

*Форма открытия (продления) Проекта /
Подпроекта КИП*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____
“ ____ ” _____ 202_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ
ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта
(далее КИП)**

1.1. Шифр темы / КИП (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

03-2-1100-2010/2024

1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП (для продлеваемых проектов и подпроектов)

1.2. Лаборатория

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова

1.3. Научное направление

Ядерная физика

1.4. Наименование проекта / подпроекта КИП

Исследования реакторных нейтрино на короткой базе

1.5. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП

Житников Игорь Викторович

**1.6. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель
проекта/ подпроекта КИП)**

Лубашевский Алексей Владимирович, Розов Сергей Владимирович, Ширченко Марк Владиславович

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Представляемый проект объединяет в себе 3 эксперимента: DANSS, RICOCHET и ν GeN. Все эксперименты посвящены исследованиям потоков антинейтрино от ядерных реакторов на расстояниях менее 20 метров. Несмотря на то, что каждый из экспериментов разработан под различные задачи, все работы объединены общей сферой исследований (реакторные антинейтрино), во многом пересекающимися и совпадающими научными проблемами, способами их решений. Помимо этого, указанные исследования объединены общим научным персоналом, инфраструктурными ресурсами ОИЯИ или из-за особенностей месторасположения (ограниченное количество персонала ОИЯИ, имеющего доступ к установкам DANSS и ν GeN на Калининской АЭС), или из-за некоторой схожести подходов (RICOCHET и ν GeN – использование полупроводниковых германиевых детекторов для поиска когерентного рассеяния реакторных антинейтрино на ядрах). Решение объединить эти эксперименты в один проект для более эффективной координации ресурсов является следующим шагом в развитии и организации исследований нейтрино в рамках темы «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика». Далее даются краткие аннотации по каждому из экспериментов.

2.1.1. DANSS

DANSS — это нейтринный спектрометр на основе пластмассовых сцинтилляторов (ПС) с чувствительным объемом 1 м^3 , расположенный на четвертом энергоблоке Калининской АЭС. Подъемный механизм позволяет в режиме on-line перемещать спектрометр на 2 метра по вертикали, обеспечивая диапазон измерений 11–13 м от реактора. Высокая степень сегментации детектора, использование комбинированной активной и пассивной защит обеспечивают подавление фона до нескольких процентов относительно регистрируемых ~ 5000 нейтриноподобных соб./сут (в ближнем к реактору положении). Основными целями эксперимента являются проверка гипотезы осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние и долгосрочный прецизионный мониторинг работы ядерного реактора с помощью измерения потока антинейтрино. В течение 2023–24 гг. планируется апгрейд эксперимента - DANSS-2. В результате модификации планируется улучшить энергетическое разрешение и увеличить объем детектора, что позволит повысить чувствительность эксперимента для поиска стерильных осцилляций.

2.1.2. ν GeN

Эксперимент ν GeN направлен на исследование фундаментальных свойств нейтрино, в частности поиск магнитного момента нейтрино (ММН), когерентного упругого рассеяния нейтрино (КРН) и других редких процессов. Спектрометр ν GeN установлен под активной зоной реактора третьего энергоблока Калининской АЭС на расстоянии 11-12 м, что позволяет оперировать гигантским потоком антинейтрино в $(3.6-4.4) \times 10^{13} \tilde{\nu}_e/\text{см}^2/\text{сек}$ при хорошем уровне защиты от космического излучения. Детектирование процессов рассеяния производится с помощью специально разработанного низкопорогового, низкофонового германиевого детектора. С помощью систем из активной и пассивной защиты от фонового излучения достигается низкий уровень фона в области поиска редких событий. Регистрация искомым событий позволяет осуществлять поиск Новой физики за пределами Стандартной Модели, кроме того, может иметь и практическое значение, например при разработке детекторов нового поколения для мониторинга работы ядерного реактора по антинейтринному потоку.

