

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

**Измерение потерь спектросмещающего оптического
волокна при изгибе и скручивании для детектора
ВВС**

Научный руководитель
Доцент

_____ П. Е. Тетерин

Выполнил

_____ А. Д. Манаконев

Москва 2023

Оглавление

1	Цели работы	3
2	ВВС 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	11
	5.3 Результат обработки	12
6	Итоги	19

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 (MCP) 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.

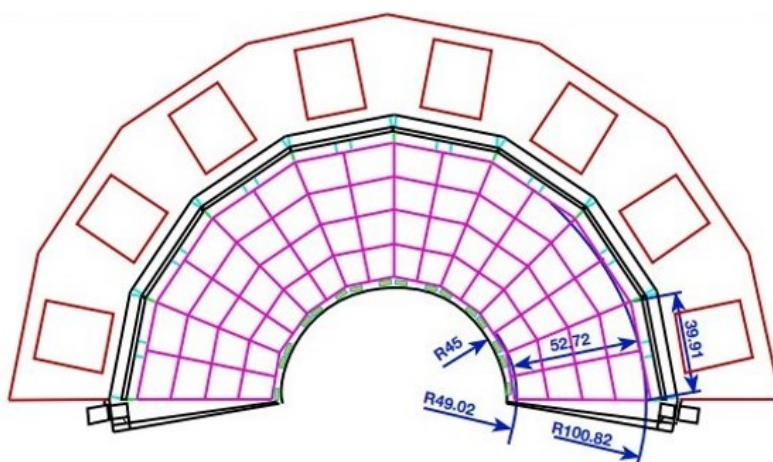


Рисунок 1 – ВВС: сегментизация по азимуту и полярному углу. Все размеры в миллиметрах.[1]

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 MCP 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;

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) [4]

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 SiO₂, 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.

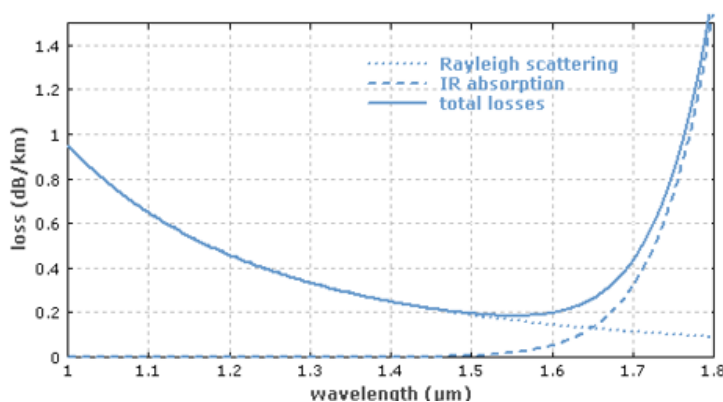


Рисунок 4 – График зависимость потерь света в оптоволокне от длины [5]

Поглощение внешних примесных ионов

Поглощение внешних примесных ионов вызвано присутствием незначительного количества ионов металлов (таких как Fe²⁺, Cu²⁺, Cr³⁺) 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) [4]

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.

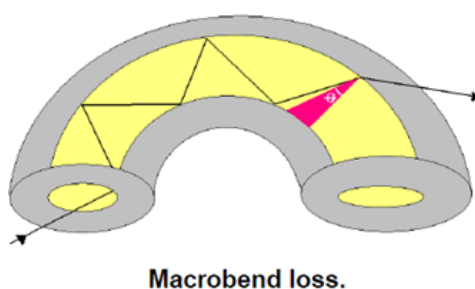


Рисунок 5 – Потеря при изгибе [5]

Потеря макроизгиба

Микроизгибы - это небольшие изгибы на границе раздела сердцевины-оболочка. Эти локальные изгибы могут возникать во время развертывания 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.

