



Исследование параметров сцинтилляционных CsI(pure) модулей для регистрации нейтрино из распада трития

Студент: Исаков Д. А.

Научный руководитель:

Григорьева И. Г., к.ф.-м.н, доцент каф.11 НИЯУ МИФИ

Научный консультант:

Ивашкин А. П., к.ф.-м.н, старший научный сотрудник ИЯИ РАН

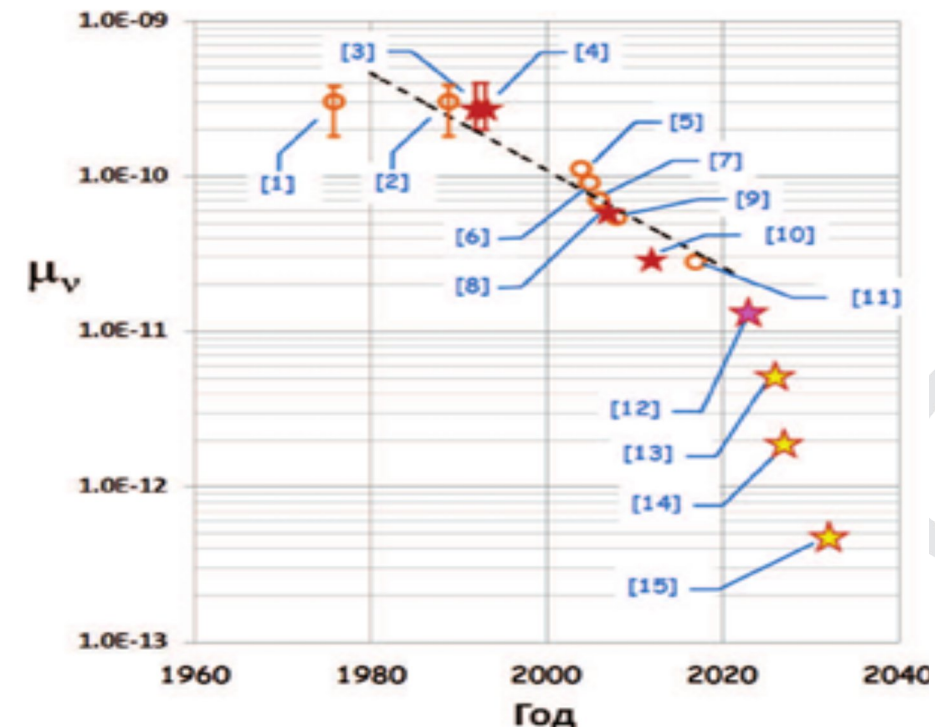
Цель работы: исследование параметров сцинтилляционных модулей CsI(pure) для эффективной регистрации нейтрино, возникающих при распаде трития.

Задачи:

- 1) Проанализировать текущее состояние и достижения в области нейтринных детекторов, оценив существующие подходы и методы.
- 2) Изучить структуру детектора, уделяя внимание работе сцинтилляторов, технологий SiPM и соответствующей электроники, а также оценить их вклад в эффективность регистрации нейтрино.
- 3) Провести экспериментальные измерения, направленные на оценку влияния шумов на работу детектора, анализ оптической связи и исследование световых выходов сцинтилляторов при различных покрытиях.

Современное состояние в области исследования нейтрино

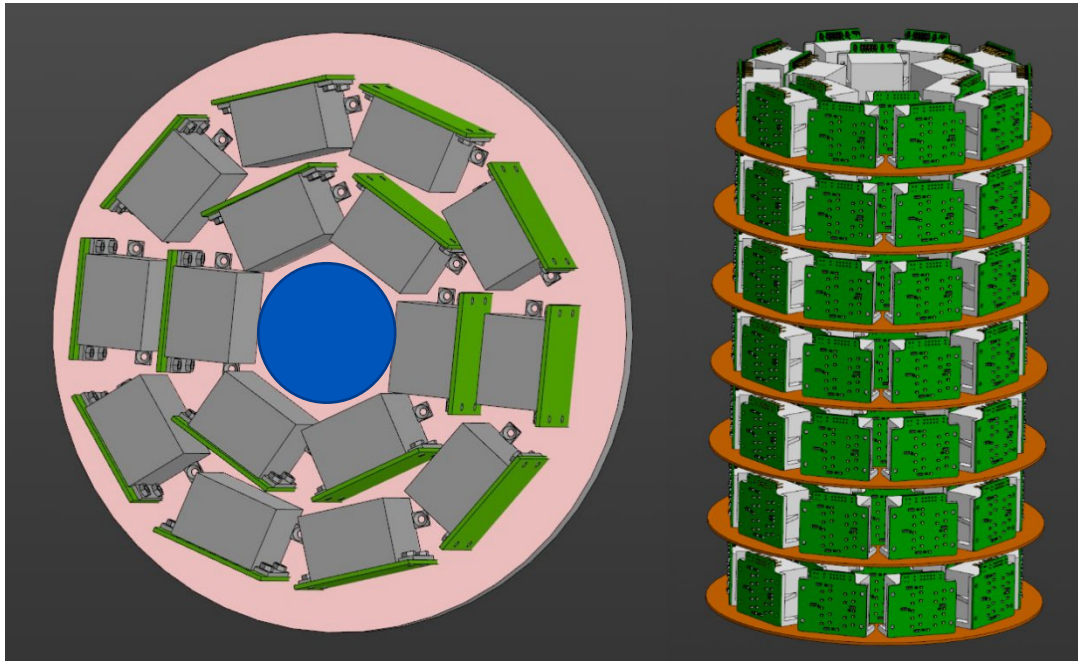
Направление / Эксперимент	Источник / Метод	Достигаемая чувствительность
Спиновые осцилляции нейтрино	IceCube (нейтринный телескоп)	$\mu_\nu \approx 10^{-15} \mu_B$
Потоки нейтрино от сверхновых	DUNE, JUNO, Hyper-Kamiokande	$\mu_\nu \approx 10^{-15} \mu_B$
Эксперимент САТУРН (Саров)	Когерентное упругое рассеяние антинейтрино от трития. Мишень: жидкий / сверхтекучий гелий	$\mu_\nu \approx 10^{-13} \mu_B$ $q_\nu \approx 10^{-15} e_0$



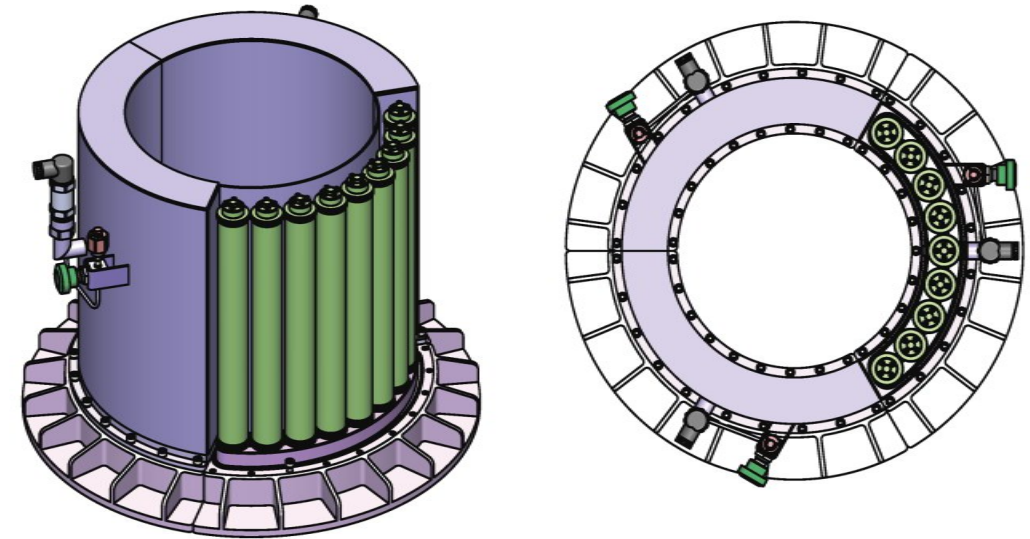
Прогресс в изменении лабораторного ограничения на магнитный момент нейтрино

