

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»**

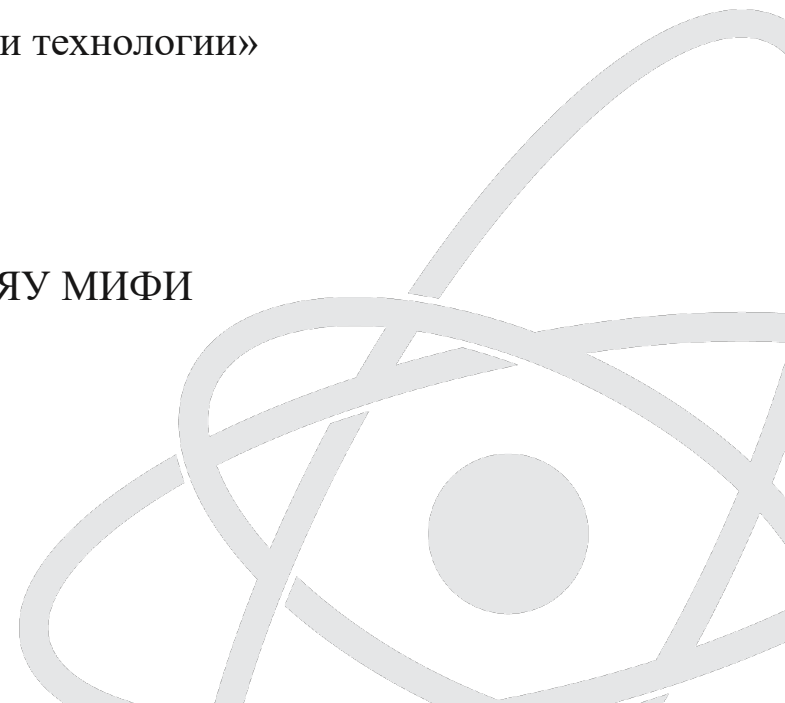
Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»

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

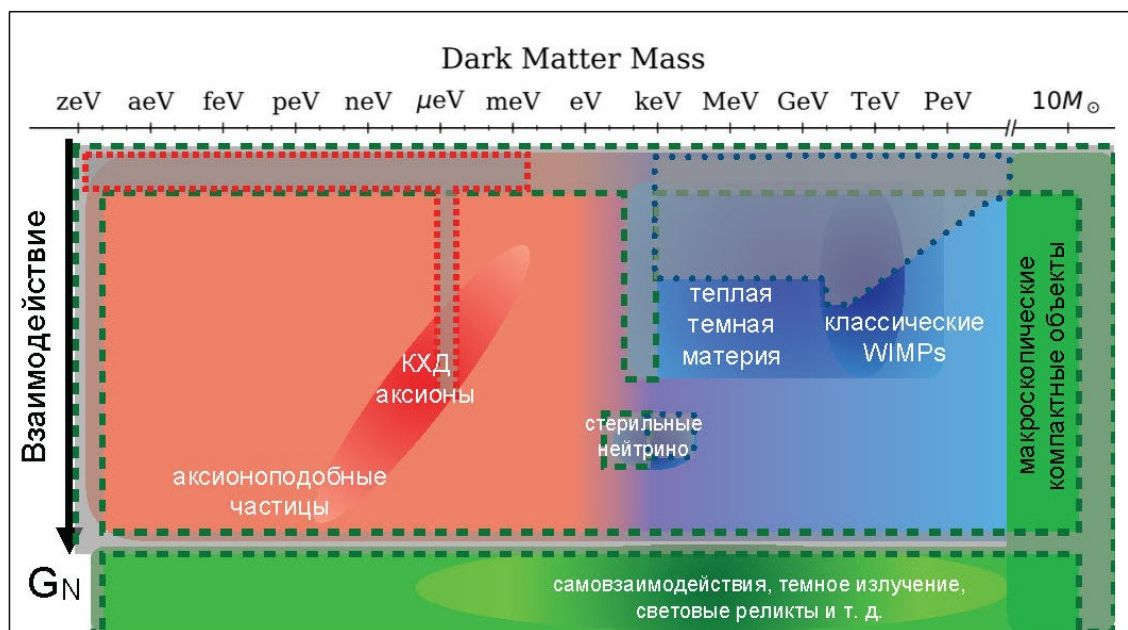
Москва, 2026 год



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 нейтрино на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Pure) и кремниевых ФЭУ.

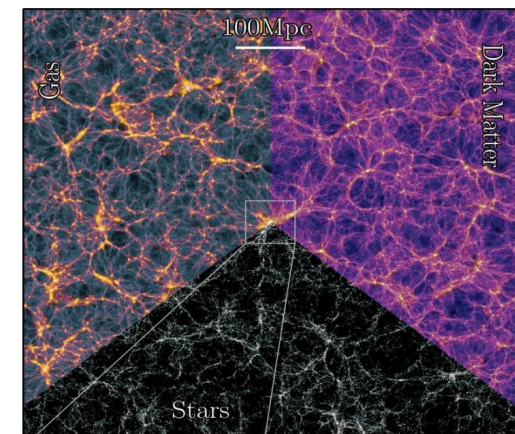
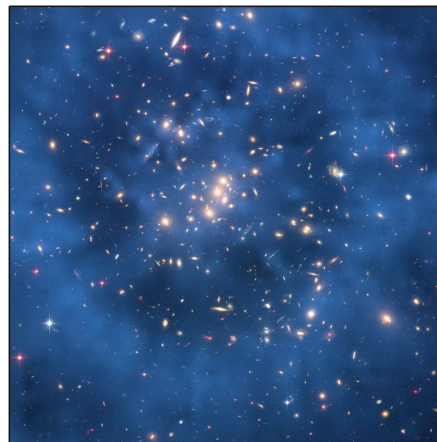
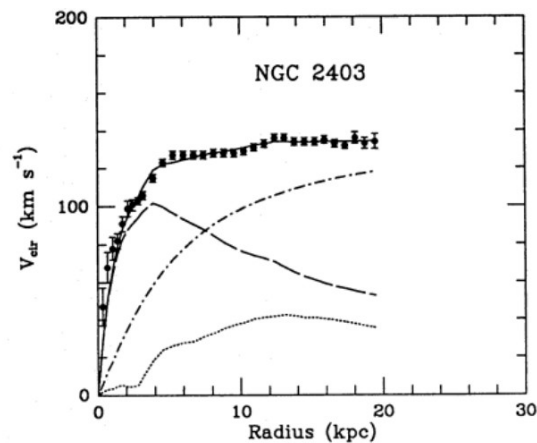