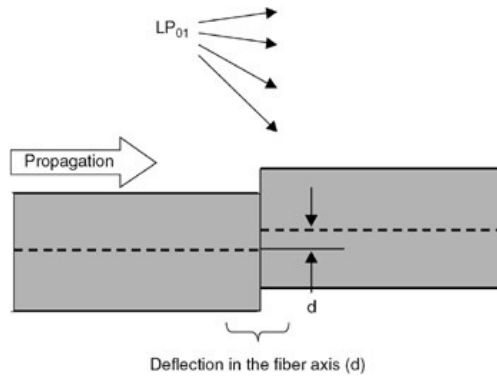


Рисунок 6 – Потеря при микросмещенность волокна [5]

5 Экспериментальная часть и результаты обработки

5.1 Установка

Данная установка на которой производились измерения состоит из осциллографа(Лесгой), источник питания 30 В, генератор сигнала, SiPM, лампочка.

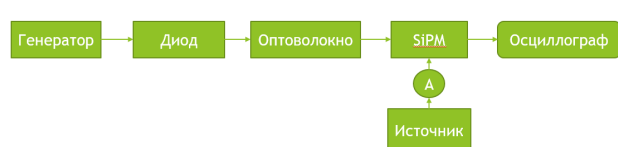


Рисунок 7 – Блок схема эксперимента

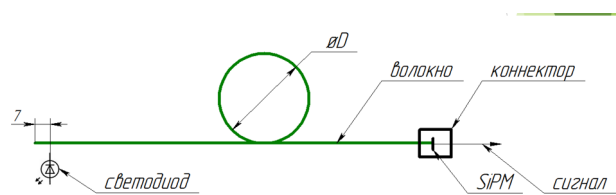


Рисунок 8 – Схематичное отображение самих измерений



Рисунок 9 – Фото самой схемы измерений (на фото нет самого Лесгоу и генератора сигналов с источником напряжения)

Пояснение к Рисунку 7: Лампочка светит перпендикулярно самому волокну каждый раз на одинаковом расстоянии от конца оптоволокну, далее идет сам завиток конкретных диаметров и кол-во скручиваний и затем оптоволокну стыкуется с SiPM через коннектор. Сигнал выходит с SiPM на осциллограф Лесгоу.

Пояснение к Рисунку 8: Тоже самое что и в пояснении Рисунку 7, но дополнительно у нас указано напряжение для питание самого SiPM(было 29 В)

5.2 Ход работы

Сначала снимались спектры с SiPM стыкованного с Saint-Gobain медленным от разных форм и в несколько раз скрученных

Лампочка стыковалась вплотную и перпендикулярно самому волокну, далее волокно скучивалось и стыковалось с SiPM, к нему было подключено питание, сигнал выводился на осциллограф, затем собирались спектры (одна сборка спектра занимала 2 минуты) путем вычета пьедестала через Лесгоу. Для каждой формы скручивания (1-4) и количества оборотов (1-3) собиралось 5 гистограмм с помощью осциллографа Лесгоу, далее выводилось усредненное значение для количества вхождений $Entries_n$, где n - номер свертка, i - номер порядка измерений, $Entries_{n,i}$.

$$Entries_n = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Entries_{n,i} \quad (1)$$

Погрешность самого количества вхождений рассчитывалась через среднее квадратическое, $t_{\alpha.n}=2.78$ - коэффициент Стьюдента, $k=5$ - количество самих измерений для точки.

$$\Delta Entries_n = t_{\alpha.n} \cdot \sqrt{\frac{1}{k \cdot (k-1)} \sum_{i=1}^5 (Entries_{ni} - Entries_n)^2} \quad (2)$$

В конечном итоге сравнивалось количество вхождений в самих гистограммах от количества скручиваний и самой формы скручивания. То есть принял формулу.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{Entries_n}{Entries_0}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$

В этой формуле $Entries_n$ означает количество вхождений в спектре n -ой формы и кол-во скручиваний, $Entries_0$ количество вхождений в распрямленной волокне целиком.