Анализ сцинтилляционных материалов для детектирования нейтрино

Параметр	CsI(pure) – иодид цезия	SrI ₂ (Eu) – иодид стронция, активированный Eu
Световыход при криогенных температурах	До 120 000 фотонов/МэВ (при T < 100 K)	Улучшение в ~2 раза при охлаждении до 213 K
Световыход (эксперимент)	30–33 фотоэлектрона/кэВ	Данные не известны
Порог регистрации (моделирование)	~40 эВ (при 50 ф.э./кэВ)	Потенциально ниже за счёт более высокого световыхода
Внутренняя радиоактивность	Есть (¹³⁷ Cs) – зависит от руды, не удаляется	Отсутствует
Спектр излучения при 77 K	Сдвиг в УФ (~350 нм) – снижение квантовой эффективности SiPM	Стабилен
Стабильность SiPM при криотемпературах	Нестабильность (вымораживание носителей)	Требуется исследование

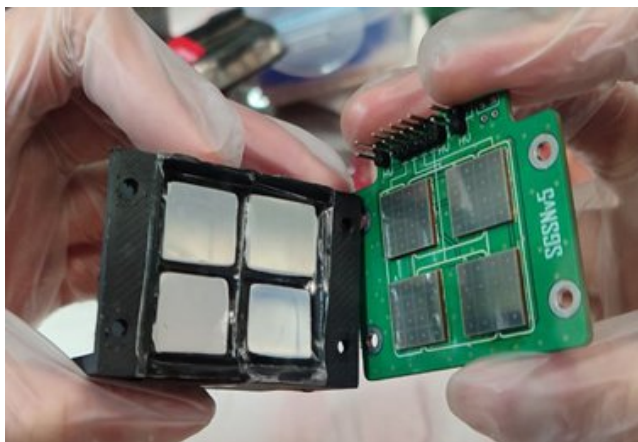


Слева – схема размещения детекторных модулей в одном слое нейтринного детектора по окружностям. Справа – схема расположения слоев детекторных модулей в детекторе нейтрино.



Внешний вид тритиевого источника нейтрино. ТЭ размещаются внутри герметичного корпуса ТИН. корпус ТИН снабжён штуцерами, обеспечивающими контроль состава внутренней среды в секторе, а также возможность откачки или подачи газа при необходимости. В ТЭ загружается порошок титана массой 319 г в насыпном состоянии с плотностью 1,31 г/см³.

Устройство сцинтилляционных модулей

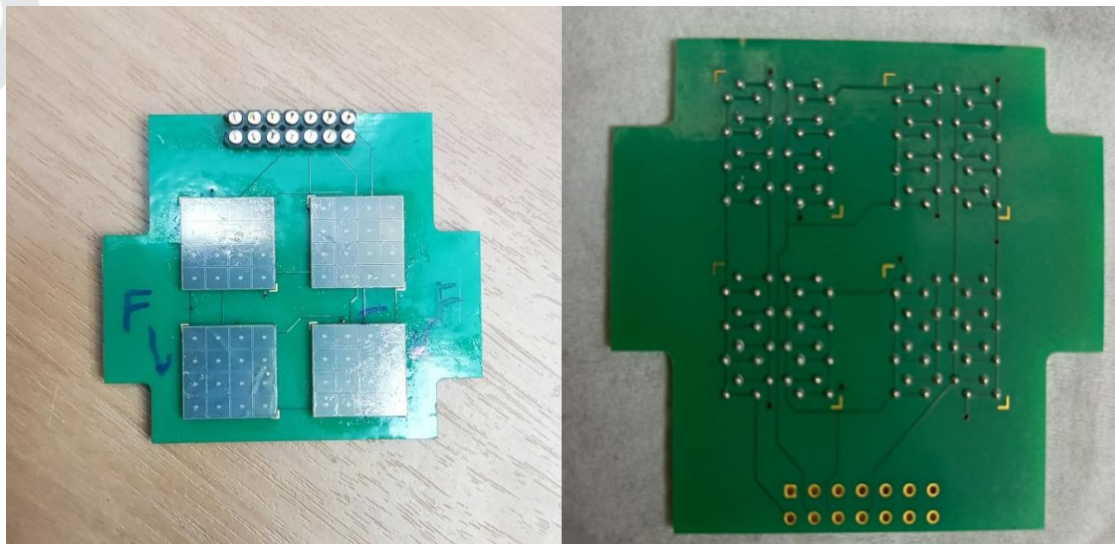


Сотовые корпуса детекторного модуля, в которые помещаются четыре сцинтилляционных кристалла.

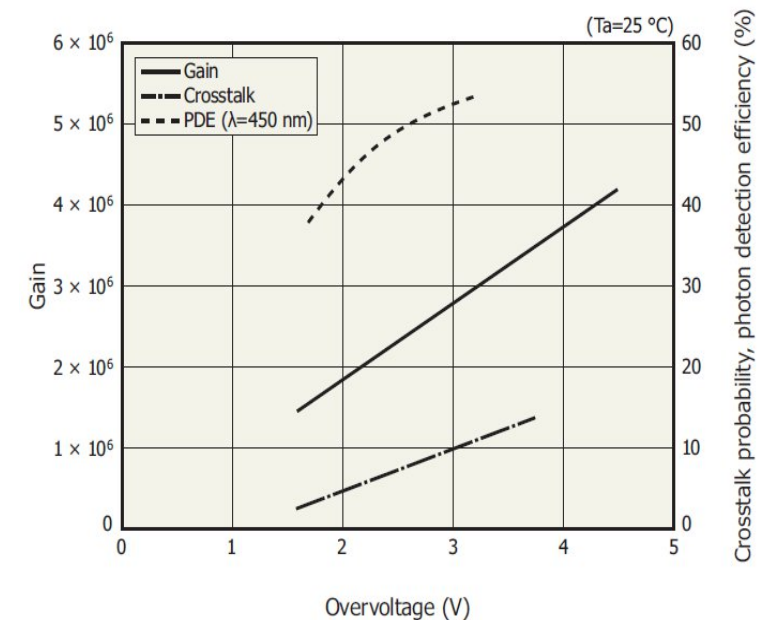
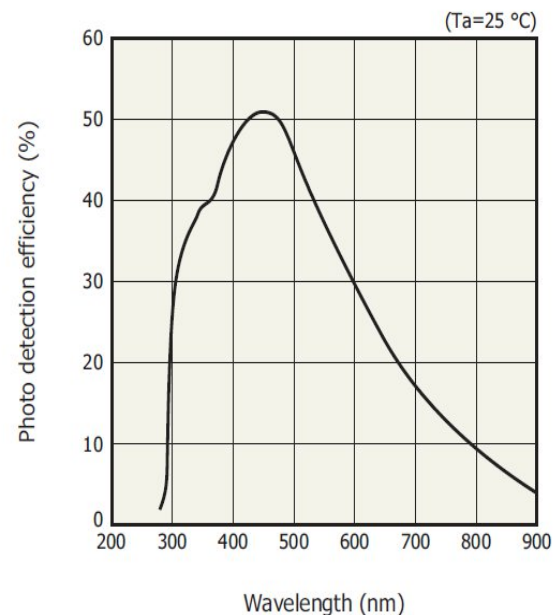


Фото CsI(pure) кристаллов в процессе обработки поверхностей. Самый левый кристалл имеет зеркальную полировку, а у остальных кристаллов матовое качество поверхностей обеспечено производителем. После полировки каждый кристалл оборачивается в диффузионный отражатель из фторопластовой (тефлоновой) плёнки. Общая толщина отражателя с каждой стороны кристалла составляет около 0.5 мм, обеспечивающей коэффициент отражения выше 95%.

