



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Проект САТУРН

SaTURNE

Sarov **T**ritium **U**ltra **R**ich **N**eutrino **E**xperiment

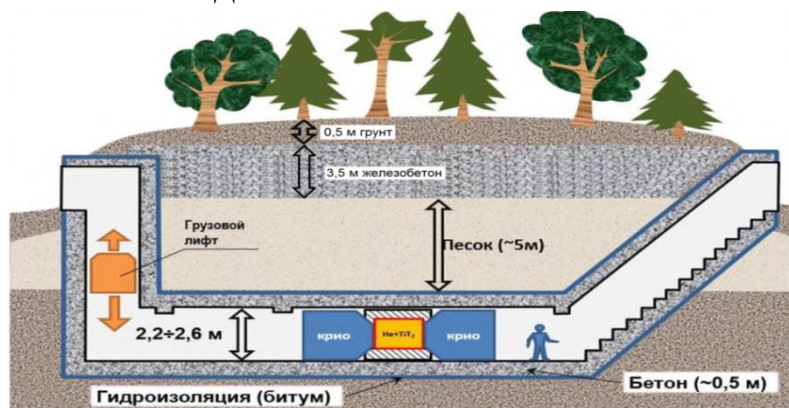
Юхимчук Аркадий Аркадьевич
arkad@triton.vniief.ru, +7 8313023473

Совет РАН по физике нейтрино и нейтринной астрофизике 11.12.2025

Проект САТУРН (SaTURNЕ). Измерение электромагнитных характеристик нейтрино с использованием интенсивного тритиевого источника (анти)нейтрино.

Теоретическое сопровождение (ФФ МГУ)

Низкофоновая нейтринная лаборатория
20-25 м водного эквивалента **ВНИИЭФ**



Детекторы

Низкотемпературный
сцинтилляционный:

- CsI (80 K)
- Порог - 100 эВ.

2028 г.: $\mu_\nu \sim 5 \times 10^{-12} \mu_B$

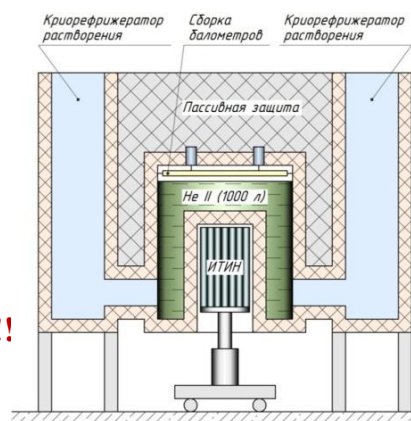
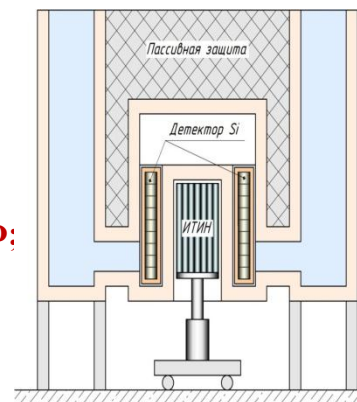
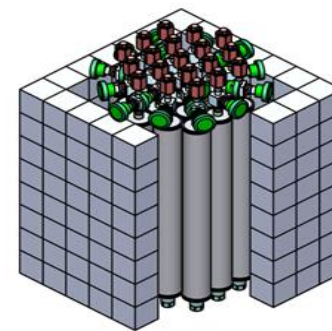
ИЯИ РАН; ВНИИЭФ

Криогенный Si с NTL
эффектом

Порог - $\sim 1-4$ эВ.

2029 г. $\mu_\nu \sim (1-2) \times 10^{-12} \mu_B$

**ЛЯП ОИЯИ; ВНИИЭФ;
НГТУ; ФТИ**



Жидкогелиевый:

$T = 10-40$ мК;

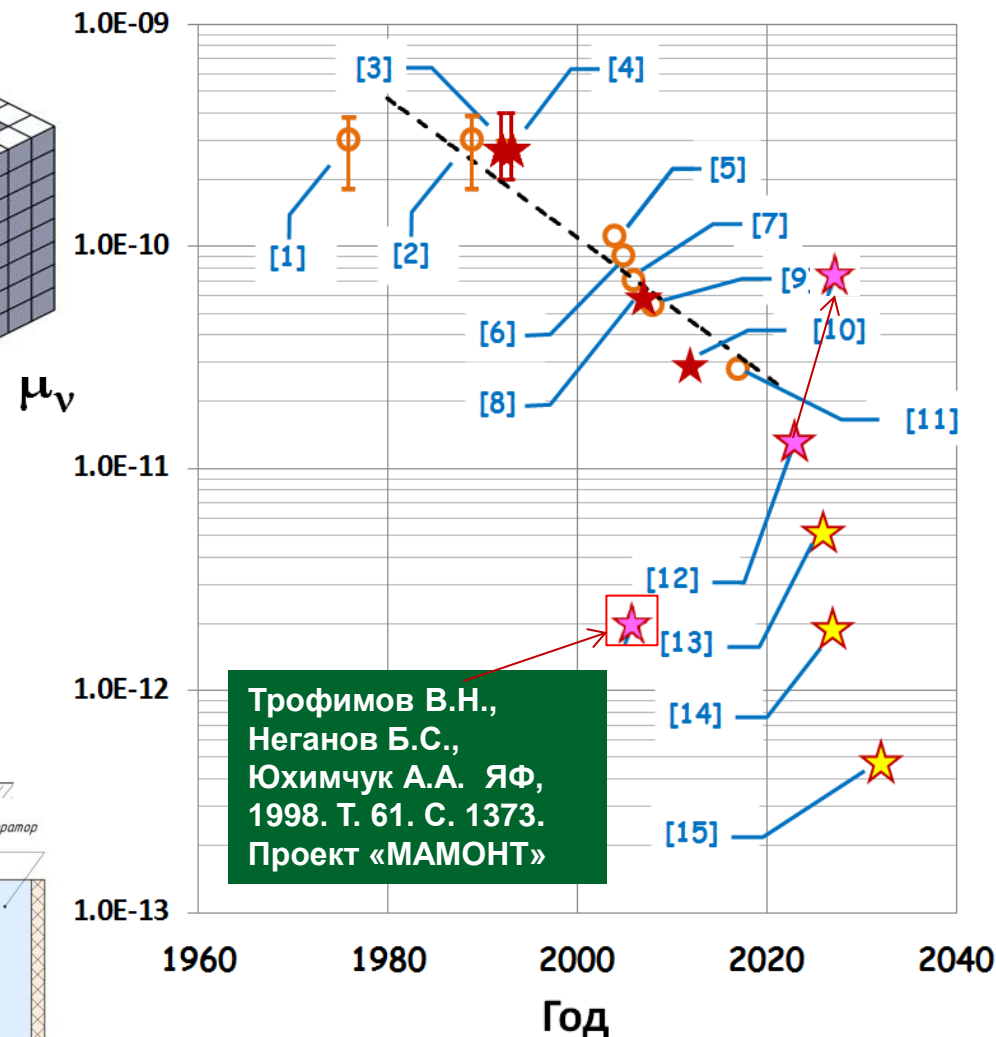
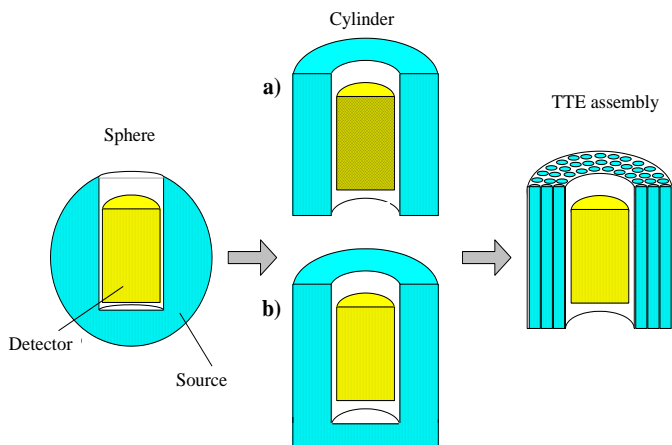
Порог - $\sim 0,01$ эВ.

2032 г. $\mu_\nu \sim (3-4) \times 10^{-13} \mu_B$

**ВНИИЭФ; ЛЯП ОИЯИ;
НГТУ**

?ФИНАНСИРОВАНИЕ!!!

Эволюция ТИН (ВНИИЭФ)



G.C. McLaughlin, C. Volpe arXiv:hep-ph/0312156v2 21Sep 2004
Reactor – $10E-10$; β beam – $10E-11$; Tritium – $10E-12$

А.А. Юхимчук и др. Физика изотопов водорода.
ФИЗМАТ, 2023, том.1, №1, с.5-19

Свойства трития и особенности эксперимента с ним

Свойства трития

Постоянная полураспада, $T_{1/2}$, лет $T_{1/2}$, дней	$12,232 \pm 0,004$ (1 год=365,25 дней) $4500,88 \pm 1,46$
Энергия распада макс., кэВ средняя, кэВ	18,582 5,685
Тепловыделение от распада	0,328 Вт/г; 1,954 Вт/моль
Удельная радиоактивность T_2 (газ)	355,9 ТБк/г (9,619 кКи/г) 2146,9 ТБк/моль (58,023 кКи/моль) 2,589 Ки/см ³ =0,386 см ³ /Ки (при НУ) 2,372 Ки/см ³ =0,422 см ³ /Ки (при НУ)
Плотность T_2 (газ) (н.у.), 10 ³ г/см ³	0,269122
Пробег β^- частиц в: воздухе (н.у.), см T_2 (газ н.у.), см воде (сухом материале, масле, полимерах при $\rho=1$ г/см ³), мкм в стали, мкм	0,036 (5,7 кэВ); 0,45 (18,6 кэВ) 0,26 (5,7 кэВ); 3,2 (18,6 кэВ) 0,42 (5,7 кэВ); 5,2 (18,6 кэВ) 0,06 (5,7 кэВ)

Водород – 96% во Вселенной: $^1\text{H} / ^2\text{H} / ^3\text{H} = 1/1,5 \cdot 10^{-4}/10^{-18}$

^3H образуется в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космического излучения с O_2 и N_2 .

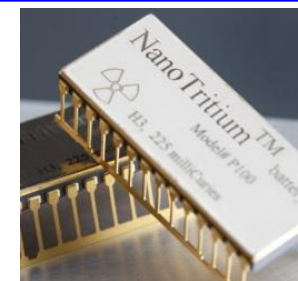
По разным оценкам на Земле $3,5 \div 12,5$ кг. После испытаний ЯО (1970) - $450 \div 670$ кг, сегодня $28 \div 42$ кг

Нарабатывается в реакторах:

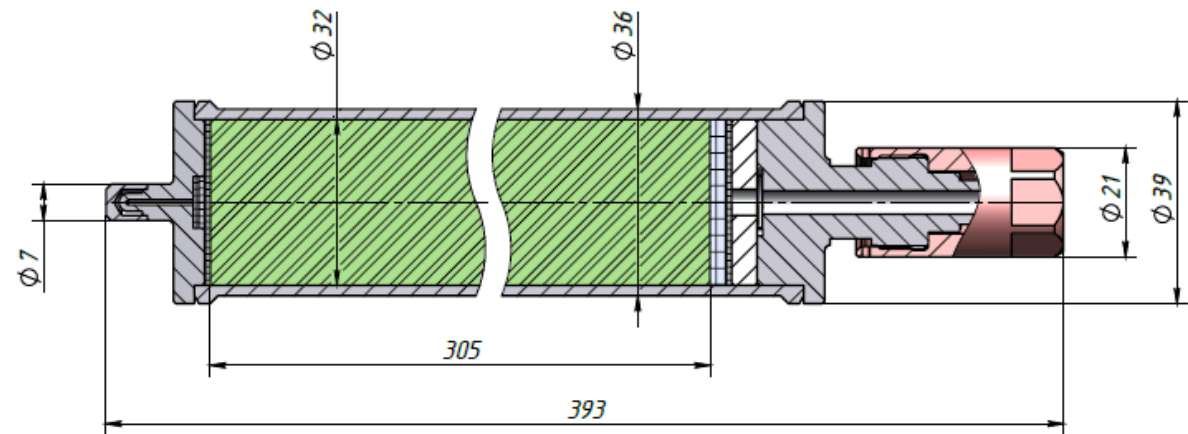
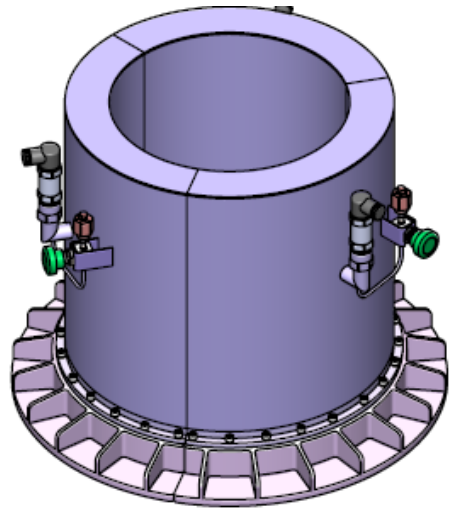
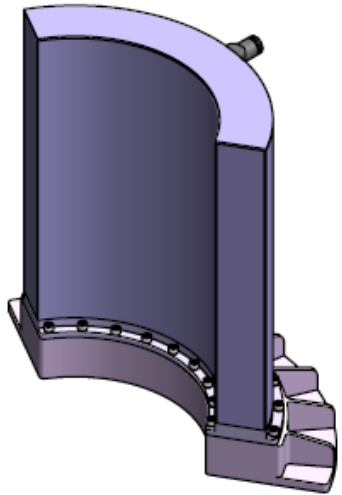


Применяется: системы нейтронного инициирования и бустинга ЯЗ; фундаментальная физика; **термоядерная энергетика; метки в медицине; светознаки; прицелы; электробатарейки и т.п.**

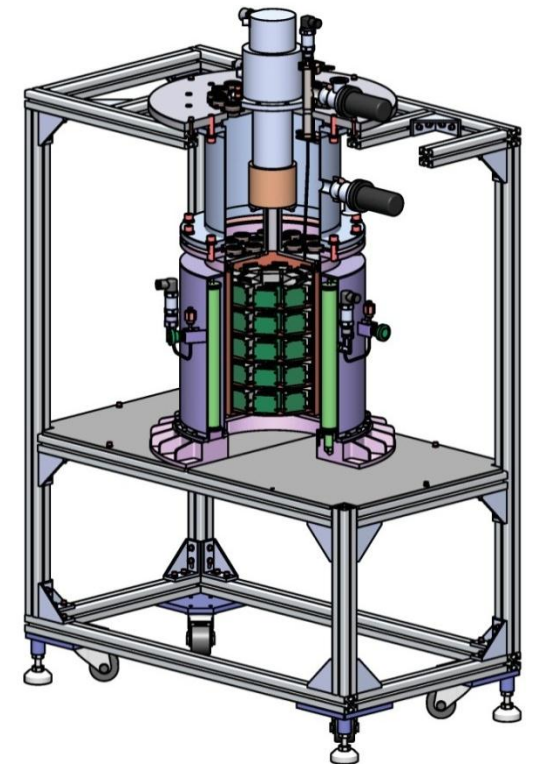
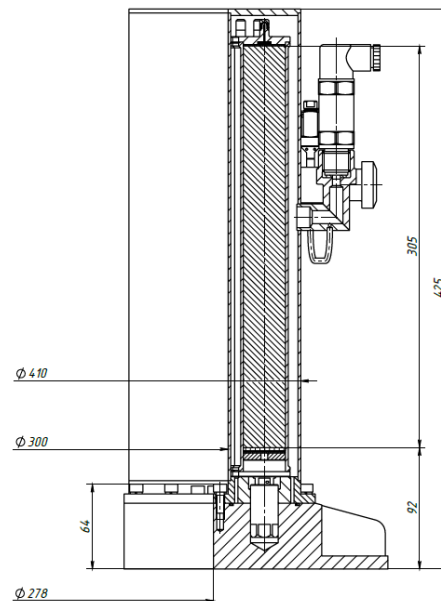
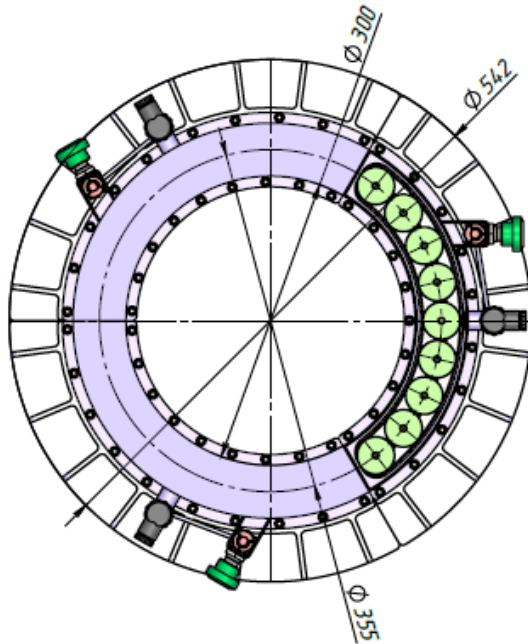
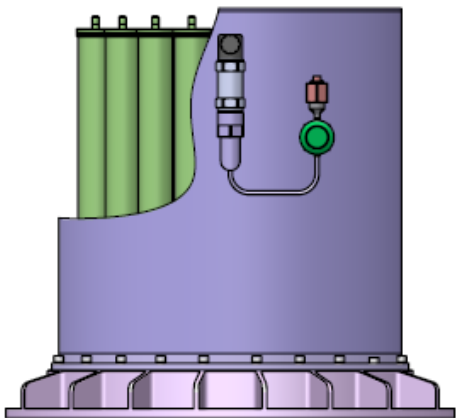
Основная опасность трития – внутреннее облучение!!!



Тритиевый источник нейтрино активностью 10 МКи



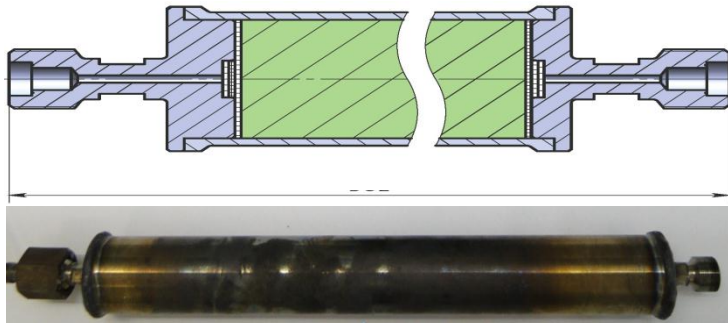
Трубчатый элемент:
 $M = 1150$ г; $M_{T_2} = 37$ г;
 $M_{Ti} = 318$ г.
Срок службы – 4-5 лет.