И после этого рассчитывалась погрешность для самих потерь через погрешность косвенных измерений, где $\Delta Entries_n$ - погрешность вхождений для n -ого номера гистограммы, $\Delta Entries_0$ - погрешность для выпрямленного волокна;

$$\Delta \eta(\%) = \sqrt{\left(\frac{\Delta Entries_n}{Entries_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Entries_0}{Entries_0^2}\right)^2} \cdot 100\% \quad (4)$$

Для волокон не менялись настройки с целью получения наиболее точных данных.

Затем тот же самый метод и ход измерений был применен для быстрого Saint-Gobain.

5.3 Результат обработки

В итоге работы были собраны спектры сигнала с вычетом пьедестала, для волокон SG fast, SG slow. Построены для самих типов скручивания гистограммы и сравнены, а также построены графики для сравнения потерь при скручиваниях SG-fast и SG-slow (% потерь от длины самого скрученного волокна), и график сравнения потерь для волокон SG-fast, SG-slow, Kugaгау, для последнего данные брались от изготовителя (в данном графике был проведен переход зависимости с % от длины скручивания к % потерь от радиуса скручивания). Ниже указана нумерация для форм скручивания самих волокон.

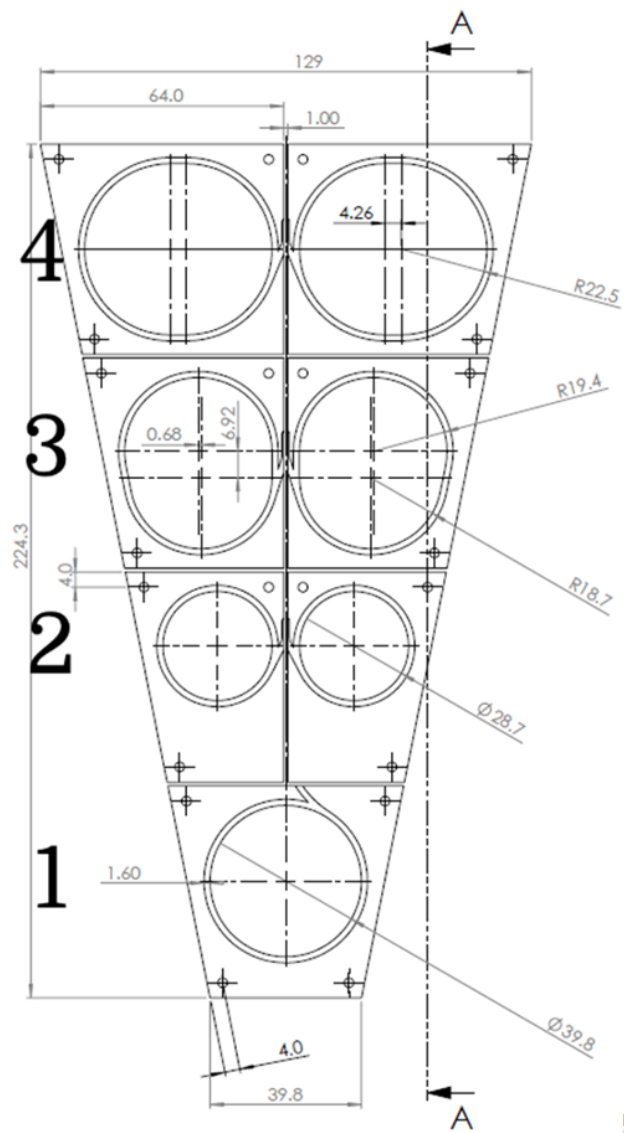


Рисунок 10 – Нумерация самих форм оптоволокон

На Рисунке 10 для дальнейшего сравнения пронумерованы типы волокон для сегмента ВВС.

