (без клея). С помощью них мы собрали энергетические дифференциальные спектры ^{137}Cs

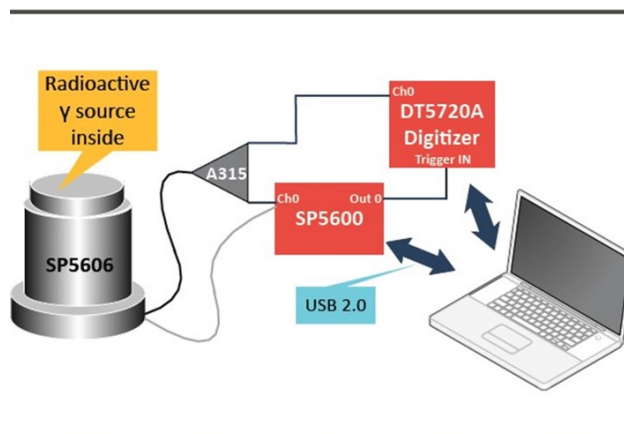
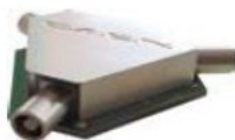


Рисунок 7 – Блок схема эксперимента

A315 - Splitter



а

SP5606 - Mini Spectrometer



б

Рисунок 8 – Сплитер(слева), мини-спектрометр(справа) [?]

DT5720A - Desktop Digitizer



- 2 Channel 12 bit 250 MS/s Digitizer
- Digital Pulse Processing for Charge Integration DPP-CI
- Best suited for PMT and SiPM/MPPC readout at low and high rates
- Mid-High speed signals (Typ: output of PMT/SiPM)
- Good timing resolution with fast signals (rise time < 100 ns)
- Optical Link and USB 2.0 interfaces
- Dimension: 154 x 50 x 164 mm³ (WxHxD)

Рисунок 9 – Цифровизатор и фровизатора

SP5600 - Power Supply and Amplification Unit



- Variable amplification gain (up to 50 dB)
- Low noise, not to spoil the sensor performances for small signals
- Wideband, to comply with the fast sensor response
- Fast leading edge discriminator and time coincidence
- Provides the bias for the sensors with gain stabilization
- USB 2.0 interface
- Dimension: 150 x 50 x 70 mm³ (WxHxD)

