

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра 11 «Экспериментальные методы ядерной физики»

**«Исследование параметров сцинтилляционного детектора тритиевых электронов для поиска
стерильных нейтрино»**

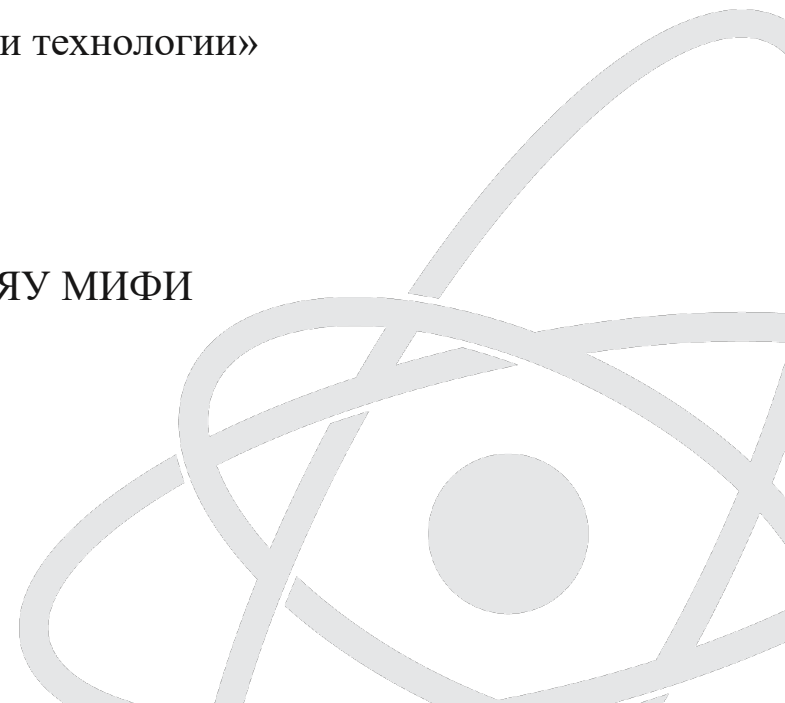
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

Выполнил: Чугунов С. С., М24-111

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Салахутдинов Гаяр Харисович, профессор НИЯУ МИФИ

Консультант: к.ф.-м.н. Ивашкин Александр Павлович, с.н.с. ОЭФ ИЯИ РАН

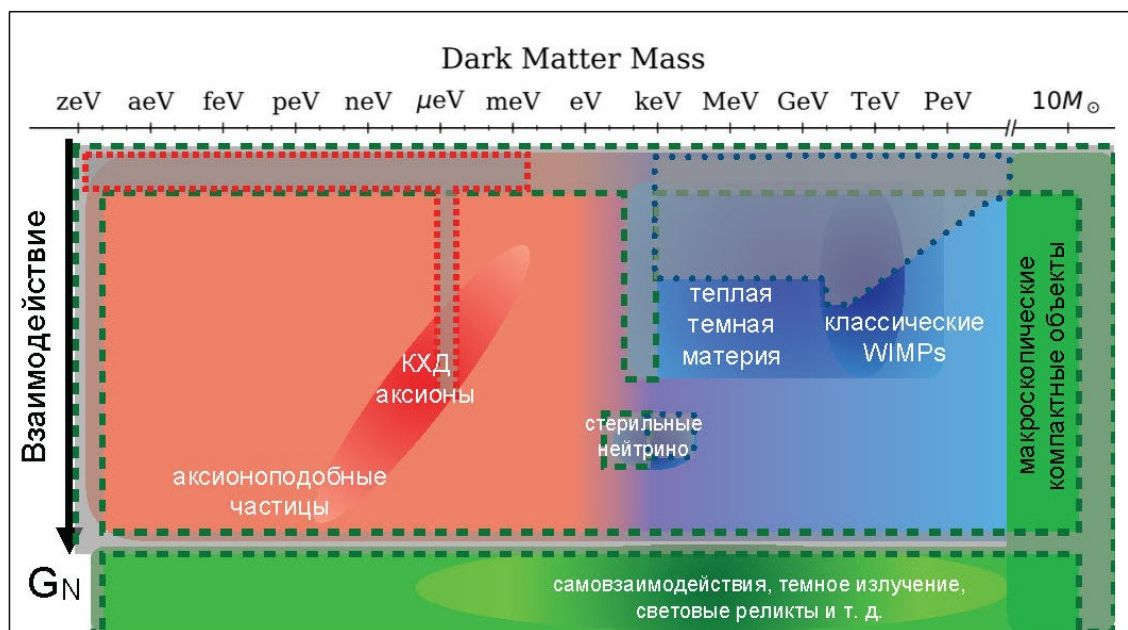
Москва, 2026 год



Актуальность и цель работы

Одной из актуальных тем в современной физике является вопрос состава темной материи. Возможным кандидатом на роль темной материи является стерильное нейтрино с энергией порядка кэВ, поиск которого ведется с помощью установки «Троицк ню-масс».

Целью данной работы является разработка криогенного детектора тритиевых электронов на основе сцинтилляционного кристалла CsI(Pure) и кремниевого ФЭУ.

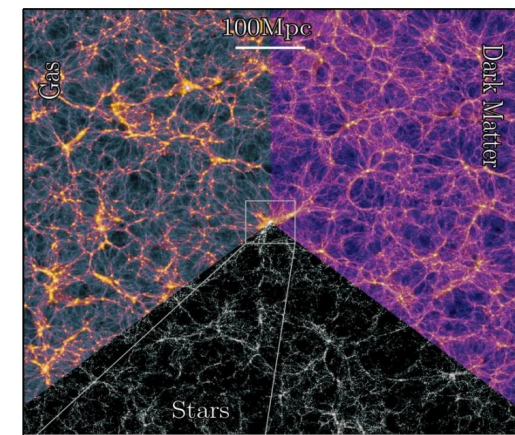
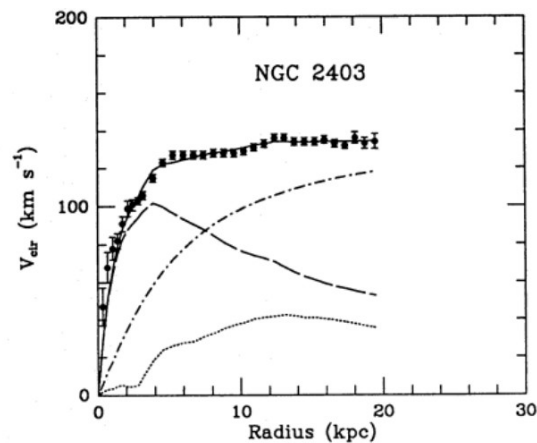