Текущий статус различных кандидатов на темную материю

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.

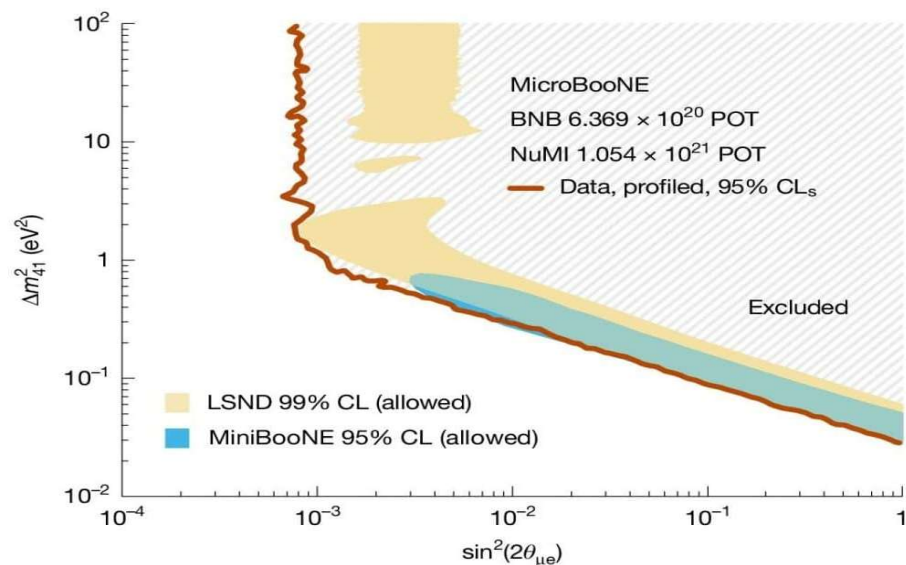


Пример ротационной кривой Изображение кольца темной материи Фрагмент симуляции MTNG

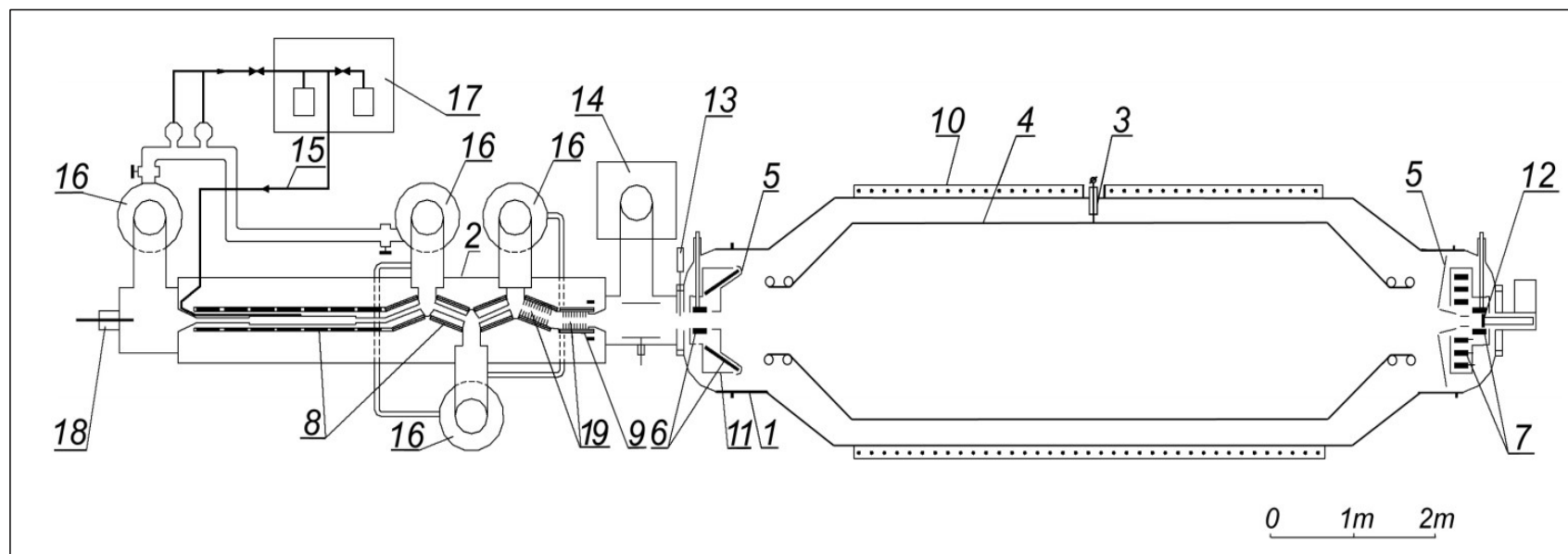
Стерильное нейтрино

Перспективным кандидатом на роль частиц темной материи является стерильное нейтрино. На существование стерильных нейтрино указывают следующие аномалии:

- LSND-аномалия - избыток электронных антинейтрино;
- Избыток в эксперименте MiniBooNE;
- Реакторная аномалия - недостаток антинейтрино на коротких расстояниях;
- Галлиевая аномалия - недостаток электронных нейтрино от источников.