Рисунок 10 – Усилитель

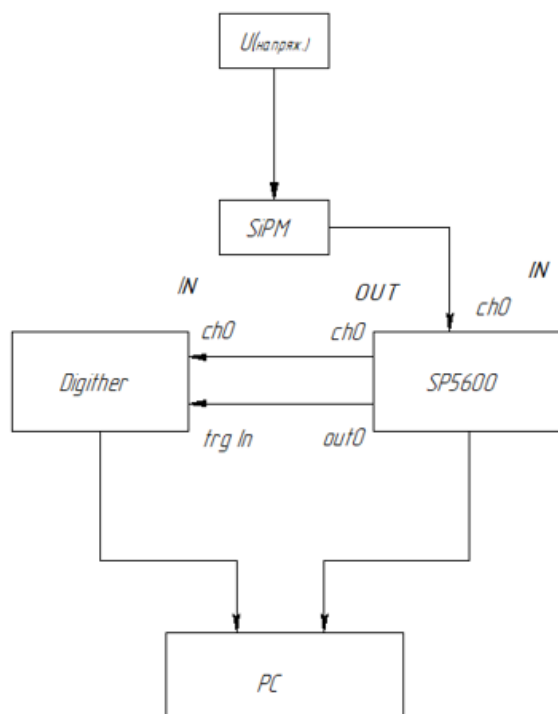


Рисунок 11 – Блок схема установки с усилением сигнала

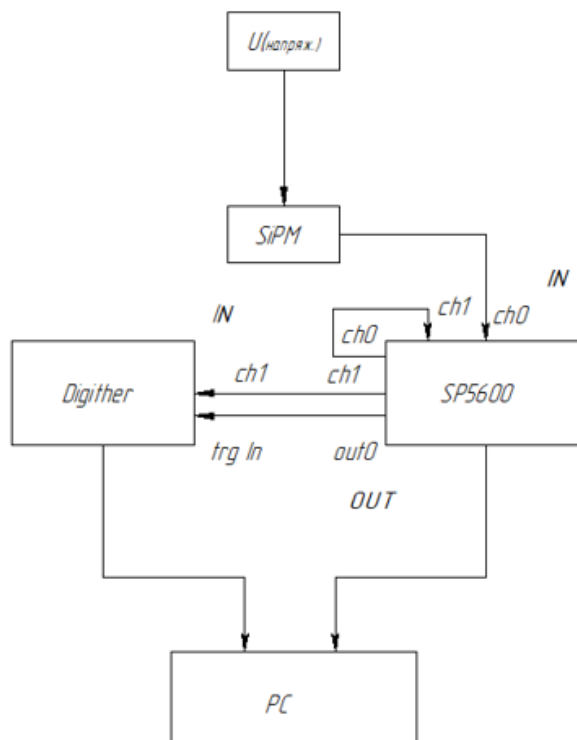


Рисунок 12 – Блок схема установки с 2-ным усилением сигнала

Пояснение к Рисунку 6: 1) есть 2 канала 12 бит 250; 2) Цифровая обработка импульсов для интеграции заряда; 3) Лучше всего подходит для считывания; 3) Лучше всего подходит для считывания ФЭУ и SiPM/MPPC на низких и высоких скоростях; 4) Сигналы подъема на средней-высокой скорости; 5) Хорошее разрешение по времени с быстрыми сигналами (время нарастания < 100 нс); 6) Оптическая связь и USB 2.0; 7) Размеры: $154 \times 50 \times 164$ мм³;

Пояснение к Рисунку 7: 1) переменный коэффициент усиления (до 50 Дб); 2) Низкий уровень шума чтобы не испортить характеристики датчика для небольших сигналов; 3) Широкополосный вместе с быстрым датчиком; 4) Быстрый дискриминатор и совпадение по времени; 5) Обеспечивание смещения для этих датчиков со стабилизацией; 6) USB 2.0; 7) Размер: $150 \times 50 \times 70$ мм³;

5.2 Ход работы

В начале мы сняли спектр с пластикового сцинтиллятора незаполненного оптическим клеем. Для этого мы перебрали установку CAEN для получения ещё более усиленного сигнала для сбора и отображения гистограммы. Так же мы собрали полный спектр со старого образца пластикового сцинтиллятора.

Далее мы обработали информацию, касающуюся SPD детектора. И приступили к созданию прототипов пластикового сцинтиллятора. Нарботав навык на эпоксидной смоле, мы приступили к заполнению клеем и оптоволоконном образцов. Мы отработали на 2-ух бракованных образцах и 1-ом полноценном. Существуют некоторые моменты, для этого нам по-

требовался 1 шт. 5мл шприц (для отвердителя клея) и 1 специальный для клея.

Необходимо заполнить малым слоем канавку в сцинтилляторе и после этого заложить туда оптоволокно, затем заполнить оставшуюся часть клеем и заранее приклеить к торцу с выходом оптоволокна скотч (чтобы клей не вылился), заранее сделав малый надрез под выход оптоволокно, оставить на 2 дня максимум и клей застынет.

И правильном способе смешивания клей не растворяет пластик и черкальный маркер, так же легко отрывается от поверхности и почти не оставляет следов. На шереховатом торце было замечено что клей смачивается с поверхностью и у торца понижается шереховатость (по качеству около отполированного).

5.3 Результат обработки

По итогу своей работы я могу показать что собрал спектр ^{137}Cs с помощью кафедрального сцинтиллятора. Был получен спектр шума на SiPM, что будет применяться при сборе гистогармм с будущим прототипов. Были разработаны 3D модели для коннектора SiPM с оптоволокном, для единичного образца и для целого сегмента в детекторе, так же платформа под целый сегмент и коннектор. В дальнейшем планируется собрать с каждого образца состоящего в сегменте на детекторе по спектру.