Текущий статус различных кандидатов на темную материю

Темная материя

На сегодняшний день есть множество фактов астрофизического и космологического рода, указывающих на существование темной материи:

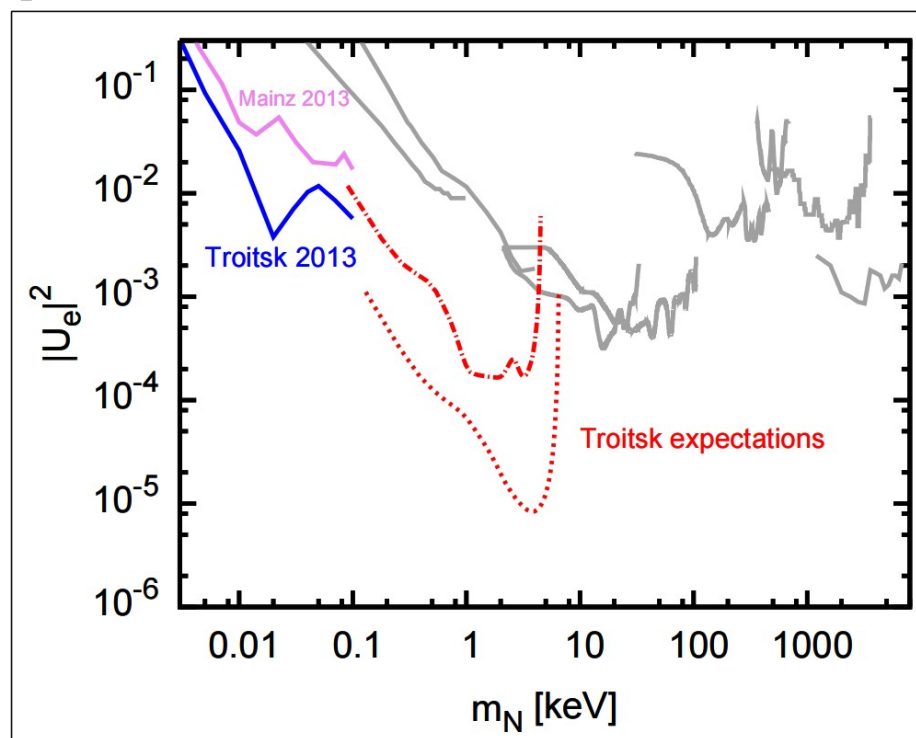
- Несоответствие между количеством видимой материей и ротационными кривыми галактик;
- Анизотропия реликтового излучения;
- Гравитационное линзирование;
- Крупномасштабная структура Вселенной.



Пример ротационной кривой Изображение кольца темной материи Фрагмент симуляции MTNG

Стерильное нейтрино

Перспективным кандидатом на роль частиц темной материи является стерильное нейтрино. В настоящий момент проводится активная подготовка к поиску стерильных нейтрино с массой порядка кэВ на установке «Троицк ню-масс»



Планируемая область измерений параметров стерильных нейтрино

Установка «Троицк ню-масс»

Установка «Троицк ню-масс» состоит из двух основных подсистем: беззаконного газового источника трития с системой замкнутой циркуляции рабочего газа и спектрометра, работающего по принципу магнитной адиабатической коллимации с электростатической фильтрацией.

Детектор размещается в последнем сверхпроводящем соленоиде спектрометра.

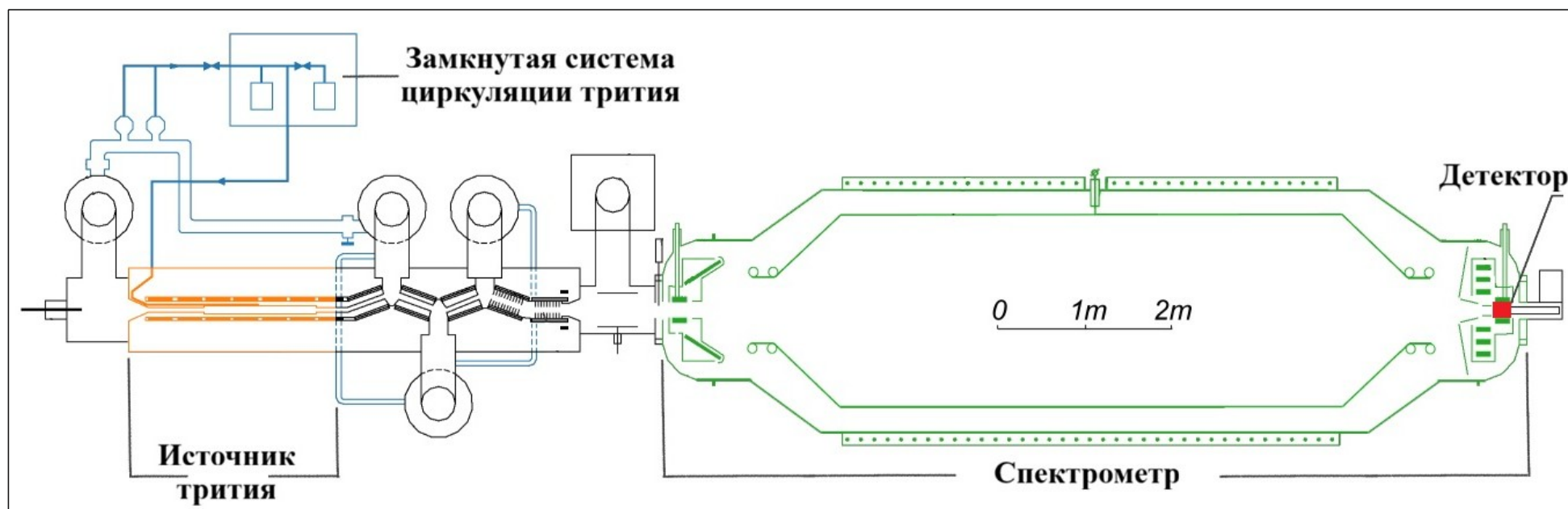
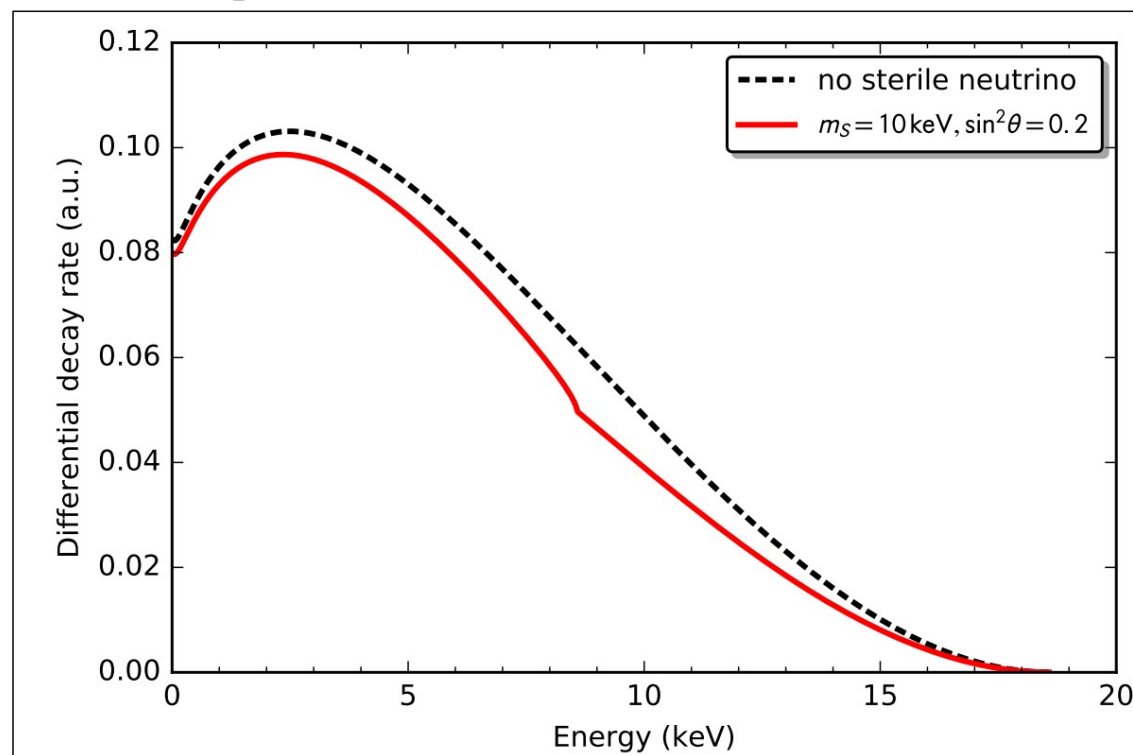