2.1.3. RICOCHET

RICOCHET – это реакторный нейтринный эксперимент нового поколения, направленный на исследование когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах (CEvNS) с процентной точностью в области энергий ядер отдачи ниже 100 эВ (т.е. в области полной когерентности), что может стать ключом к Новой физике в электрослабом секторе. До конца 2023 года планируется разместить установку вблизи исследовательского ядерного реактора института Лауэ-Ланжевена (ILL). В RICOCHET будут использованы два массива криогенных

детекторов: CRYOCUBE (германиевые детекторы-боллометры, аналогичные используемым в эксперименте EDELWEISS) и Q-ARRAY (сверхпроводящий цинк). Массив CRYOCUBE будет состоять из 27 германиевых кристаллов массой по 30 г, работающих при температуре 20 мк. Каждый из кристаллов будет оснащен тепловым сенсором (NTD-Ge) и алюминиевыми электродами, что позволит регистрировать частицы по тепловому и ионизационному сигналам. Это особенно важно при детектировании ядер отдачи, так как значительная часть их энергии уходит не на ионизацию, а на нагрев окружающего их вещества. Именно детекторы-боллометры способны в настоящий момент обеспечить измерение CEvNS с точностью 1%, или лучше.

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Далее даются научное обоснование по каждому из экспериментов, составляющих единый проект исследований реакторных (анти)нейтрино на короткой базе.

2.2.1. Эксперимент DANSS

Цель, актуальность и научная новизна

Поиск осцилляций в легкое ($\Delta m_{14}^2 \sim 0.1-10$ эВ) стерильное нейтрино является одним из актуальных трендов фундаментальной нейтринной физики. Существование стерильного нейтрино могло бы объяснить ряд наблюдаемых противоречивых результатов, прежде всего, реакторную и галиевую (анти)нейтринные аномалии (RAA) и одновременно стать революционным открытием Новой Физики. Реакторные эксперименты на короткой базе (<30 м) имеют ряд конкурентных преимуществ в подобной области исследований: гигантский поток антинейтрино от самых интенсивных доступных искусственных источников (анти)нейтрино на Земле и малое расстояние от источника излучения, на котором предполагаемый осцилляционный паттерн еще не размыт. Стоит отметить, что спектрометр DANSS является одним из лидеров среди проектов подобного типа, позволяя исследовать наивысший доступный поток антинейтрино ($\sim 5 \times 10^{13} \bar{\nu}_e/\text{cm}^2/\text{s}$) с одним из-лучших/лучшим соотношением сигнала к фону ($S/B > 50$).

Методы и подходы, методики

В основе DANSS лежит метод измерения реакторных антинейтрино при помощи реакции обратного бета распада ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$), где после взаимодействия антинейтрино с веществом детектора, регистрируются позитрон и нейтрон. Детектор изготовлен из пластмассового сцинтиллятора, покрытого тонким Gd-содержащим слоем, выполняющим функции рефлектора и захватчика нейтронов. Сбор света осуществляется через три спектросмещающие (WLS) фибры, одна из которых заведена на мультипиксельный лавинный фотодиод (SiPM, 2500 каналов), и две подсоединяются к ФЭУ (50 каналов). ФЭУ собирают свет с 100 элементарных ячеек - стрипов (размеры 2x5x100 см), объединенных в модули 20x20 см² (Рис.1, справа). Стрипы уложены в слои, при этом соседние слои расположены ортогонально друг другу для фиксации XY-координаты частиц, вызвавших срабатывание двух соседних слоев. В такой смешанной системе светосбора сигналы с ФЭУ используются как триггеры событий для записи, в то время как SiPM позволяют определять пространственные паттерны событий с точностью до единичных сработавших стрипов, тем самым позволяя подавлять фоновые события.

Спектрометр DANSS представляет собой куб общим объемом 1 м³, окруженный комбинированной пассивной защитой (медь, свинец, борированный полиэтилен), а также активной защитой от космических мюонов в виде сцинтилляционных пластин (Рис.1 слева). DANSS расположен под 4-й энергоблоком КАЭС на подвижной платформе, что позволяет проводить исследования потоков антинейтрино в диапазоне 10.9-12.9 м до активной зоны.