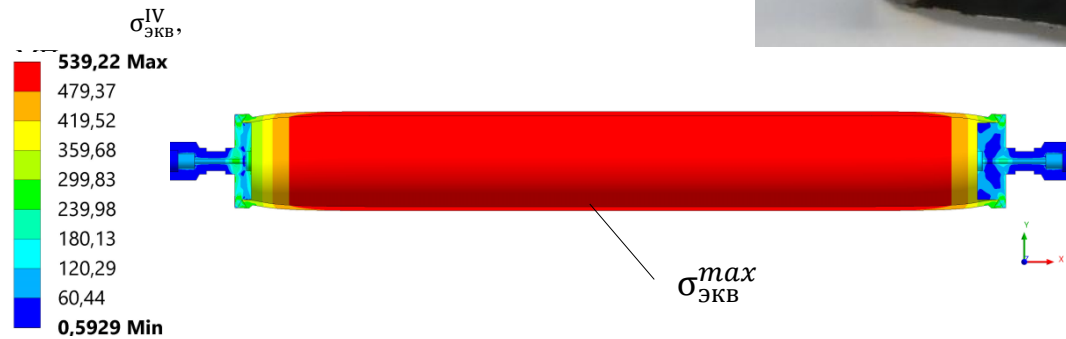
100 x 55 x 157 cm

ТЭ безопасность, надежность

Оценка прочностной надежности

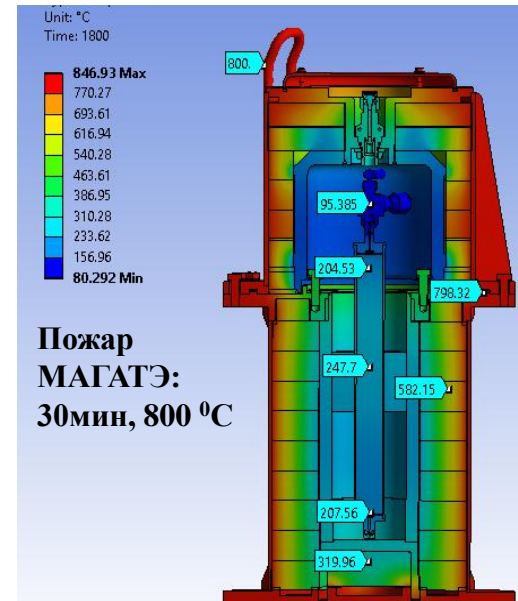
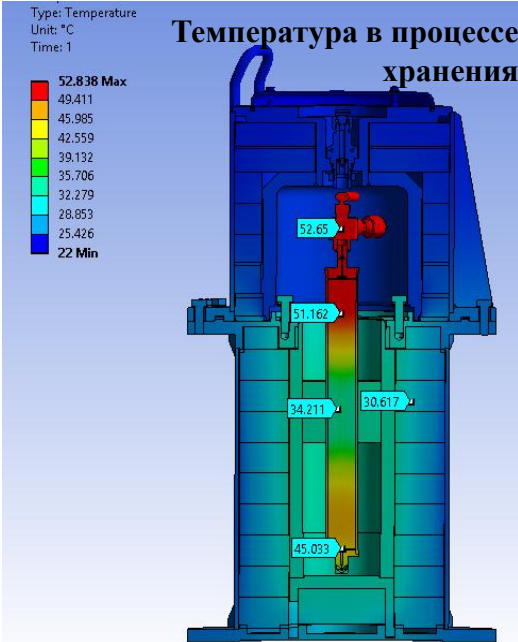


$P_{пр} = 53 \text{ МПа}$



НДС конструкции в предельном состоянии

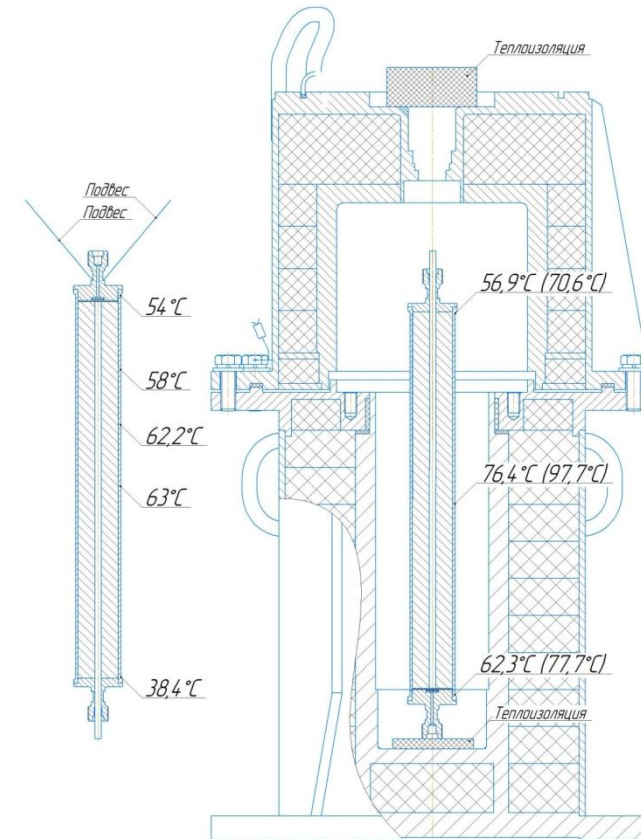
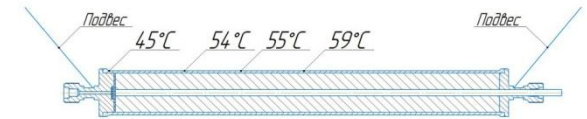
- Предельная нагрузка (несущая способность) макета ТЭ при нагружении давлением аргона составила $P_{пр} = 53 \text{ МПа}$ для $P_{раб} = 25 \text{ МПа}$.
- Предварительная оценка прочностной надежности ТЭ в условиях эксплуатации составляет свыше **0,9999** при уровне доверительной вероятности 0,95.



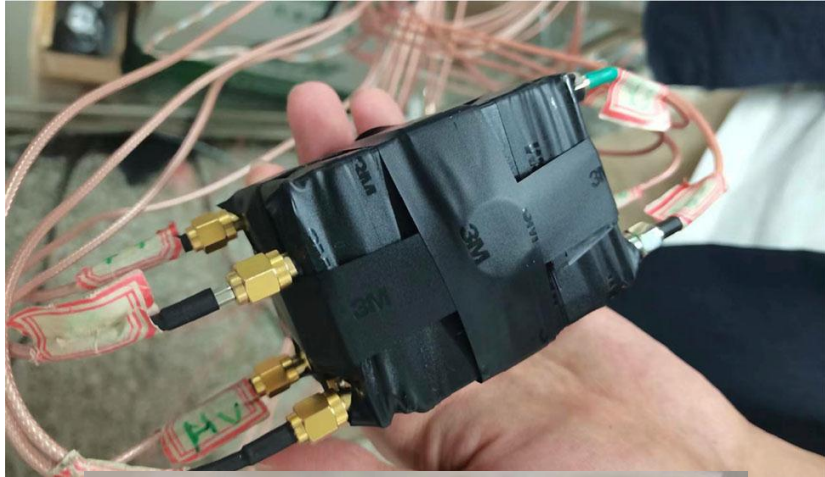
Тепловой эксперимент на макете

1 г \Rightarrow 0,328 Вт
37 г \Rightarrow 12,14 Вт

12 (17,5) Вт



Сцинтилляционный CsI детектор. Что в мире?

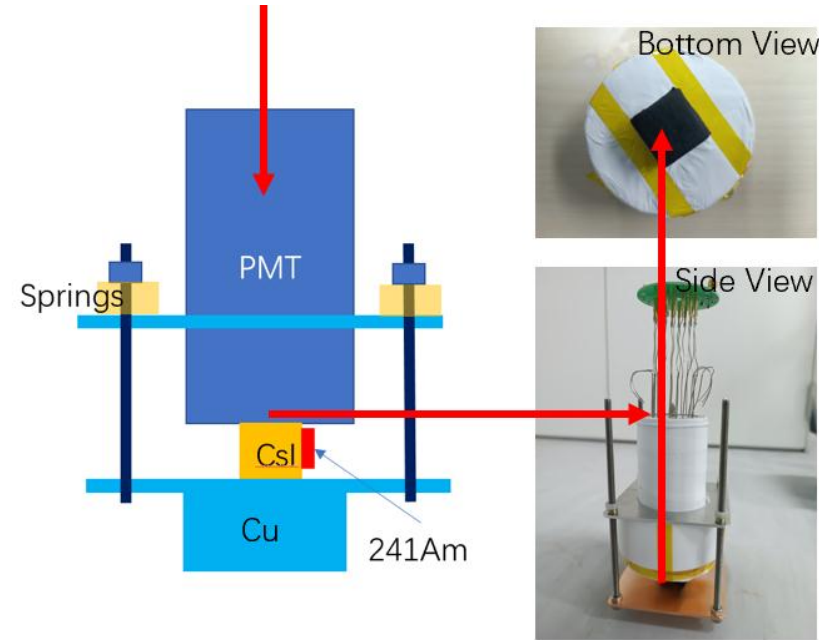


CsI: 50x50x50 мм³, SiPM матрицы с двух сторон.
Светосбор: 21 ф.э./кэВ при номинальном напряжении, 30 ф.э./кэВ при экстремальном напряжении.

Порог регистрации определяется шумами SiPM.

Eur. Phys. J. C (2024) 84:440

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-12800-y>



CsI: 20x20x20 мм³.

Съем сигнала: большой криогенный ФЭУ.

Светосбор: 35 ф.э./кэВ

Экстремально дорогой.

Не годится для больших детекторов.

NUCL SCI TECH **36**, 82 (2025).

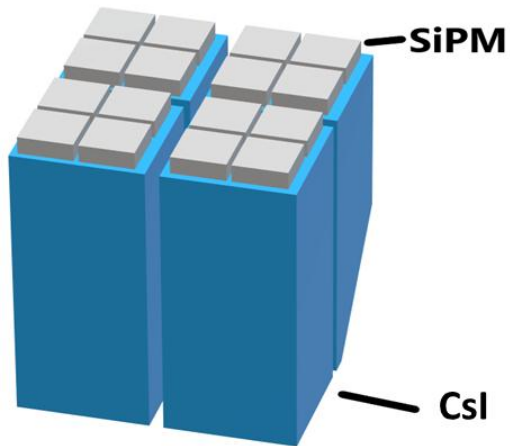
<https://doi.org/10.1007/s41365-025-01651-1>

Сцинтилляционный CsI детектор. Структура детектора

Модуль детектора:

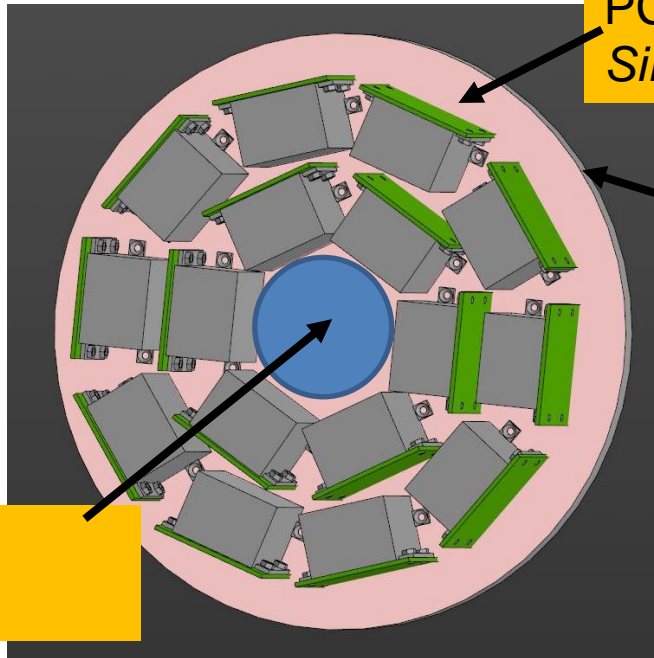
Базовый элемент – 4 кристалла $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ или $\text{CsI}(\text{pure})$, помещенный в контейнер из пластика. Считывание света – *SiPM* матрица.

Вес 4 кристаллов ~ 100 г



Вес одного модуля ~ 150 г

Слой детектора



PCB –плата с *SiPM*

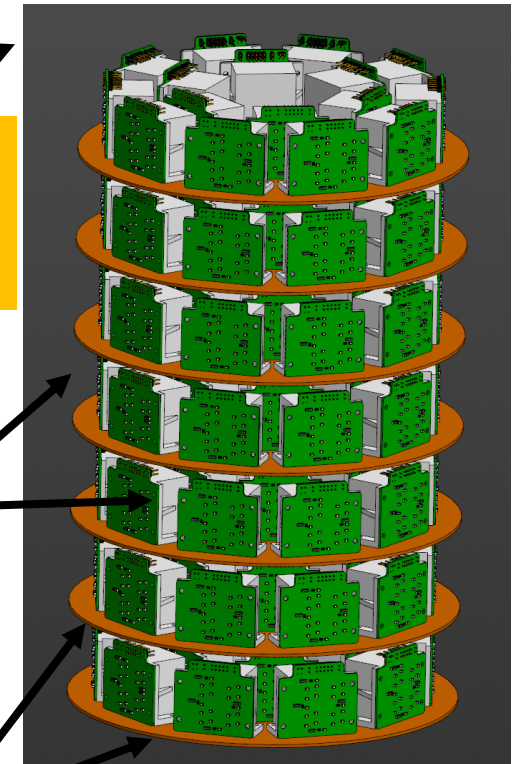
Медная труба
снаружи
детектора

Слои из
модулей

Отверстие для
кабелей

Один слой детектора состоит из 16 модулей с весом сцинтиллятора 1.6 кг. 64 кристалла и 64 канала электроники.

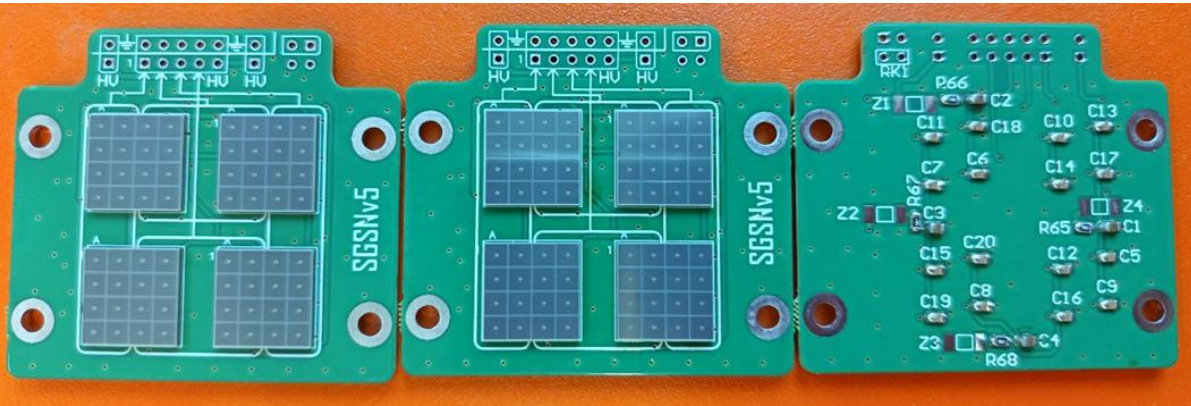
Детектор в сборе



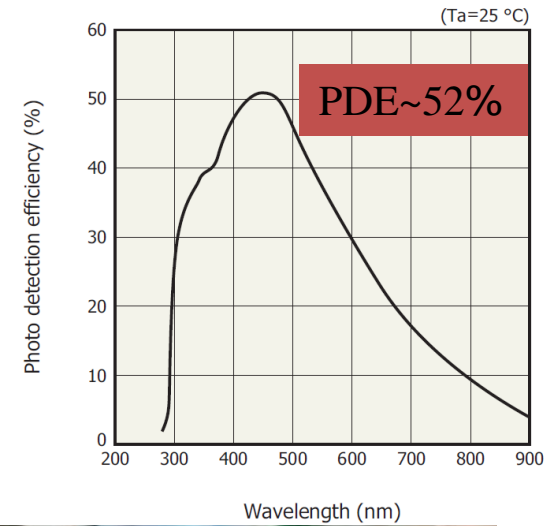
Медная пластина с
отверстием в центре
для кабелей.

Каждый слой – независимый малогабаритный детектор нейтрино с отдельным считыванием экспериментальных данных.