Схема установки «Троицк ню-масс»

Методика поиска стерильных нейтрино

На установке измеряется спектр электронов от бета-распада трития. В случае существования стерильного нейтрино на энергетическом спектре электронов от распада трития будет наблюдаться излом и широкое искажение.



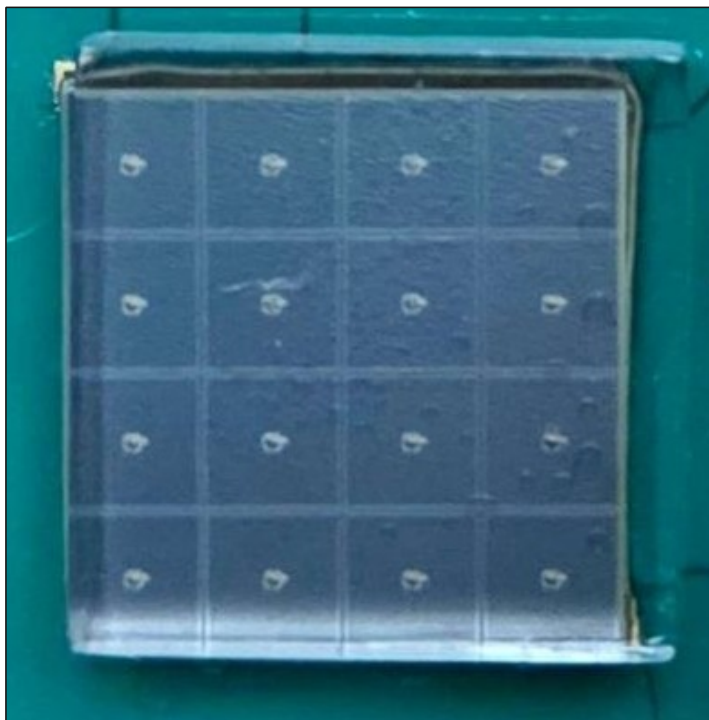
Спектр бета-распада трития с примесью стерильных нейтрино (красным) и без нее (черным)

Для использования на установке детектор должен обладать следующими свойствами и параметрами:

- **Чувствительность к тритиевым электронам;**
- **Способность работать в вакууме;**
- **Порог регистрации ниже 5 кэВ;**
- **Предельная скорость счета не ниже 1 кГц;**
- **Шум не менее чем на 2 порядка ниже предельной скорости счета.**

В состав детекторного модуля входят следующие элементы:

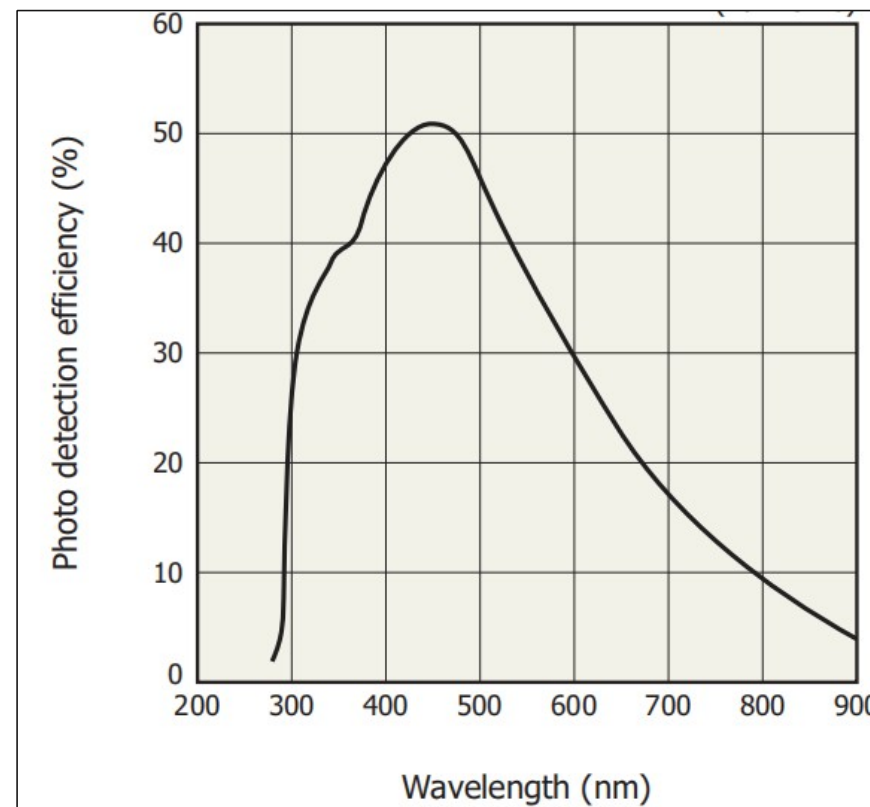
- 1) Плата с размещенной на ней матрицей SiPM Hamamatsu модели S14161-3050HS-04;
- 2) Сцинтилляционный кристалл CsI (pure);
- 3) Пластиковый корпус.



