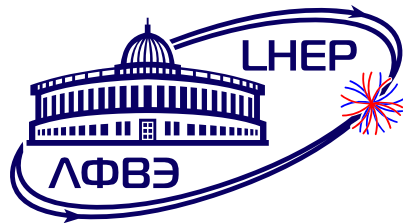


Выпускная квалификационная работа магистра

---

# Выбор материалов для прототипа сцинтилляционного детектора локальной поляриметрии SPD Beam-Beam Counter

---



JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH



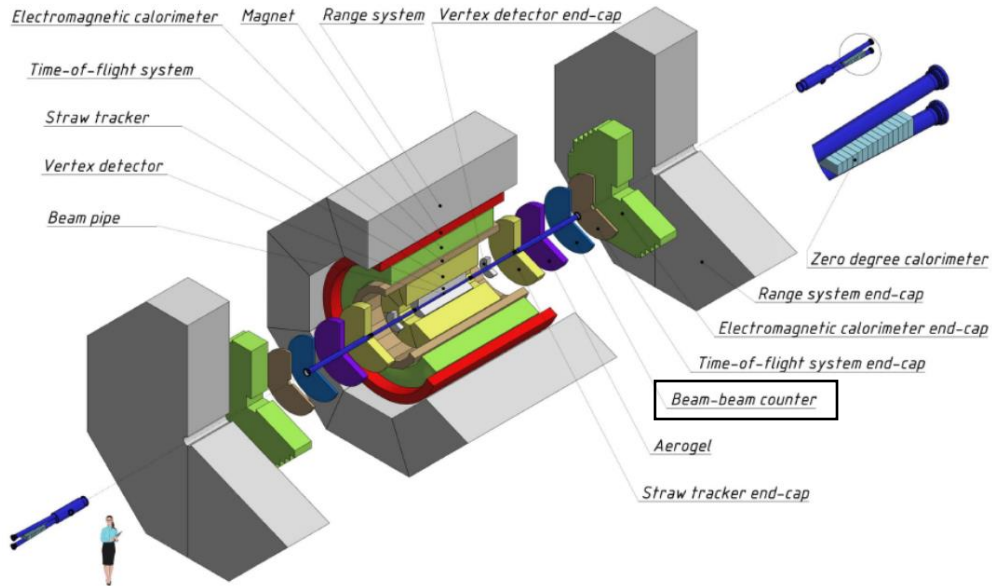
Научный руководитель:  
Тетерин Пётр Евгеньевич  
доц., к.ф.-м.н.

Студент:  
Захаров Арсений Михайлович  
М22-115, ИЯФит

г. Москва, 2024

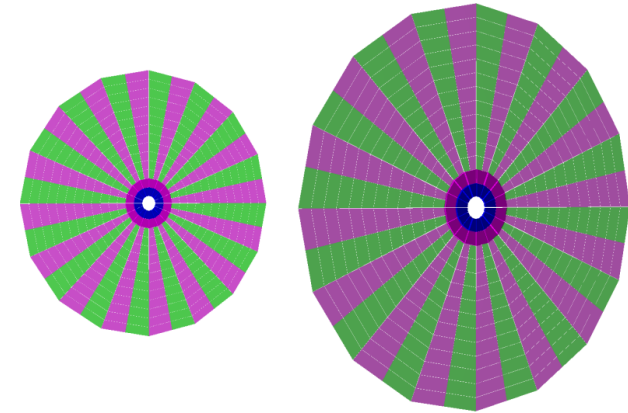
# Эксперимент SPD

- **Spin Physics Detector (SPD)** - эксперимент в NICA (ОИЯИ, Дубна), предназначенный для изучения спиновой структуры протона и дейтрона и других спиновых явлений, используя уникальную возможность работы с поляризованными пучками протонов и дейтронов при энергии столкновений до 27 ГэВ и светимости до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .



- В поляризованных протон-протонных столкновениях данный эксперимент покрывает кинематический разрыв между низкоэнергетическими измерениями в экспериментах ANKE-COSY и SATURNE, и высокоэнергетическими измерениями, полученными на БАК

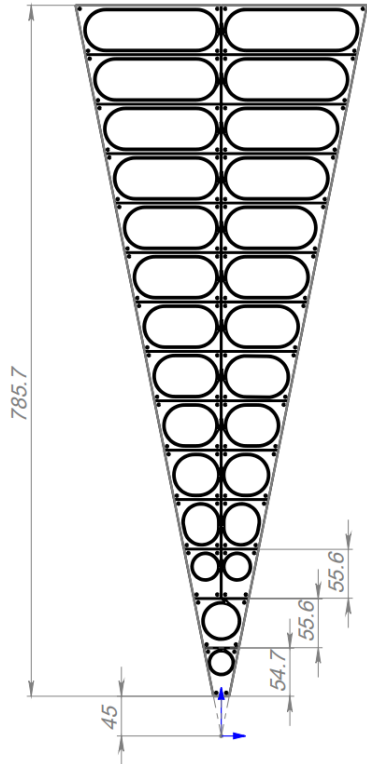
- Два торцевых детекторных колеса сцинтилляционных счетчиков **Beam-Beam Counters (BBCs)** планируется установить перед TOF системой установки SPD симметрично относительно точки взаимодействия.
- Детектор будет состоять из внутренней и внешней частей: во внутренней части BBC будут использоваться высокосегментированные сцинтилляторы, напрямую соединенные с кремниевыми фотоумножителями (SiPM), а внешняя часть BBC будет изготовлена из пластиковых сцинтилляционных тайлов со считыванием SiPM через спектросмещающее волокно (WLS).



Основными задачами Beam-Beam Counters являются:

- **Локальная поляриметрия** в SPD, основанная на измерениях азимутальных асимметрий поляризованных протонных пучков;
- Мониторинг столкновений пучков;

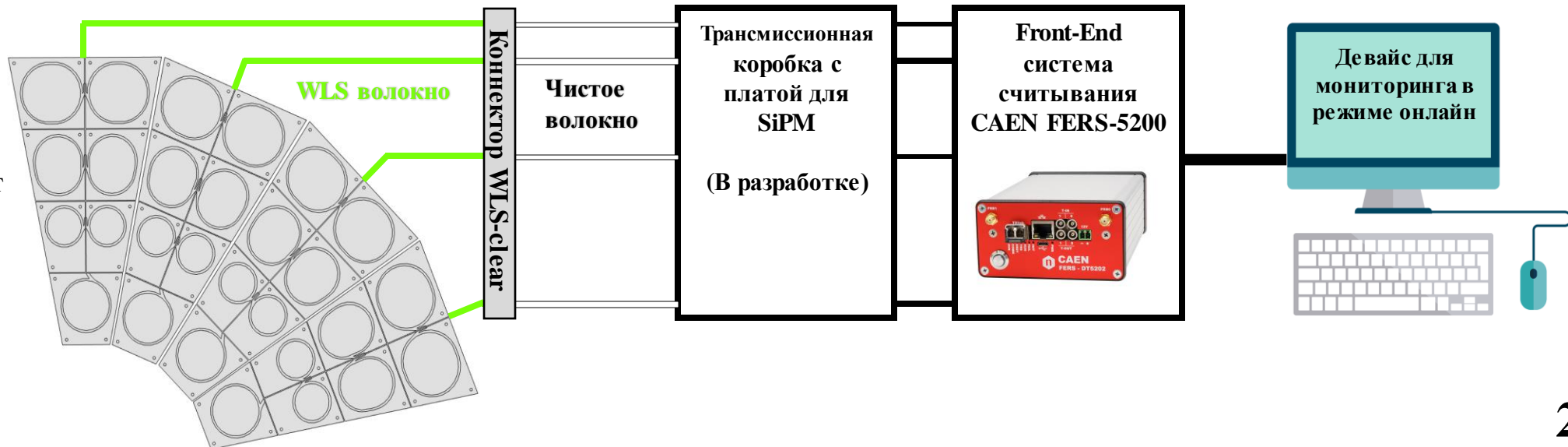
# Экспериментальная установка



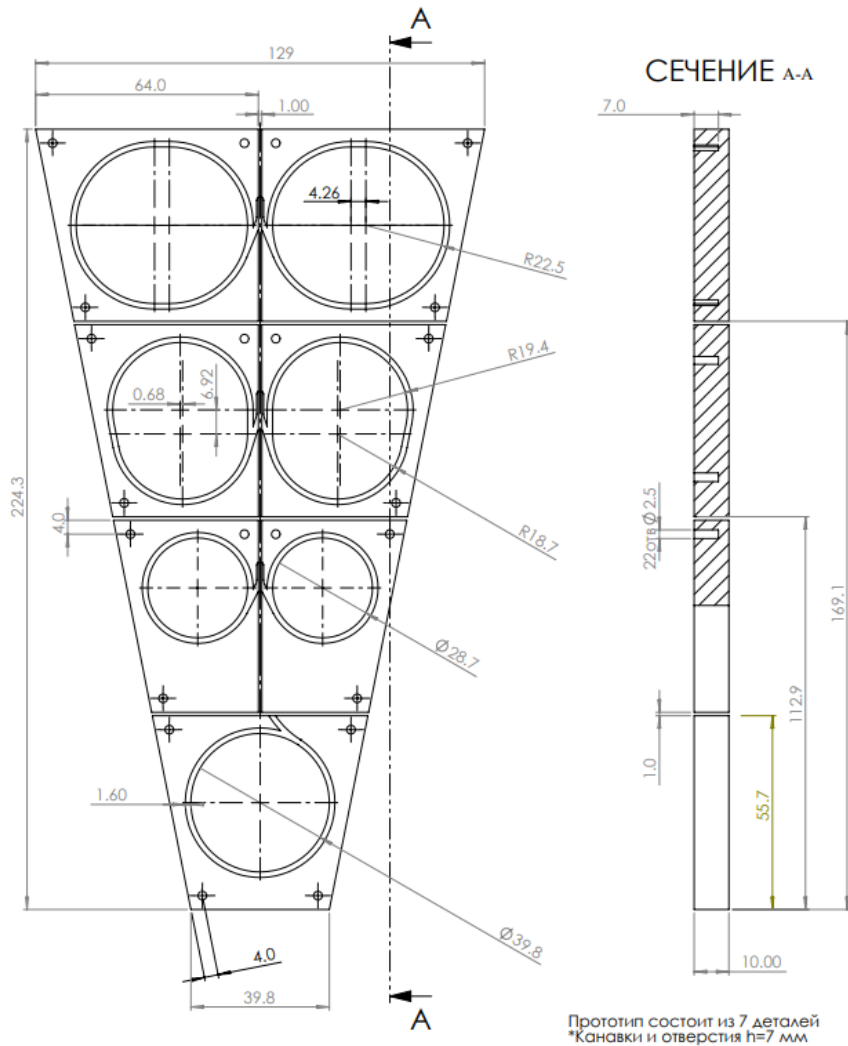
- SPD BBC будет состоять из **16 секторов с 26 тайлами в каждом секторе в одном колесе**. Каждый тайл представляет собой отдельный источник сигнала, считывающийся с помощью кремниевого фотоумножителя (SiPM), подключенного к оптоволокну WLS.
- Количество каналов считывания наводит нас на использование FEE системы считывания **CAEN FERS-5200**, разработанной специально для больших массивов детекторов.
- Для исследований на **космическом излучении** используется внешняя триггерная система, основанную на двух сцинтилляторах  $10 \times 10 \text{ см}^2$  со считывающими ФЭУ Hamamatsu H10720-110 и временным разрешением  $\sim 650$  пс.