Текущая ситуация с поиском осцилляций в стерильное нейтрино показана на Рис.2. На данный момент большинство ведущих экспериментов не наблюдают значимого сигнала

нейтринных осцилляций (Рис.1 слева). Космология и нейтринные эксперименты по измерению q_{13} также выдают только ограничения, но из-за большой базы ($L > 100$ м) эти реакторные эксперименты актуальны в области сверхмалых масс стерильного нейтрино $[0.001-0.1] \text{ эВ}^2$ и не чувствительны к области RAA (Рис.2 справа).

В 2018 году были опубликованы результаты эксперимента NEUTRINO-4 (ПИЯФ, Гатчина), подтверждающие существования осцилляций антинейтрино в стерильное состояние с параметрами $\sin^2(2\Theta_{14}) \sim 0.2-0.3$, $\Delta m_{14}^2 \sim 6-7 \text{ эВ}^2$ [arXiv:2005.05301]. Впоследствии новые результаты, указывающие на возможность осцилляций в стерильное нейтрино, опубликовала коллаборация BEST [arXiv:2109.11482] с лучшей точкой $\sin^2(2\Theta_{14}) \approx 0.4$, $\Delta m_{14}^2 < 0.5 \text{ эВ}^2$. Поскольку подобные результаты имеют фундаментальное значение, их независимая проверка – актуальная и важная задача нейтринной физики на ближайшее время.

К сожалению, в своей нынешней конфигурации DANSS не чувствителен к фазовой точке заявленного эффекта NEUTRINO-4. Для продвижения в область эффекта NEUTRINO-4, требуется апгрейд детектора. Главными целями модификации являются существенное повышение разрешения до 12% @ МэВ с нынешних 34% @ МэВ и увеличение на 70% объема детектора. Для этого разрабатывается следующая версия спектрометра с использованием новых стрипов (1440 шт., $2 \times 5 \times 120 \text{ см}^3$, 8 фибр по 2 SiPM на каждую фибру) из пластика с улучшенными оптическими характеристиками по сравнению с задействованным в DANSS. При этом DANSS-2 будет использовать те же защиту и подвижную платформу, что позволит существенно снизить затраты на модернизацию, которую планируется провести в течение следующих двух лет.

DANSS-2 в итоге будет обладать большей чувствительностью, что позволит достигнуть точки интереса за несколько лет измерений и внести существенный вклад в оценку гипотезы существования стерильного нейтрино, а также подтвердить (или опровергнуть) параметры в области фазового пространства, указанной экспериментами NEUTRINO-4 и BEST.

Участие ОИЯИ

Группа ОИЯИ играет ключевую роль в эксперименте DANSS:

- Производство и тестирование стрипов
- Разработка методики измерений, разработка системы DAQ
- Разработка и создание системы активного мюонного вето
- Сборка детектора на КАЭС
- Обеспечение непрерывного набора экспериментальных данных на КАЭС в течение нескольких лет, техническое обслуживание экспериментальной установки
- Изучение фоновых условий на КАЭС, разработка методов учета фона и/или его подавления
- Анализ данных
- Публикация результатов

Риски

Экспериментальная установка находится в помещении Калининской АЭС и поэтому нельзя исключить потенциальные сложности вследствие введения новых правил и регуляций на АЭС. Однако, стоит заметить, что на протяжении многих лет дирекция и персонал КЛНАЭС оказывают большую помощь и содействие в выполнении проектов ОИЯИ на территории станции.

Основные риски в осуществлении проекта представляются нам связанными с закупками необходимого оборудования для создания DANSS-2 (в особенности оптоволоконных и кремниевых фотоумножителей), импортозамещающих аналогов которым в настоящее время не найдено. Работы по поиску и покупке оборудования, комплектующих для следующей фазы эксперимента продолжаются.