Фотография детектора

Характеристики SiPM

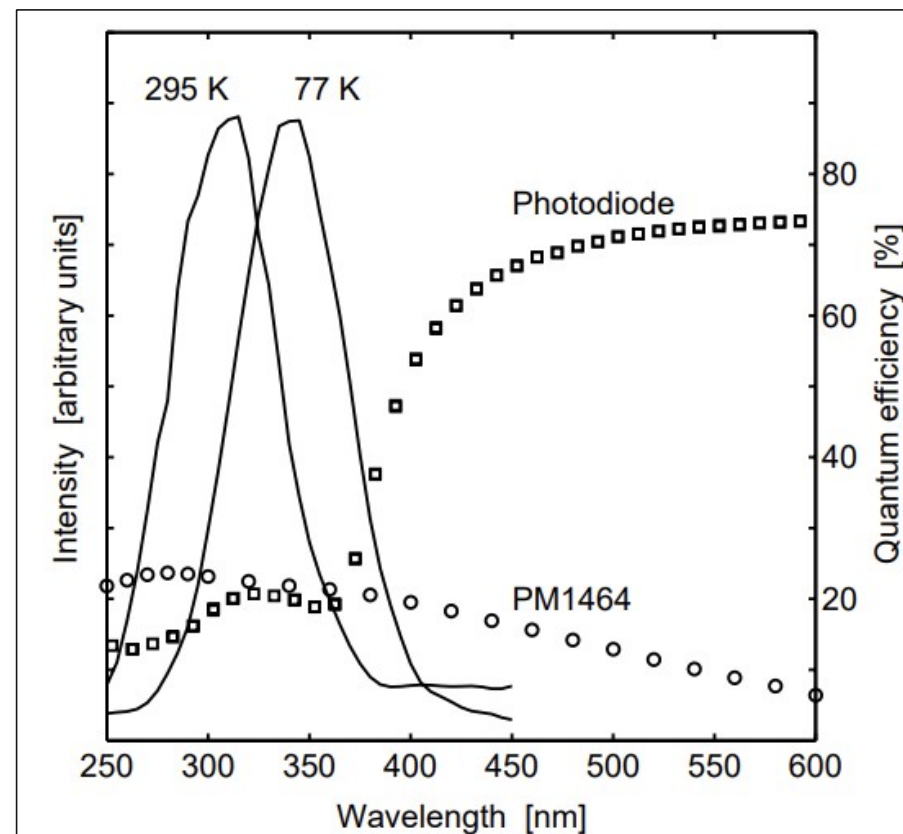
Параметр	Значение
Напряжение пробоя (при 298 К)	38 В
Рекомендуемое перенапряжение	2,7 В
Температурный коэффициент изменения напряжения пробоя	34 мВ/К
Максимальная эффективность регистрации фотонов	50 %
Спектральный диапазон	270; 900 нм
Длина волны, соответствующая максимальной PDE	450 нм
Коэффициент усиления	$2,5 \times 10^6$



Эффективность регистрации фотонов
в зависимости от длины волны

Характеристики сцинтиллятора CsI(pure)

Параметр	Значение
Световыход (при 77 К)	до 124 ф/кэВ
Максимум спектра излучения (при 77 К)	350 нм
Плотность	4,51 г/см ³
Эффективный атомный номер	54
Радиационная длина	1,86 см
Гигроскопичность	слабая