Устройство матрицы кремниевых фотоумножителей



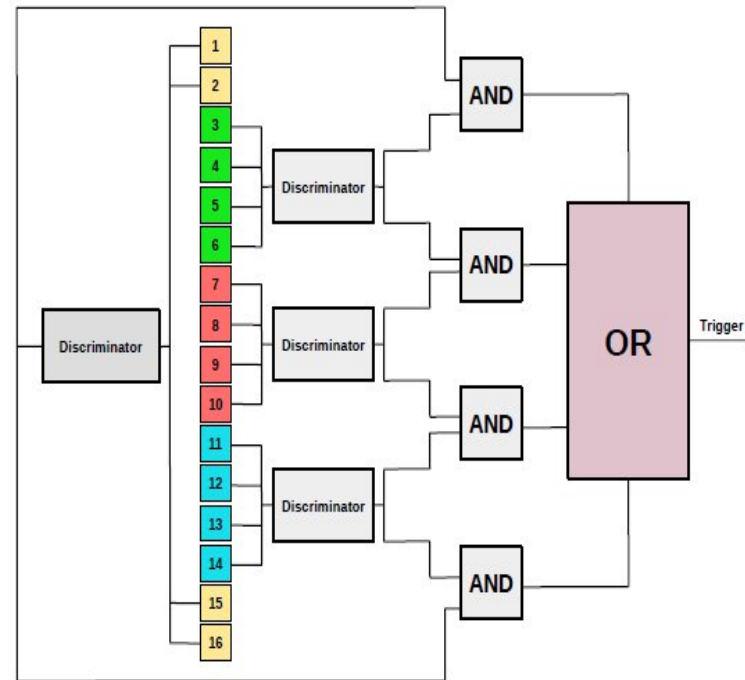
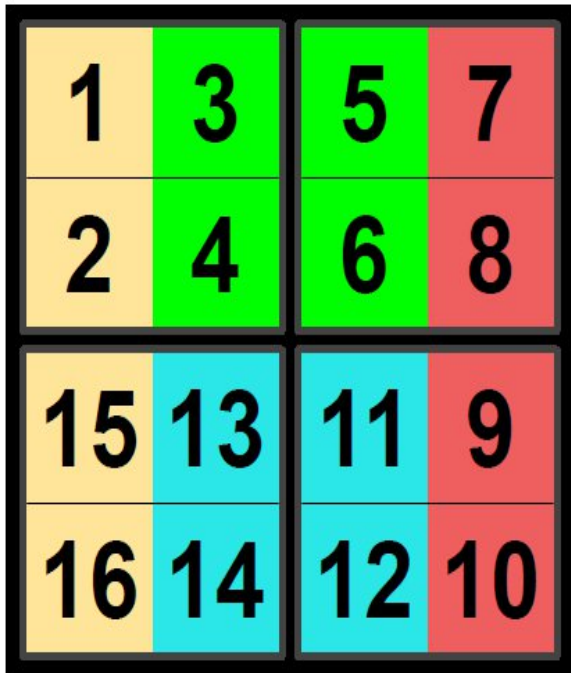
Слева – вид лицевой стороны печатной платы для матриц фотодетекторов MPPC S14161-3050HS-04 с BGA контактами. Справа – печатная плата с фотодиодными матрицами.



Основные параметры кремниевых фотоумножителей типа SiPM S14161–3050HS-04 производства компании Hamamatsu (Япония).

Слева – зависимость эффективности регистрации фотонов от длины волны падающего света. Справа – зависимости внутреннего коэффициента усиления и величины оптической связи от значения перенапряжения на фотодетекторе.

Система съёма световых сигналов со сцинтилляционных модулей



Слева – схема цветового распределения каналов считывания матриц SiPM в пределах одного детекторного модуля. Цветовая маркировка отражает их объединение, используемое для реализации четырехканальной системы считывания сигнала. Справа показан принцип формирования временного совпадения сигналов, применяемого для подавления шумовых срабатываний. Сигналы, относящиеся к каналам одной цветовой группы, суммируются и далее поступают на считывание. При регистрации события в одном из кристаллов модуля активируются две группы разных цветов, что позволяет точно определить местоположение кристалла, в котором произошло взаимодействие.

Электронная схема обработки сигнала с детектора

Токовые
усилители

Триггерная часть



Токовый усилитель:

- Передает сигнал с SiPM без искажений;
- Шумы на уровне 0.2-0.4 фотоэлектронов;
- Можно менять усиление на порядок –
- Возможность калибровки гамма-квантами с энергиями $\times 10$ кэВ;
- На одном модуле – 4 усилителя.

- Плата АЦП (Дубна):
- 64 канала, 12-бит;
- Один АЦП – один слой детектора;
- Шаг оцифровки – 16 нс;
- Ширина временного окна – 33 мкс;

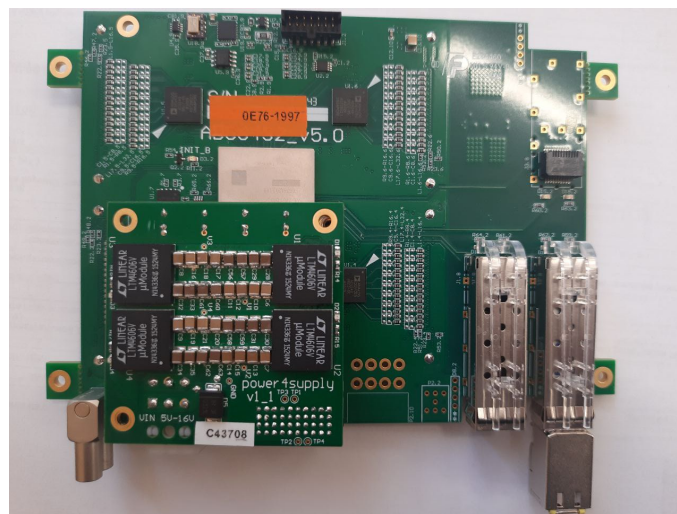
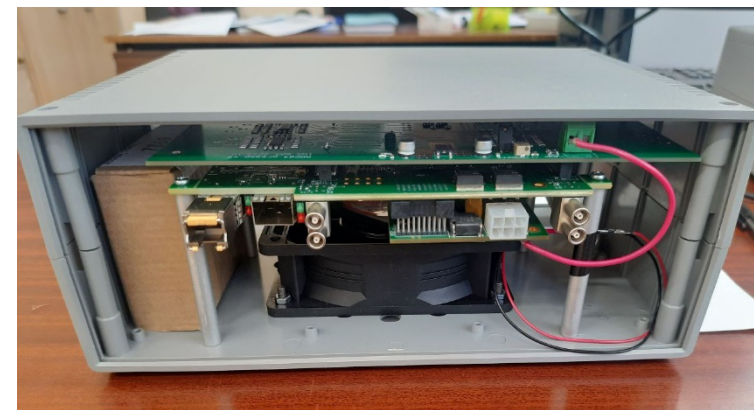


Фото модуля АЦП ADC64.