2.2.2. Эксперимент νGeN

Эксперимент νGeN направлен на поиск когерентного рассеяния нейтрино, магнитного момента нейтрино и других редких явлений, возникающих при рассеянии нейтрино. Когерентное упругое Рассеяние Нейтрино на ядрах вещества (КРН) – это процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели. Однако он еще никогда не был обнаружен в области полной когерентности и для реакторных антинейтрино. Детектирование этого процесса является важным тестом Стандартной Модели. Большой интерес к этому процессу в настоящее время вызван еще тем, что с его помощью можно производить поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильного нейтрино и производить другие исследования. Однако, вследствие низкого сечения рассеяния и малого энерговыделения обнаружение данного эффекта является нетривиальной задачей, требующего использования низкороговых детекторов и различных методов по подавлению фоновых событий. Магнитный Момент Нейтрино (ММН) – это фундаментальный параметр, исследование которого может привести к результатам, выходящим за рамки Стандартной Модели. Минимально Расширенная Стандартная Модель предсказывает очень малое значение магнитного момента для массивных нейтрино ($\mu_{\nu} < 10^{-19} \mu_B$), которое не может быть измерено в современных экспериментах. Однако в большом количестве расширений Стандартной Модели предсказывается, что значение ММН может быть на уровне $10^{-(10 \pm 12)} \mu_B$ для Майорановских нейтрино. Наблюдение значения ММН выше, чем $10^{-14} \mu_B$ будет свидетельствовать об обнаружении физики за пределами Стандартной Модели и о Майорановской природе нейтрино. В проекте GEMMA, проводимом ОИЯИ совместно с ИТЭФ на втором энергоблоке Калининской АЭС был установлен лучший в настоящее время предел на величину магнитного момента электронного нейтрино в $2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$. В эксперименте νGeN планируется увеличить чувствительность до уровня $(5-9) \cdot 10^{-12} \mu_B$ после нескольких лет измерений. Регистрация нейтрино от реактора с помощью компактных германиевых детекторов также имеет и прикладное значение, такое как мониторинг мощности реакторов и контроль за нераспространением ядерного оружия.

Эксперимент νGeN расположен под реактором энергоблока №3 Калининской АЭС для исследования вышеперечисленных процессов. Установка находится на расстоянии (11-12.2) м от центра активной зоны реактора, что позволяет оперировать рекордным потоком нейтрино в $(3.6-4.4) \cdot 10^{13}$ нейтрино/(см²·сек). Более того, экспериментальный зал расположен непосредственно под реактором, что дает хорошую защиту от космического излучения, эквивалентную 50 м в.э. Схема реактора показана на (Рис.3 справа). В 2022 году была завершена установка специального подъемного механизма, позволяющего производить движение всей экспериментальной установки по направлению к активной зоне реактора (Рис.3 справа). Это позволяет изменять поток антинейтрино и значительно снижать систематическую ошибку, связанную с неопределенностями в определении уровня фона. Для уменьшения количества фоновых событий в области интереса используется специальная система из активной и пассивной защиты от радиоактивного излучения. Схема защиты представлена на рисунке 4.

Внутренняя часть защиты представляет собой специальный нейлон изготовленный на 3D принтере, далее идет 10 см слой меди, 8 см борированного полиэтилена, 10 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Снаружи установлено активное мюонное veto, созданное из сцинтиллятора толщиной 5 см. Для снижения микровибраций и шумовых событий детектор установлен на специальную антивибрационную платформу. Она позволяет существенно улучшить энергетическое разрешение детектора и снизить порог измерений. Для обеспечения хорошего разрешения и снижения фоновых и шумовых событий была создана специальная система набора данных. Принципиальная схема набора данных вместе с фотографией электроники показана на рисунке 5.