Спектры излучения CsI(pure) при температурах 295 К и 77 К

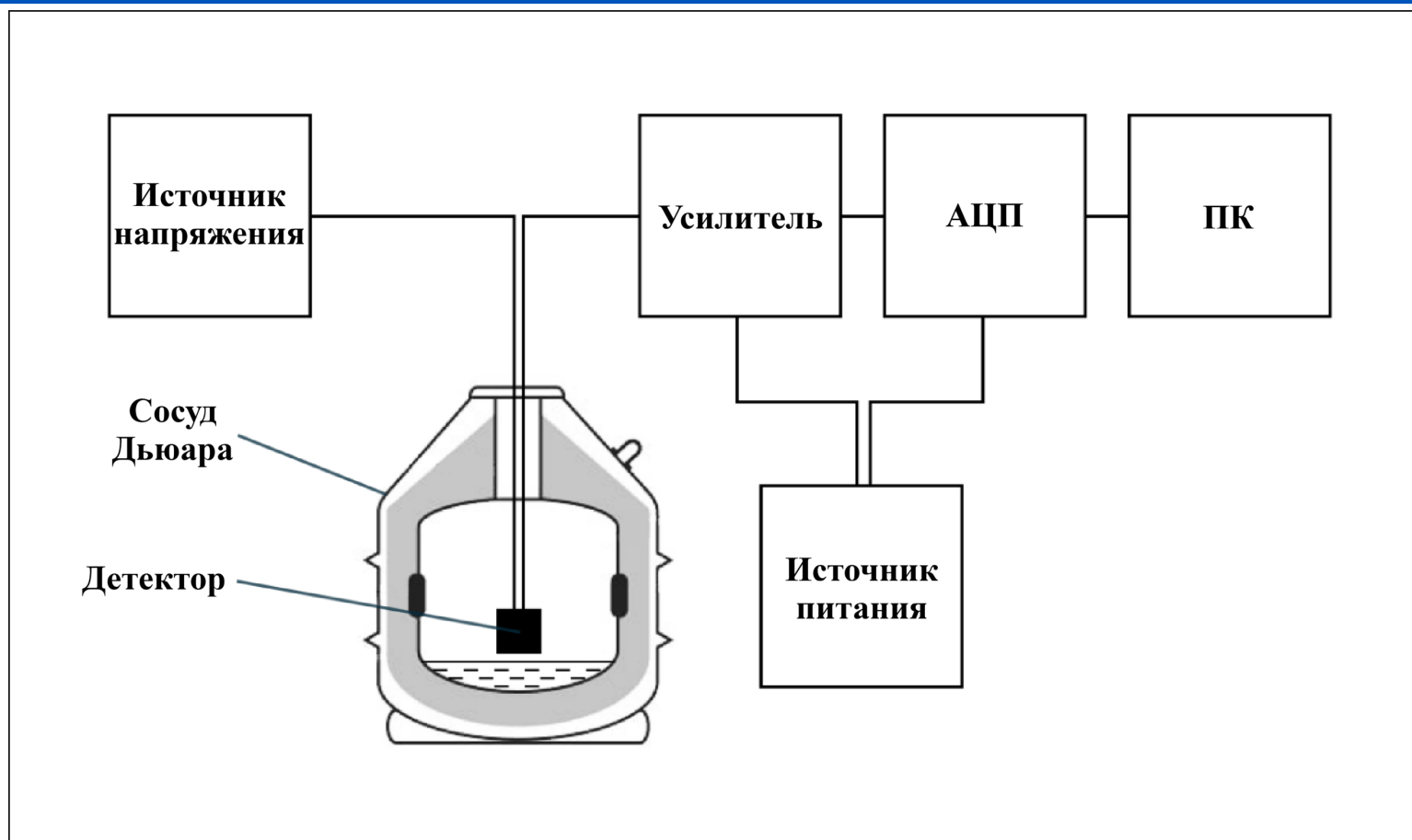


Схема установки для проверки и испытания детектора

Параметры АЦП

- Разрядность: 12 бит (4096 каналов);
- Временной шаг оцифровки: 16 нс;
- Число входных каналов: 64;
- Дифференциальные входы;
- Максимальная ширина кадра для записи формы сигнала: 2048 отсчётов (33 мкс).

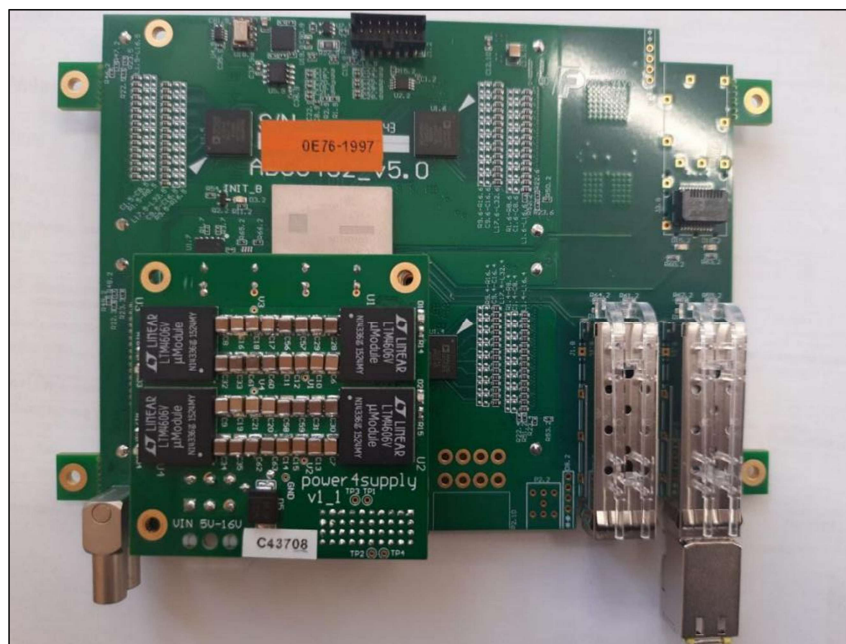
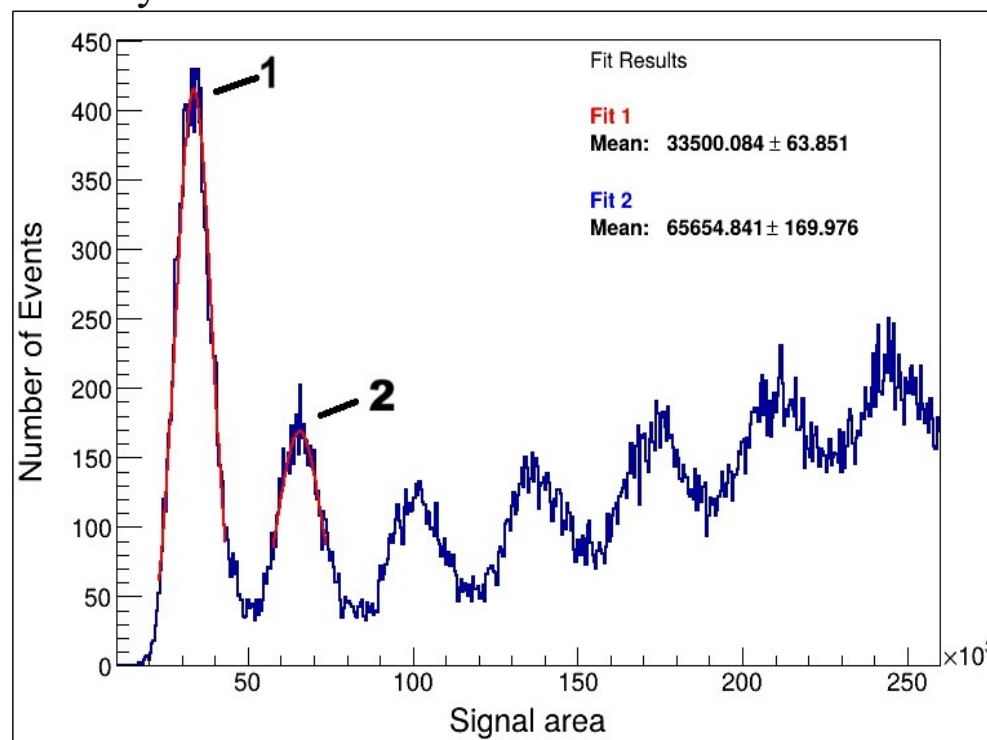
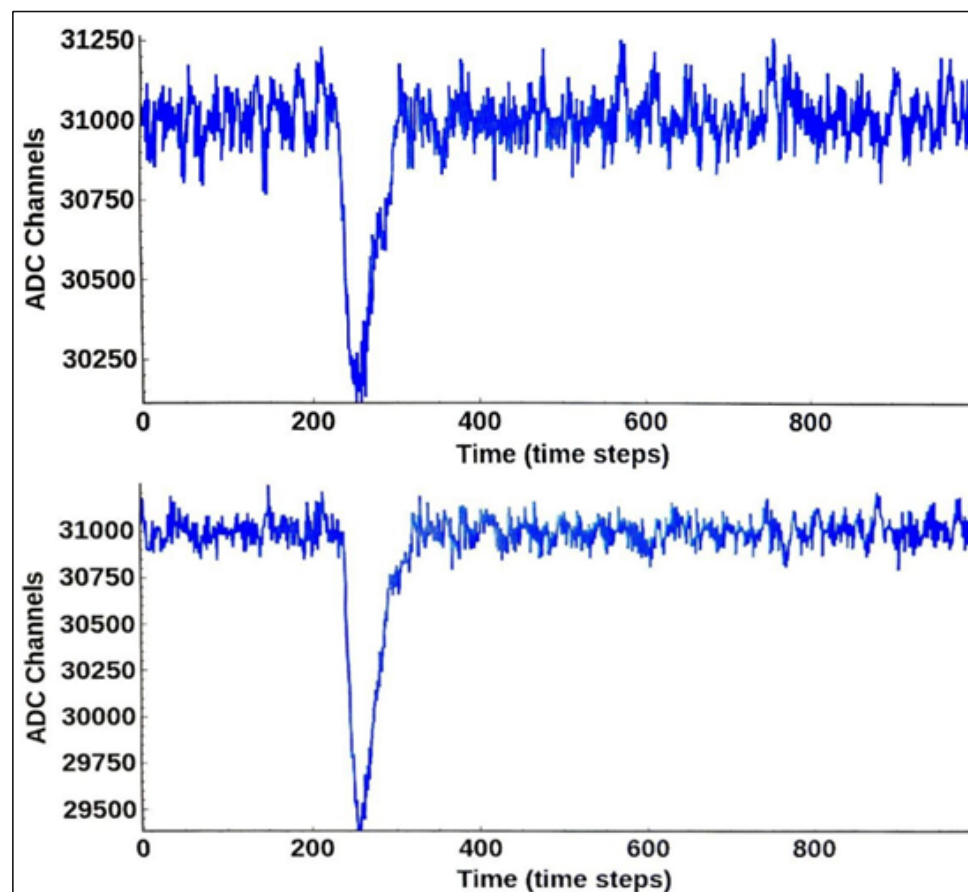