Блок АЦП включает:

плату АЦП, преобразователь сигналов, вентилятор, 64 сигнальных разъема, Ethernet разъем, триггерный разъем.

Схема установки по тестированию фотодетекторов

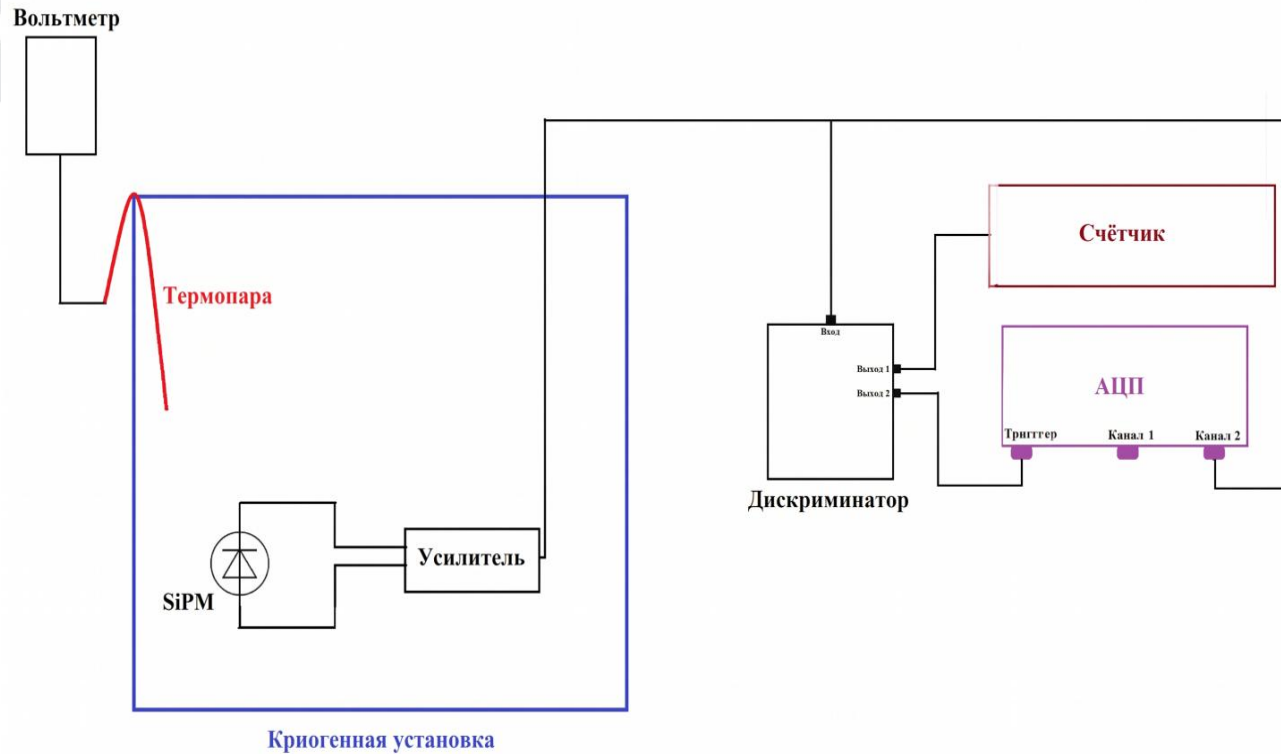
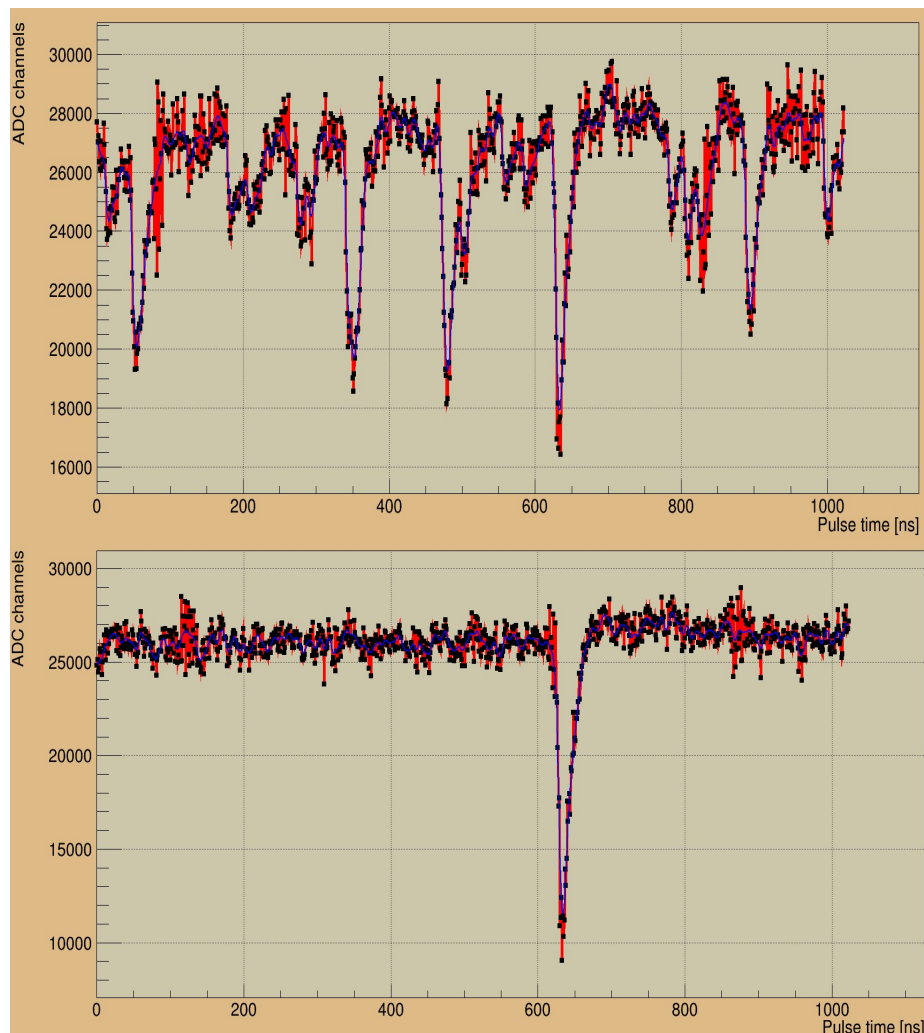


Схема установки по измерению зависимости частоты собственного шума кремниевых фотоумножителей от температуры окружающей среды.