Актуальные ограничения на параметры стерильного нейтрино

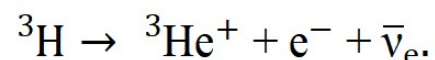


1 – Вакуумный бак спектрометра; 2 – вакуумный бак источника; 3 – высоковольтный ввод; 4 – электрод спектрометра; 5 – заземляющие электроды; 6, 7, 8, 9 – с верхпроводящие катушки; 10 – «теплые» катушки; 11 – кожух, заполненный жидким азотом; 12 – детектор, охлаждаемый жидким азотом; 13 – вакуумный шиббер; 14 – титановый насос ; 15 – замкнутая система циркуляции трития; 16 – диффузионные насосы; 17 – система хранения и очистки трития; 18 – электронная пушка; 19 – криогенный аргоновый насос

Схема установки «Троицк ню-масс»

Методика поиска стерильных нейтрино

На установке измеряется спектр электронов от бета-распада трития, в котором нейтрон становится протоном с испусканием электрона и электронного антинейтрино:



Граничная точка этого спектра, то есть максимальная кинетическая энергия электрона в том случае, если масса нейтрино равна 0, определяется как

$$Q_\beta = M_i - M_f - m_e,$$

где M_i – масса начального ядра, M_f – масса ядра, родившегося в результате распада, m_e – масса электрона.

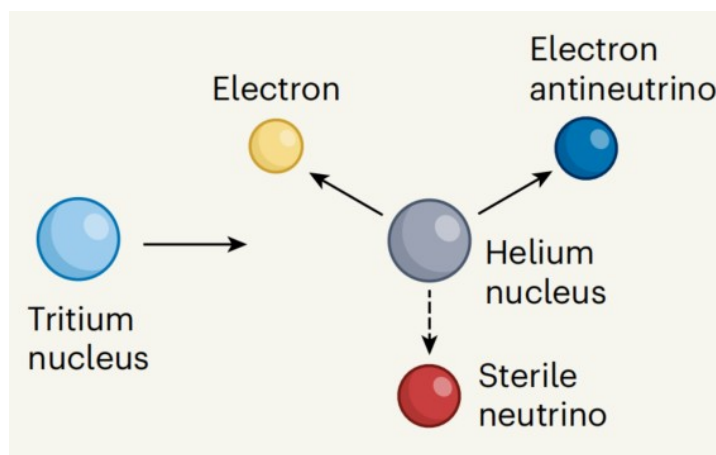
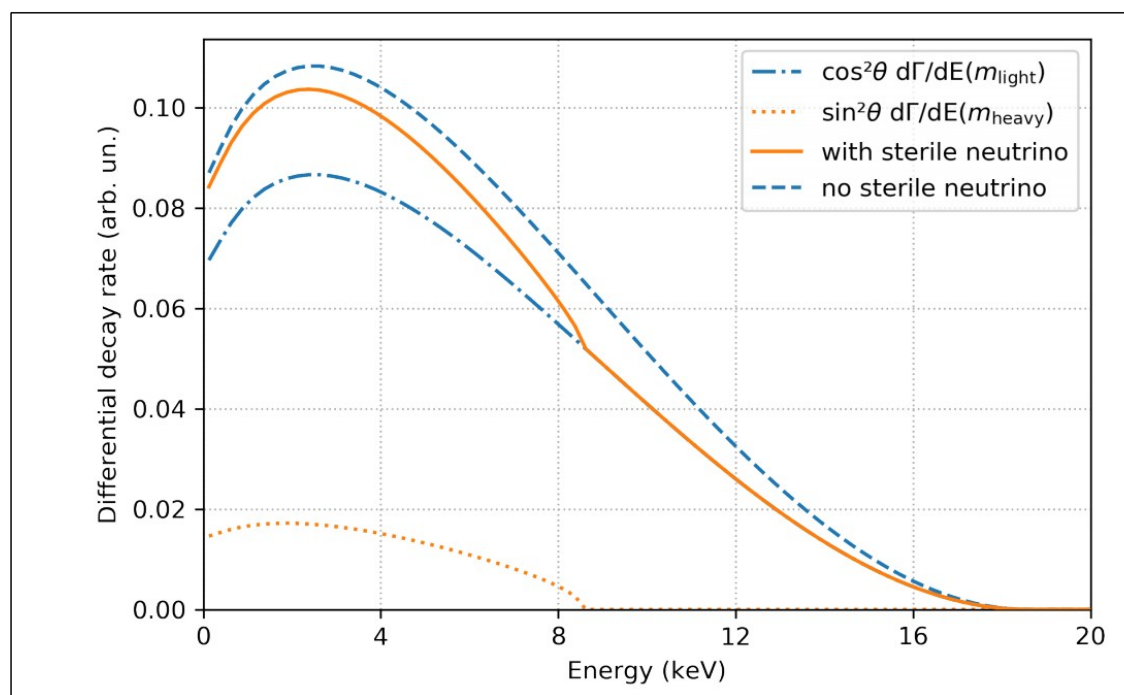