- Спектрсмещающее волокно (WLS) сдвигает ультрафиолетовый спектр в сторону зеленого света
- Прозрачное волокно имеет большую длину затухания
- Необходимо постоянно считывать около 800 каналов
- Устройство мониторинга служит инструментом для предварительного анализа



# Выбор материалов: главное



Геометрия семитайлового прототипа, используемого в данной работе



Ряд  
3 (L;R)  
2 (L;R)  
1 (L;R)  
центральный

**Выбор материалов необходим для оптимизации параметров детектора и включает в себя тестирование различных их композиций:**

Покрытие сцинтиллятора:

Матированный VS покрытый Tyvek

Оптический клей:

СКТН МЕД Е, Б VS ОК-72

Оптоволокно:

Saint-Gobain Crystals VS Kuraray

SiPMs:

3x3 VS 1x1 мм<sup>2</sup>

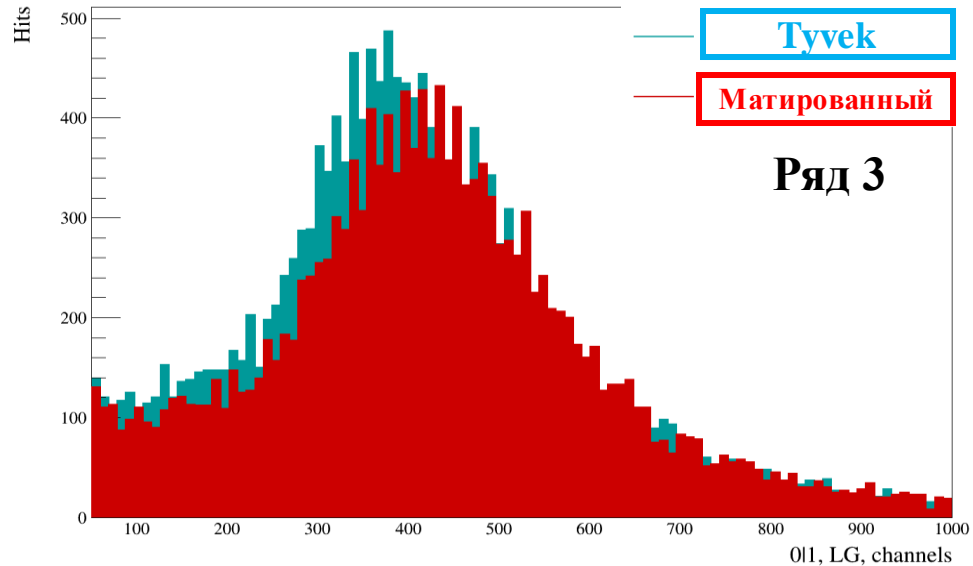
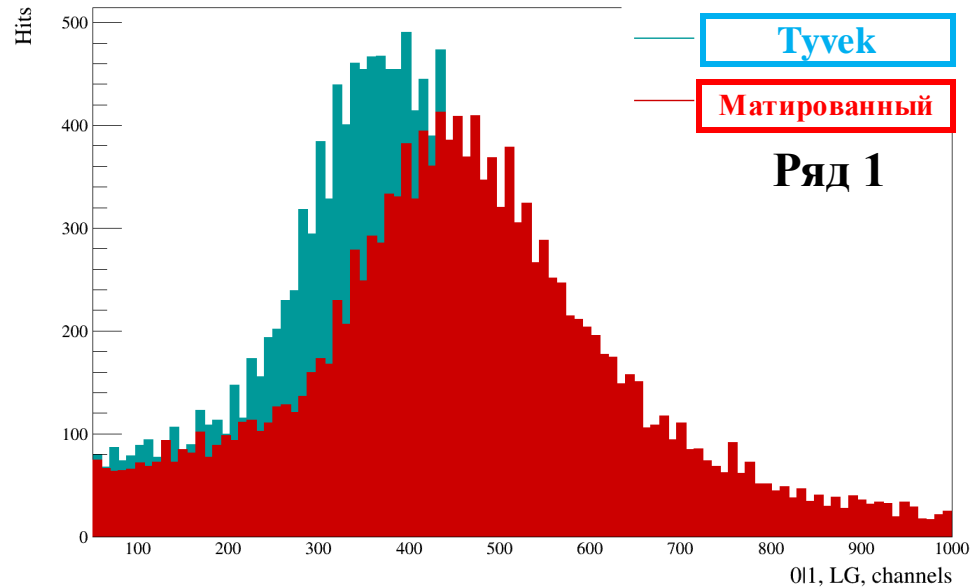
Основные критерии отбора:

- Светосбор
- Удобство массового производства
- Стоимость материала
- Независимость от санкций
- Радиационная стойкость
- Старение, и т.д.

**Главный приоритет**

**Следующий приоритет**

# Выбор материалов: покрытие сцинтиллятора



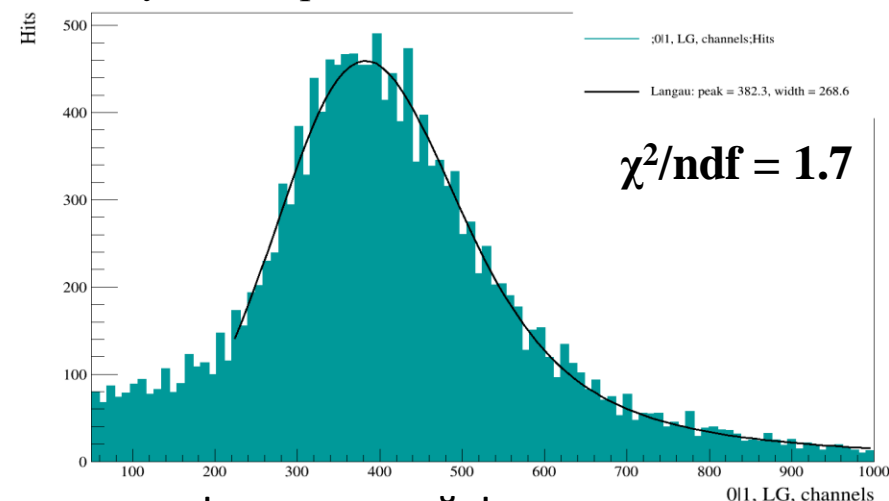
Параметры фита	Матированный Ряд 1	Tuvek Ряд 1	Матированный Ряд 3	Tuvek Ряд 3
Среднее, каналы	444.9	382.3	409.1	384.7
Ширина, каналы	290.1	268.6	306.0	279.9

Матированное покрытие отражает больше света (разница от 6% и до 14%);

Матированный тайл более удобен в контексте массового производства;

Химически матированные тайлы более устойчивы к внешним воздействиям, матирование не отличается от материала сцинтиллятора;

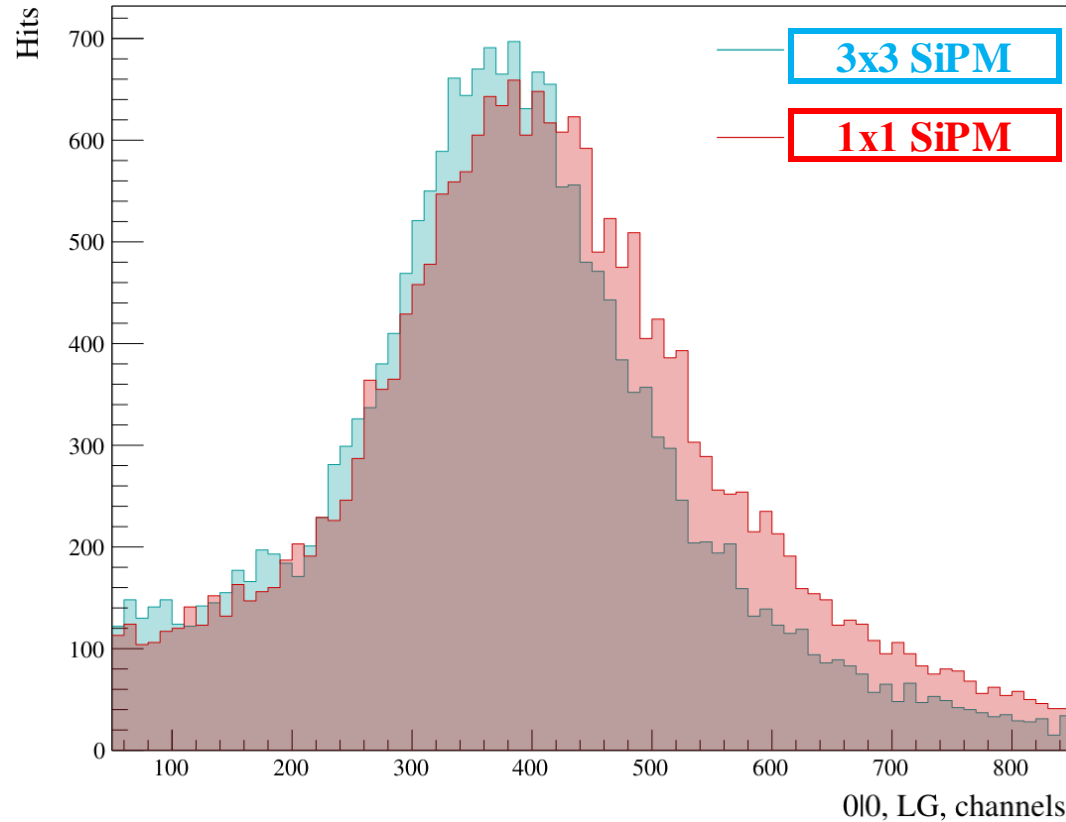
Тайлы матируются производителем сцинтилляторов (Унипласт Владимир), что также дешевле Tuvek покрытия.