Фото платы АЦП

На детекторе был размещен тритиевый источник, обернутый в фольгу для экранирования от электронов. Было получено калибровочное распределение, с помощью которого была вычислена площадь сигнала от срабатывания 1 ячейки как разность между положениями 1 и 2 пиков, то есть величина 1 фотоэлектрона. Полученное значение составило 32×10^3 .



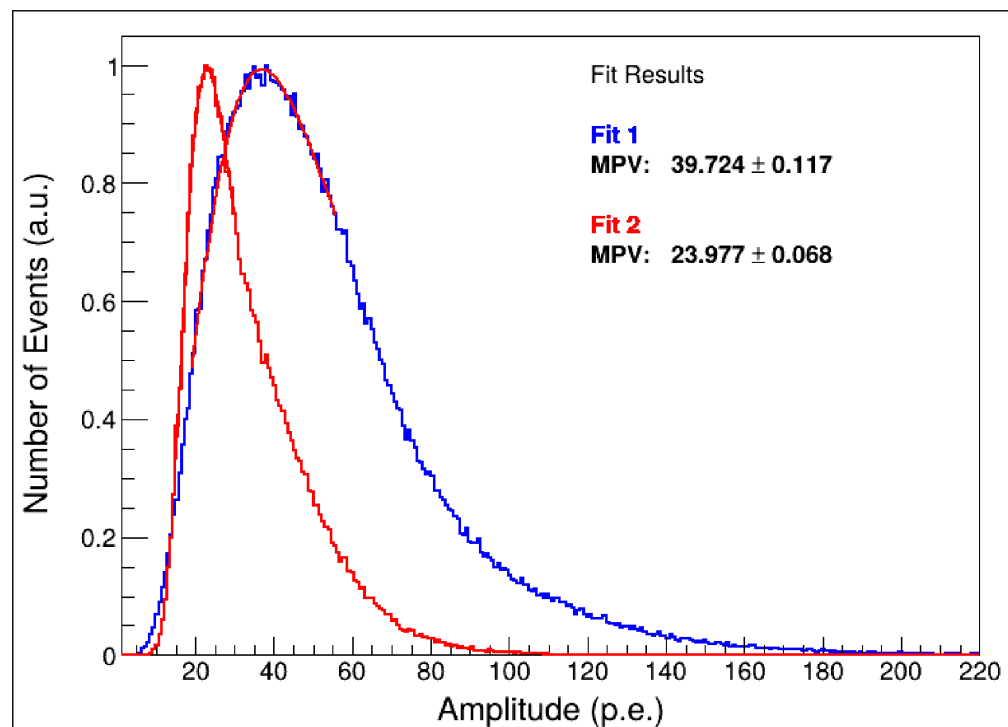
Калибровочный спектр, полученный при облучении фотонами



Примеры калибровочных сигналов

Измерение спектра электронов

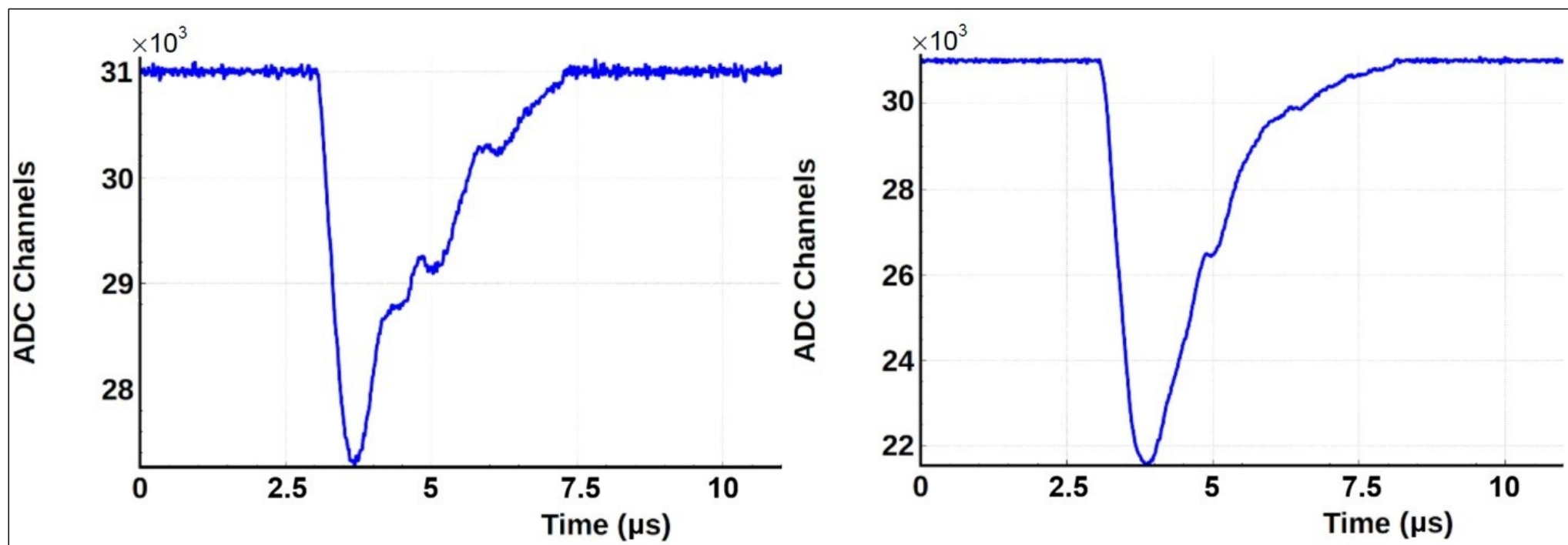
После набора амплитудного спектра в фольге было сделано отверстие, играющее роль коллиматора для электронов, затем был набран амплитудный спектр электронов. Пик электронного спектра приходится на 39,7 фотоэлектронов.