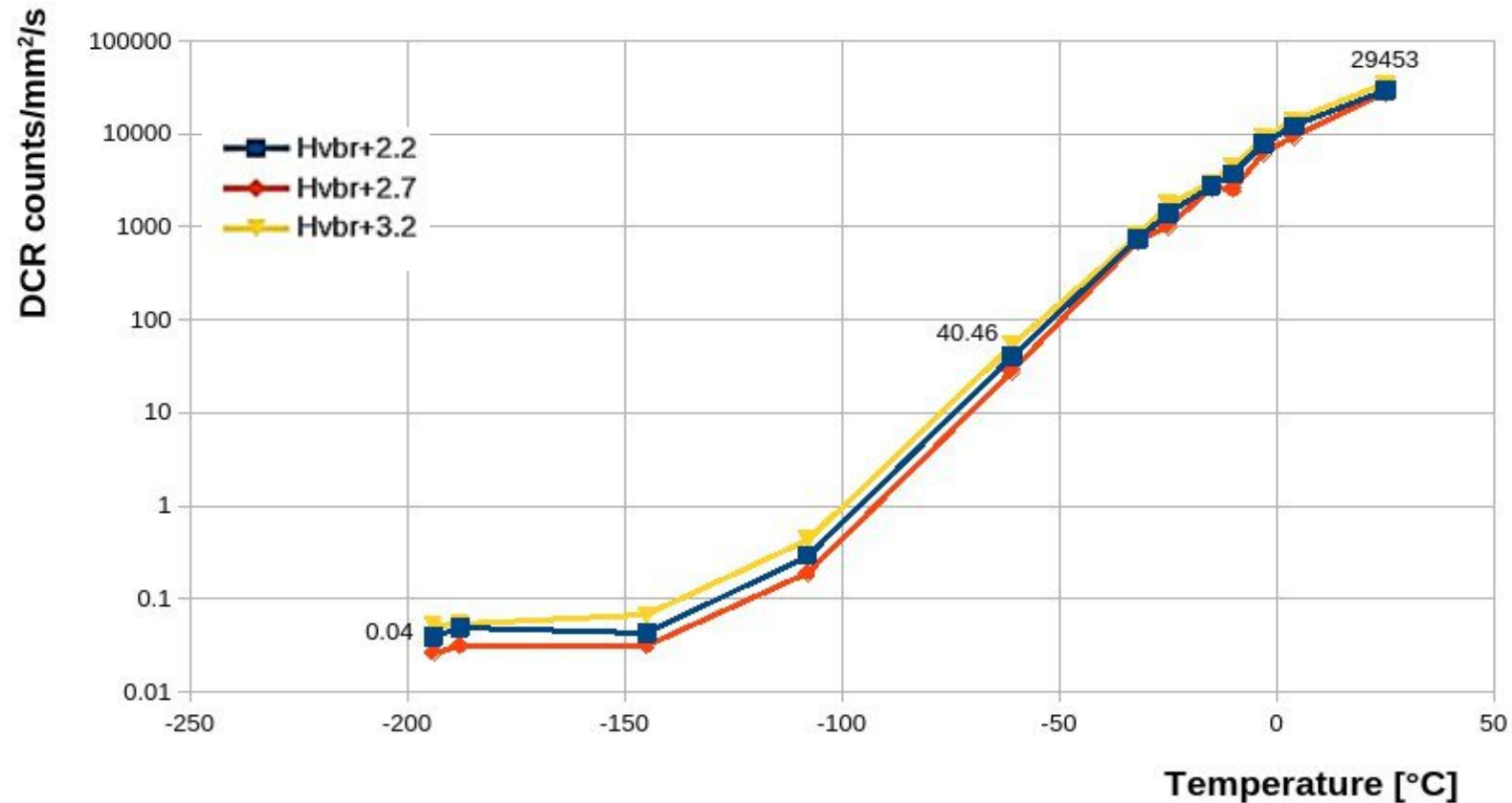
Фотографии Сосуда Дьюара СДП-35/6 (слева) и криогенного термоконтроллера ККВМ-24 (справа).

Исследование уровня тепловых шумов



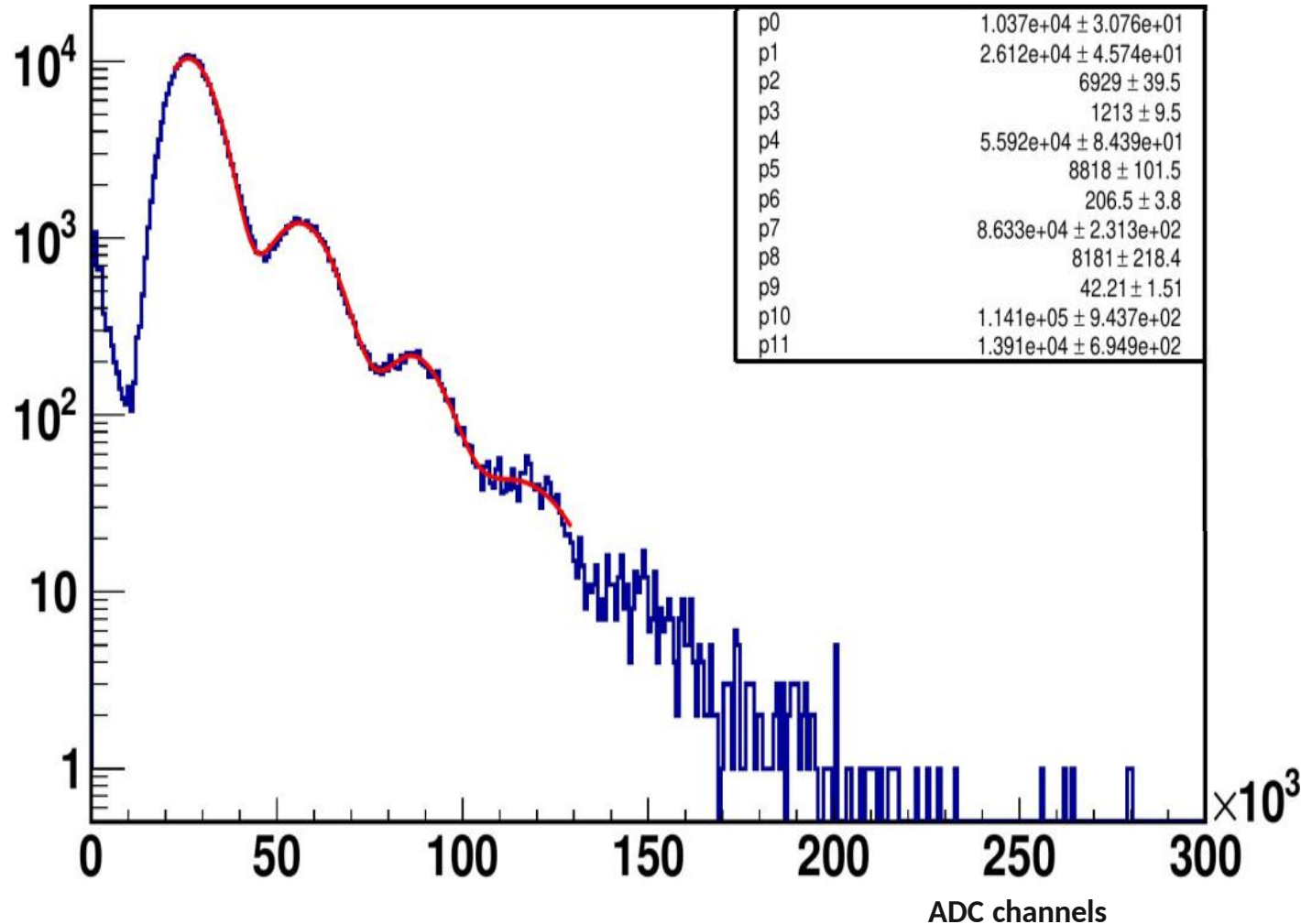
Тепловые шумы SiPM характеризуются отчётливо выраженной дискретной структурой, которая отражает число ячеек, сработавших в данный момент времени. Число таких срабатываний за единицу времени, как правило, определяется температурой фотодиода: с её увеличением интенсивность шумовых импульсов возрастает. Это видно на оцифрованных АЦП шумовых сигналов для двух температур окружающей среды. Сверху – температура 22 °С, снизу – температура -35 °С.