Схема бета-распада трития

Методика поиска стерильных нейтрино

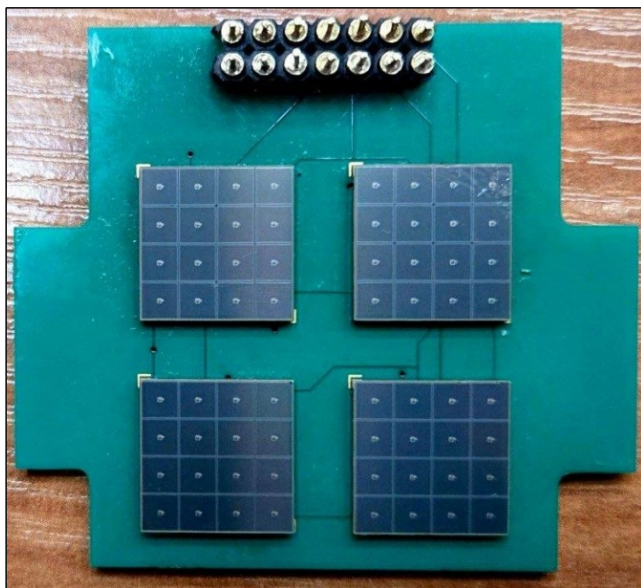
Суть поиска в эксперименте «Троицк ню-масс» заключается в следующем: если существует стерильное нейтрино, то на энергетическом спектре электронов от распада трития это должно проявляться как излом и широкое искажение.



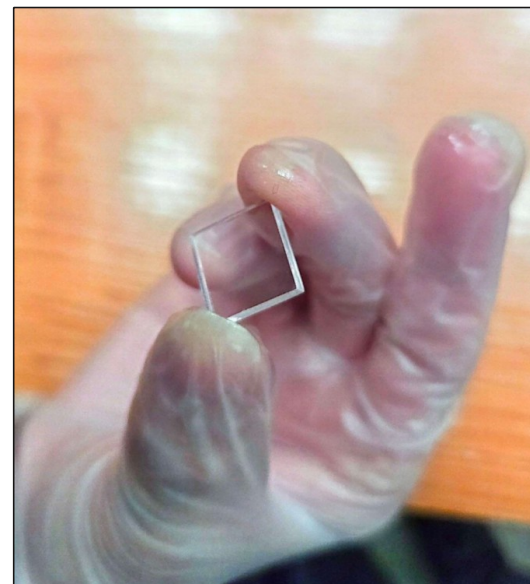
Спектр бета-распада трития с примесью стерильных нейтрино массой 10 кэВ и амплитудой смешивания $\sin^2(\theta) = 0,2$

В состав детекторного модуля входят следующие элементы:

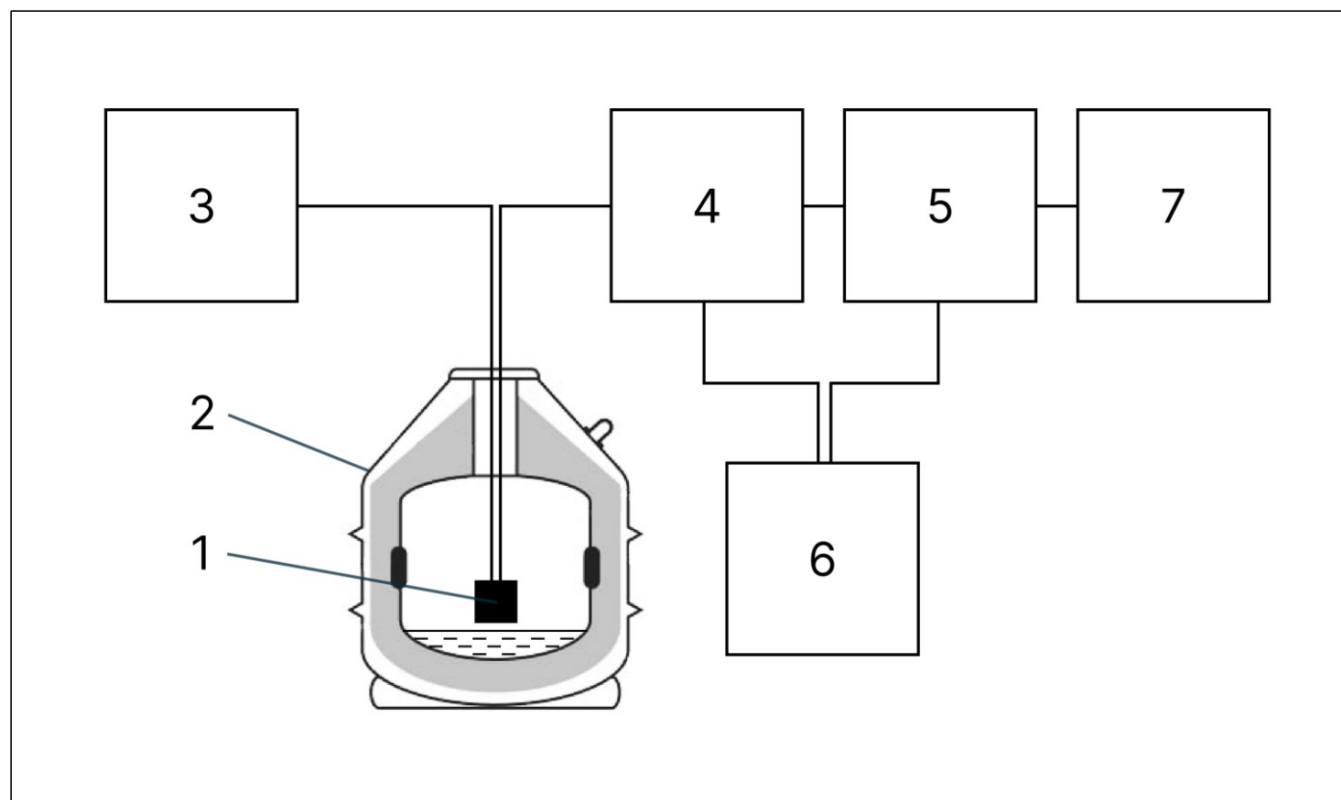
- 1) Плата с размещенными на ней матрицами SiPM Hamamatsu модели S14161-3050HS-04;
- 2) Сцинтилляционные кристаллы CsI (pure);
- 3) Пластиковый корпус.