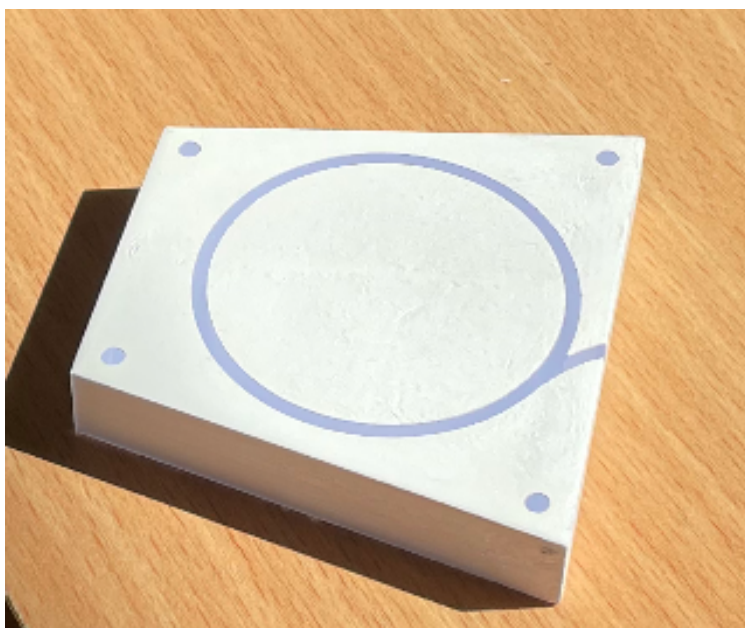


Рисунок 13 – Образец сцинтиллятора с покрешнной поверхностью

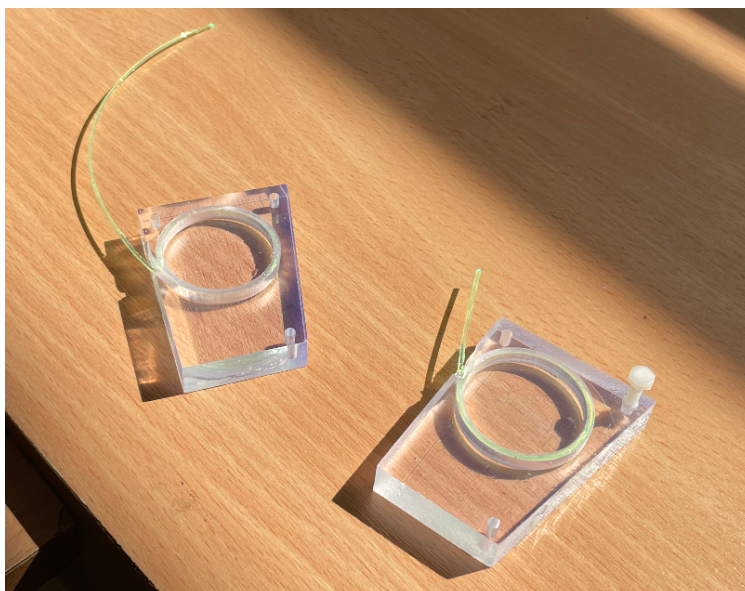


Рисунок 14 – Обработанные образцы с полированными и не полированными торцами

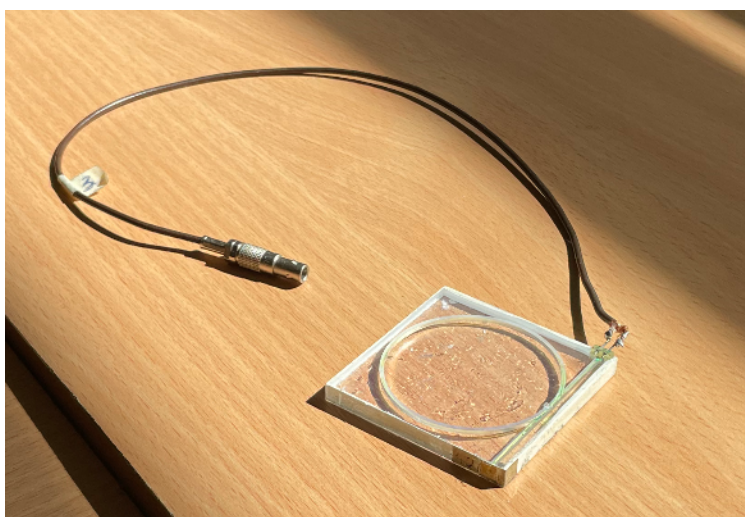


Рисунок 15 – Образец сцинтиляционного детектора со встроенным SiPM

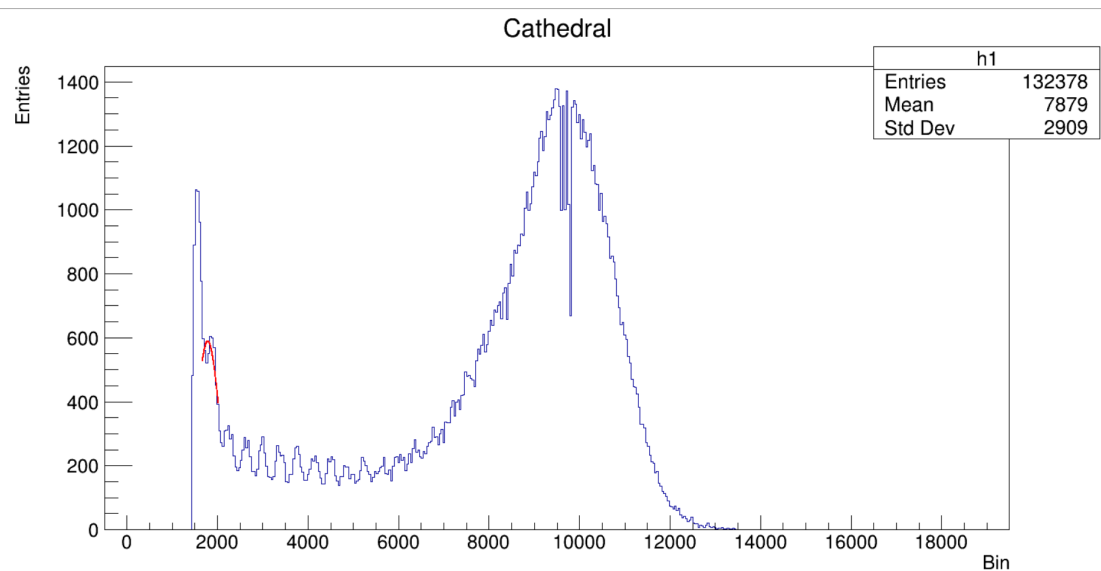


Рисунок 16 – Спектр со старого образца сцинтилятора без клея

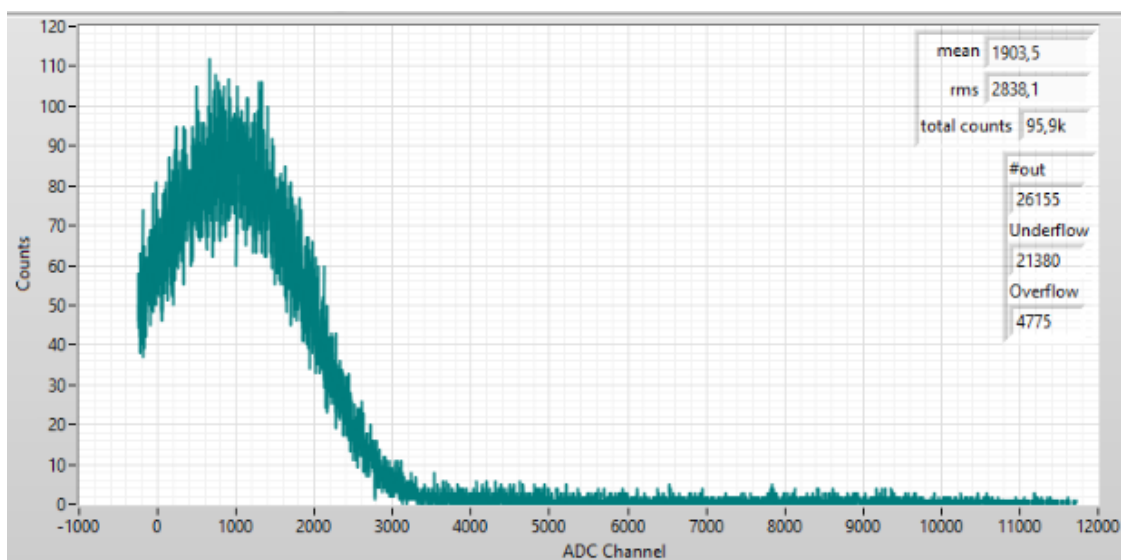


Рисунок 17 – Предварительный спектр без пластика

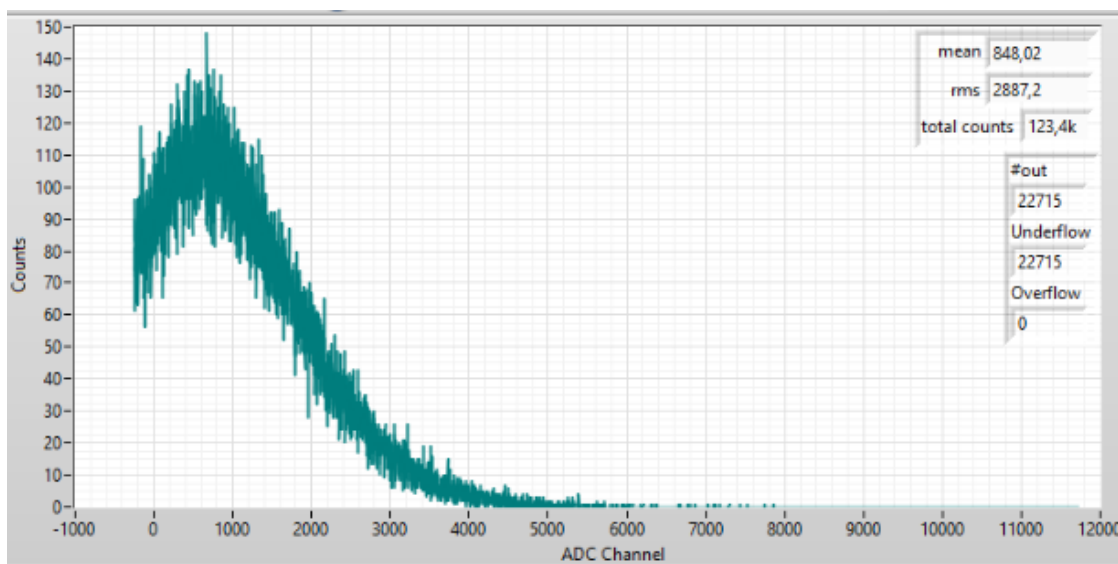


Рисунок 18 – Предварительный спектр пластика с зеркальной поверхностью