Детекторные модули



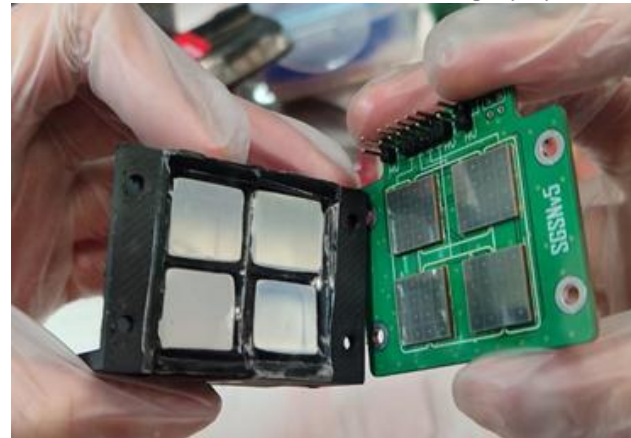
Фотодиодные матрицы и РСВ-платы



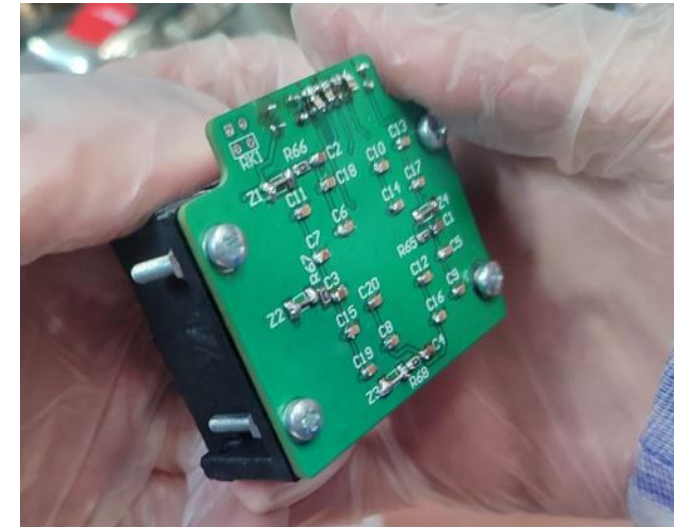
**Фотодиодные матрицы
Hamamatsu (Япония)
MPPC S14161-3050HS-04.**



Сотовые контейнеры для кристаллов



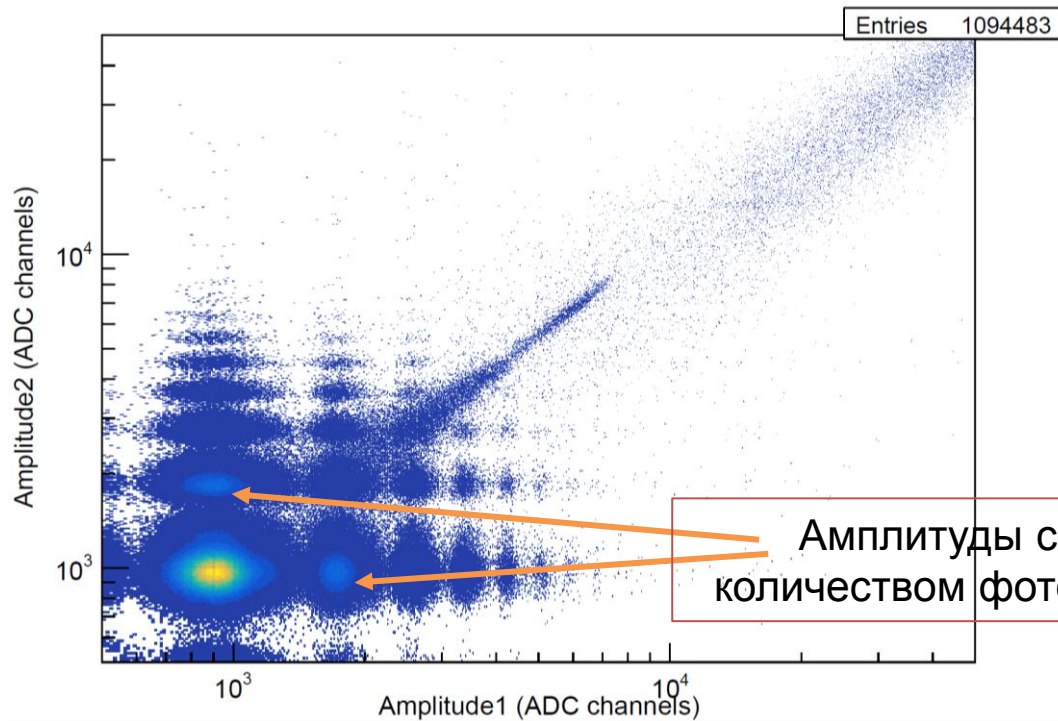
Сборка детекторного модуля



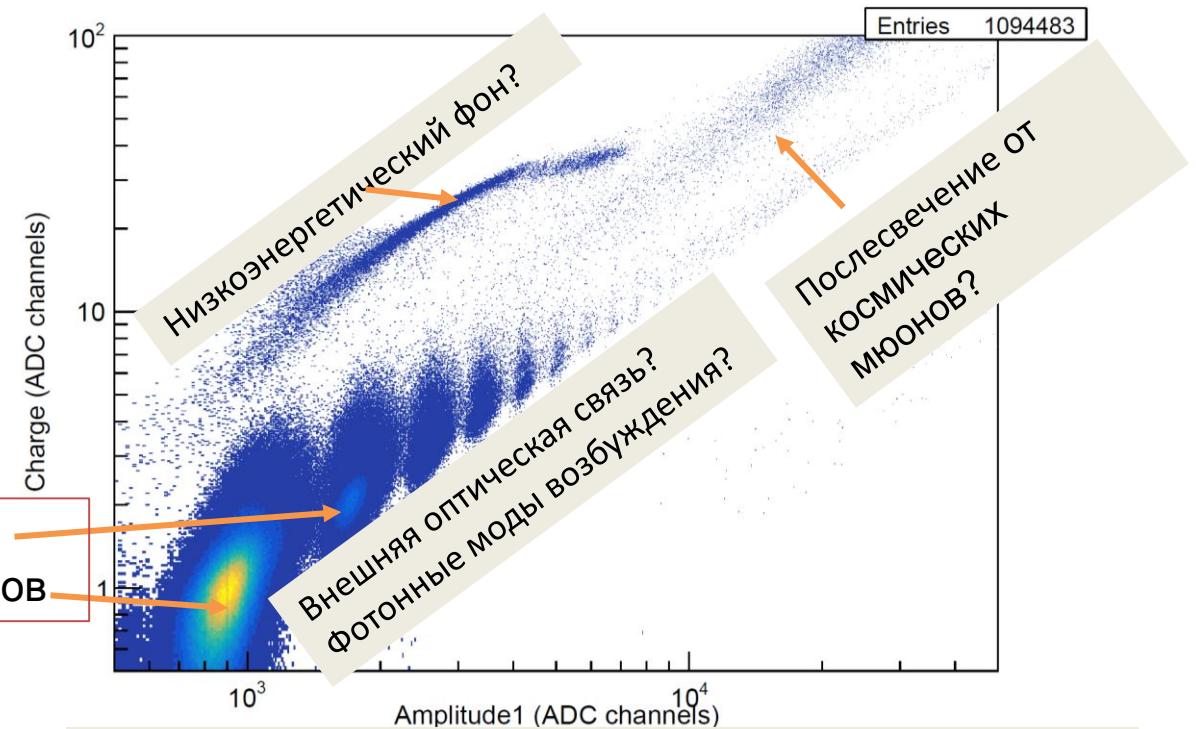
Готовый детекторный модуль

**В 2025 г. будут готовы к работе 2 слоя детектора, CsI(pure) сцинтиллятор готов для 5 слоев.
В планах в ближайшее время испытания по набору фоновой статистики в наземных условиях, низкофоновых (БНО) и НФНЛ (Саров).**

Первые эксперименты по набору фона детекторными модулями



Двумерная корреляция **амплитуд** с одного и того же кристалла.



Двумерная корреляция **заряда и амплитуды** с одного и того же кристалла.

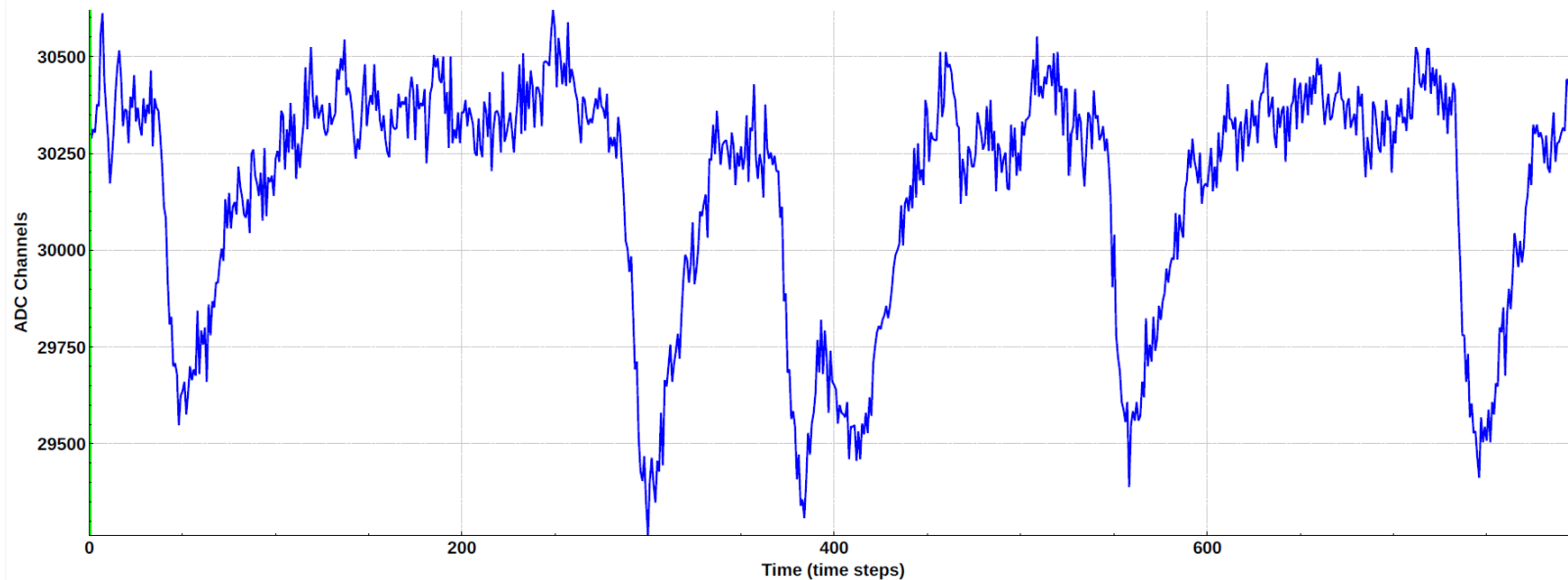
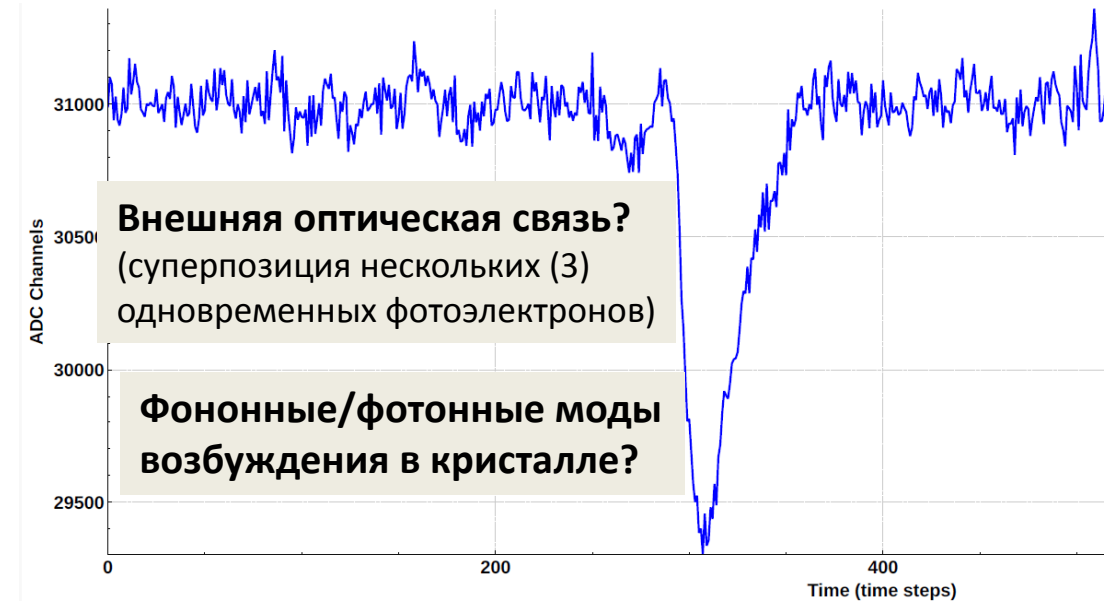
Время набора: одни сутки.

Количество событий: около 1 млн.

Более 90% событий - с амплитудой меньше 10 фотоэлектронов.

Несколько групп событий с различной природой.

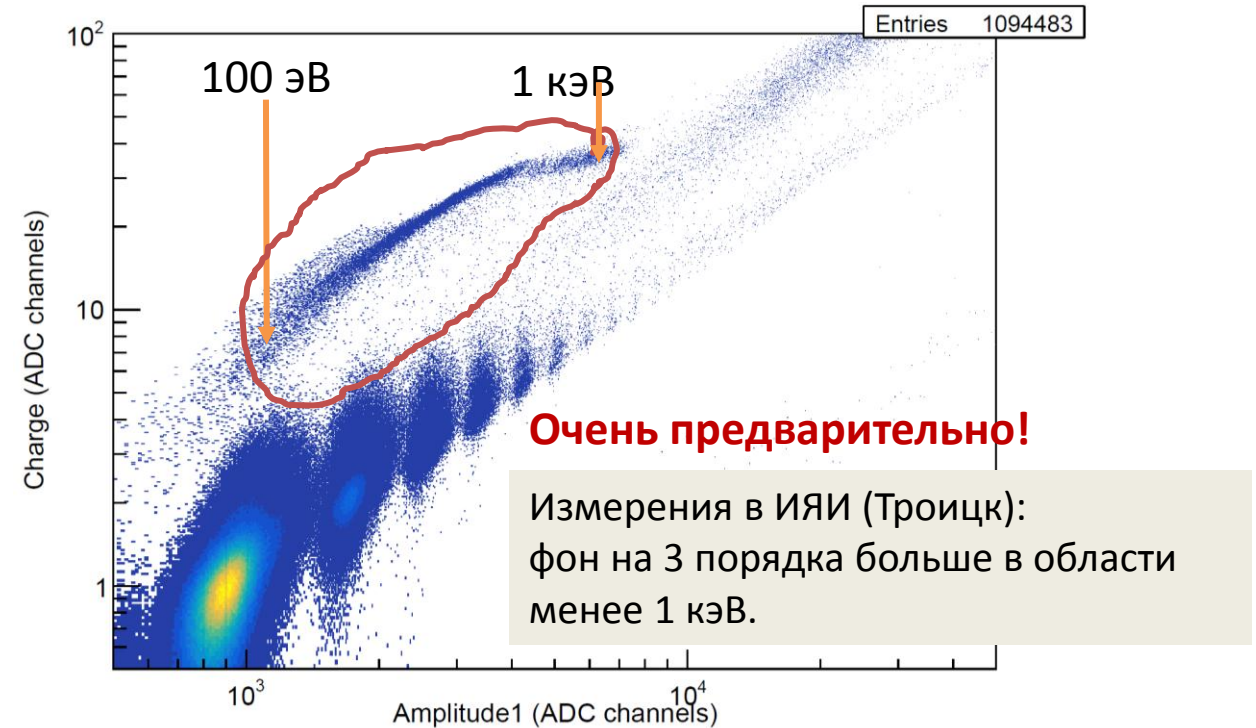
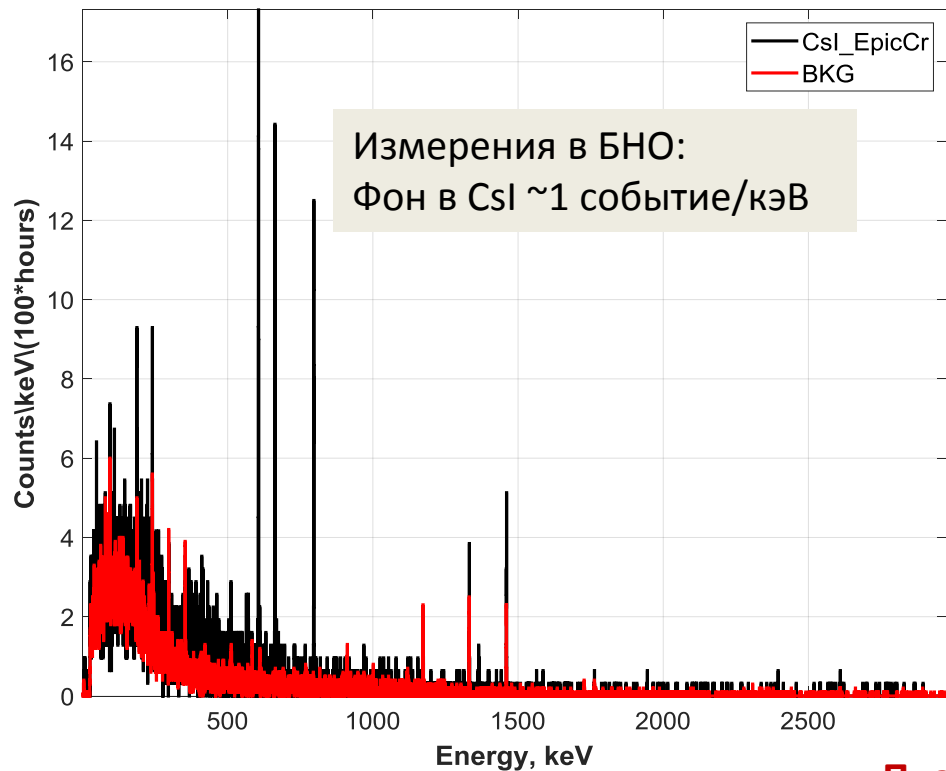
Примеры форм сигналов от различных событий



**Чтобы
идентифицировать
события необходим
анализ формы
сигналов!**

Послесвечение от космического мюона?
(набор (6) отдельных фотоэлектронов).

Ожидания от фона



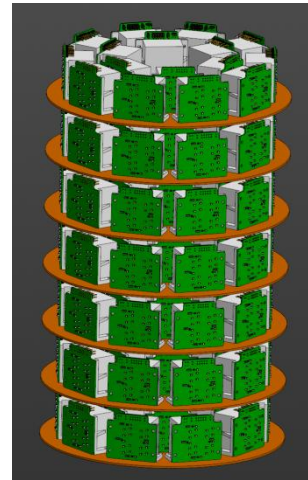
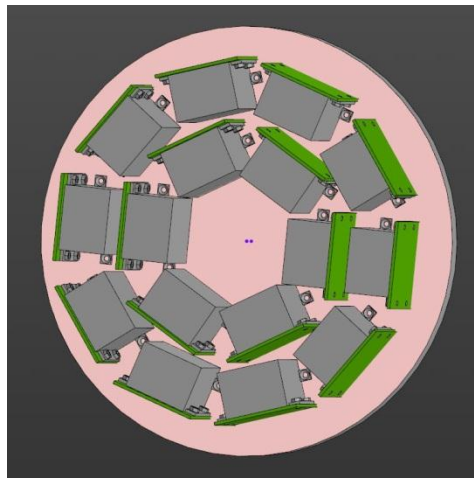
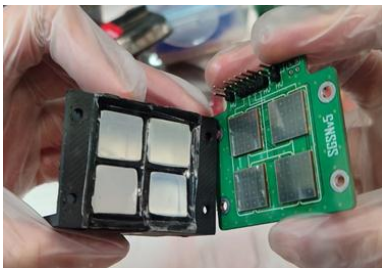
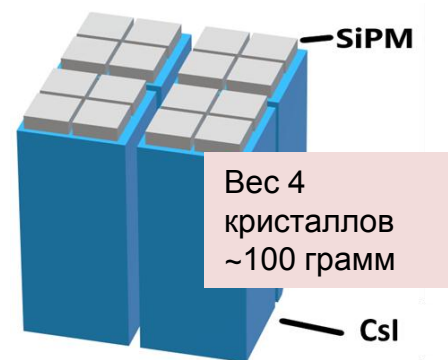
План работ по анализу фона:

- Необходимо идентифицировать природу различных типов событий.
- По всей видимости, основные фоновые события связаны с внешней оптической связью (X-talk) либо с возбуждением фотонных мод в кристалле.
- Корреляции между зарядом и амплитудой сигналов позволяют отделить различные типы событий при амплитудах более 5-10 фотоэлектронов.
- Анализ форм сигналов должен более явно показать природу событий.
- Опуститься по порогу ниже 5 фотоэлектронов очень проблематично, поскольку формы сигналов будут приближаться для X-talk и сцинтилляционной вспышки.
- Нужно разработать алгоритмы подавления фона и выделения полезных событий.