Плата с SiPM



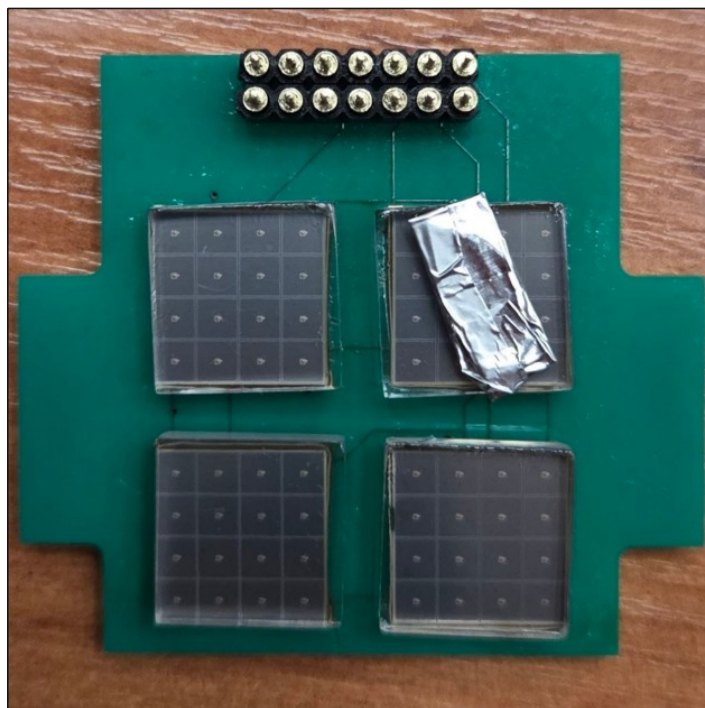
Кристалл CsI(pure)



1 – детектор, 2 – сосуд Дьюара, 3 – источник напряжения, 4 – плата усилителей,
5 – АЦП, 6 – источник питания, 7 – ПК

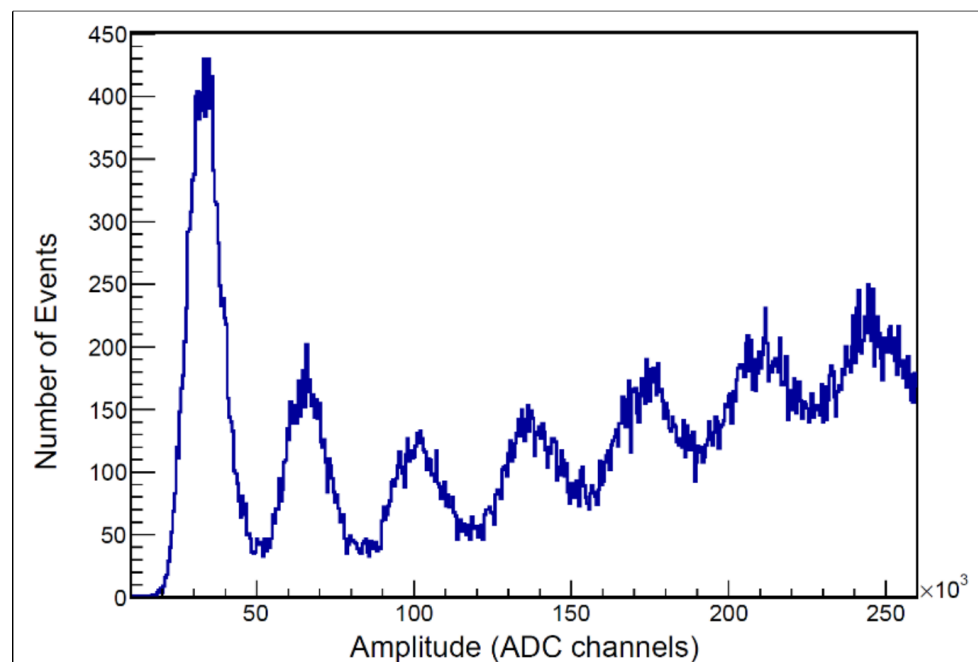
Схема установки для проверки и испытания детектора

Детектор был помещен в сосуд Дьюара над жидким азотом с непосредственно размещенным на сцинтилляторе тритиевым источником, обернутым в фольгу толщиной 10 мкм, что было достаточным для экранирования от электронов.