В качестве фитирующей функции используется свертка Гаусса и Ландау (langaus)

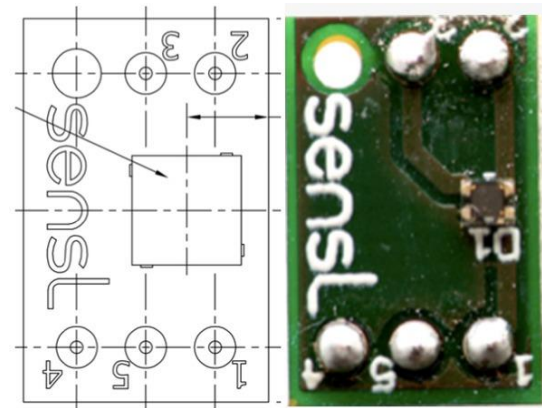
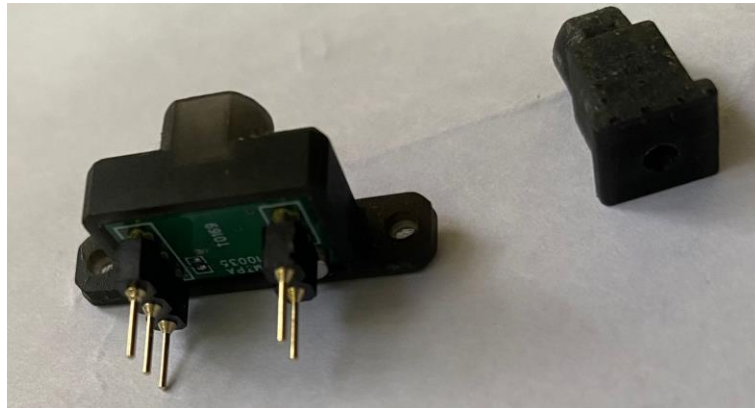
Матированный - тайл, химически покрытый белым светоотражающим слоем  
 Tuvek - тайл, дважды покрытый уникальным нетканым материалом из непрерывных нитей полиэтилена высокой плотности

# Выбор материалов: кремниевые фотоумножители SensL SiPM

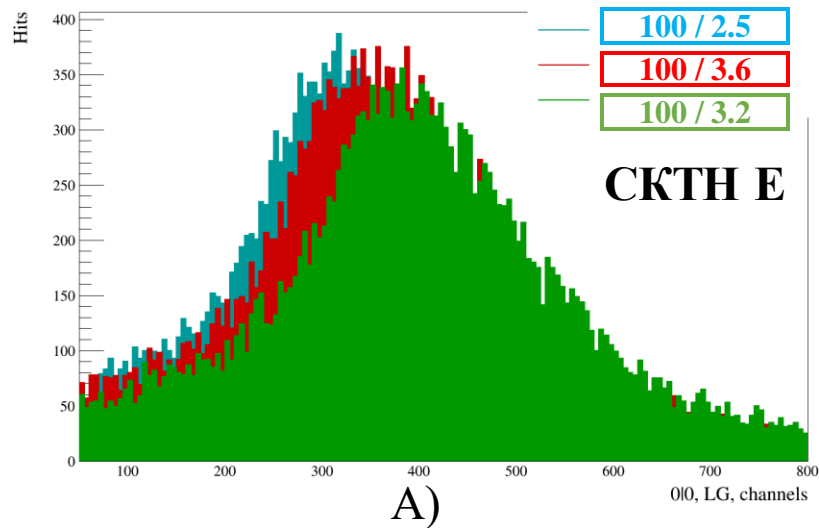


Параметры фита	1x1 мм <sup>2</sup>	3x3 мм <sup>2</sup>
Среднее, каналы	388.9	369.0
Ширина, каналы	275.4	229.2

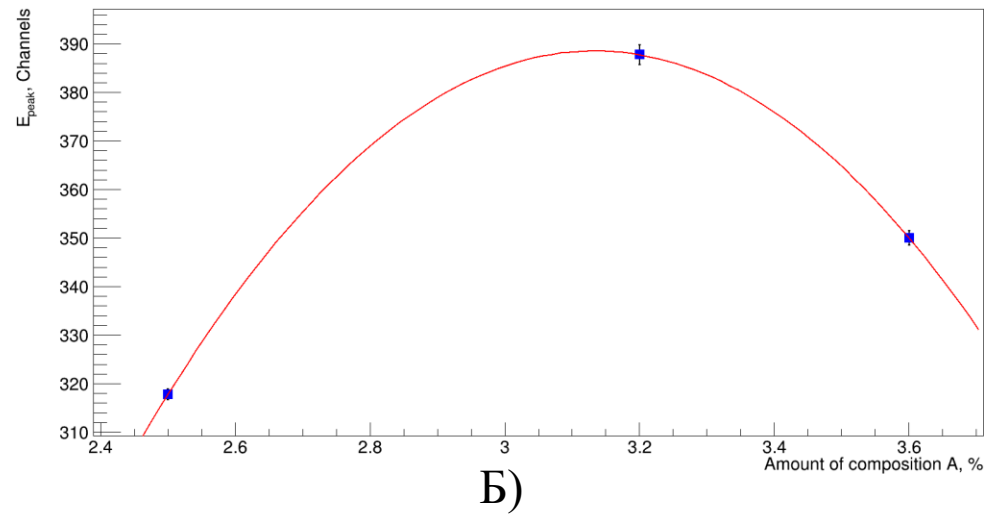
- Разница в ширинах распределений для SiPM 1x1 и 3x3 мм<sup>2</sup> составляет около 17%, что может отрицательно влиять на разрешение пиков
- SiPM 1x1 оптимальнее разместить на плате, размеры которой уменьшаются пропорционально размерам SiPM
- SiPM 1x1 дешевле



# Выбор материалов: композиции оптических клеев

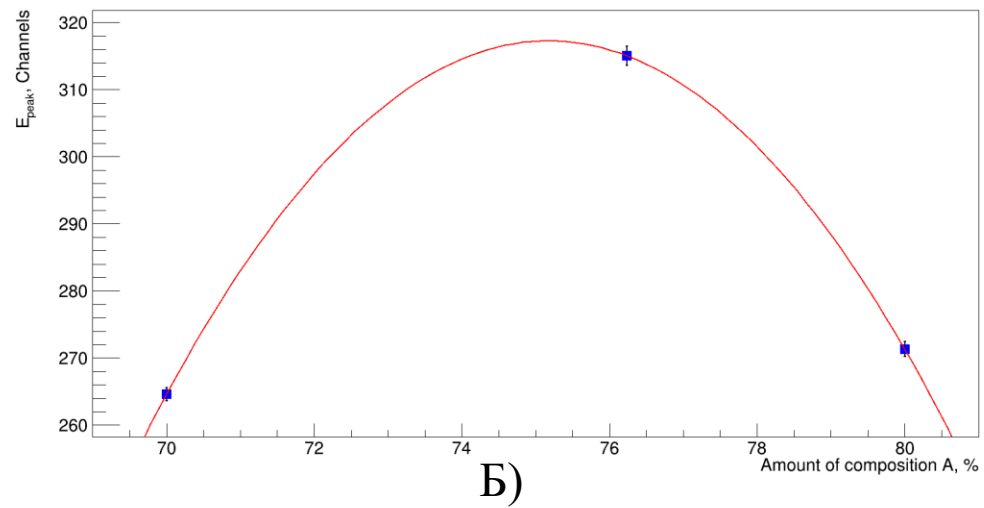
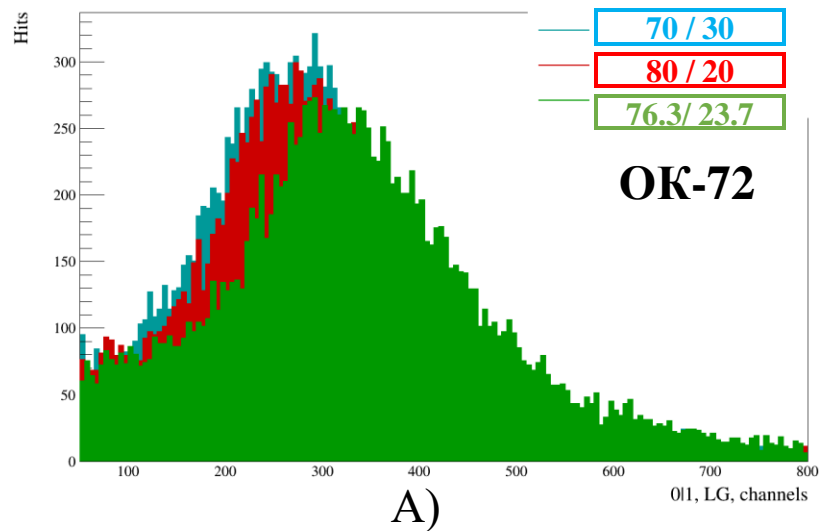