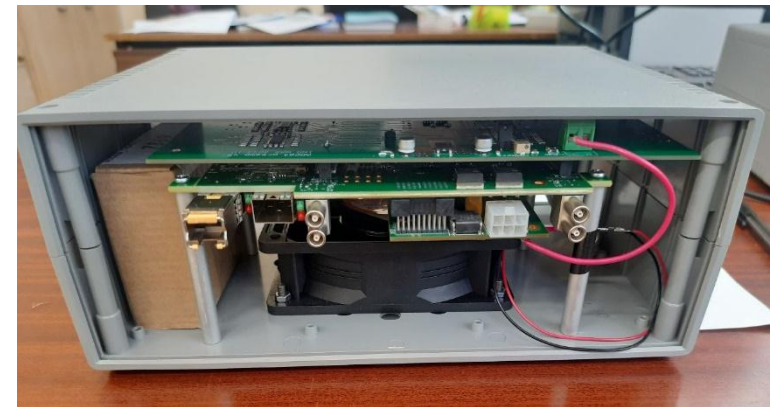
Планы

- 2025** Монтаж и тестирование малоразмерного сцинтилляционного детектора нейтрино.
- 2026** Изготовление полномасштабного сцинтилляционного детектора. Изготовление конструкции и криогенной системы детектора. Исследование уровня собственного радиоактивного фона сцинтилляционных модулей.
- 2027** Монтаж полномасштабного детектора в экспериментальной зоне. Тестирование полномасштабного детектора. Технический сеанс по набору экспериментальных данных с модельным ТИН в НФНЛ.
- 2028** Набор и анализ экспериментальных данных.

Модуль детектора:
Базовый элемент – 4 кристалла *CsI(pure)*,
помещенный в контейнер из пластика.
Считывание света – *SiPM* матрица.



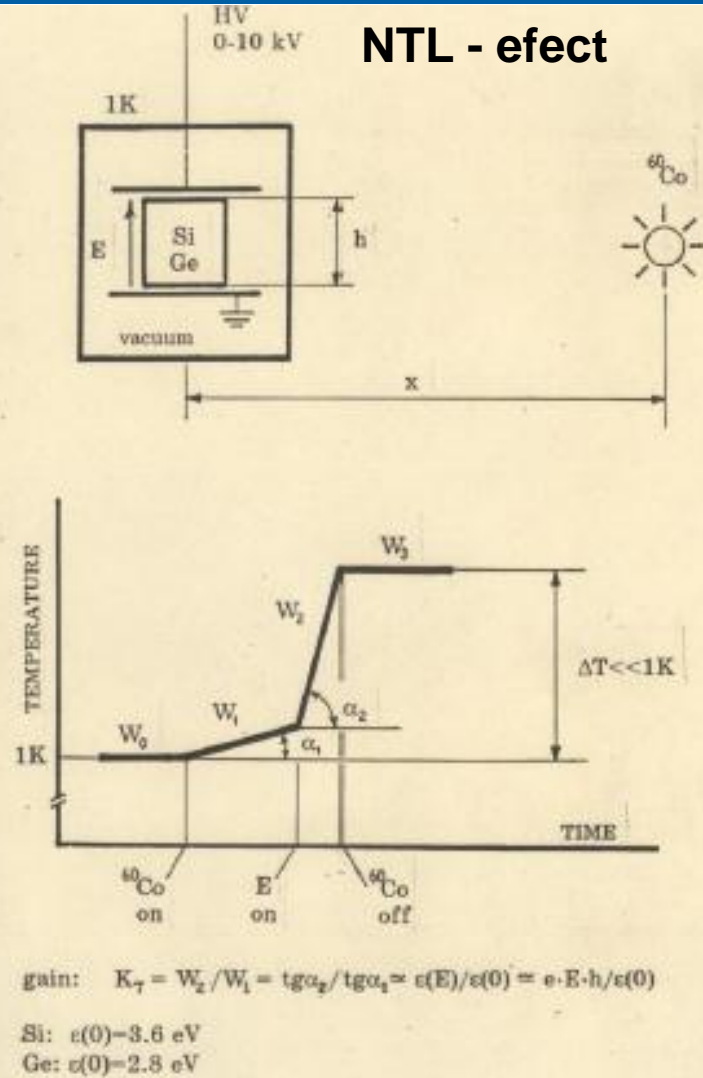
Один слой детектора состоит из 16 модулей с весом сцинтиллятора 1.5 кг. 64 кристалла и 64 канала электроники.



- Плата АЦП (Дубна):
- 64 канала, 14-бит;
- Один АЦП – один слой детектора;
- Шаг оцифровки – 16 нс;
- Временной диапазон – до 32 мкс;

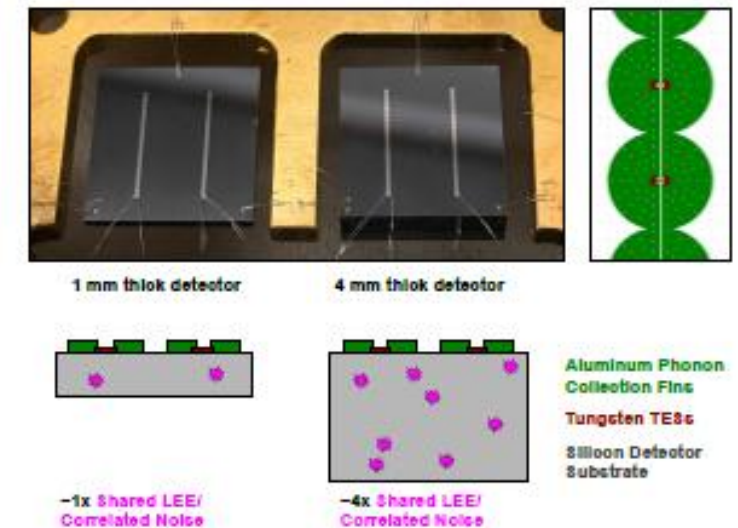
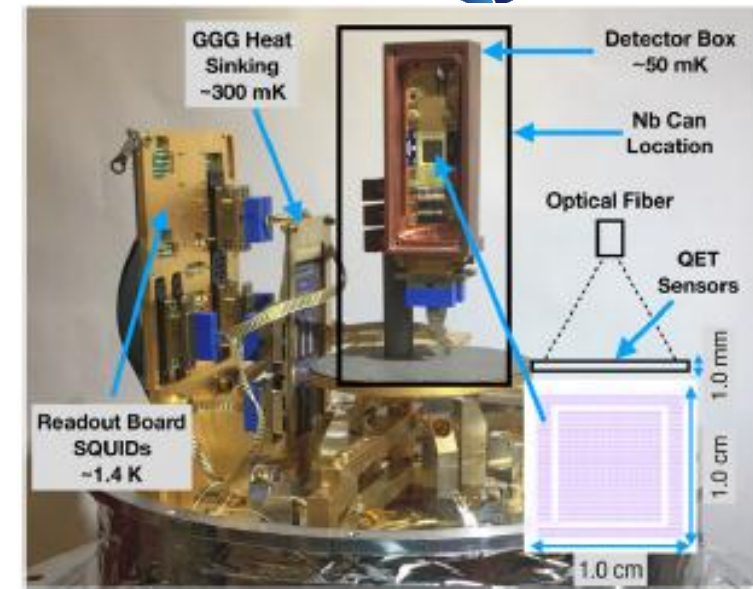
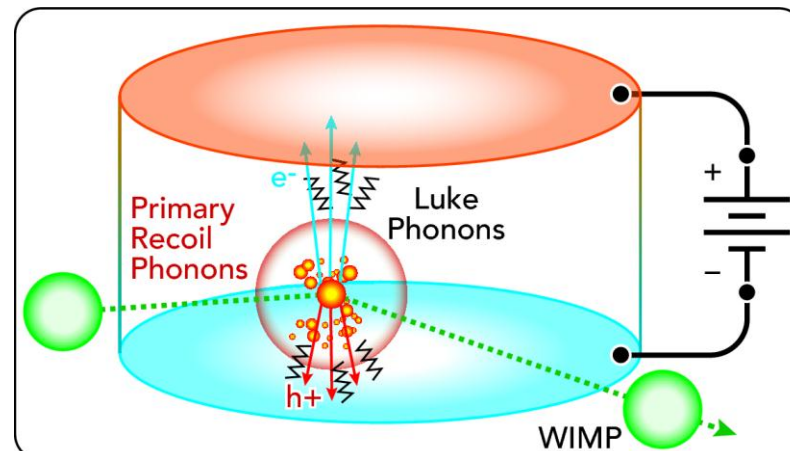
Криогенный кремниевый детектор. Состояние в мире

NTL - effect



Коллаборация SuperCDMS (Fermilab, 225м ВЭ, 10x10x4 мм, $V=100 \text{ В}$), рекордное разрешение по заряду в **0.03 электрон-дырочной пары**. При этом энергетическое разрешение частиц оказалось на уровне $\sigma_E \approx 3,2 \pm 0,1 \text{ эВ}$.
[arXiv:2509/03608v1](https://arxiv.org/abs/2509.03608v1) (3 Sep. 2025)

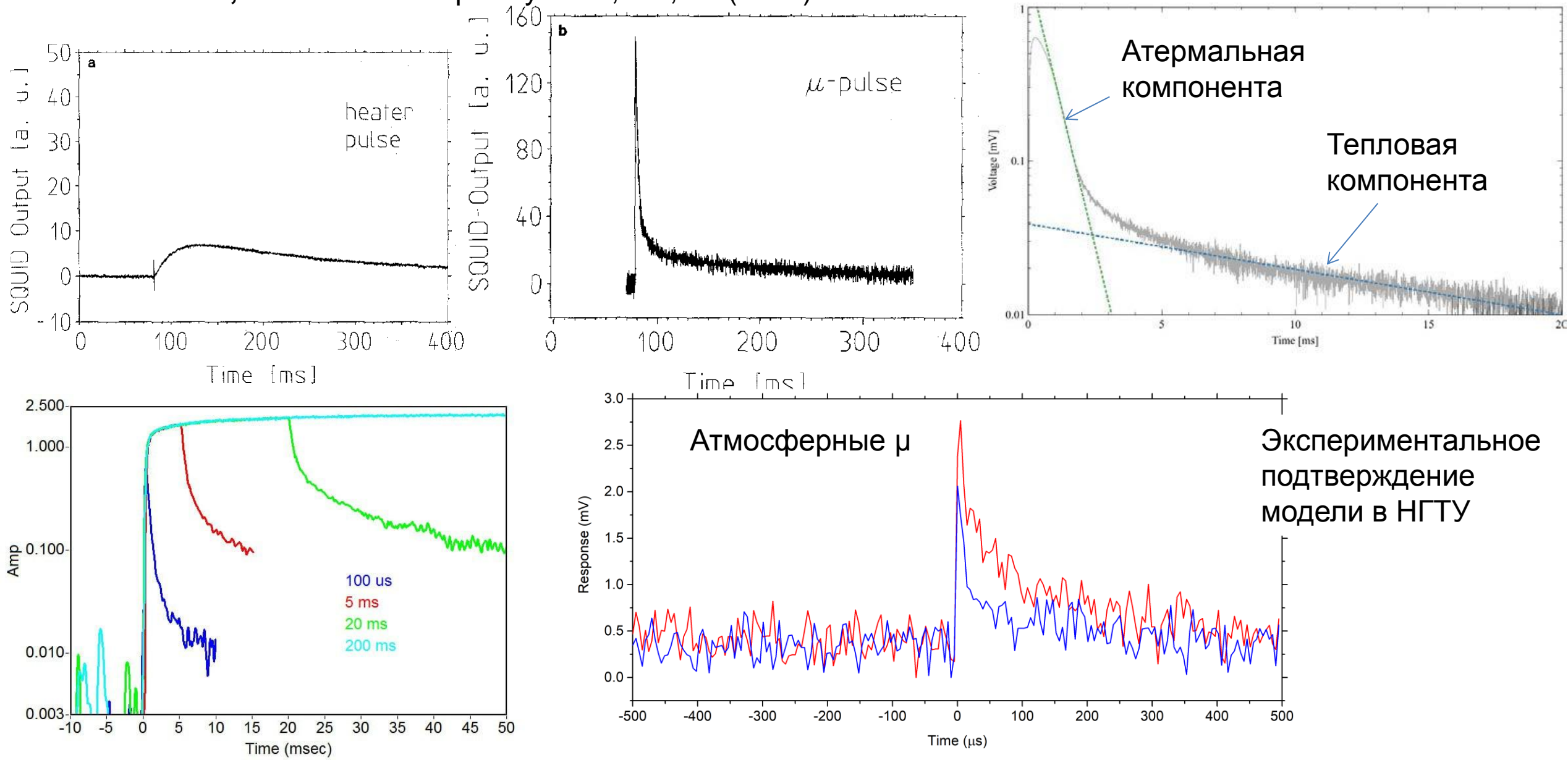
Коллаборация TESSERACT, май 2025 установила новый абсолютный рекорд в области фоновонного разрешения $\sigma_P = 258.5 \pm 0.4 \text{ мЭВ}$, толщина детектора 1 мм.
[arXiv:2505/16092v1](https://arxiv.org/abs/2505.16092v1) (22 May 2025)



Б.С. Неганов и В.Н. Трофимов.
 Способ калориметрического измерения ионизирующего излучения. SU 10327771 A (1985)

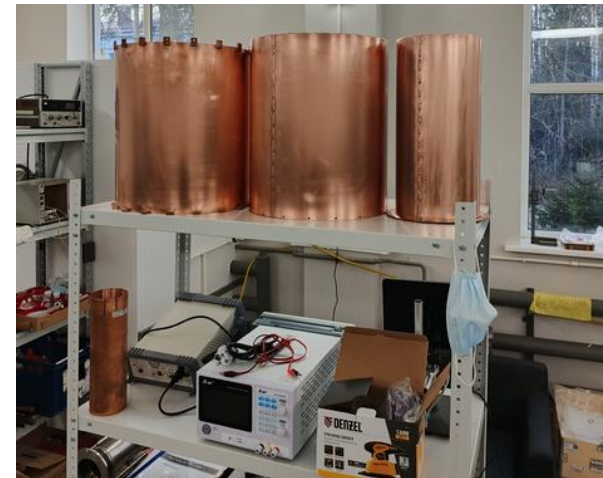
Исследование отклика СИН-термометров на кремниевых чувствительных элементах

F. Probst, et. al., **Model for Cryogenic Particle Detectors with Superconducting Phase Transition Thermometers**, Journ. Low Temp. Phys. **100**, 1/2, 69 (1995).



Криогенный кремниевый детектор. Криорефрижератор, ЛЯП ОИЯИ

- Завершается подготовка к испытанию опытного образца лабораторного рефрижератора.
- Изготовлены два экземпляра температурного контроллера LTM-8. Технические характеристики LTM-8 соответствуют лучшим мировым аналогам.

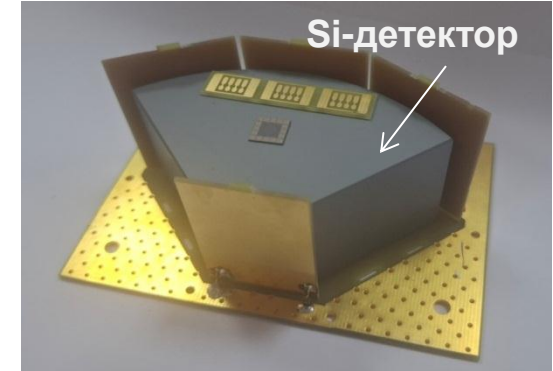


Исследования прототипа криогенного кремниевого детектора



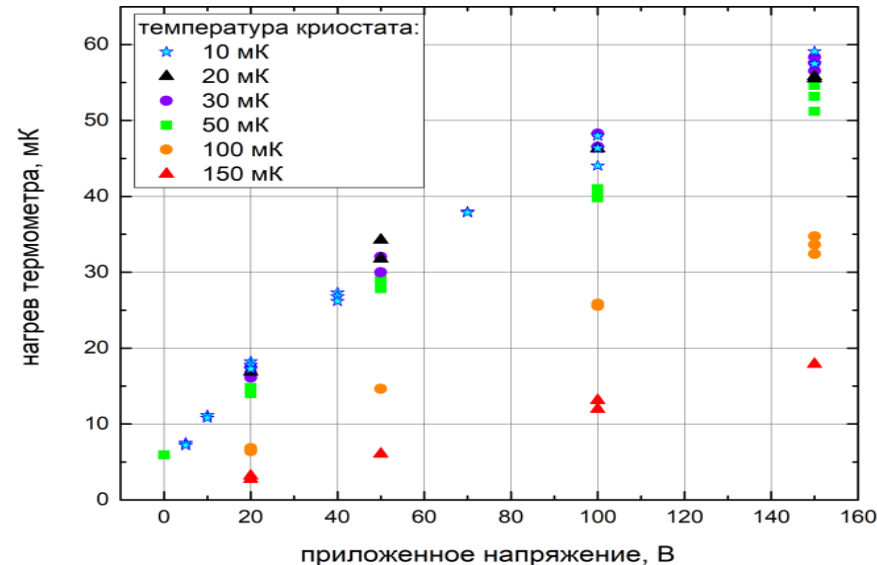
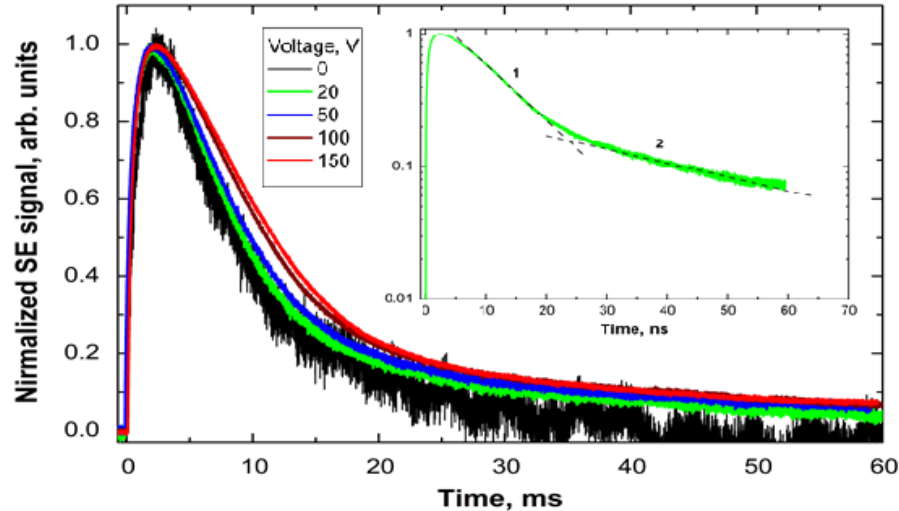
В НГТУ совместно с ФТИ проводятся исследования различных конструктивных исполнений чувствительных элементов криогенного кремниевого детектора.