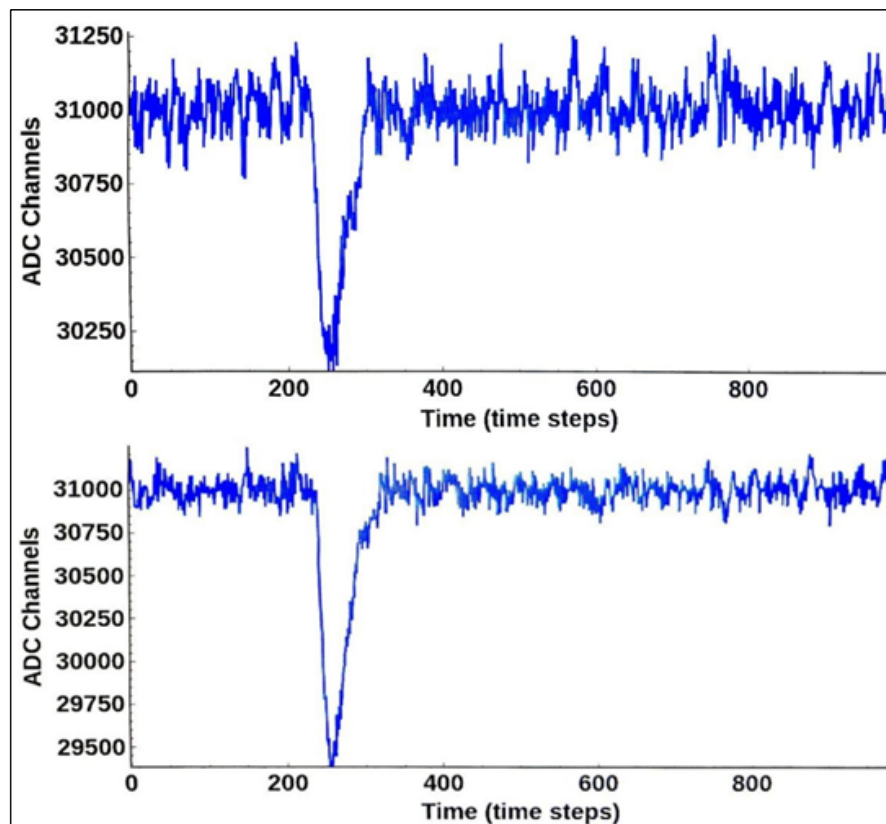


Детектор с размещенным источником

С помощью данного распределения было вычислено количество каналов АЦП, соответствующее величине 1 фотоэлектрона, как разность между координатами положений максимумов однофотоэлектронного пика и двухфотоэлектронного пика. Полученное значение составило 34×10^3 каналов.



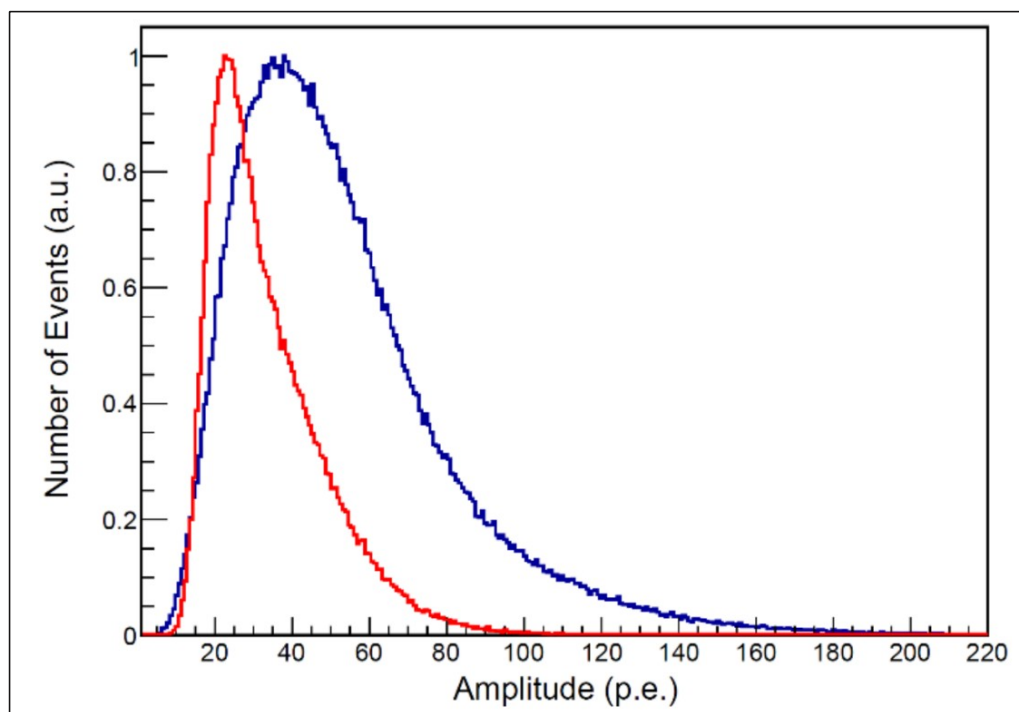
Дискретный амплитудный спектр сигналов с детектора, обусловленный вкладами отдельных фотоэлектронов