Красным цветом – спектр, полученный при облучении тормозными фотонами
Синим цветом – спектр, полученный при облучении электронами

Измерение спектра электронов

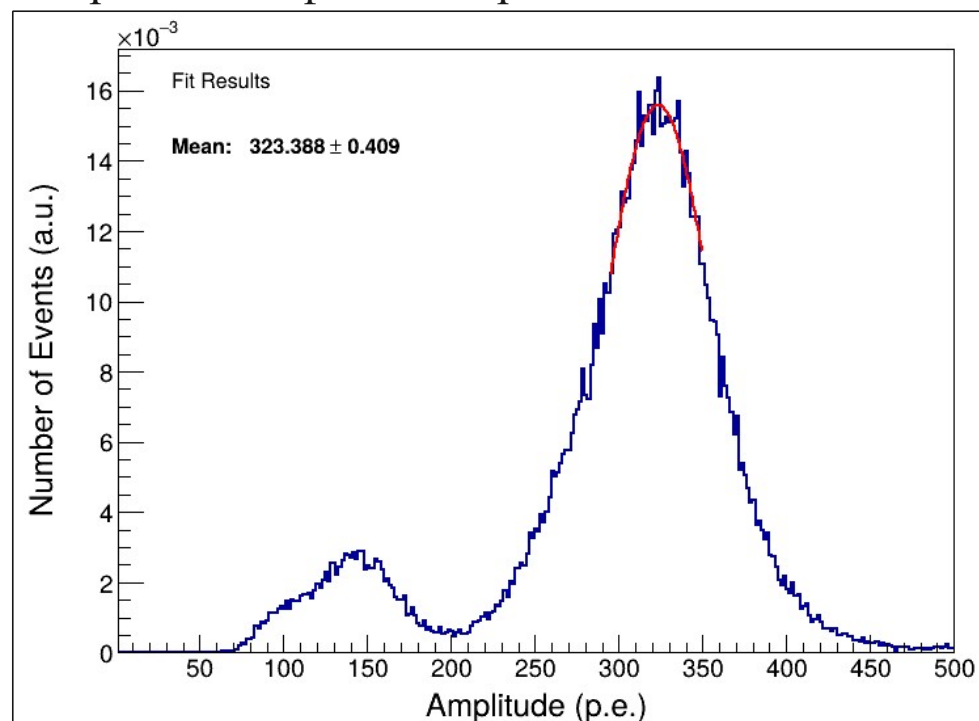
Как видно из формы импульса, длительность сигнала составляет 5 мкс, что дает предельную нагрузку 1 кГц при уровне случайных наложений 1%



Типичные сигналы от попадания электронов

Энергетическая калибровка

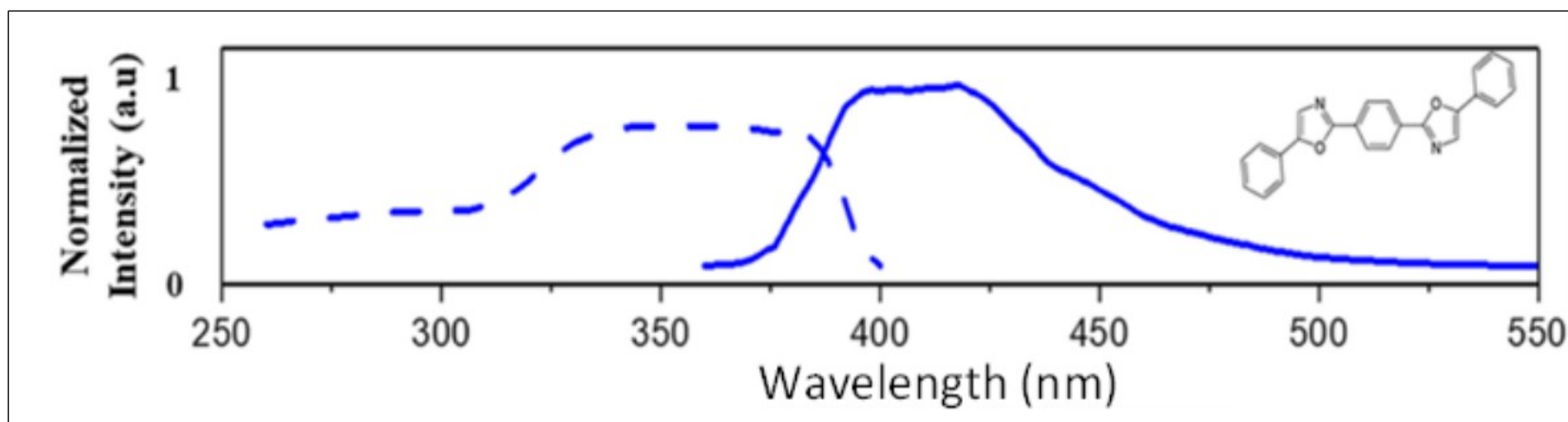
Для построения энергетического спектра тритиевых электронов, была выполнена калибровка с использованием эталонного источника фотонного излучения ^{241}Am . Пик 59,5 кэВ приходится на 323,4 ф.э., что соответствует светосбору около 5,4 ф.э./кэВ, что обеспечивает энергетический порог от 500 эВ при установлении порога регистрации 2-3 фотоэлектрона.