А) Сравнение составов оптических клеев;



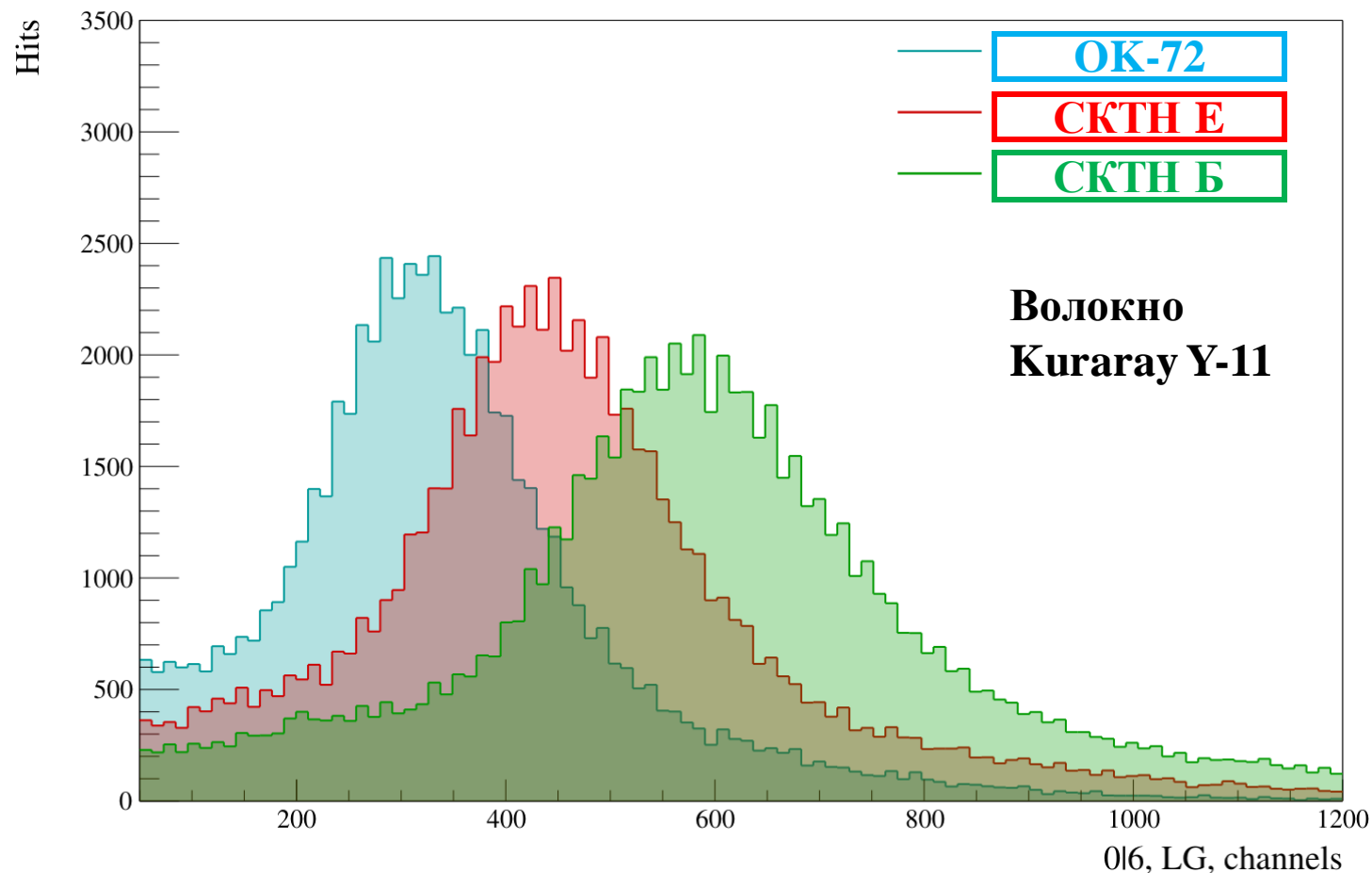
Б) Зависимость среднего значения от процентного содержания компонента А;

- По результатам исследования стало ясно, что среди протестированных смесей наилучшие результаты показывают составы, выполненные в соответствии с паспортными данными



- При грубом нарушении соотношений наблюдаются существенные потери светосбора (вплоть до 18%)

# Выбор материалов: оптический клей



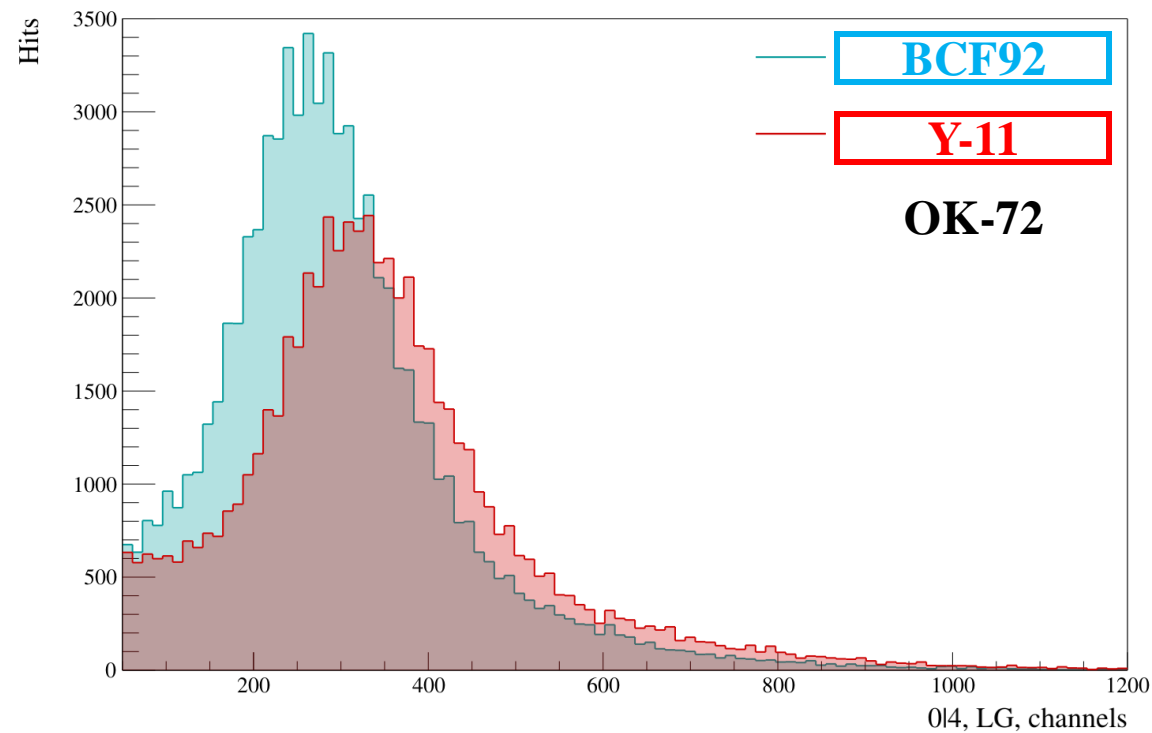
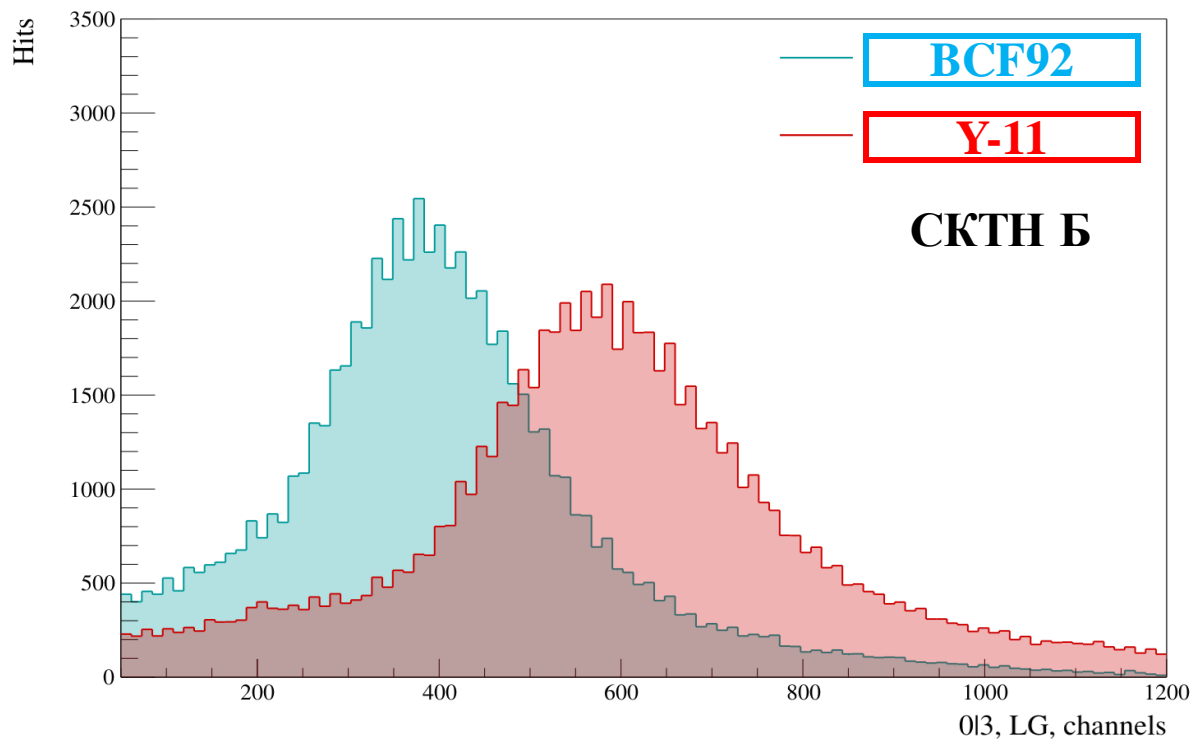
Оптические клеи - СКТН Б, Е, ОК-72:

- Вязкость СКТН МЕД типа Б снижена в порядка 17 раз по сравнению с маркой Е и относительно близка к ОК-72 - удобство массового производства;
- СКТН Б пропускает большее количество света, чем тип Е, и значительно большее, чем ОК-72;
- Предположительно, разница Б и Е связана с меньшей вязкостью марки Б – лучшая адгезия, практически не оставляет пузырьков воздуха в итоговой смеси

Параметры фита	СКТН МЕД Е	СКТН МЕД Б	ОК-72
Среднее, каналы	429.7	569.1	312.8
Ширина, каналы	268.7	324.9	228.2



# Выбор материалов: WLS волокно

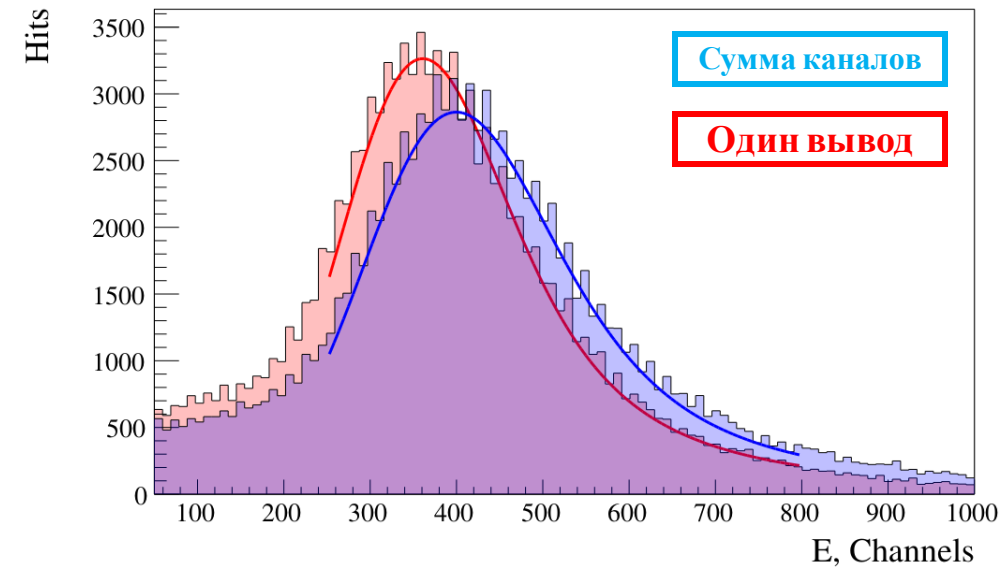
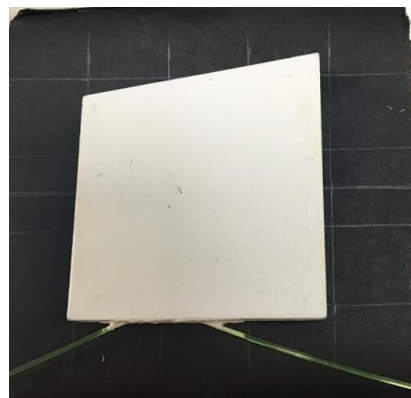
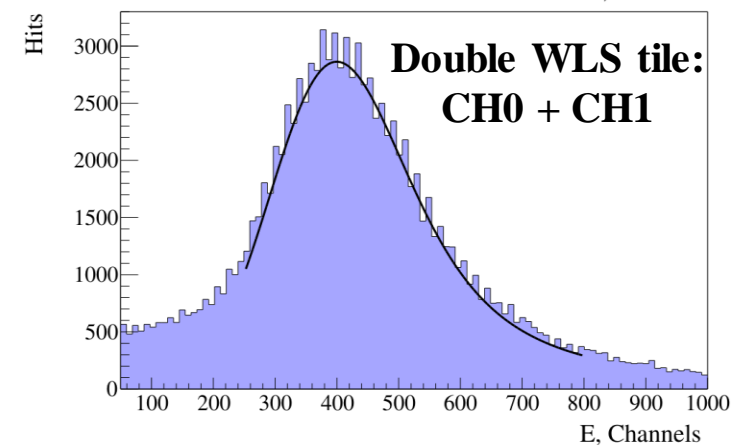
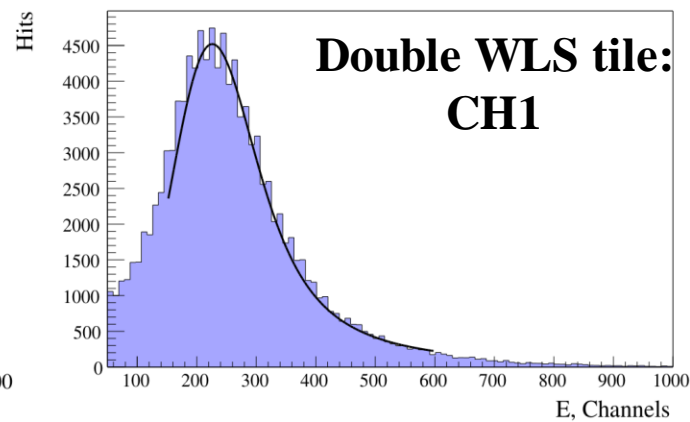
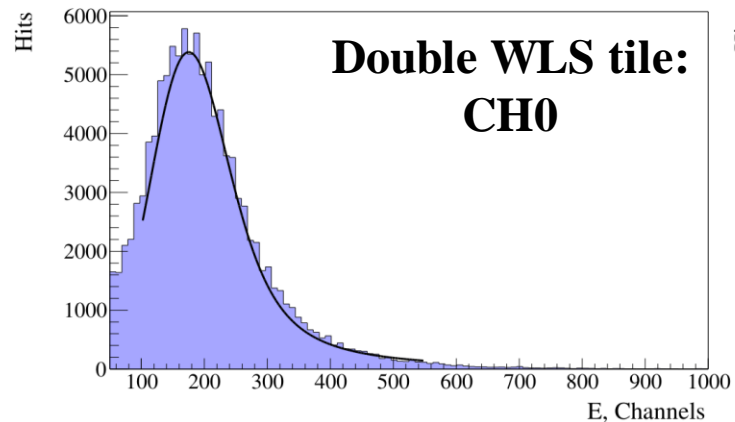


Параметры фита	BCF92	Y-11
Среднее, каналы	378.4	569.1
Ширина, каналы	265.4	324.9

- Волокно Y-11 собирает больше света в обоих случаях;
- В случае ОК-72 мы видим, что пики не разделяются и находятся в области более низких энергий
- Предположительно, клей ОК-72 не может пропускать фотоны высоких энергий

Параметры фита	BCF92	Y-11
Среднее, каналы	263.7	312.8
Ширина, каналы	212.6	228.2

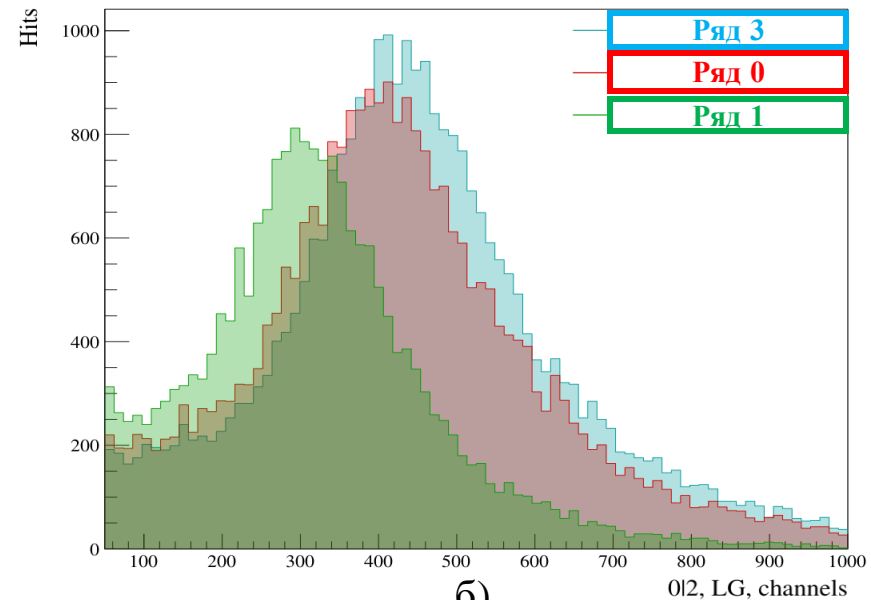
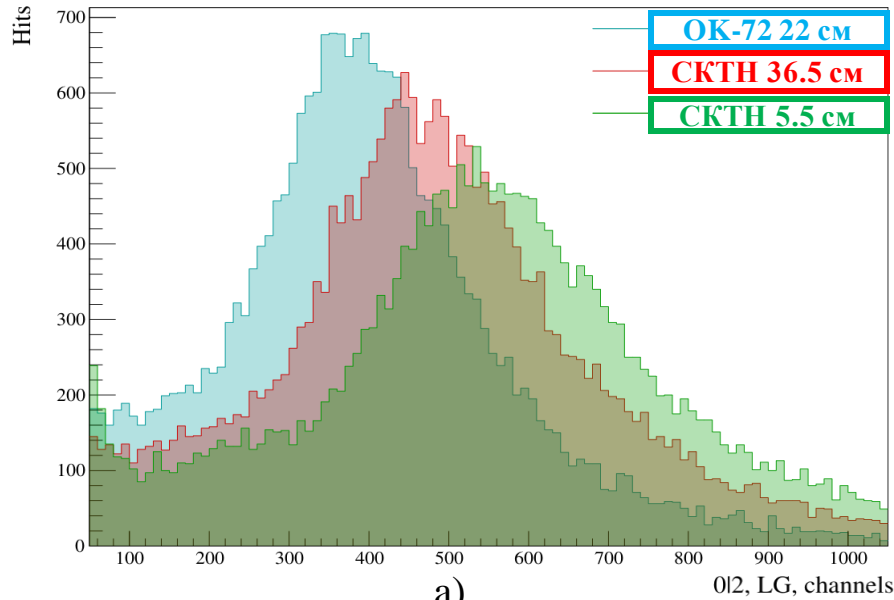
# Дополнительно: эффективность сбора фотонов