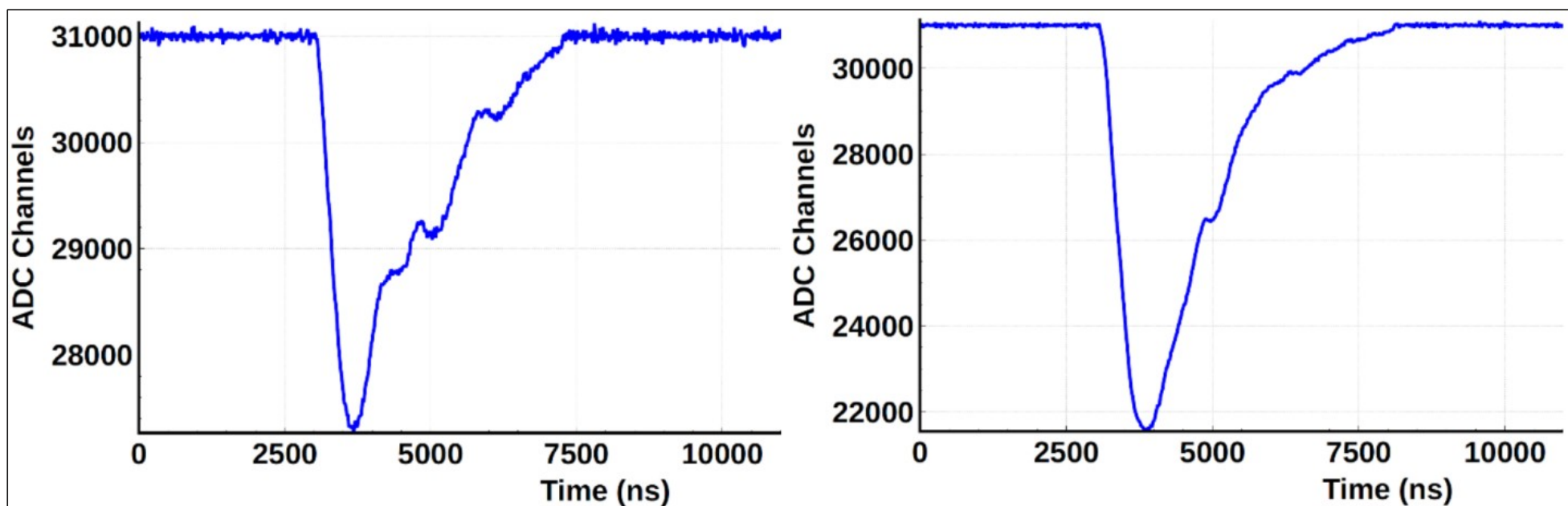
Сверху – сигнал от срабатывания одной ячейки
Снизу – сигнал от срабатывания двух ячеек одновременно

Измерение спектра электронов

После набора амплитудного спектра детектор был разморожен и извлечен, в фольге было сделано отверстие, играющее роль коллиматора для электронов, после чего был набран амплитудный спектр. Пик электронного спектра приходится на 36 фотоэлектронов.

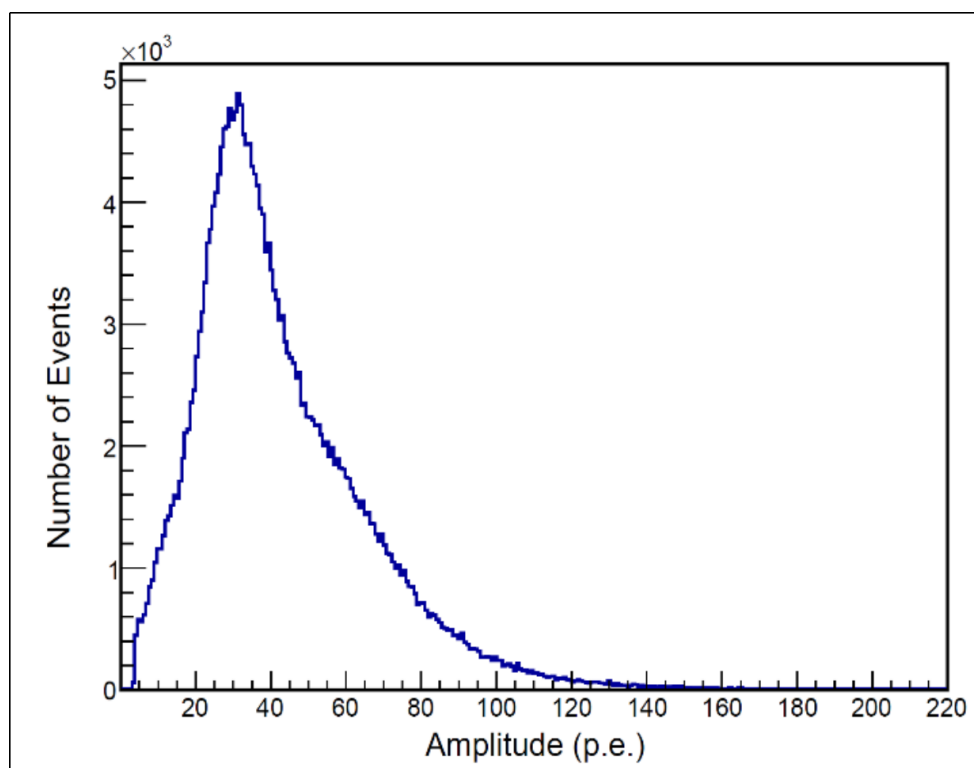


Красным цветом – спектр, полученный при облучении тормозными фотонами
Синим цветом – спектр, полученный при облучении электронами