Исследование уровня тепловых шумов



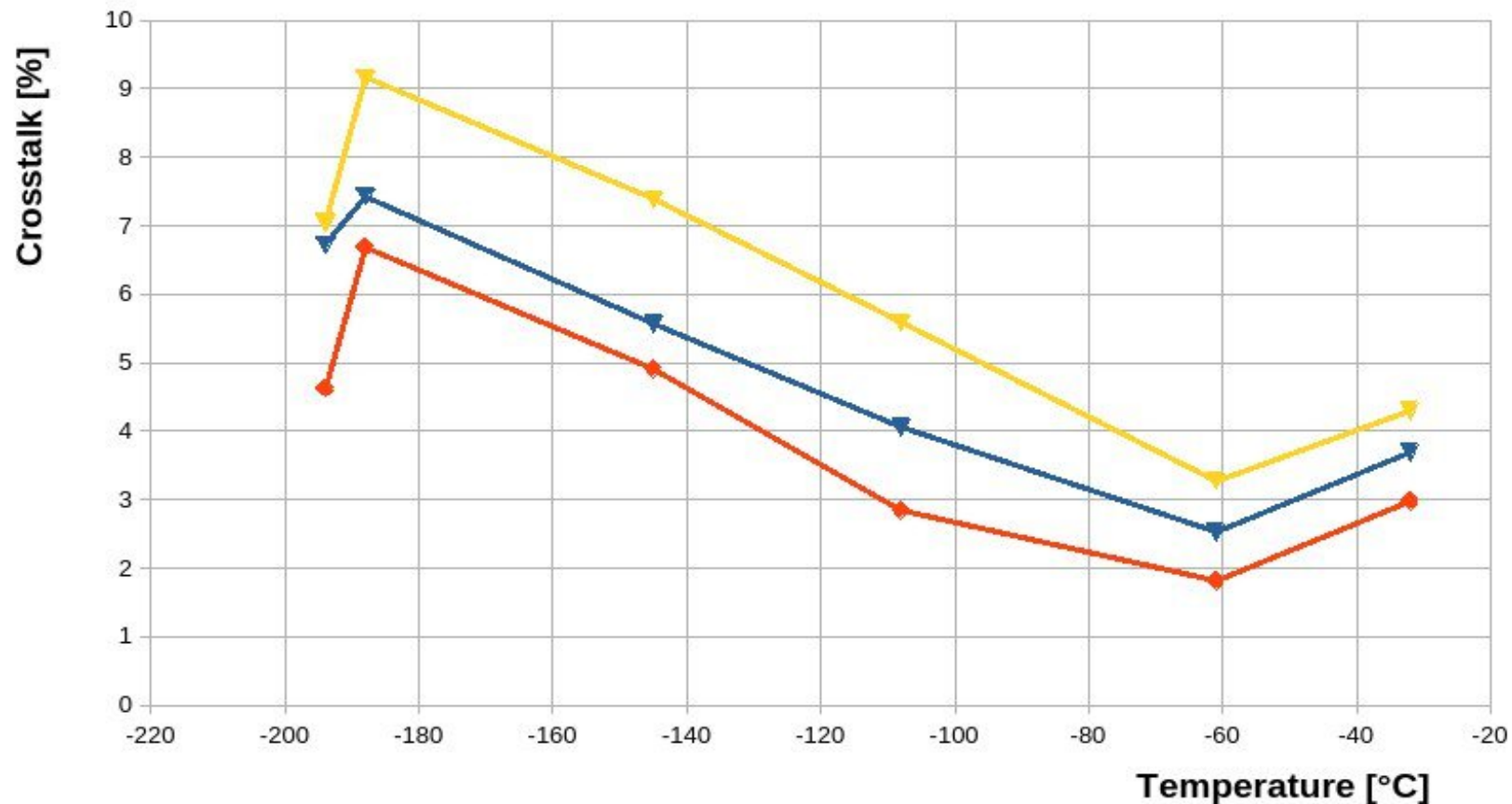
Зависимость частоты одноэлектронных шумов на единицу площади от температуры для SiPM MPPC S14161-3050HS-04 для трёх напряжений питания. Синий график соответствует напряжению, рекомендуемому производителем, красный – на 0.5 В ниже рекомендуемого и жёлтый – на 0.5 В выше рекомендуемого напряжения.

Исследование оптической связи кремниевых фотоумножителей



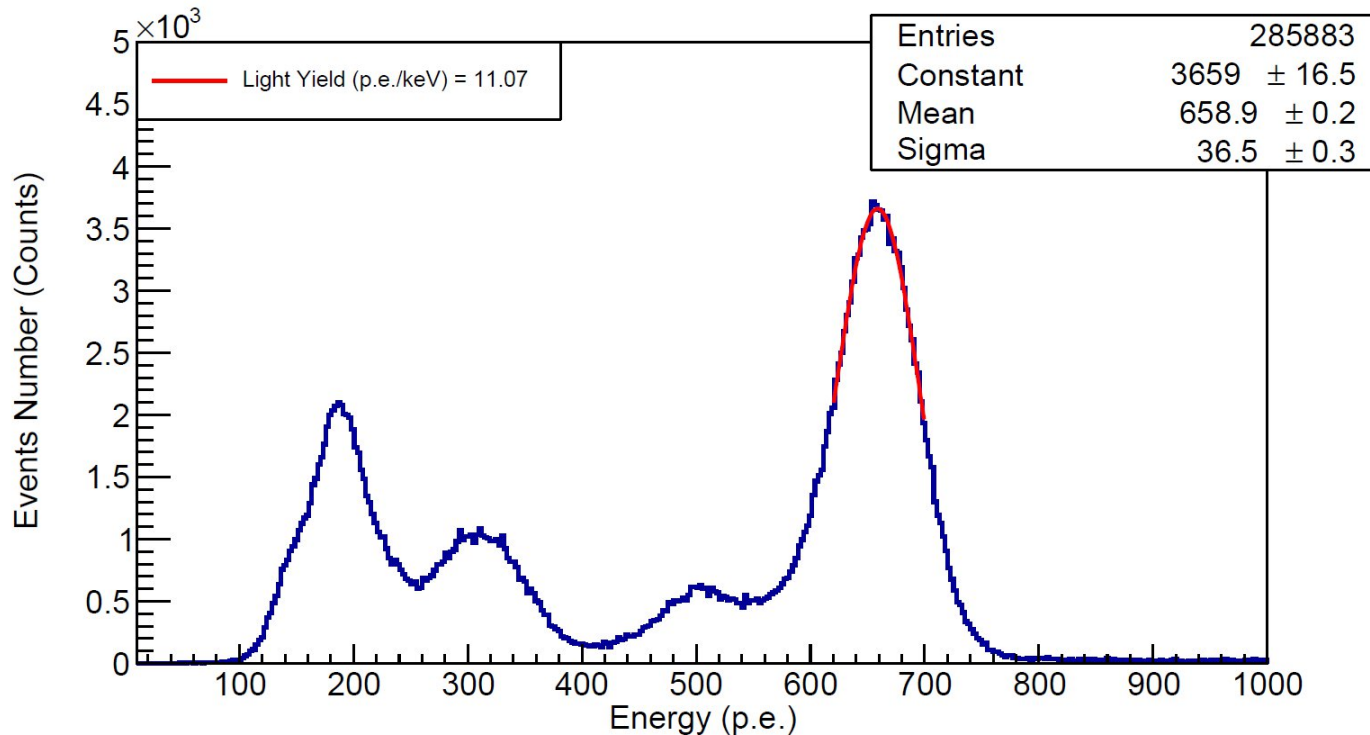
Шумовой спектр SiPM с пиками от одиночных фотоэлектронов, измеренный при температуре жидкого азота. Величина оптической связи оценивается как отношение числа шумовых импульсов с амплитудой два и более фотоэлектронов к числу шумовых импульсов с амплитудой один и более фотоэлектронов.