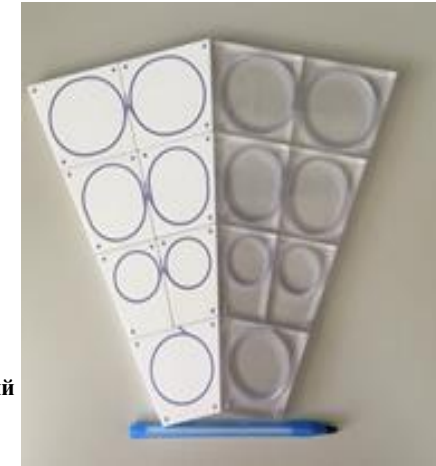
- В наборе данных участвовали два тайла: первый тайл имел один выход волокна, второй же конец находился внутри сцинтиллятора и был окрашен светоотражающей краской, а у второго тайла оба конца волокна были выведены наружу.
- Сумма сигналов с двух концов собирает больше света (до 10% разницы), чем один конец. Мы можем утверждать, что эффективность сбора фотонов с отраженным концом примерно равна 90%.

Параметры фита	Тайл с одним выводом волокна	Сумма сигналов двух выводов волокна
Среднее, каналы	360.9	399.8
Ширина, каналы	243.2	277.4

# Дополнительно: разные длины волокон и геометрия



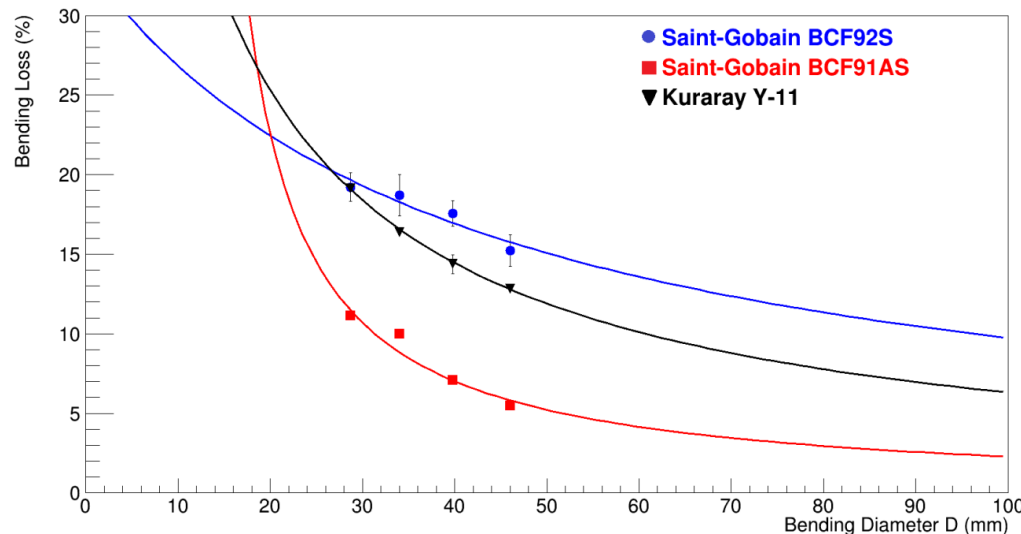
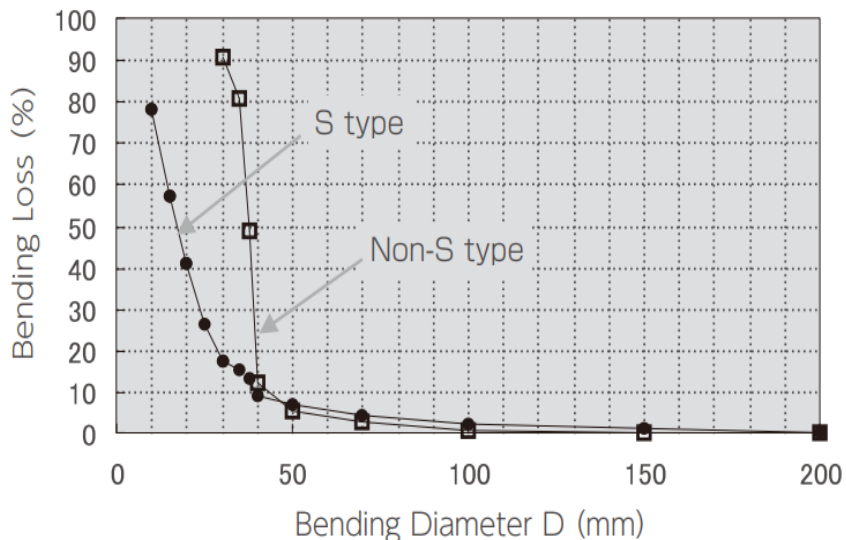
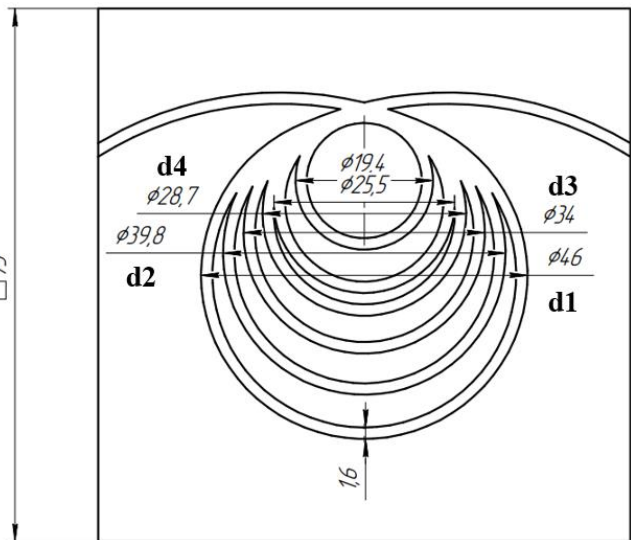
а) Сигнал от центральных тайлов с различной длиной волокна и клеем, б) Сравнение ряда 1, 3 и центральных тайлов с СКТН и VCF92S



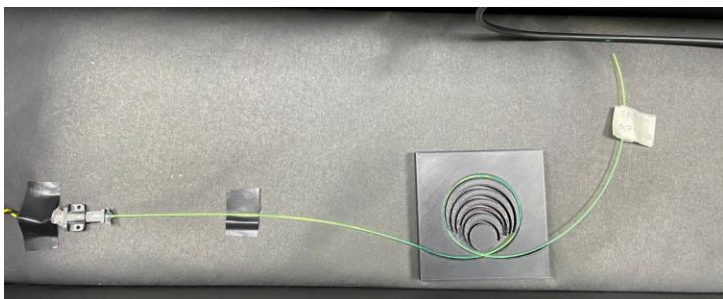
Исследование	Сравнение длин волокон центральных тайлов			Сравнение геометрий 0, 1 и 3 рядов		
	СКТН Е	СКТН Е	ОК-72	Ряд 1	Ряд 0	Ряд 3
Параметры Фита	5.5 см	36.5 см	22.0 см			
Среднее, каналы	538.2	460.8	375.7	306.7	398.1	421.9
Ширина, каналы	366.6	326.5	284.9	238.1	298.1	287.1

**Экспериментально наблюдаем ослабление амплитуды сигнала с увеличением длины оптоволокна. Амплитудные спектры тайлов разной геометрии имеют разное положение пика. Необходимо провести исследование зависимости положения пика от искривления волокна внутри тайла**

# Дополнительно: разные длины волокон и геометрия



Y-11 (Non-S type) имеет хорошую длину затухания, но оно слабо защищено от трескания, вызванного изгибом или манипуляциями при сборке.