Новые образцы СИН-сенсоров, изготавливаемых совместно с МФТИ



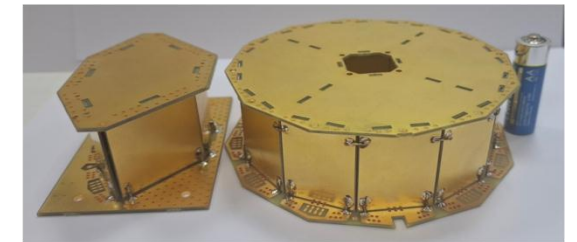
Модуль без крышки
(ЧЭ + СИН + адаптер шага)

Демонстрация эффекта фоновонного усиления Неганова-Трофимова-Лука при повышении напряжения на кремниевом детекторе



Основание

Слой без крышки

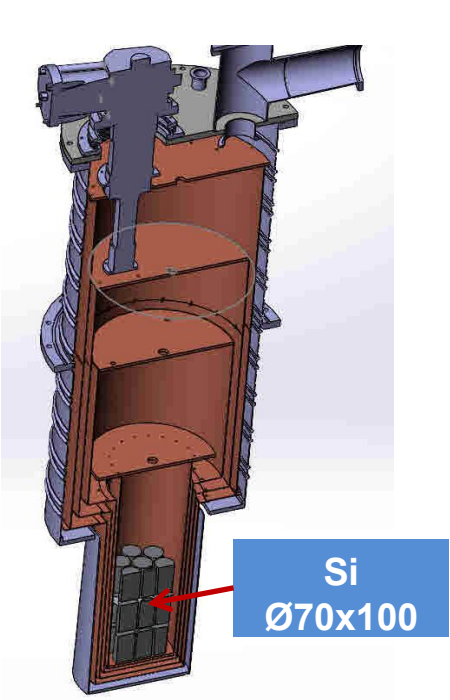


Корпусированный ЧЭ (слева) и чувствительный слой (справа) в разработанной концепции

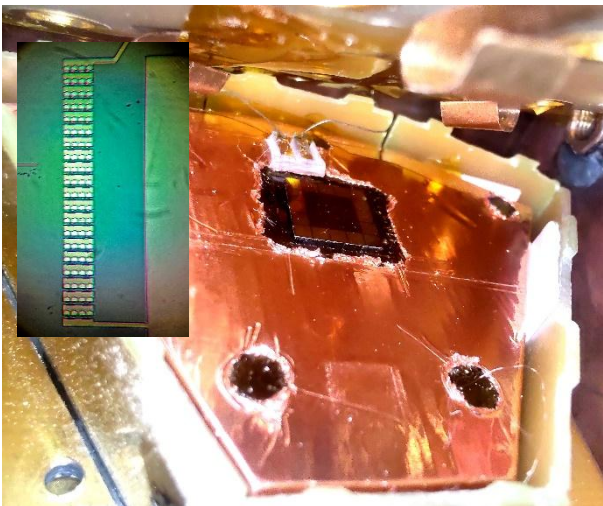
Кремниевый детектор (ФНИИЭФ; ЛЯП ОИЯИ; ФТИ; НГТУ, МГУ ФФ)

- 2026 Выбор микрокалориметра и системы считывания для чувствительного элемента Si детектора и его испытания. Изготовление и испытания одного слоя Si детектора с использованием многоканальной системы регистрации и хранения информации.
- 2027 Сборка полноразмерного Si детектора и начало его испытаний в наземных условиях, в том числе с измерением фонов от модельного ТИН. Транспортировка и монтаж Si детектора в НФНЛ.
- 2028 Запуск в работу Si детектора в НФНЛ. Измерение фона в НФНЛ с использованием модельного ТИН.

Криорефрижератор для НФНЛ



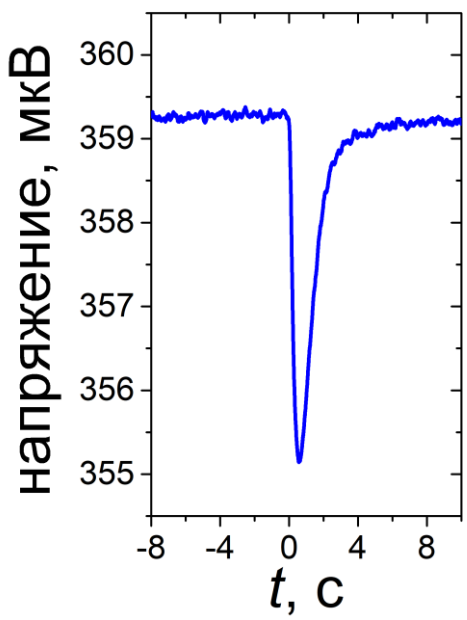
Элемент Si детектора 10 мм с СИН термометром.



СИН термометр, изготовленный фотолитографией



Отклик СИН термометра на нагрев лазером



Жидкогелиевый (He II) детектор. Состояние

Коллаборации, разрабатывающие He II детекторы:

HeRALD//HERON (США, Япония),

DELight (Германия),

HeLIOS (США, Канада),

QUEST-DMC (^3He) (Великобритания, Япония)

DELight (Direct search Experiment for Light dark matter),

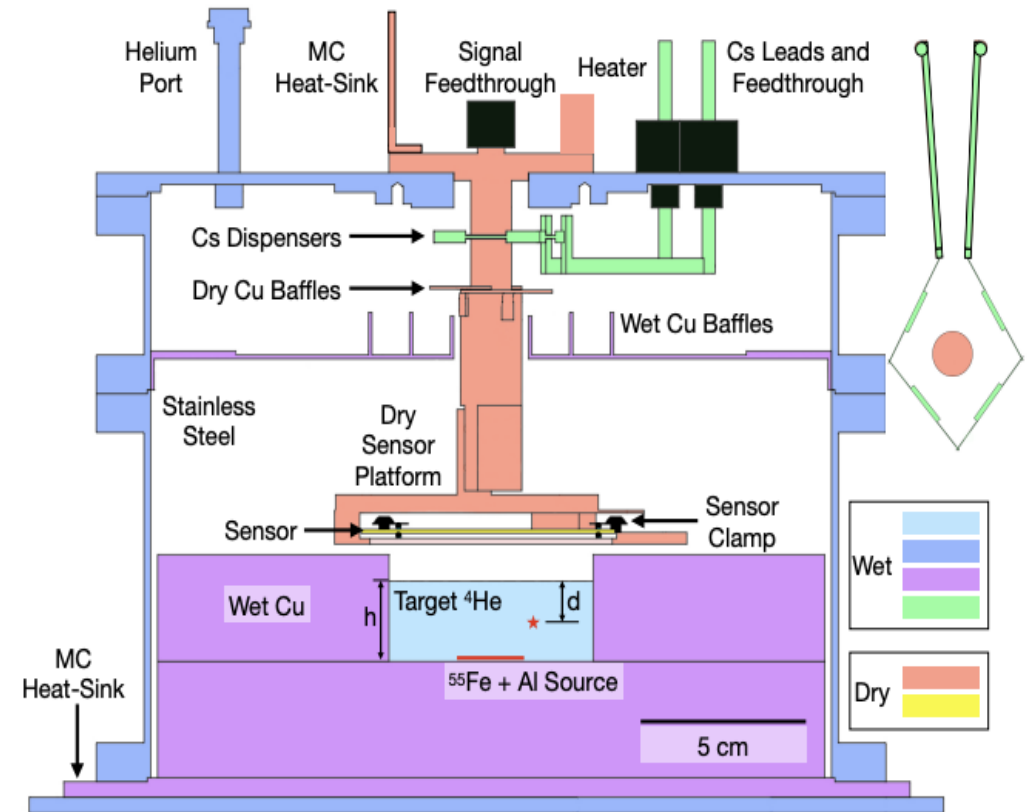
разрабатываемый в KIT (Германия), планирует первую фазу с 10 л (позднее порядка 100 литров) сверхтекучего гелия-4, оснащенную 50 магнитными микрокалориметрами (MMC) для регистрации эффекта квантового испарения атомов He с ожидаемым порогом 10–20 эВ. [September 2025, 20th PATRAS Workshop on Axions...]

[Belina von Krosigk et. al., SciPost Phys. Proc. 12, 016 (2023)]

Схема регистрации CEvAS боллометрами

Рассеяние \rightarrow атом отдачи (0.2-200 мэВ) \rightarrow фононы, ротоны (0.7-2 мэВ) \rightarrow баллистическое распространение \rightarrow квантовое испарение атомов с поверхности (0.6 мэВ) \rightarrow адсорбция на поверхности болометра (6-40 мэВ) \rightarrow сигнал ΔT схемы регистрации

Ключевой вопрос: какой процент фононов и ротонов достигнет поверхности и вызовет испарение? (10-30%)



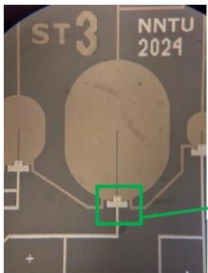
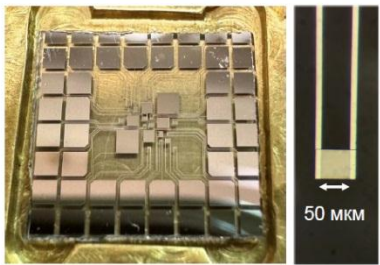
Прототип детектора коллаборации HeRALD на данный момент имеет энергетический порог в 145 эВ при 5σ

[R. Anthony-Petersen et al.](#), Demonstration of the HeRALD superfluid helium detector concept, Phys. Rev. D 110, 2024

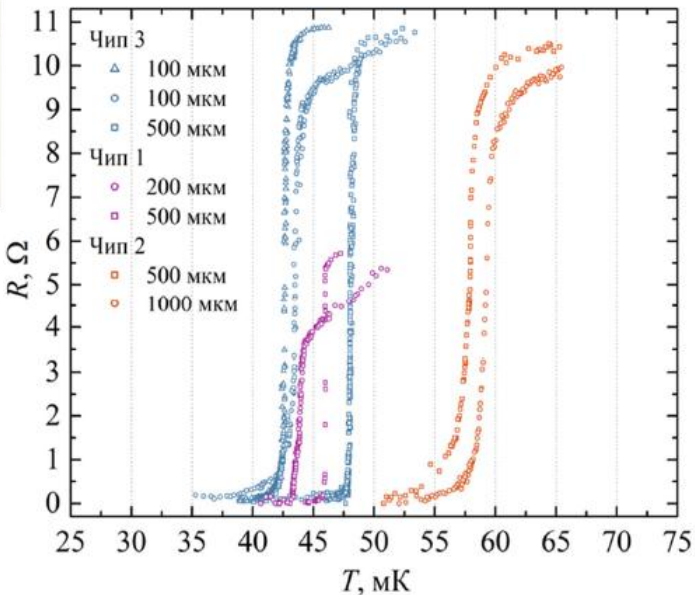
Жидкогелиевый (He II) детектор. Состояние

Проблемы технические

Элементы детектора	План	Состояние
Криостат растворения (20мК)	Закупка	Разработка (Криотрейд + ЛЯП ОИЯИ +НГТУ +ВНИИЭФ)
TES	Закупка	Разработка (НГТУ +ИФМ РАН)
SQUID	Закупка	Разработка (НГТУ-НН + НГТУ-Новосибирск)



Hf / Pd = 100 / 5 нм

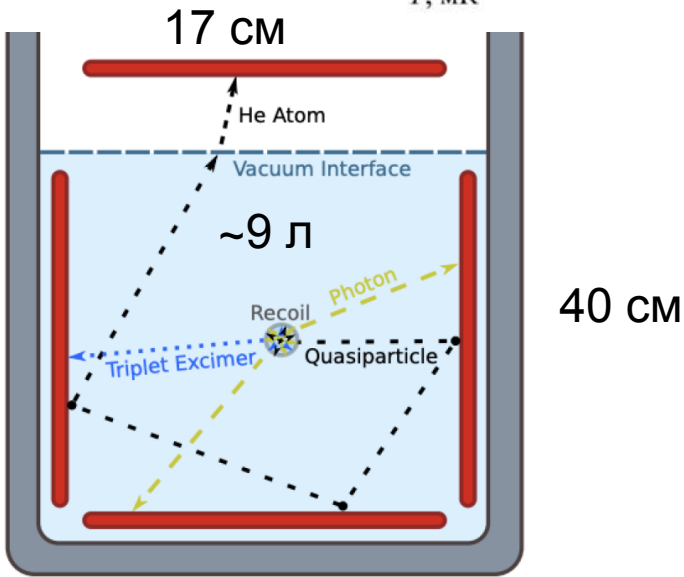


Проблемы принципиальные

Явление	Состояние, способы решения
Сверхтекучесть гелия	Гидрофобное покрытие Cs, нагрев, (решение не найдено)
Эффективность регистрации	(0,3 – 30) %; не определена длина баллистической траектории движения ротонов и фононов
.....

Поиск новых способов решения проблем

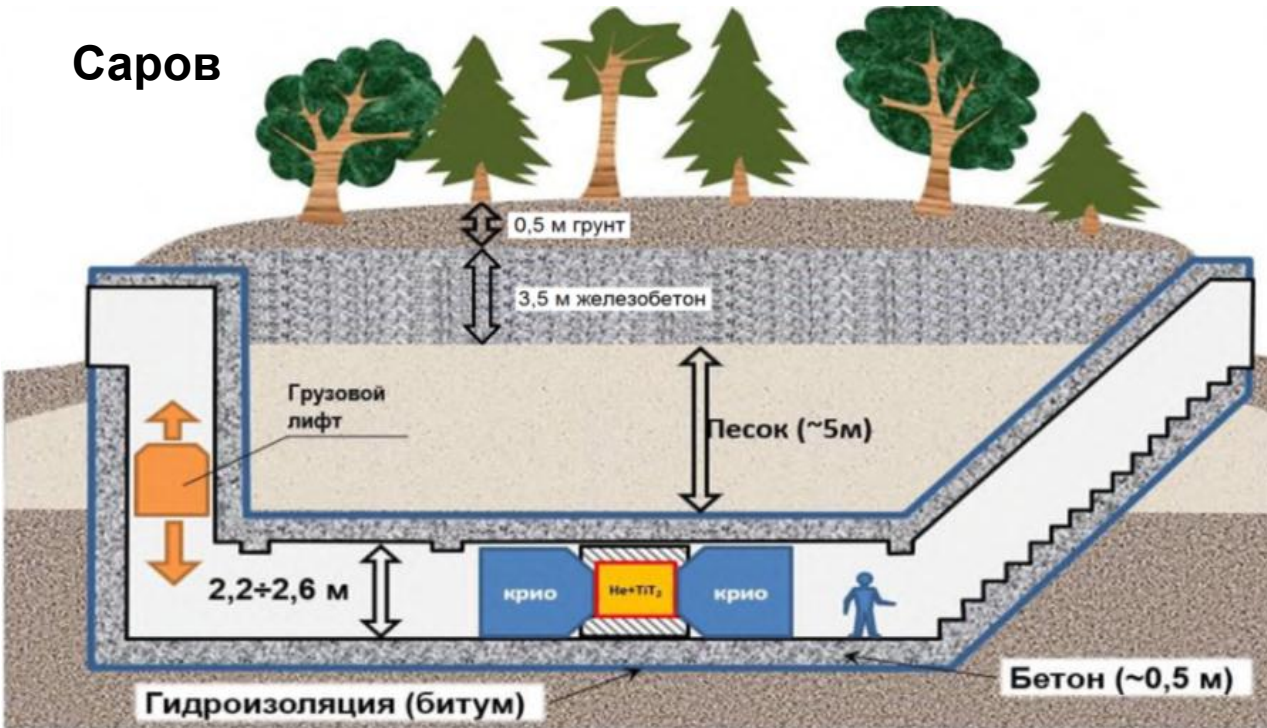
1. Поиск эффективных гидрофобных покрытий;
2. Исследование физики взаимодействия частиц кэВ-ных энергий с He II, определение длины баллистической траектории в He II, отражение от поверхностей с различной шероховатостью;
3. Поиск новых схем регистрации (регистрация фононов с помощью СИН-сенсоров, оптомеханические, моды шепчущей галереи, др.???)



$1 \text{ СИН/см}^2 \rightarrow \sim 2500 \text{ СИН}$

Фоновые условия

Саров



«+» территория ЯОК ГК «Росатом»
Соблюдены все правила

«-» **Фоновые условия**

4 м железобетон – 16 м ВЭ ?

5 м песок - 5-10 м ВЭ ?

Итого – 21-26 м ВЭ



660 м ВЭ
1 μ /см²/сутки
0.69 н с⁻¹ м⁻²

1000 м ВЭ
~ 0.3 μ /см²/сутки
1.4 × 10⁻³ н с⁻¹ м⁻²

4900 м ВЭ
3,5 · 10⁻⁴ μ / (см² · сутки)
0.02 н с⁻¹ м⁻²

«+» фоновые условия идеальные!

«-» ?????

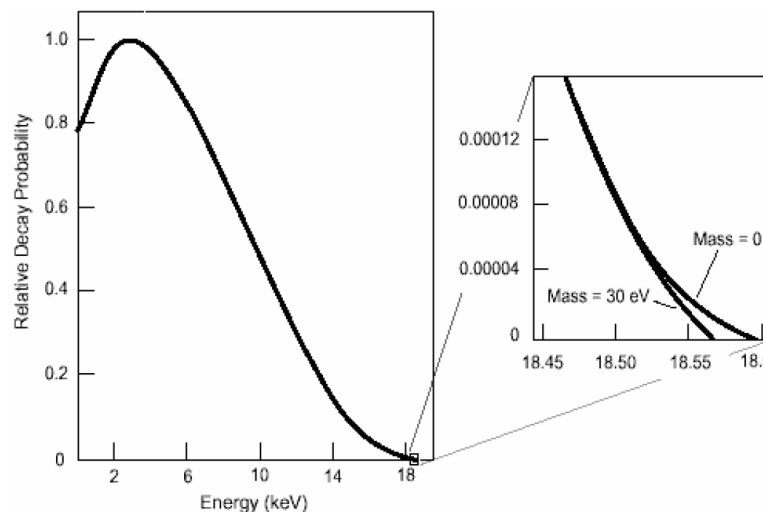
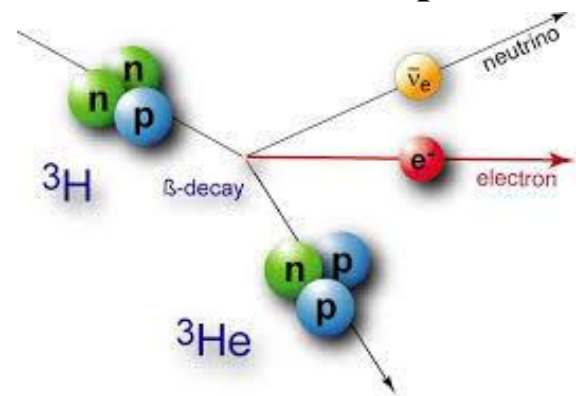
Другие площадки?!