Исследование оптической связи кремниевых фотоумножителей

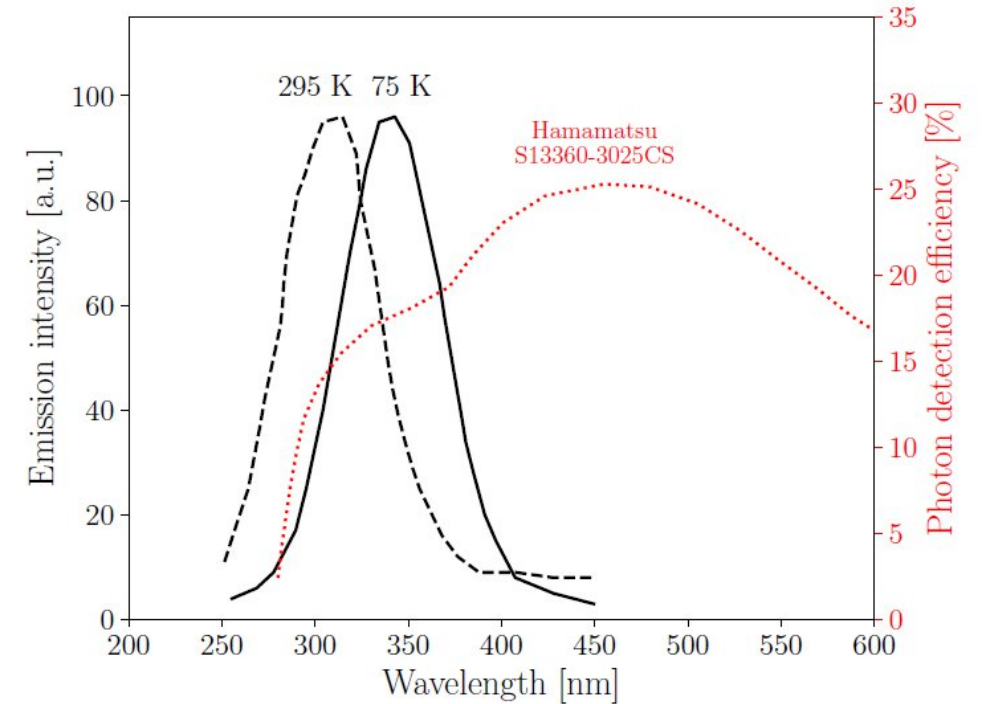


Зависимости величины оптической связи от температуры для кремниевых фотоумножителей mRPC S14161-3050HS-04 производства компании Hamamatsu (Япония). Синий график соответствует напряжению, рекомендуемому производителем, красный – на 0.5 В ниже рекомендуемого и жёлтый – на 0.5 В выше рекомендуемого напряжения.

Измерения светосбора со сцинтилляционных детекторов



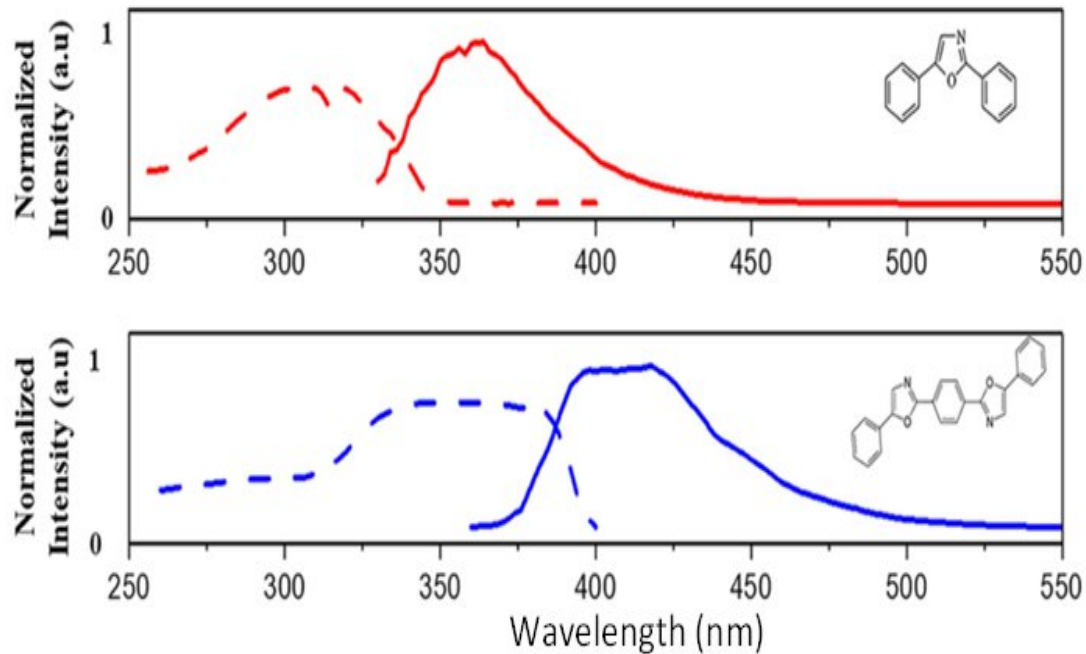
Амплитудный спектр ^{241}Am . Пик, соответствующий поглощению рентгеновского гамма-кванта с энергией 59.5 кэВ был аппроксимирован распределением Гаусса. Светосбор, определённый по линии 59.5 кэВ составляет всего 11.1 фотоэлектронов/кэВ.