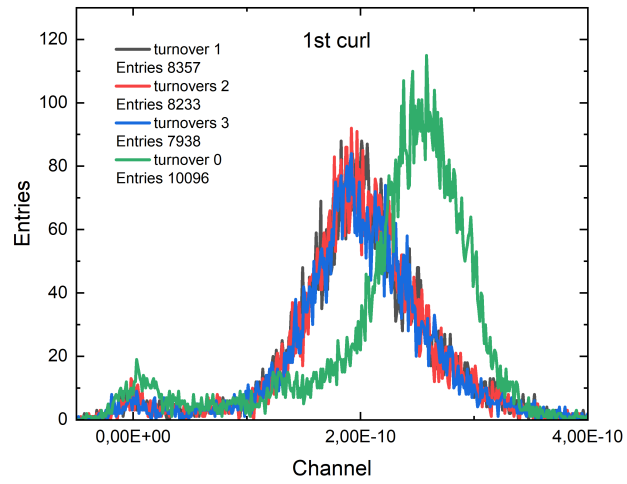


Рисунок 11 – Спектры полученные для сигнала через SG-slow типа №1

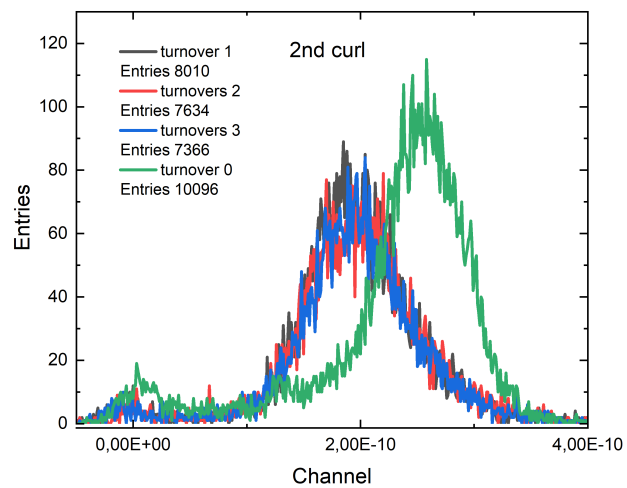


Рисунок 12 – Спектры полученные для сигнала через SG-slow типа №2

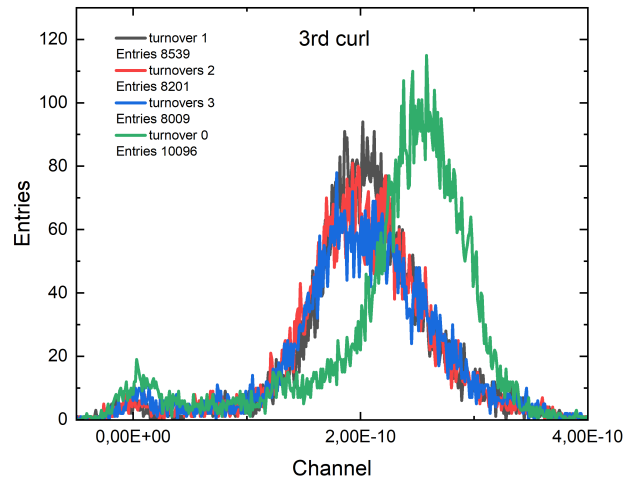