**Спасибо
за внимание**

Тритий в нейтринной физике. Поиск массы нейтрино.

Физика нейтрино

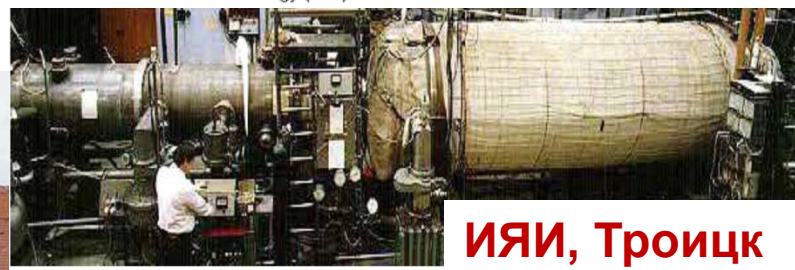


KATRIN, TLK, Karlsruhe

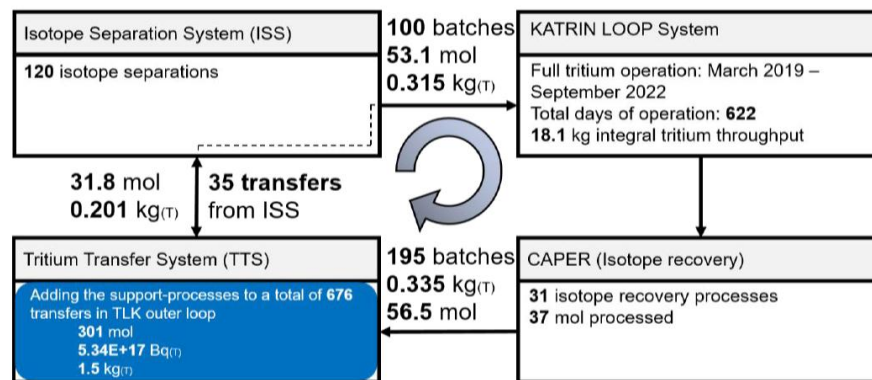


Прокачивается ~ 1,8 см³/с
(40 г/день)

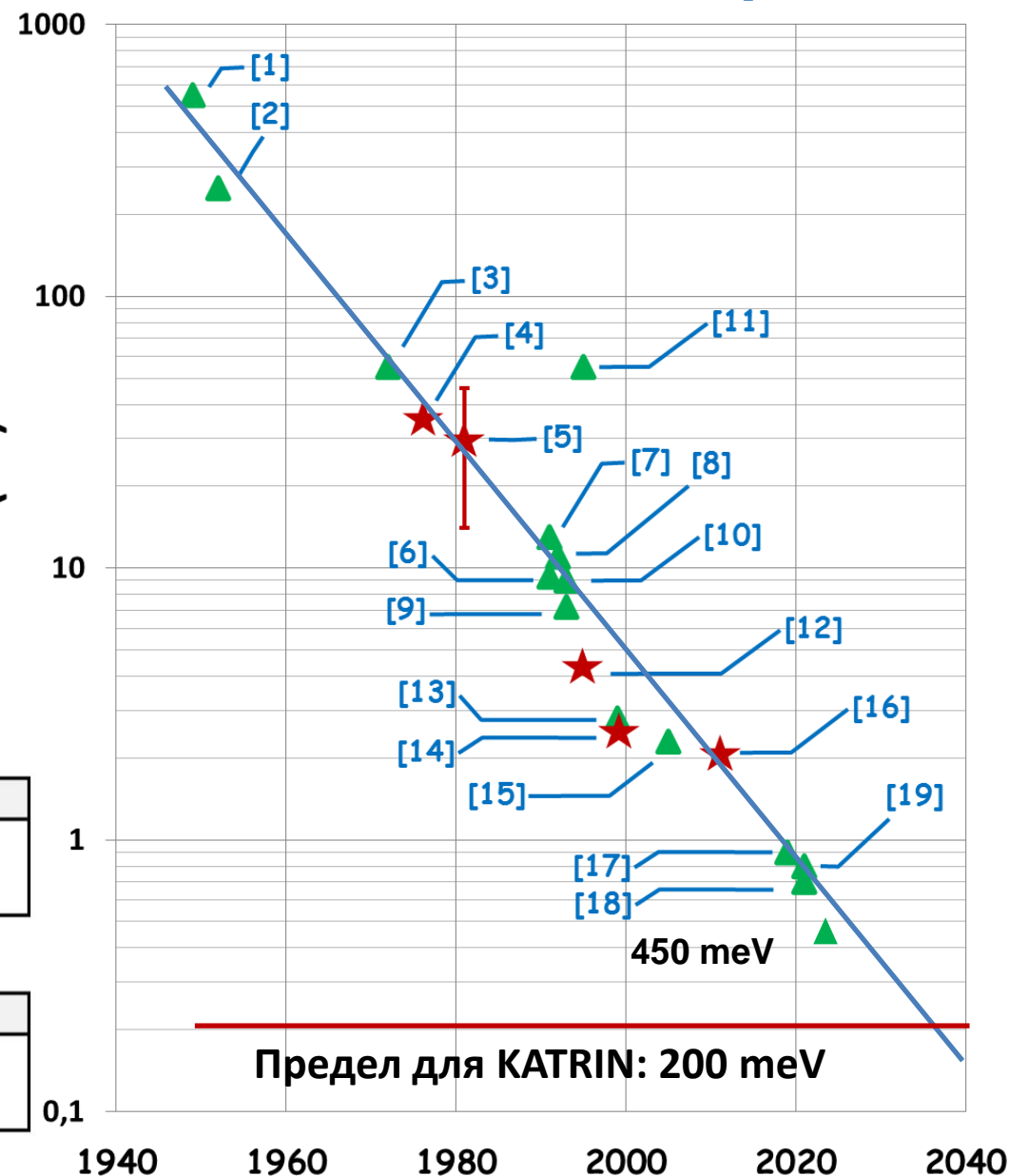
622 дня → 18,1 кг трития
Р макс ~ 200-300 мбар



ИЯИ, Троицк

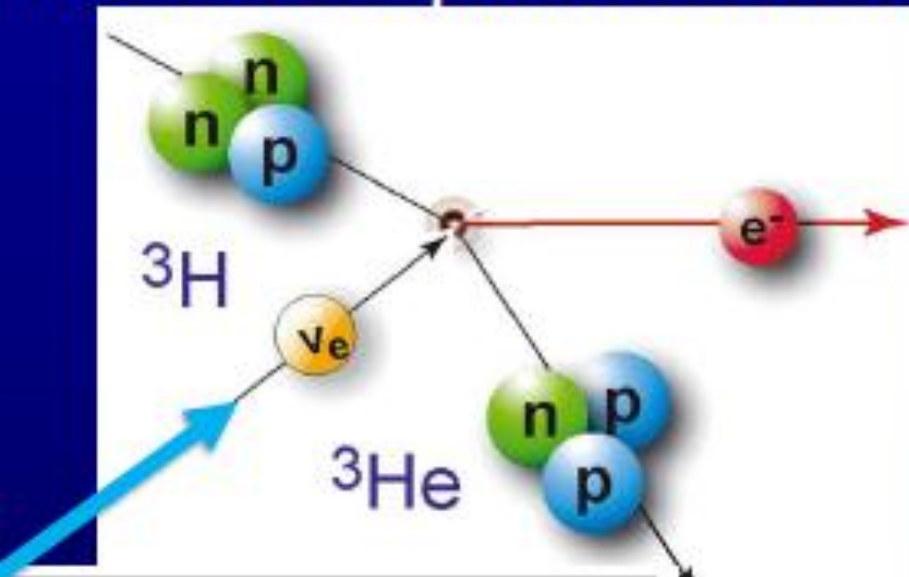


Mass Limit (eV)



Тритий в нейтринной физике. Поиск реликтовых нейтрино - PTOLOMEY

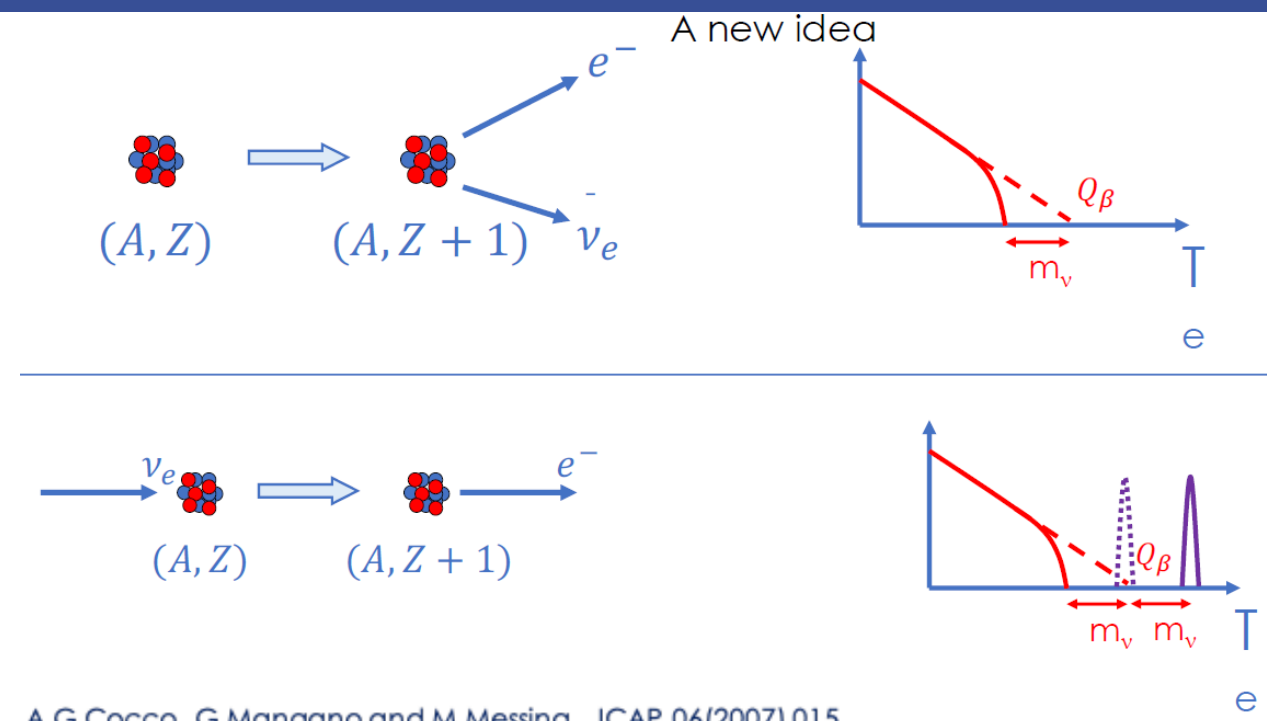
Neutrino capture on Tritium



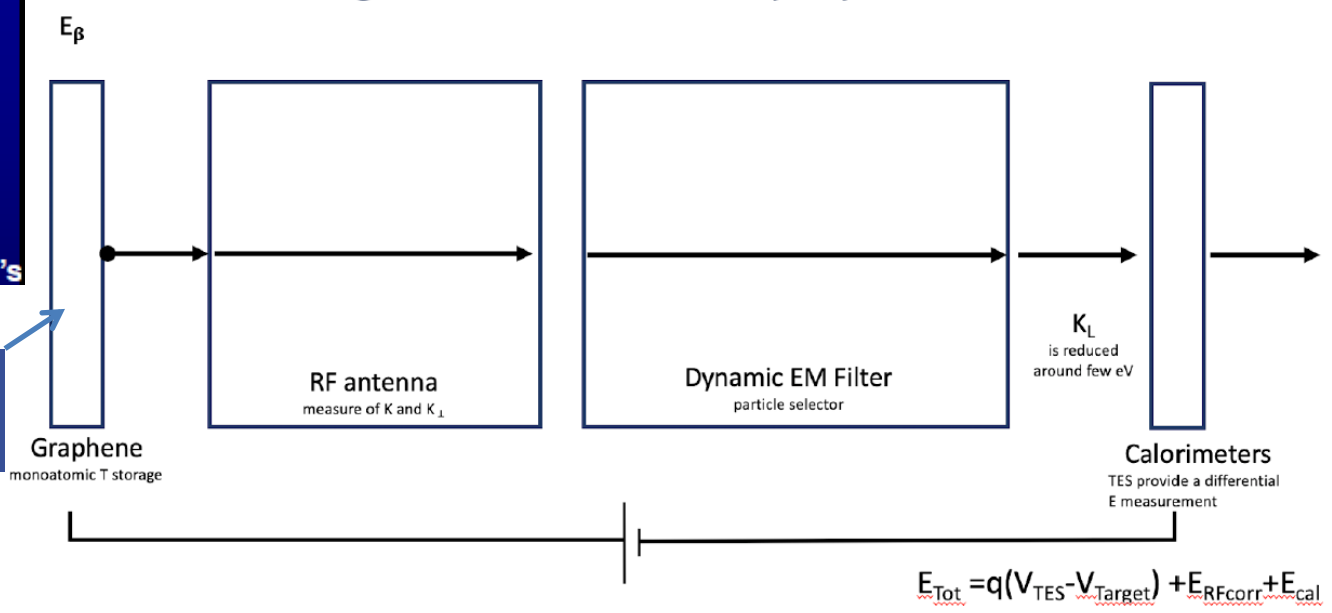
- Target mass: **100 grams of tritium** (2×10^{25} nuclei)
- Capture cross section $\times (\nu/c) \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$ (flat up to 10 keV)
- (Very Rough) Estimate of Relic Neutrino Capture Rate:
($56 \nu_e/\text{cm}^3$) (2×10^{25} nuclei) (10^{-44} cm^2) ($3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$) ($3 \times 10^7 \text{ s}$)
Lazauskas, Vogel, Volpe: J.Phys.G G35 (2008) 025001
Cocco, Mangano, Messina: JCAP 0706 (2007) 015
 $\sim 10 \text{ events/yr}$
5(10) events/yr for Dirac(Majorana) ν 's

Коллаборация (2020):
7 стран, 23 института, 55 ученых

**$\sim 3 \text{ эВ}$ энергия
СВЯЗИ**

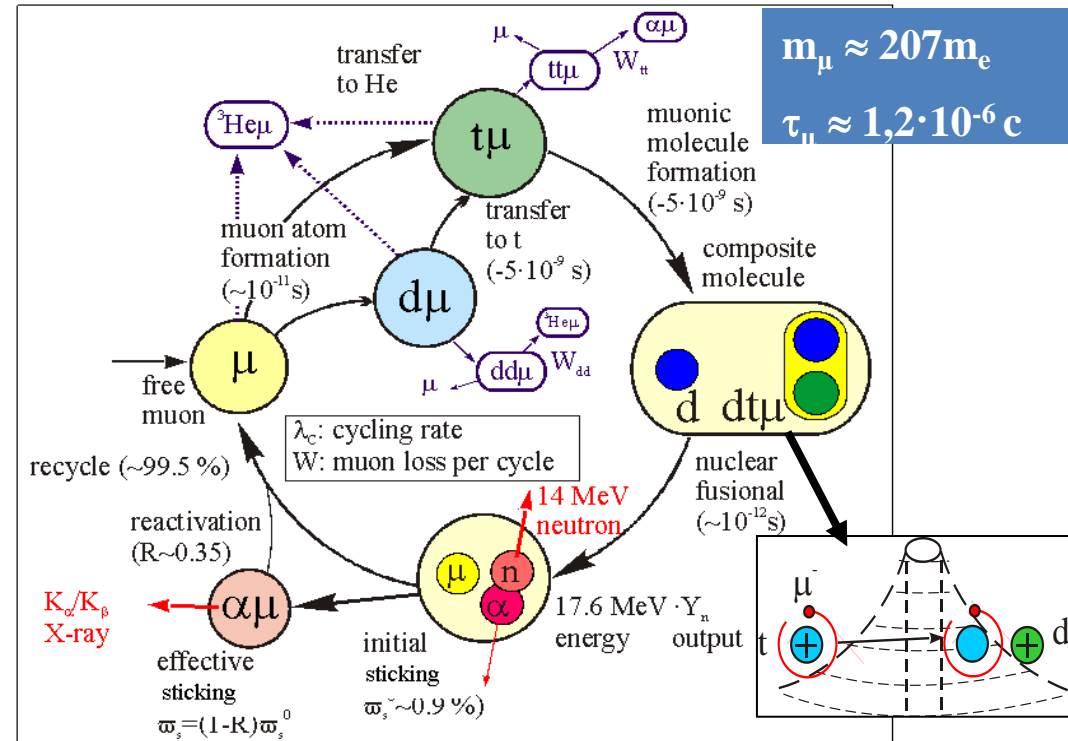


A.G.Cocco, G.Mangano and M.Messina JCAP 06(2007) 015



Мюонный катализ. Экспериментальный комплекс ТРИТОН (ЛЯП ОИЯИ)

Создан в 1995-1996 годах. ВНИИЭФ
Утилизирован – 2020г



А.А. Юхимчук и др. Комплекс газового обеспечения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций синтеза. ПТЭ №6 (1999) 17-23.

А.А. Yukhimchuk et al. Facility for preparation of gas mixture in muon catalyzed fusion experiments. Hyperfine Interactions. 119 (1999) 341-344.

В.Г. Клевцов и др. Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами. Материаловедение, 5 (2002) 53-56.

N.S. Ganchuk et al. Calculation of equilibrium composition and establishing time in a mixture of three hydrogen isotopes. Hyperfine Interactions 119 (1999) 357-360.

Golubkov A.N., Yukhimchuk A.A. High pressure hydrogen isotopes sources based on vanadium hydride. Hyperfine Interactions 138 (2001) 403-408.