Типичные сигналы от попадания электронов

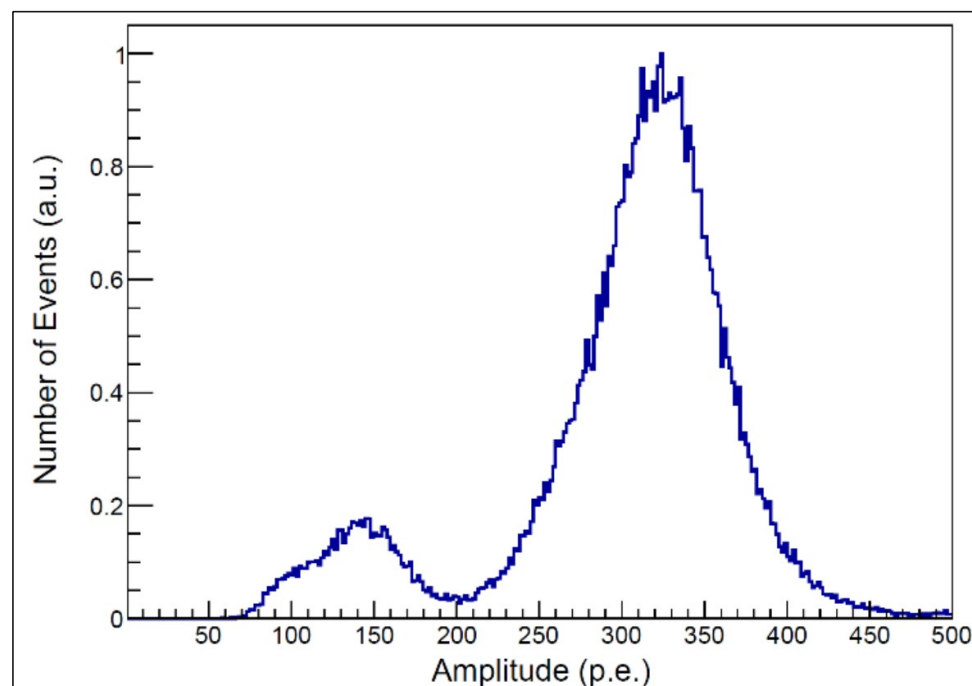
Далее было произведено тестирование детектора с нанесением спектросмещающего состава между кристаллом сцинтиллятора и SiPM. Пик приходится на 35 фотоэлектронов.



Амплитудный спектр, полученный при облучении детектора электронами, в случае покрытия контактной поверхности сцинтиллятора спектросмещающим составом

Энергетическая калибровка

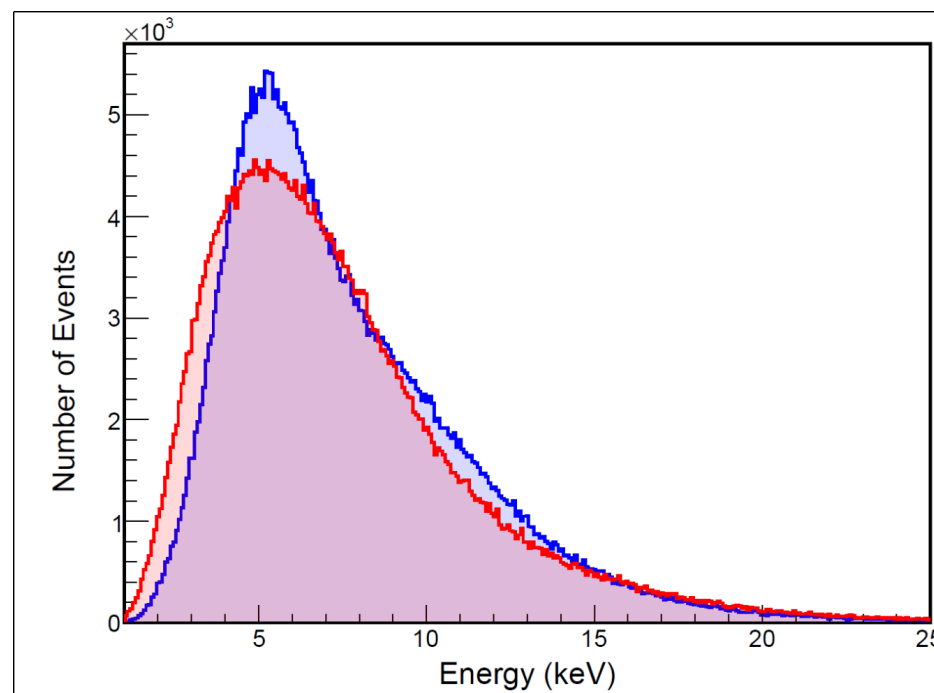
Для построения энергетического спектра тритиевых электронов, была выполнена калибровка с использованием эталонного источника фотонного излучения ^{241}Am . Пик 59,5 кэВ приходится на 330 ф.э., что соответствует светосбору около 5,5 ф.э./кэВ.



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

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 спектросмещающего

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

Исходя из полученных данных можно выделить следующие параметры детектора:

- Чувствительность к тритиевым электронам на всем спектре излучения;
- Удельный светосбор в 5,5 ф.э./кэВ;
- Энергетический порог от 500 эВ при установлении порога регистрации 2-3 фотоэлектрона;
- Длительность сигнала 5 мкс;
- Сегментированность, потенциально обеспечивающая увеличение максимальной загрузки детектора;
- Способность работать при температуре ниже 100 К.

По результатам исследования можно сделать вывод о применимости сцинтилляционного детектора предложенной конфигурации для использования в эксперименте по поиску стерильных нейтрино. Следующим этапом должна стать интеграция детектора в установку «Троицк ню-масс» и проведение тестирования в условиях рабочей задачи.



*СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!*