Рисунок 13 – Спектры полученные для сигнала через SG-slow типа №3

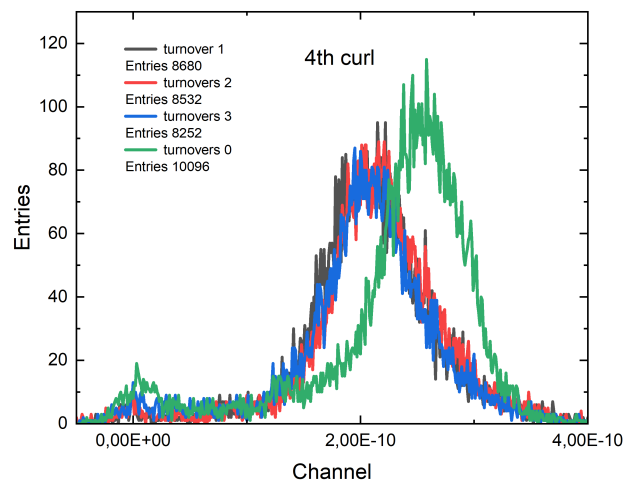


Рисунок 14 – Спектры полученные для сигнала через SG-slow типа №4

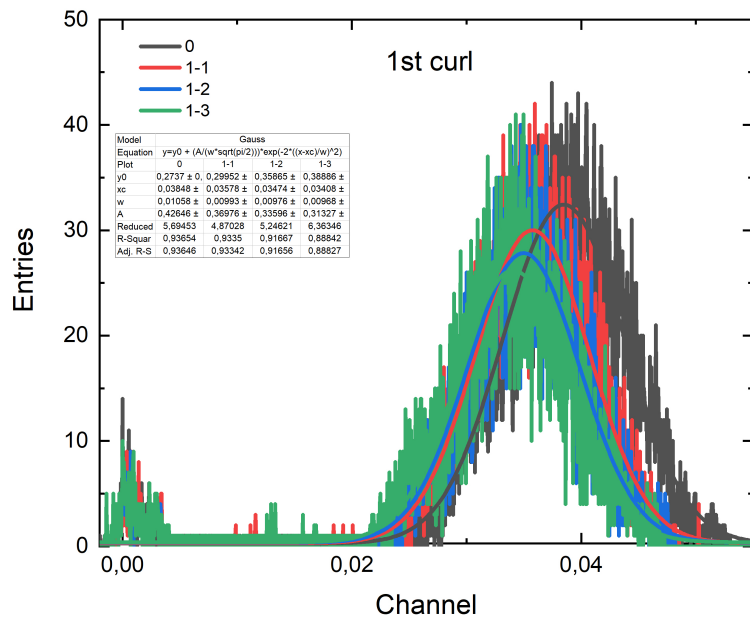


Рисунок 15 – Спектры полученные для сигнала через SG-fast типа №1

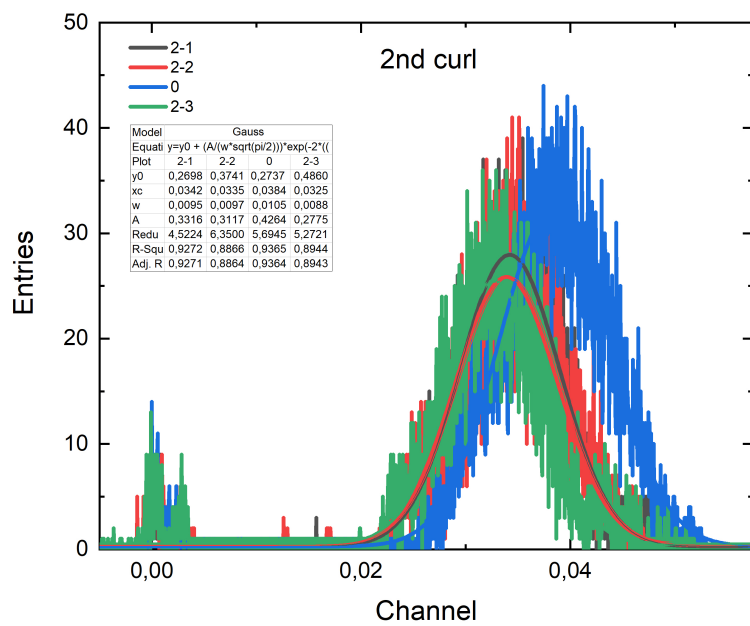