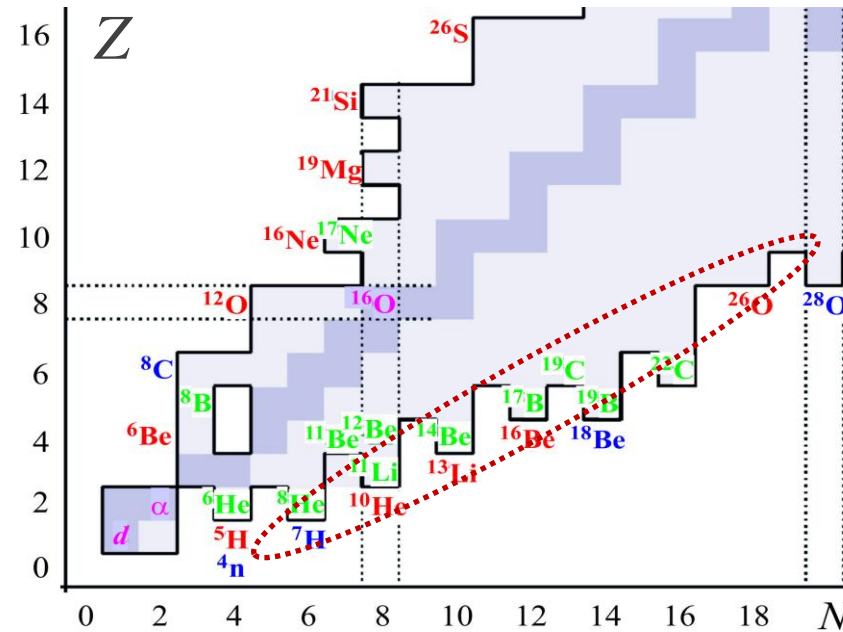
- безопасное проведение работ с большими (десятки кКи) активностями газообразного трития в условиях открытых лабораторий
- высокие давления до 300 МПа; температуры 20 - 800 К
- подготовка смеси заданного изотопного состава
- очистка смеси до уровня 10^{-7} об. долей по примесям с $Z > 4$
- молекулярный анализ смеси изотопов водорода
- замкнутый цикл работ с тритием
- автономность работы
- автоматизированный контроль и сбор данных эксперимента

СВОЙСТВА НЕЙТРОННО-ИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР НА ГРАНИЦЕ НЕЙТРОННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

2000 – 2011 г.г. Исследованы свойства ядер: ^4H , ^5H , ^7H , ^8He , ^{10}He

ЛЯР ОИЯИ

- Система напуска ИВ в ионный источник циклотрона U400-М
- Наполнение мишеней ИВ и ^3He , ^4He
- Эвакуация и утилизация трития из мишени
- Поддержание рабочей температуры с точностью $\pm 0,1\text{K}$
- Мониторинг радиационной обстановки
- Автоматизированный контроль и управление рабочими параметрами



$T_{2\text{max}} - 1,0 \text{ кКи}; P < 1 \text{ bar}$
 $T \text{ от } 20 \text{ до } 300 \text{ K}$

Тритиевый пучок $E \sim 58 \text{ МэВ}$, 10^6 с^{-1}

1. Yukhimchuk A.A. et al. // Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A. 2003. Vol.515. P.439-447.
2. Golovkov M.S. et al. // Phys. Lett. B. 2003. Vol.566. P.70-75.
3. Ter-Akopian G.M. et al. // Nuclear Physics A. 2004. Vol.734. P.293-302.
4. Golovkov M.S. et al. // Phys. Rev. C. 2005. Vol.72. P.1-17. 064612.
5. Ter-Akopian G.M. et al. // The European Physical Journal A – Hadrons and Nuclei. 2005. T. 25. №Suppl.1. C. 315-320.
6. Grigorenko L.V. et al. // Particles and Nuclei Letters 2009. Vol.6 (№2) P.118-125.
7. Fomichev A.S. et al. // Eur. Phys. J. A. 2009. Vol.42. P.465-469.
8. Golovkov M.S. et al. // Phys. Lett. B. 2009. Vol.672. P.22-29.
9. Sidorchuk S.I. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol.108. P.1-5. 202502.
10. Григоренко Л.В. и др. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. С. 337–386.
11. Юхимчук А.А. и др. // ФИЗМАТ 2024. Т.1 (№1) С.5-19

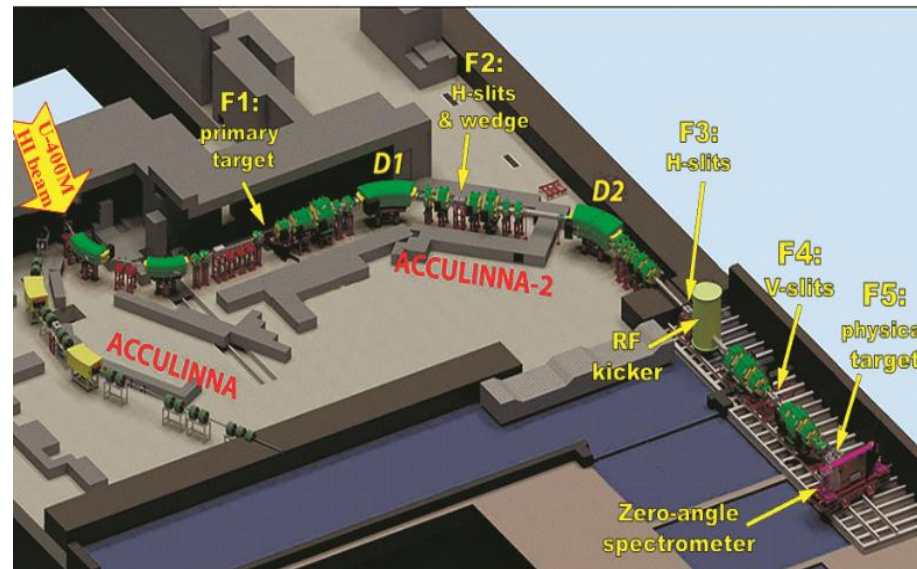
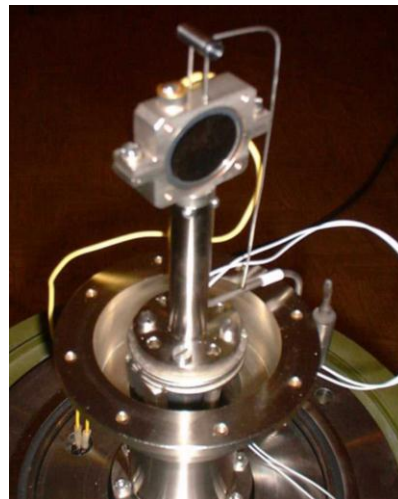
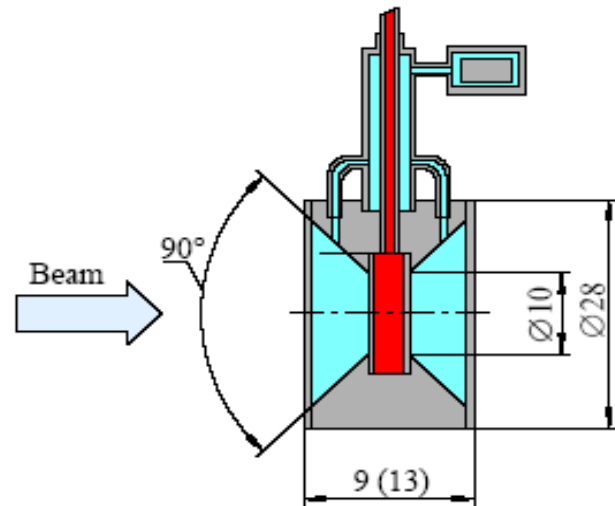
Тритиевая инфраструктура для фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2

Тритиевая инфраструктура фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 обеспечивает безопасную эксплуатацию тритиевых мишеней на всех стадиях жизненного цикла (наполнение, утилизация, хранение).

Второй класс работ – 2,7кКи → ~1000 см³ н.у.

Единственная в мире площадка для проведения исследований с тритием на радиоактивных пучках!

Изучение нейтронно-избыточных систем ${}^6,7\text{H}$, ${}^7,10\text{He}$, ${}^{13}\text{Li}$ вплоть до ${}^{24,26}\text{O}$.



«Холостой сеанс»
– декабрь 2024 г.

Истоки тритиевого эксперимента по поиску магнитного момента нейтрино в СССР

Глубокоуважаемый Венедикт Петрович!


Дирекция ИЯИ АН СССР рассмотрела изложенное в Вашем письме от **25.11.86** г. предложение о совместной подготовке и проведении эксперимента с тритиевым источником в низкофоновой подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ АН СССР с использованием разработанных в ЛЯП ОИЯИ методов низкотемпературного детектирования редких событий.

ИЯИ АН СССР считает Ваше предложение крайне интересным и поддерживает, в принципе, идею создания в Баксанской нейтринной обсерватории специальной низкофоновой камеры с тепловым квантовым детектором с соответствующими элементами пассивной и активной защиты от внешней радиоактивности и космических лучей. Создание такой специальной низкофоновой лаборатории откроет новые возможности как фундаментальных, так и прикладных исследований в области физики элементарных частиц.

Институт готов принять участие в разработке проекта эксперимента с учетом привязки его к подземным помещениям БНО ИЯИ АН СССР.

Учитывая, что радиоактивная чистота специальных подземных помещений БНО АН СССР является одним из важнейших требований, считаем необходимым участие специалистов ИЯИ АН СССР в подготовке технического задания на проектирование и изготовление тритиевого источника.

Считаем целесообразным рассмотреть проект данного эксперимента на одном из ближайших заседаний Ученого совета ИЯИ АН СССР.


Академия наук СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а. Для телеграмм: Москва, МЕЗОН
Тел.: 135-77-60, 334-64-55, 334-64-63 (канц.) Р. сч. № 110195 в Брежневском отл. Госбанка

05.12.86 № 11302-01-2126-5084 Директору Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ
На № _____ члену-корреспонденту АН СССР профессору В.П.Джелепову

Глубокоуважаемый Венедикт Петрович !

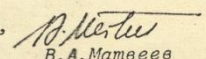
Дирекция Института ядерных исследований АН СССР рассмотрела изложенное в Вашем письме от 25.11.86 г. предложение о совместной подготовке и проведении эксперимента с тритиевым источником в низкофоновой подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ АН СССР с использованием разработанных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ методов низкотемпературного детектирования редких событий.

Институт ядерных исследований АН СССР считает Ваше предложение крайне интересным и поддерживает, в принципе, идею создания в Баксанской нейтринной обсерватории специальной низкофоновой камеры с тепловым квантовым детектором с соответствующими элементами пассивной и активной защиты от внешней радиоактивности и космических лучей. Создание такой специальной низкофоновой лаборатории откроет новые возможности как фундаментальных, так и прикладных исследований в области физики элементарных частиц.

Институт готов принять участие в разработке проекта эксперимента с учетом привязки его к подземным помещениям Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ АН СССР.

Учитывая, что радиационная чистота специальных подземных помещений БНО ИЯИ АН СССР является одним из важнейших требований, считаем необходимым участие специалистов ИЯИ АН СССР в подготовке технического задания на проектирование и изготовление тритиевого источника.

Считаем целесообразным рассмотреть проект данного эксперимента на одном из ближайших заседаний Ученого совета ИЯИ АН СССР.

С глубоким уважением, 
И.о. директора ИЯИ АН СССР В.А.Матвеев
профессор -

Истоки тритиевого эксперимента по поиску магнитного момента нейтрино

Предложение заслуживает решительной поддержки Л.Б. Окунь

Тритиевый источник согласно [1]:
Полый сферический источник $\varnothing 140 \times \varnothing 300$ мм;
Носитель трития – титан;
Объем с активным материалом – 14 литров;
Масса нетто – 56 кг;
Концентрация трития - $9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$; **$(4,55 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3})$**
Активность – 60 МКи;
Тепловыделение – 7 кВт; **(1968 Вт)**
Поток антинейтрино в центре - $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;
Поток антинейтрино на наружной стенке - $1,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

1. B.S. Neganov, V.N. Trofimov, V.N. Stepankin. A Proposal on Cryogenic Detection of Neutrino Magnetic Moment at a Level Better Than $10^{-11} \mu_B$ (Bohr Magneton). Journal of Low Temperature Physics. Vol. 93, Nos. 3/4, 1993, 745-749.


Отзыв

Л.Б.Окуня о предложении Б.С.Неганова "Эксперименты по обнаружению магнитного момента электронного нейтрино".

1. Предложение заслуживает решительной поддержки, поскольку : (1) Б.С.Неганов известен как искусный экспериментатор, (2) предлагаемая им методика усиления сигналов в полупроводниковых монокристаллах оригинальна, и поиски магнитного момента нейтрино актуальны как в астрофизическом плане, так и в плане физики элементарных частиц. В частности, продвижение на два порядка (до 10^{-12} боровских магнетонов) позволило бы исключить модель, в которой наблюдаемые вариации нейтринного потока в эксперименте Дэвиса связываются с взаимодействием магнитного момента нейтрино с магнитными полями внутри Солнца.

2. Правильней было бы назвать предложение "Эксперимент по поискам магнитного момента нейтрино", поскольку обнаружение магнитного момента отнюдь не гарантировано. Не исключено, что он много меньше, чем 10^{-12} магнетона, и, может быть, равен нулю.

Член-корреспондент АН СССР

 Л.Б.Окунь

5.04.87

Подпись Л.Б.Окуня заверяю:

Ученый секретарь ИТЭФ
кандидат физ.-мат. наук



Ю.В.Терехов

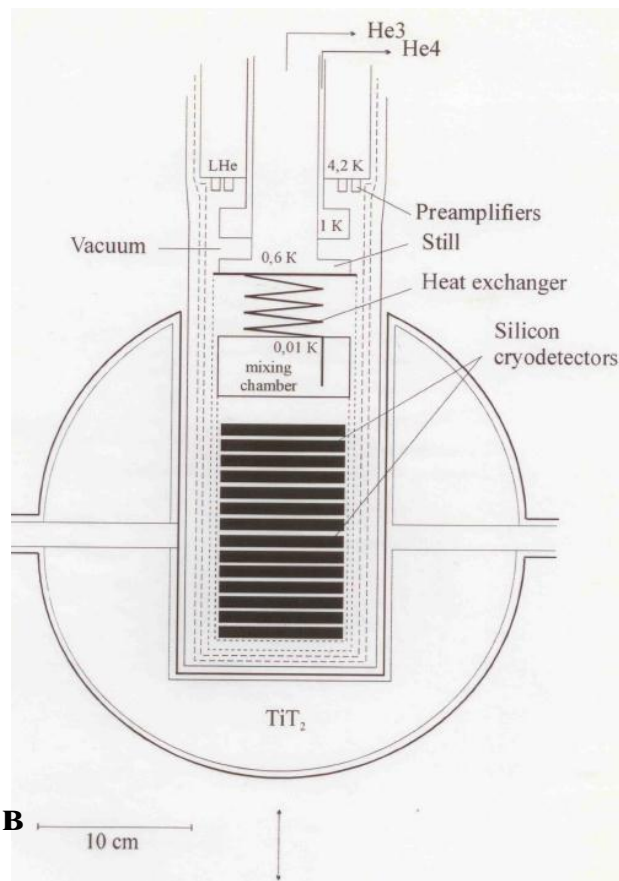
Интенсивный тритиевый источник антинейтрино (ИТИН) [2]

Преимущества тритиевого источника антинейтрино

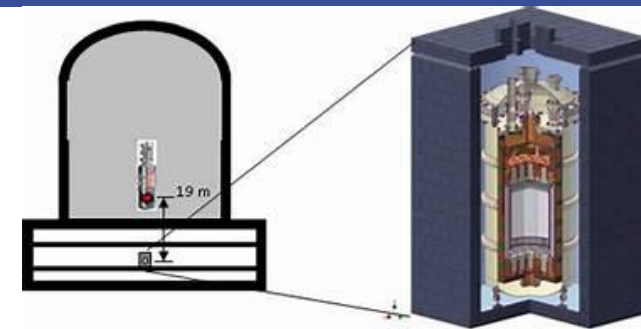
- более интенсивные потоки антинейтрино в детекторе, по сравнению с реакторными и ускорительными источниками;
- сильно подавленный коррелированный фон;
- небольшие размеры, позволяющие использовать низкофоновые подземные лаборатории и модуляцию потока для вычитания некоррелированного фона;
- знание спектра антинейтрино с высокой точностью;
- низкая граничная энергия спектра распада ($E_0 = 18,6$ кэВ) – тормозное излучение не выходит за пределы источника, отсутствует необходимость в пассивной защите между источником и детектором.

Недостатки конструкции, предложенной в [2]:

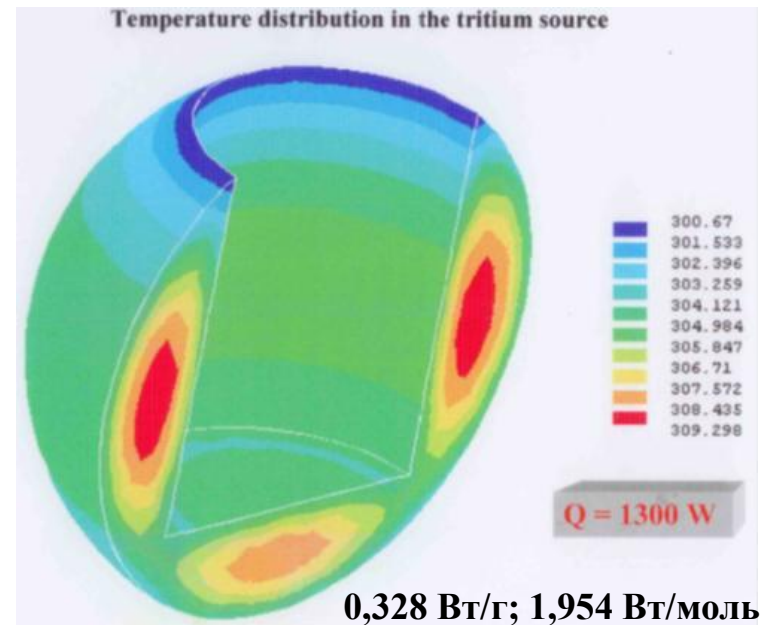
- существенный разогрев (309°C , снаружи Т ком.) в условиях естественного хранения;
- трудности при транспортировке;
- специальная технологическая линия для изготовления и утилизации.