Рисунок 19 – Иллюстрация смачивания поверхности клеем

6 Итоги

1) Изучена конструкция и назначение SPD детектора на NICA. 2) Произведен обзор литературы посвященной подобным детекторам 3) Изучена работа измерения системы CAEN для различных форм сцинтилляторов. 4) Получены спектр на образце незаполненного оптическим клеем 5) Планируется проведение измерения с прототипом на BBC, 6) Планируется сравнение спектров сцинтилляционных детекторов с различными типами оптоволокон, обработки поверхности, клеем. Так же мы разработали технологию заполнения клеем пластикового сцинтиллятора, была обнаружена смачиваемость клея и шероховатой поверхности, что обеспечивает в разы меньше рассеяние внутри канавки сцинтиллятора.

Список используемых источников

- [1] J. Adams, A. Ewigleben, S. Garrett, W. He, T. Huang, and P.M. Jacobs. Nuclear inst. and methods in physics research, a. *Nuclear medicine communications*, 2020.
- [2] V.P. Ladugin. Bbc status report. 2022.
- [3] LUXIM SOLUTIONS. Scintillation crystals. 2022.
- [4] A.Guskov. Conceptual design of the spin physics detector. 2021.
- [5] И.Б Немченко. Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики. Дубна. Диссертация на соискание ученой степени.