Рисунок 16 – Спектры полученные для сигнала через SG-fast типа №2

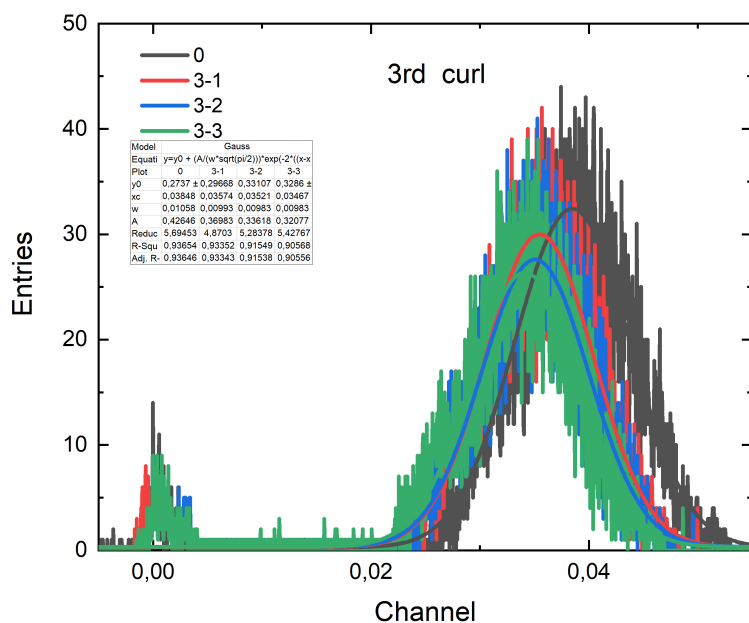


Рисунок 17 – Спектры полученные для сигнала через SG-fast типа №3

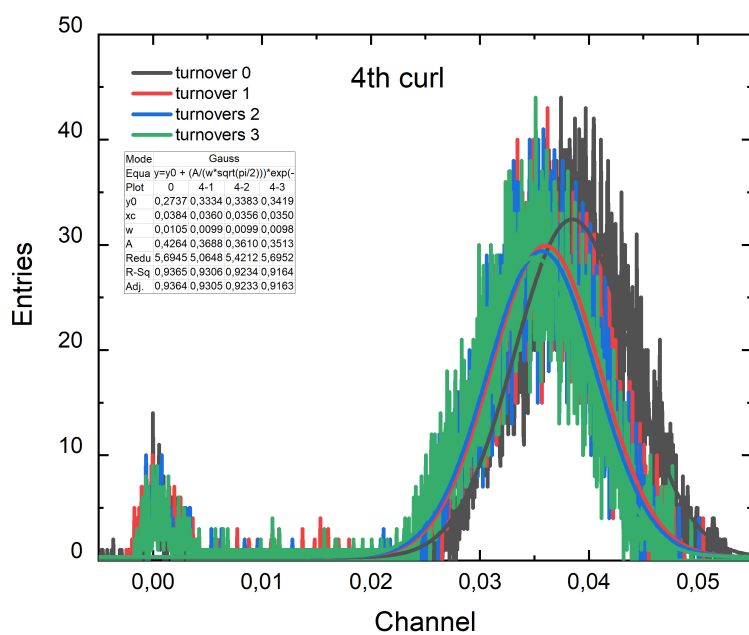


Рисунок 18 – Спектры полученные для сигнала через SG-fast типа №4