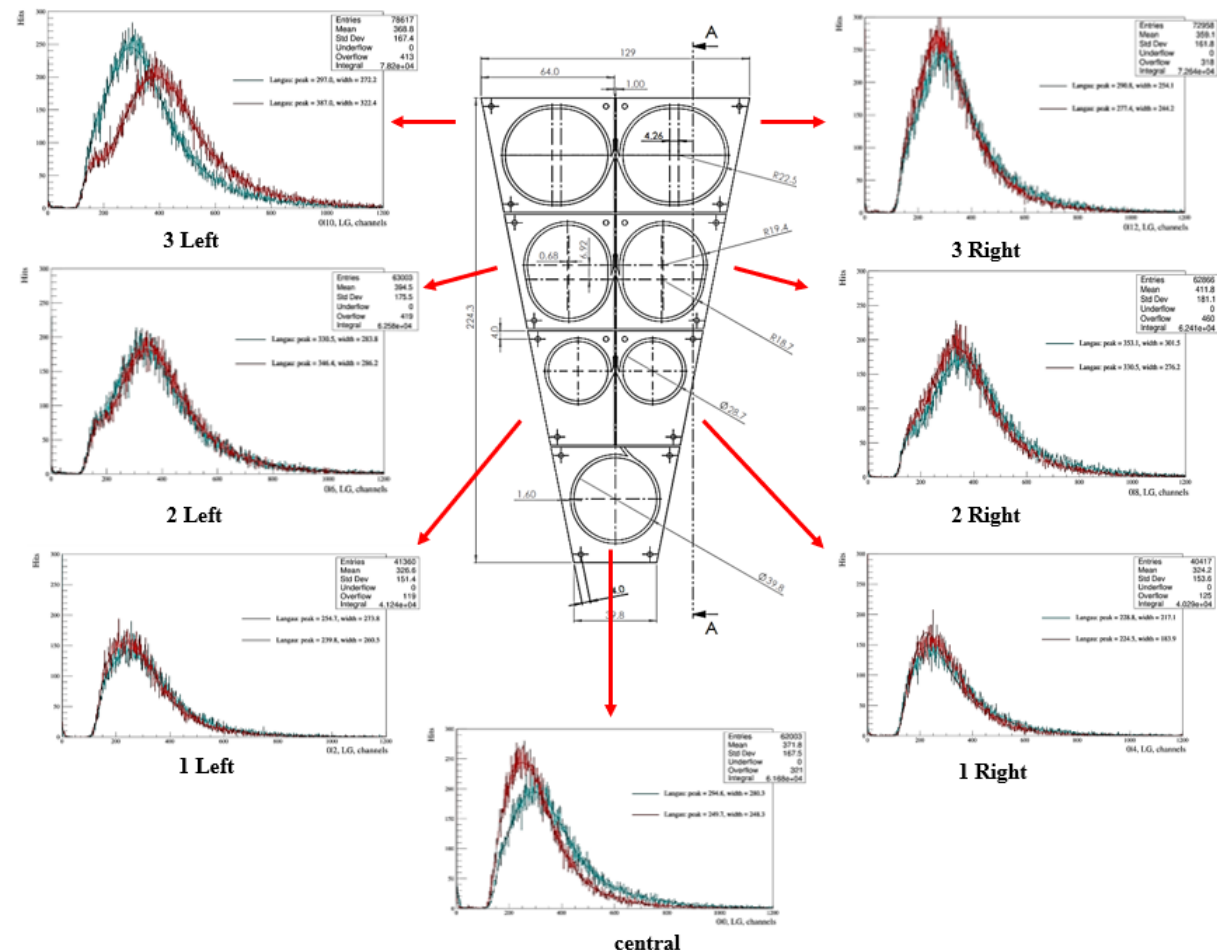
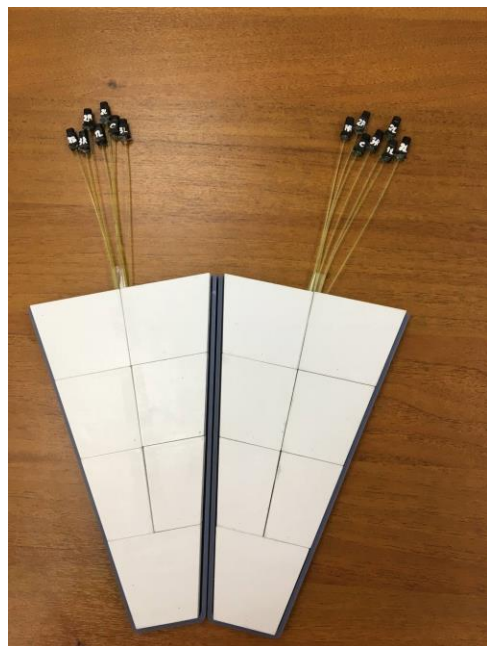
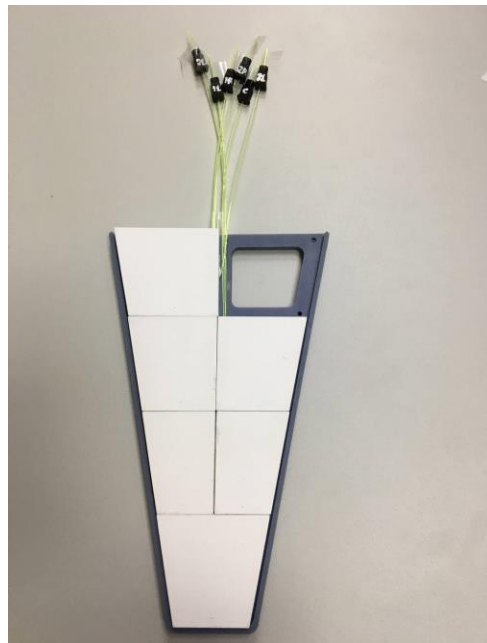


Волокно	Разница в положениях пиков для диаметров d1 и d4, %
SG BCF91A	6.0
SG BCF92	4.7
Kuraray Y-11	8.5

**Исследование потерь на изгиб не соответствует экспериментальным данным из технического паспорта Kuraray в случае волокна Y-11, однако подтверждает существование зависимости и оценивает приблизительные потери при одном обороте волокна**

# Подготовка к тестам на пучке

- На текущий момент этап выбора материалов близится к логическому завершению, проводятся предварительные тесты для сборки колеса из семитайловых прототипов;
- Для сборки прототипа используются специальные крепежи, распечатанные на 3D принтере, геометрически повторяющие один сектор;
- Вдоль оси сектора присутствует специальное углубление, внутрь которого укладываются волокна низ лежащих тайлов;
- На данный момент изготовлено два семитайловых сектора, тайлы которых выполнены с использованием матированного покрытия, оптического клея СКТН Б и волокна SG BCF92;



- Для снятия сигнала использовалась внутренняя схема совпадения FERS-5200 с параметром AND2\_OR32, при котором идет сравнение сигналов от двух соседних каналов от одной платы Citiros 1A;
- Не совпадение сигналов может быть вызвано неточностью в изготовлении самих образцов, а также проблемами с деформацией волокна при укладке тайлов в прототип сектора;
- Вопросы изготовления более подходящего прототипа сектора будут исследованы в будущем.

# Заключение

Выбор материалов для прототипа сцинтилляционного детектора локальной поляриметрии SPD ВВС практически завершен:

- Сравнение различных покрытий сцинтиллятора привело нас к использованию химического матирования – тайл с матированным покрытием собирает больше света, нежели его аналог (от 6% и до 14%), а также является удобным с точки зрения массового производства;
- Сравнение 1x1 и 3x3 мм<sup>2</sup> SiPM показало достаточно похожий сигнал, однако использование 1x1 целесообразнее с точки зрения большого числа каналов и финансов;
- Оптический клей СКТН Б позволяет собирать больше света (10-25%), нежели рассмотренные аналоги, а также достаточно удобен с точки зрения массового производства;
- Исследование волокон показало, что Kuraray Y-11 собирает больше света и является эффективным для наших задач;
- Проведены работы по подготовке к тестам с колесом из семитайловых секторов, в работе также представлены предварительные результаты по работе с двумя секторами;

Работы находящиеся на стадии публикации по материалам конференций:

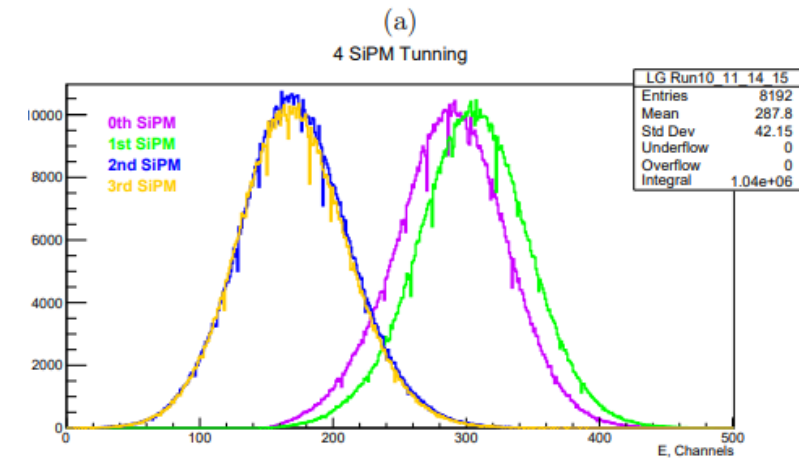
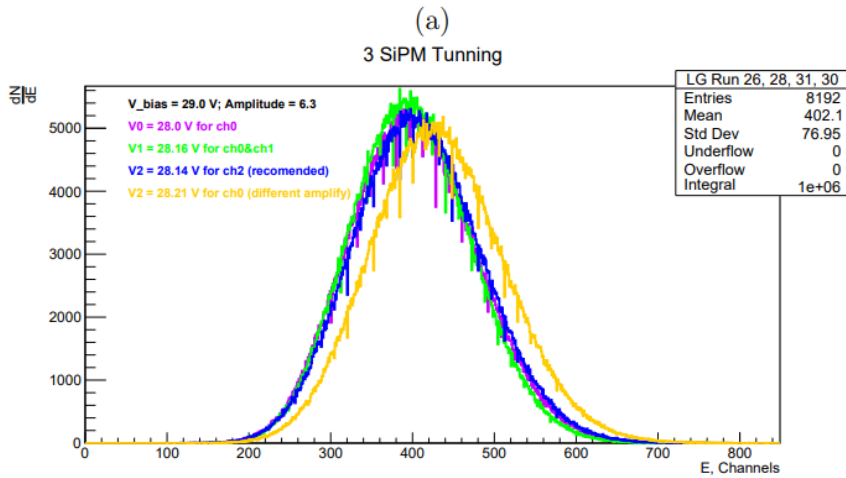
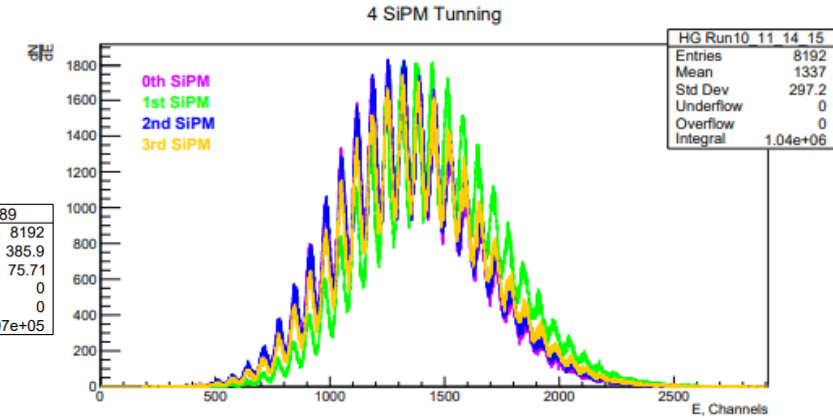
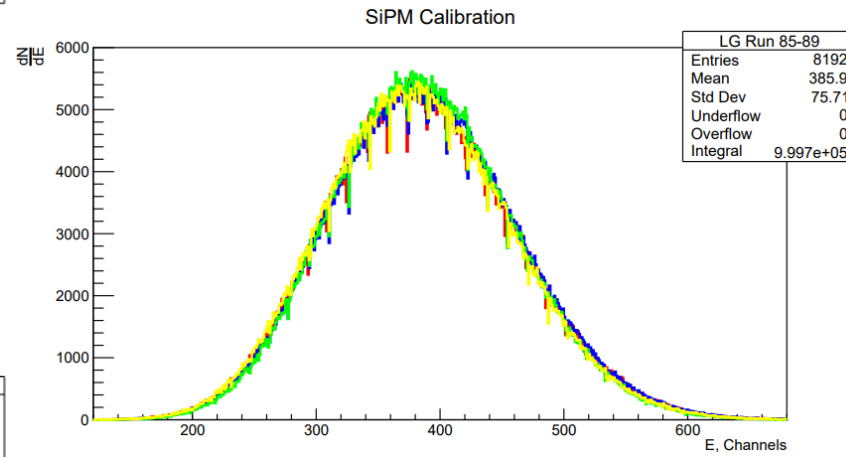
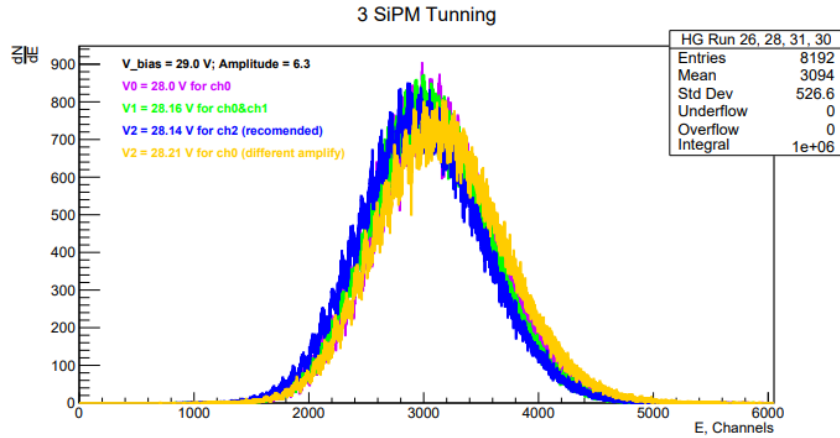
- XXV Baldin ISHEPP 18-23 Sep 2023: «Material selection of the SPD Beam-Beam Counter scintillation detector prototype» [1];
- AYSS-2023 30 Oct – 3 Nov 2023: «Tile detector configurations testing for the SPD Beam-Beam Counter prototype» [2];
- AYSS-2023 30 Oct – 3 Nov 2023: «The SPD Beam-Beam Counter scintillation detector prototype tests with FERS-5200 Front-End readout system» [3];
- XIX Workshop on HESP, DSPIN-23: «Development of the SPD Beam-Beam Counter scintillation detector prototype with FERS 5200 front-end readout system» [4];
- Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, 1 - 5 Apr 2024: «Оптимизация параметров детектора ВВС для эксперимента SPD» [5];