Амплитудный спектр, полученный при облучении детектора источником ^{241}Am

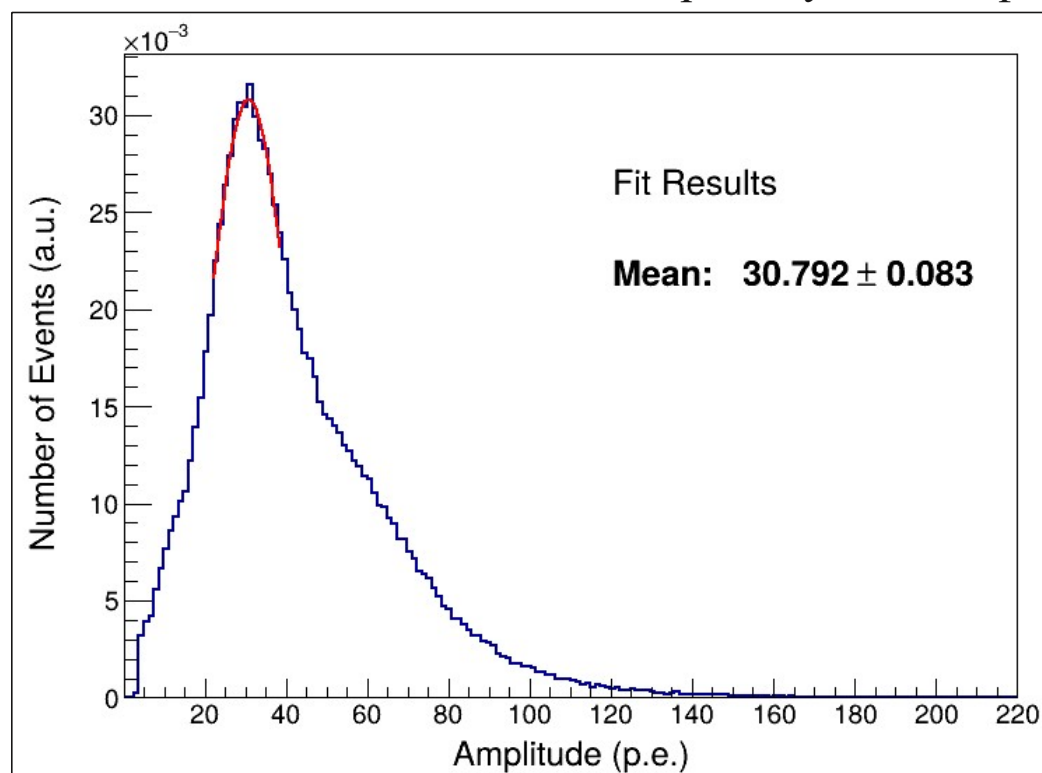
Спектросмещающий состав

Чтобы уменьшить разницу между максимумом спектра излучения CsI(pure) и максимумом спектральной чувствительности SiPM, был использован спектросместитель POPOP, то есть (1,4-Ди-(5-фенил-2-оксазолил)бензол) с химической формулой $C_{24}H_{16}N_2O_2$. Максимум поглощения этого вещества находится в диапазоне 350-370 нм, а максимум излучения в диапазоне 410-420 нм, что значительно ближе к длине волны, соответствующей максимальной PDE используемого SiPM.



Пунктиром – спектр поглощения,
Сплошным – спектр излучения

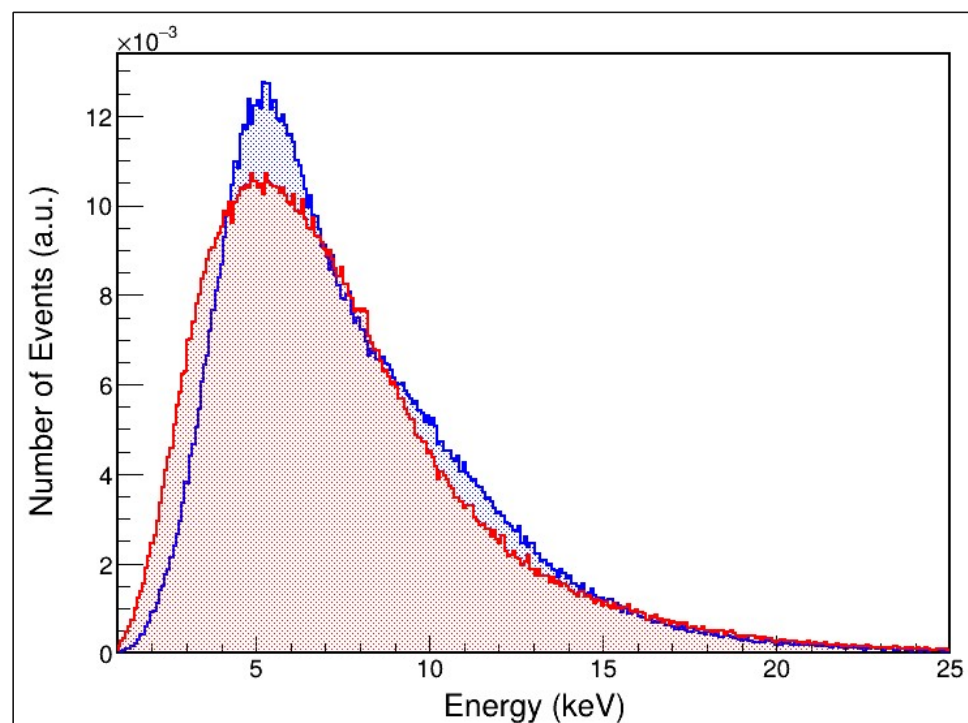
По результатам тестирования детектора с нанесением спектросмещающего был построен спектр электронов. Пик приходится на 30,8 фотоэлектронов, что с учетом результатов калибровки дает светосбор 4,2 ф.э./кэВ, что на 22% меньше чем в предыдущей конфигурации детектора.



Амплитудный спектр, полученный при облучении электронами детектора с нанесением РОРОР

Энергетический спектр трития

В соответствии с полученными результатами калибровки, были построены энергетические спектры тритиевых электронов для двух случаев: прямого контакта кристалла сцинтиллятора с КФЭУ и использования спектросмещающего состава.



Красным цветом – спектр, полученный без использования спектросместителя
Синим цветом – спектр, полученный в случае использования спектросместителя

В ходе данной работы был разработан криогенный детектор тритиевых электронов на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Pure) и кремниевых ФЭУ, собрана установка для исследования его параметров и проведено измерение параметров детектора с использованием собранной установки.

Исходя из полученных данных, основные параметры детектора:

- **Чувствительность к тритиевым электронам на всем спектре излучения;**
- **Конфигурация, способная работать в условиях вакуума;**
- **Энергетический порог от 500 эВ при установлении порога регистрации 2-3 фотоэлектрона;**
- **Предельную загрузку 1 кГц при уровне случайных наложений 1%;**
- **Сегментированность, потенциально обеспечивающая увеличение максимальной загрузки детектора;**
- **Тепловой шум на уровне 7 Гц.**

По результатам исследования можно сделать вывод о применимости сцинтилляционного детектора предложенной конфигурации для использования в эксперименте по поиску стерильных нейтрино.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!*