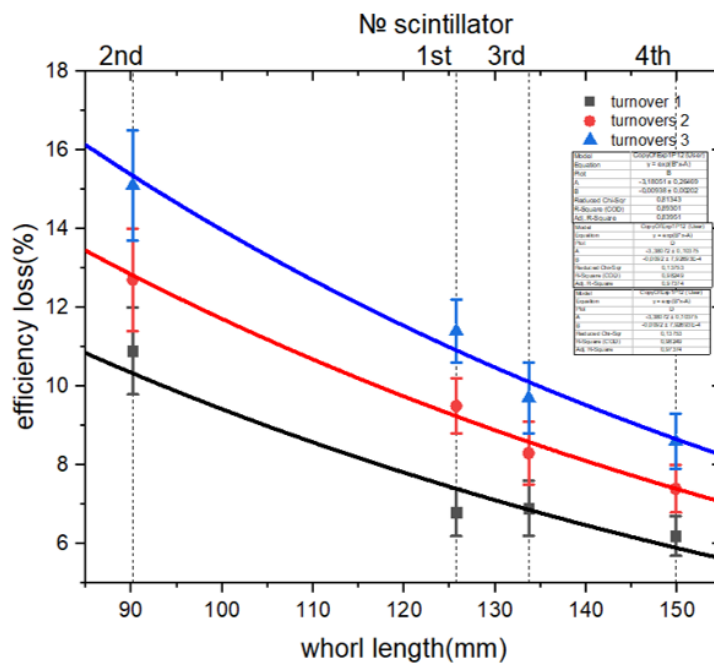


Рисунок 19 – Графики потерь света в SG-slow от типа скручивания и количества скручиваний

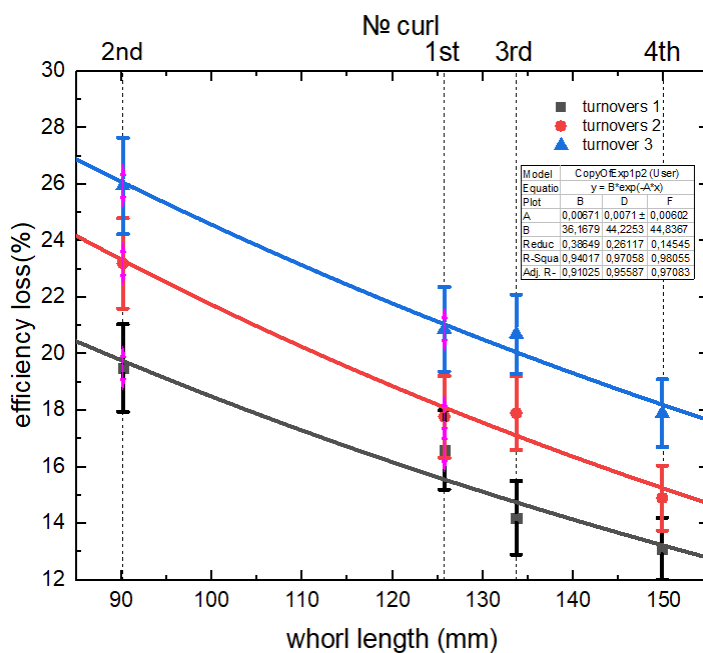


Рисунок 20 – Графики потерь света в SG-fast от типа скручивания и количества скручиваний