**Спасибо за внимание!**

**BACK UP**



# SiPM Calibration



CAEN Fix channel amplify difference

Using beta-source

Led Driver CAEN SP5601

## Uniplast Polystyrene Scintillator

Марка	Вязкость	Диапазон рабочих температур	Спектральные характеристики	Показатель преломления
EJ-500	800 cPs	От -65 до +105 °C	60-95% 300-350 нм, 95-100% 350-600 нм	1.574
СКТН МЕД Марки Б	16 - 90 на ВЗ-1, с	—	92-96% 500 нм	1.606
СКТН МЕД Марки Е	601 - 1200 на ВЗ-1, с	—	92-96% 500 нм	1.606
ОК-72	15 - 18 на ВЗ-1, с	От -60 до +60 °C	99% 400-2700 нм	1.587

Волокно	Цвет эмиссии	Пик высвечивания, нм	Время высвечивания, нс	Длина затухания, м
Kuraray Y-11	зеленый	476	7.4 [6]	>3.5
SG Crystals BCF91AS	зеленый	494	12	>3.5
SG Crystals BCF92S	зеленый	492	2.7	>3.5

### 1. Scintillation mixture:

- polystyrene Styrolution 124N – 98.0-98.5%
- p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5-2.0%
- POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01-0.04%

### 2. Physical properties:

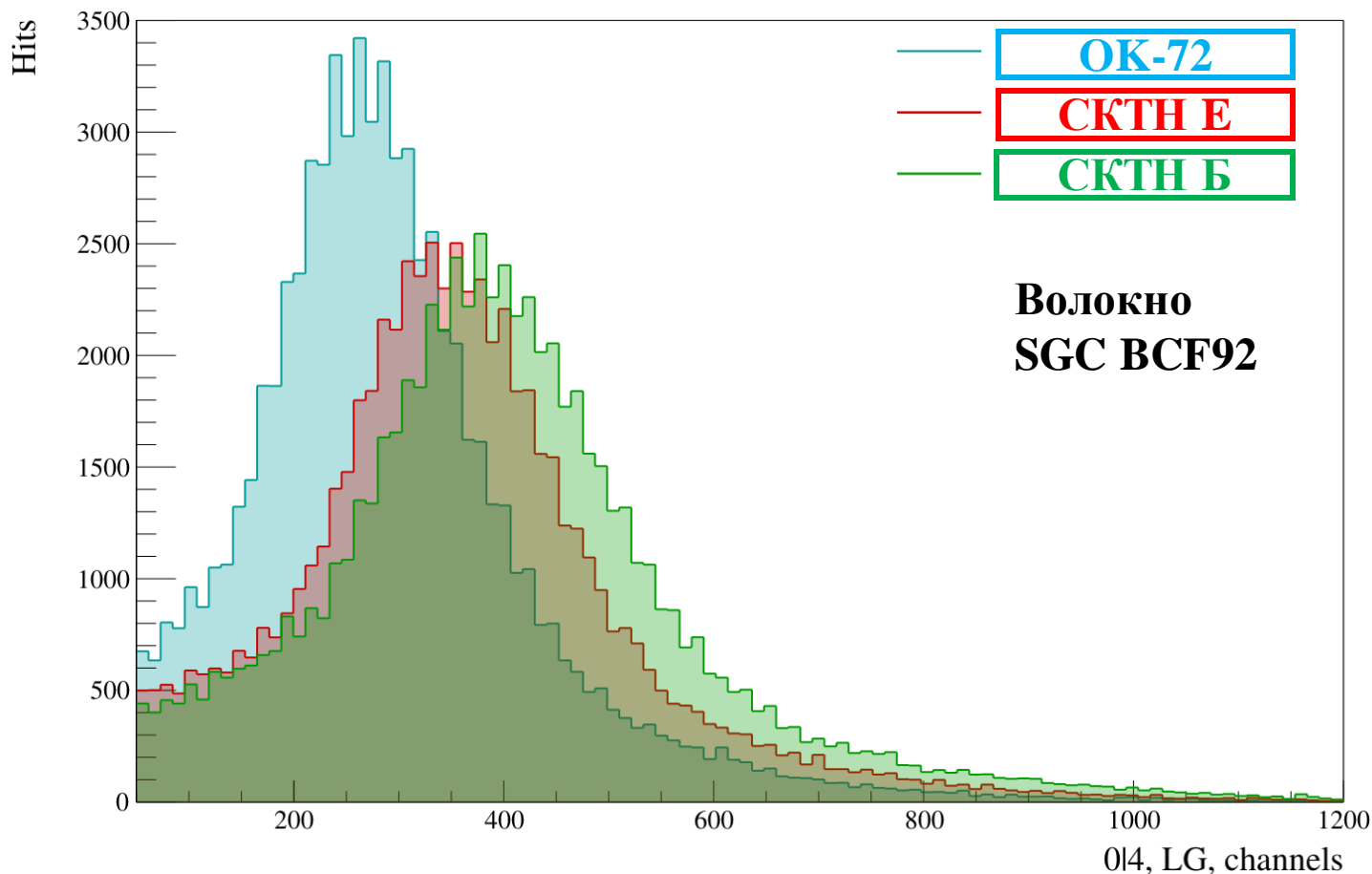
Density, g/cm <sup>3</sup>	Refractive Index	Coefficient of Linear Expansion	Temperature Range
1.03–1.06	1.62–1.64	8·10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	–60 to +80°C (acceptable) –20 to +60°C (recommended)

### 3. Scintillation properties:

Light Output, % Anthracene	Decay Time, ns	Wavelength of Max. Emission, nm	Light Attenuation Length, cm (1x20x200 cm samples)	Main Applications
60–70	2.5	430	>200	α, β, γ, fast n

Anthracene itself produces about 17400 photons/MeV

# Выбор материалов: оптический клей



Оптические клеи - СКТН Б, Е, ОК-72:

- Вязкость СКТН МЕД типа Б снижена в порядка 17 раз по сравнению с маркой Е и относительно близка к ОК-72 - удобство массового производства;
- СКТН Б пропускает примерно такое же количество света, как и тип Е, но значительно больше, чем ОК-72;
- Предположительно, серия СКТН имеет более высокую пропускную способность для частиц высоких энергий
- Разница в положении пика у СКТН Б и Е с SG VCF92 составляет около 10%, в то время как при использовании волокна Kuraray Y-11 она составляет около 25%. В обоих случаях СКТН Б пропускает больше света

Параметры фита	СКТН МЕД Е	СКТН МЕД Б	ОК-72
Среднее, каналы	340.3	378.4	263.7
Ширина, каналы	240.7	265.4	212.6