Максимальный поток
по оси детектора
 $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$



Для реактора мощностью 1 ГВт такой поток может быть получен в детекторе удаленном на 10 м от активной зоны реактора



В.М. Лобашев, Л.И. Пономарев

Для получения верхнего предела магнитного момента нейтрино на уровне $2 \cdot 10^{-17}$ Дж, в течение 1-2 года необходим источник с активностью 40 мегаюри (4 кг трития, находящегося в химически связанном состоянии на титане). Изготовление такого источника - сложная техническая задача, которая может быть решена специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ, имеющими уникальный опыт работы с тритием. Кроме того ВНИИЭФ имеет необходимую техническую базу и возможность в течение 2-3 лет разработать, изготовить, предварительно испытать у себя и в дальнейшем силами своих специалистов эксплуатировать необходимое оборудование при проведении экспериментов в низкофоновой лаборатории Красноярск-26 или Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

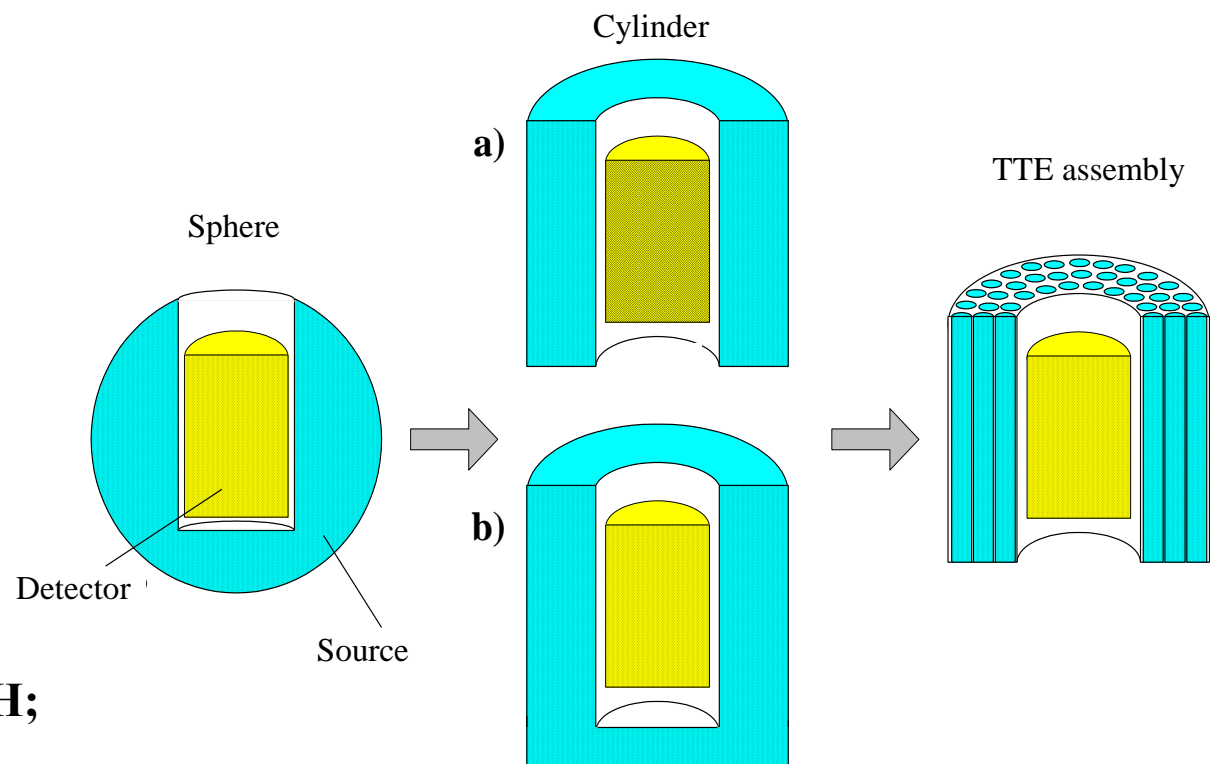
Академик РАН, начальник отдела ИЯИ РАН

В.А.Рубаков

Эволюция взглядов на конструкцию ТИН

Нами были выполнены работы по оптимизации конструкции ТИН [3,4]. При этом учитывались следующие факторы:

- при имеющемся количестве трития получить максимальное число событий взаимодействия нейтрино с материалом детектора;
- размеры и форму детектора;
- технологические возможности изготовления элементов конструкции источника;
- возможность получения тритида титана (TiT_x) необходимой плотности;
- поведение в процессе эксплуатации;
- безопасность на всех этапах жизненного цикла ТИН;
- удобства монтажа и демонтажа.



3. Ю.И. Виноградов и др. Оптимизация конструкции тритиевого источника для экспериментальной установки. В сб. «Изотопы водорода. Фундаментальные и прикладные исследования» под ред. А.А. Юхимчука. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2009, с.212-221.

4. A.A. Yukhimchuk et al. Status of works a 40-MCi-activity source for the measurement of the antineutrino magnetic moment. Fusion Science and Technology, 48 (2005) 731-736.

Выбор носителя трития

Материал	Ёмкость по H ₂		Т дис., °C	Р _{рав.} , мм.рт.ст. при 25°C
	см ³ /г	см ³ /см ³		
UH ₃	140	1570	~150	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁴
TiH ₂	468	1700	~450	10 ⁻⁷
TiH _{1,85}	432	1570		
MgNiH ₄	418	1074	240	10 ⁻²
ZrCoH ₃	186	1415	340-350	10 ⁻⁵
LaNi ₃ Mn ₂ H ₆	127		270	10 ⁻²
H ₂ жид.		854	-253	760

Реалистические параметры
TiH₂ TiH_{1,85}

В институте проблем материаловедения (г. Киев) проведен анализ радиоактивной чистоты макетных ТЭ (TiD₂) в медных корпусах – получено:

²³⁸U – 3,7·10⁻¹⁰ г/г; ²³²Th – 4,9·10⁻¹⁰ г/г

[A.A. Yukhimchuk et al. Fusion Science and Technology. 2005. V.48. p. 731-736]

Для достижения максимальной плотности потока (анти)нейтрино необходимо обеспечить максимальную объемную активность трития в конструкции источника. В тоже время такой источник должен быть абсолютно безопасным при любых, в том числе и экстремальных, обстоятельствах.

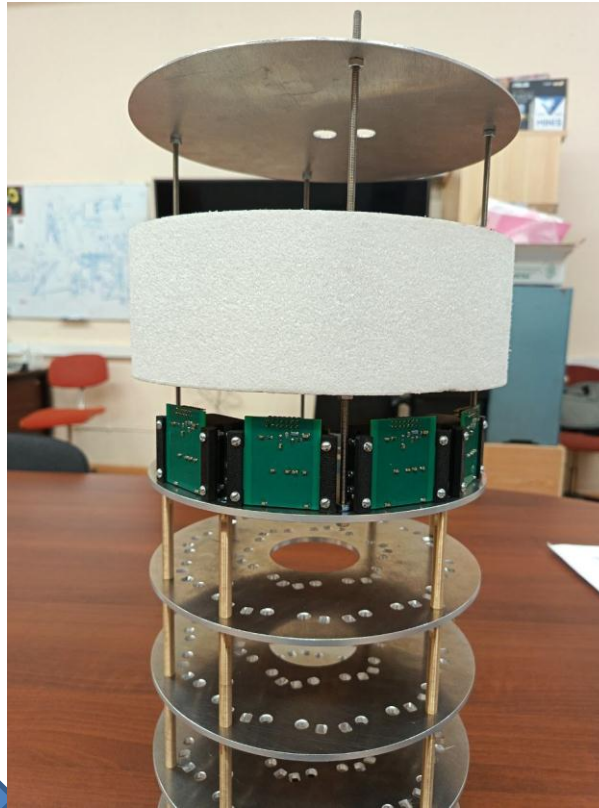
Наиболее подходящим для этого является хранение трития в химически связанном состоянии на гидридообразующих металлах, которые, с одной стороны, имеют более высокую объемную плотность содержания водорода, а с другой – тритий в них при комнатных температурах имеет низкие равновесные давления.

Выбран дигидрид титана. Низкое равновесное давление. Объемное содержание водорода на Ti практически в 1,7 раз выше, чем в жидком состоянии. Возможность безопасной эксплуатации до 400°C, в то время как для хранения трития в жидком состоянии требуется специальная довольно мощная холодильная установка, позволяющая постоянно поддерживать температуру трития (с учетом его тепловыделения) около 20К.

Сборка детектора



Механическая структура с пятью слоями и медный криогенный объем.



Первый слой с детекторными модулями.



Детектор погружен в криогенный объем.



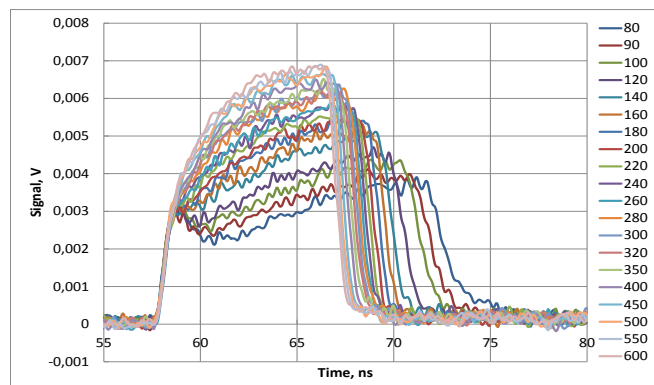
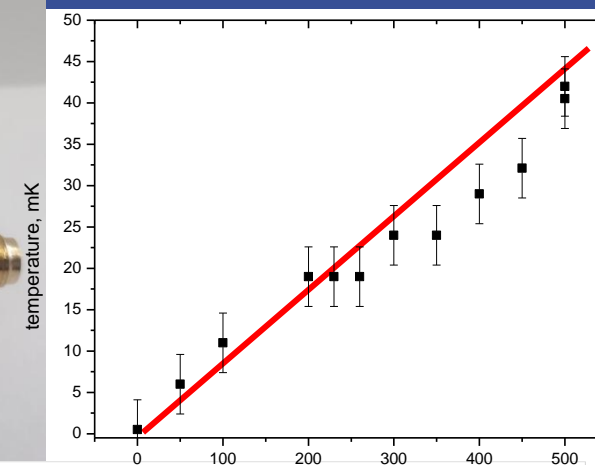
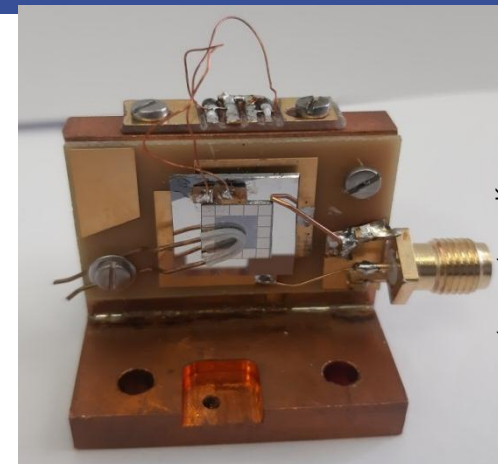
Криостат для тестов детектора.

Кремниевый детектор. Испытания тестовых структур и чувствительных элементов кремниевых детекторов (НГТУ+ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

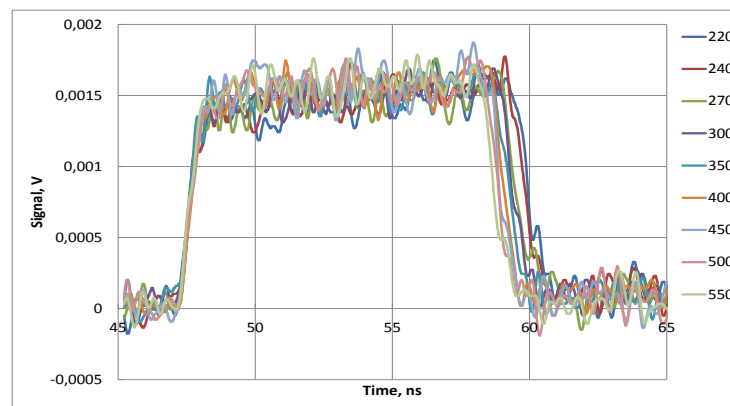
Создан модуль ЧЭ с термометром СИН и получены его температурные отклики при 40 мК.

Зарегистрировано внутреннее тепловое усиление сигнала в ЧЭ и получена его зависимость от напряжения приложенного к ЧЭ

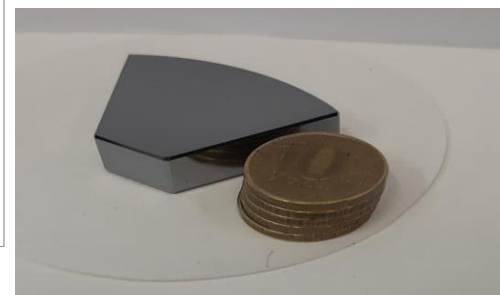
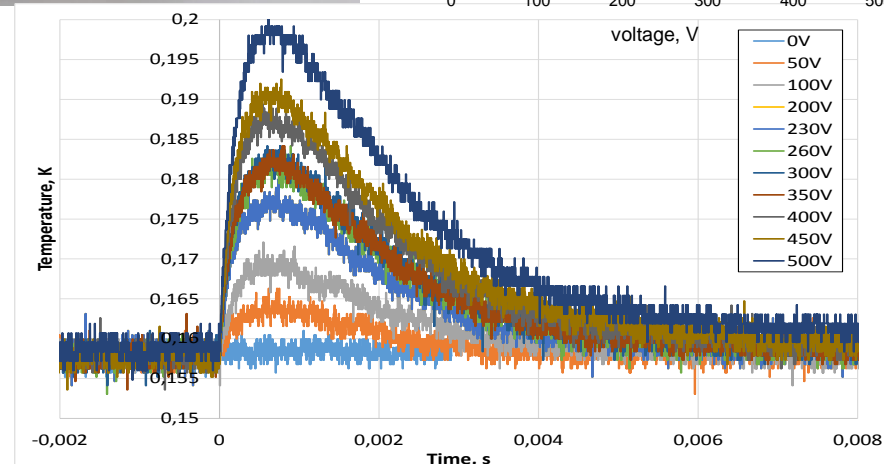
Создана конструкция ЧЭ на основе двухсторонней М-Д-П структуры и экспериментально показана полная активация ее чувствительного объема



дрейф электронов



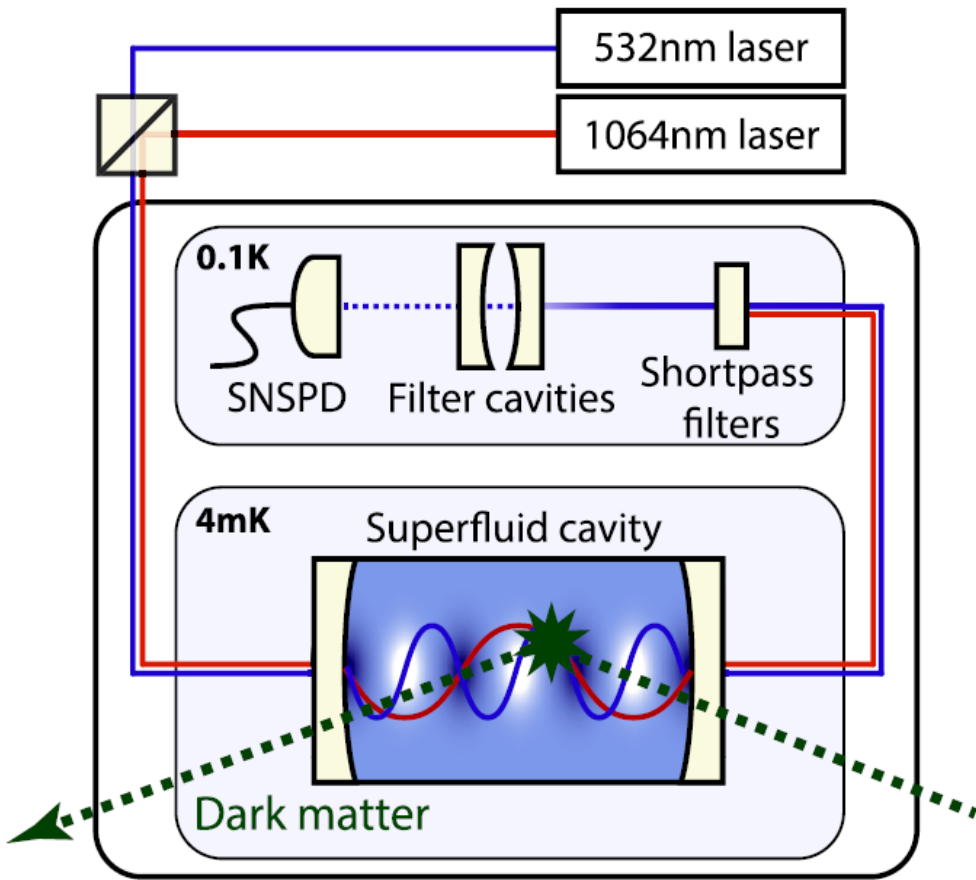
дрейф дырок



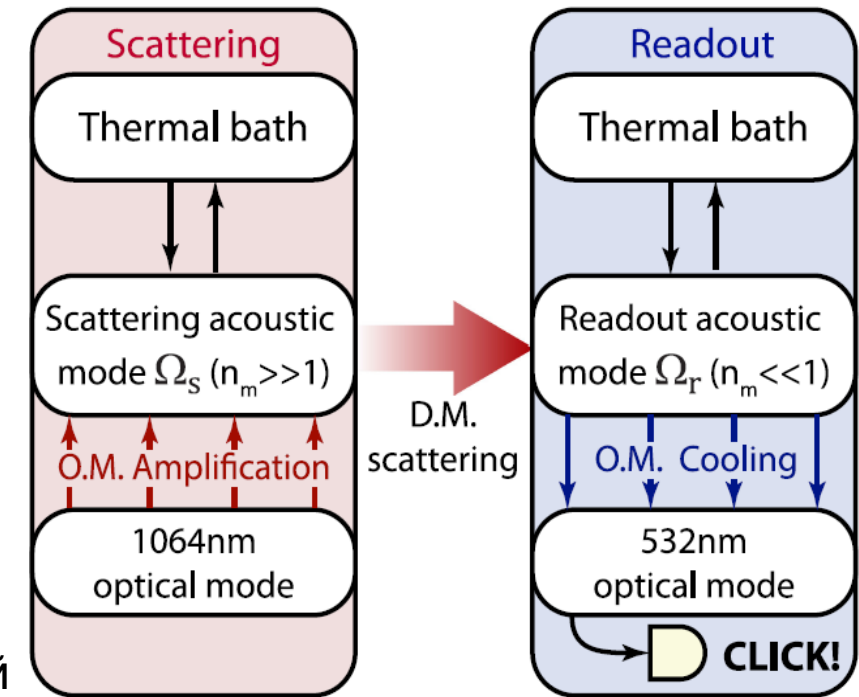
Секторная кремниевая пластина ЧЭ из кремниевой заготовки диаметром 100 мм, толщиной 1 см после полирующего травления

Optomechanical dark matter instrument for direct detection

Christopher G. Baker^{1,*} Warwick P. Bowen^{1,†} Peter Cox^{2,‡} Matthew J. Dolan^{2,§}
Maxim Goryachev^{3,||} and Glen Harris^{1,¶}



Оптомеханический детектор темной материи (ODIN). Фонон от темной материи рассеивается на высоконаселенной фононной моде (мода рассеяния), накачиваемой лазером 1064 нм, в другую фононную моду, связанную с оптической модой 532 нм. Этот фонон преобразуется в антистоксов фотон 532 нм и детектируется однофотонным детектором. Узкополосное (по энергии) детектирование одиночных фононов мкэВ диапазона



The deposited phonon (μeV range) is then converted to a photon (eV range) via an optomechanical interaction with a pump laser.