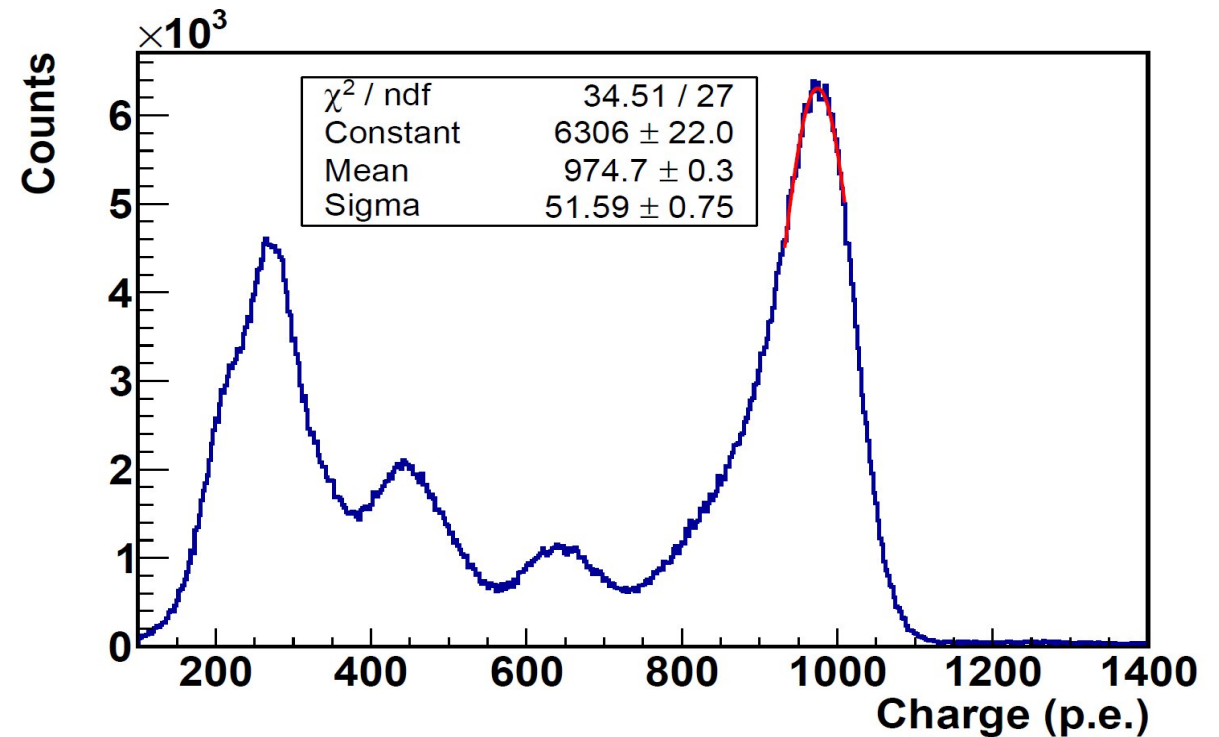
Спектр излучения сцинтиллятора CsI(pure) для комнатной температуры и температуры жидкого азота.

Измерения светосбора со сцинтилляционных детекторов.

Использование спектросмещающих покрытий

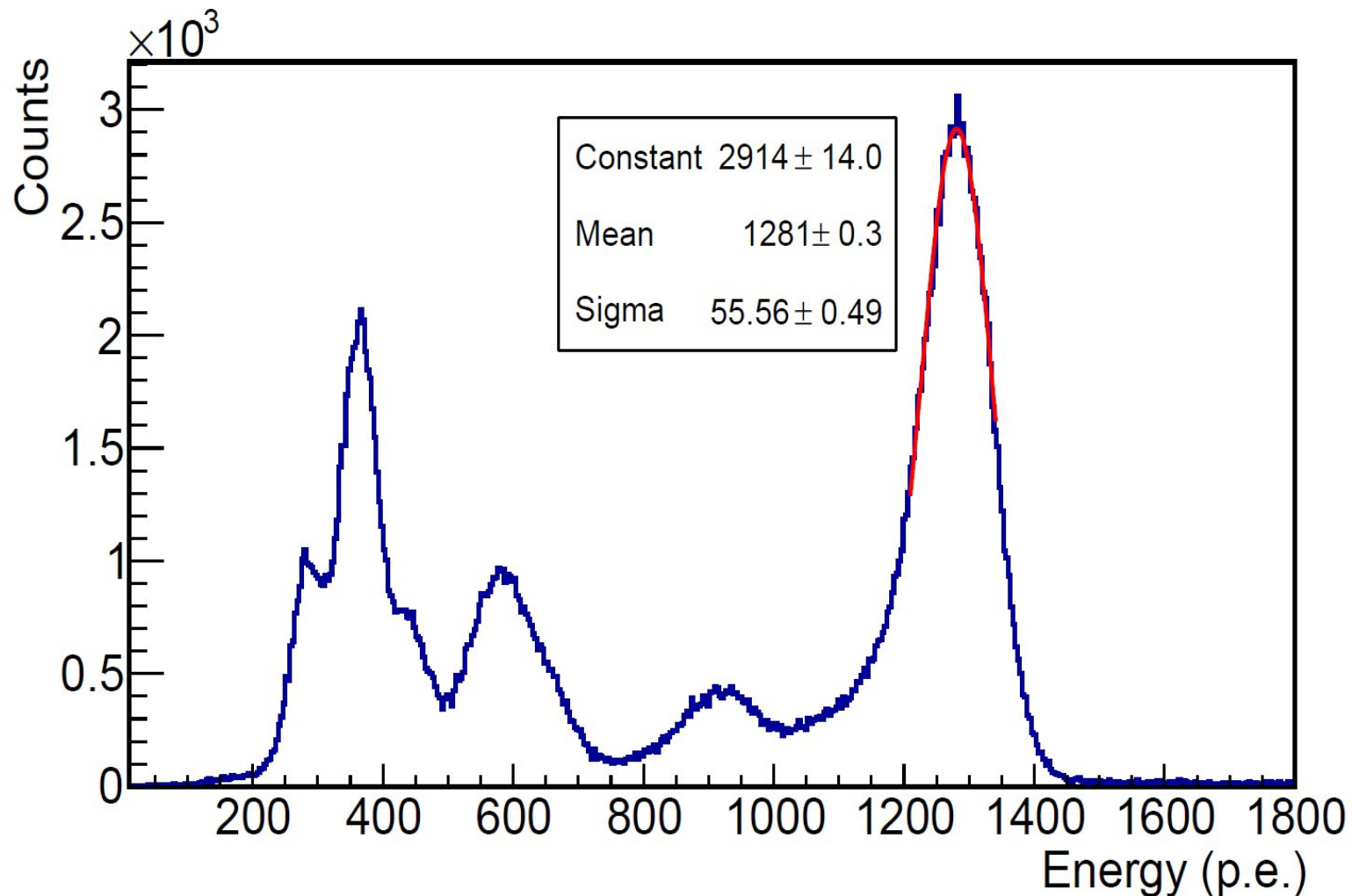


Спектр поглощения (прерывистая линия) и спектр излучения (сплошная линия) для состава PPO (вверху) и POPOP (внизу).



Амплитудный спектр от источника ^{241}Am с характерной линией максимального энерговыделения 59,5 кэВ. Данный спектр получен для CsI(pure) кристалла, покрытого спектросмещающим составом POPOP.

Измерения светосбора со сцинтилляционных детекторов



Дальнейшее повышение светосбора обеспечивается за счёт применения комбинированного спектросмещающего состава на основе РОРОР и РРО, который переводит излучение из области около 300 нм в диапазон около 420 нм. Светосбор увеличивается до значения более 21,5 фотоэлектрона/кэВ.

Выводы и результаты

В рамках работы:

- Проведён анализ современных подходов к регистрации нейтрино от распада трития. Изучена структура детектора: сцинтиллятор CsI(pure), SiPM, система съёма и обработки сигналов.
- Выполнены экспериментальные измерения влияния шумов, оптической связи и покрытий сцинтиллятора на светосбор.

По результатам работы можно сделать выводы:

- Светосбор 20–30 фотоэлектронов/кэВ и порог регистрации $\sim 0,5$ фотоэлектрона обеспечивают детектирование энерговыделения на уровне 100–200 эВ (2–3 фотоэлектрона).
- Применение спектросмещающих веществ POPOP и PPO увеличило светосбор вдвое.
- Двойные совпадения подавляют тепловые шумы SiPM до уровня менее одного события за несколько лет работы. Основное ограничение — внешний фон.
- Дальнейшее совершенствование экспериментальных методик и алгоритмов обработки сигналов должно быть направлено на подавление внешнего фона и поддержание стабильного светосбора на уровне 20–30 фотоэлектронов/кэВ.

**Спасибо за
внимание!**