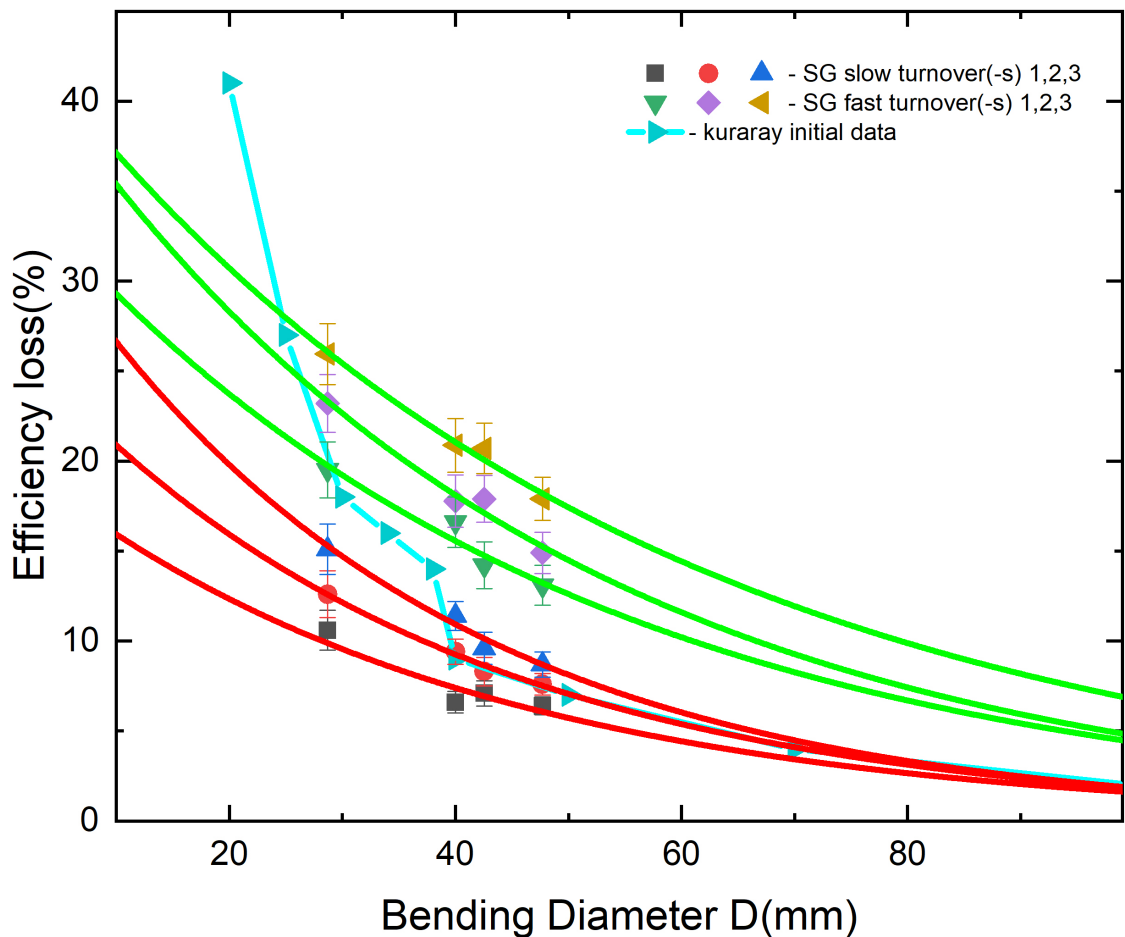


Рисунок 21 – Графики сравнения потерь по волокнам SG-fast и SG-slow и Kuraray [6]

6 Итоги

1) Изучена конструкция и назначение SPD детектора на NICA. 2) Произведен обзор литературы посвященной подобным оптоволоконам 3) Изучена работа осциллографа Лесроу, генератора, источника питания 4) Получены графики зависимостей потерь от скручивания оптоволокна для SG-slow, SG-fast 5) Были сравнены потери от скручивания SG-slow, SG-fast и Kuraray 6) Планируется проведения измерений с остальными волокнами 7) Разработаны 3D-модели элементов конструкции прототипов

Литература

- [1] Lednicky R. Conceptual design of the Spin Physics Detector. *Joint Institute for Nuclear Research, JINR, Dubna, Russia Directorate*, (2021) 8 99.
- [2] 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) 3
- [3] LUXIM SOLUTIONS. Scintillation crystals. *Mi-Net Technology Ltd The Quadrant Business Centre Nuart Road Beeston Nottingham NG9 2NH United Kingdom*, 2022.
- [4] И.Б Немченко. Разработка и исследование пластмассовых и жидких сцинтилляторов для детекторов экспериментов в области нейтринной физики. *Дубна. Дисертация на соискание ученой степени доктора технических наук*, (2019) 38.
- [5] John A.Jay. Optical fiber loss and attenuation. *Fosco Connect*, (2019)
- [6] Kuraray CO., LTD. Kuraray fiber data on losses and fiber type. *kuraray-psf-y-11*. <http://Kuraraypsf.jp/> (2013) 4