Специально разработанный низкороговый, низкофоновый германиевый детектор используется для регистрации сигнала от нейтрино. Калибровка детектора осуществляется с помощью ториевого источника, космогенных пиков и генератора импульсов. Энергетическое

разрешение в условиях АЭС, полученное с генератором импульсов, составило 101.6(5) эВ (FWHM). Было продемонстрировано, что эффективность регистрации сигнала остается всегда выше 80% для сигналов с энергией больше, чем 250 эВ. Эффективный порог анализа событий составляет около 300 эВ, что является большим улучшением по сравнению с экспериментом GEMMA, где эффективный порог составлял 2.8 кэВ. Расширение области измерений в низкую область энергий увеличивает чувствительность при поиске ММН, кроме того, позволяет производить поиск когерентного упругого рассеяния нейтрино и других редких процессов. Сравнение экспериментальных спектров, полученных в экспериментах GEMMA и ν GeN показано на рисунке 6.

Как продемонстрировано на рисунке 6, полученный уровень фона в низкоэнергетической области поиска значительно лучше, чем это было в эксперименте GEMMA. Также, было продемонстрировано, что общий уровень фона не меняется в режимах измерений с остановленным и работающим реакторе, что говорит о хорошем качестве исполнения защиты от радиоактивного излучения и стабильности набора данных.

Созданная установка ν GeN обладает одной из лучших в мире чувствительности к когерентному рассеянию реакторных антинейтрино. Всего по декабрь 2022 года было набрано 170 кг суток при остановленном реакторе и около 1000 кг суток при работающем реакторе. Набранная статистика сравнима со статистикой, набранной в эксперименте GEMMA (1133.4 кг суток ON, 280.4 кг суток OFF). Поэтому, после тщательного анализа данных ожидается существенное улучшение чувствительности к магнитному моменту нейтрино по сравнению с результатами, полученными в эксперименте GEMMA. В настоящее время продолжается набор данных (с 2022 года в ближнем к реактору положении). Планируется значительно улучшить чувствительность к обнаружению КРН. Для дальнейшего улучшения чувствительности экспериментальной установки также планируется произвести модернизацию. Планы по модернизации включают изготовление внутреннего активного вето, для снижения уровня фона в области интереса. Также планируются работы по улучшению параметров детектора и приобретения нового детектора с более низким порогом измерений.

В результате выполнения проекта ожидается впервые зарегистрировать когерентное рассеяние антинейтрино от реактора, улучшить чувствительность к обнаружению магнитного момента нейтрино до уровня $(5-9) \cdot 10^{-12}$ μ В после нескольких лет измерений, что позволит значительно улучшить современное ограничение.

Участие ОИЯИ:

Эксперимент ν GeN выполняется в основном силами ОИЯИ. Нами было приобретено необходимое оборудование, изготовлена экспериментальная установка, проводятся измерения и анализ полученных данных. Сотрудники других институтов оказывают помощь в моделировании и обработке экспериментальных данных.

Риски

Аналогично проекту DANSS экспериментальная установка находится в помещении Калининской АЭС и поэтому нельзя исключить потенциальные сложности в проведении работ вследствие введения новых правил и регуляций на АЭС. Однако, стоит заметить, что на протяжении многих лет дирекция и персонал КЛНАЭС оказывают большую помощь и содействие проекту.

2.2.3. Эксперимент RICOCHET

Поиск физики за пределами Стандартной Модели требует крайне прецизионного изучения низкоэнергетической части спектра ядер отдачи, возникающих при CEvNS. Это

связано с тем, что явления Новой Физики могут оказывать сильное влияние на форму спектра ядер отдачи при энергиях ниже 100 эВ. Другим важным требованием для поиска новой физики является проведение измерений CEvNS в области полной когерентности, для этого, в случае ядер германия, энергия нейтрино должна быть меньше 10 МэВ.

Благодаря новейшим криогенным болометрам с беспрецедентно низкими энергетическим порогом и уровнем фоновых событий, эксперимент RICOCHET предполагает обеспечить ~1% прецизионность измерения CEvNS вплоть до $O(10)$ эВ. Это позволит не только расширить наше понимание электрослабого сектора, но и проводить поиск новых, экзотических явлений, уходящих за рамки Стандартной Модели: стерильные нейтрино, темная материя, нестандартные взаимодействия.

В RICOCHET будут использованы криогенные детекторы, разработанные в рамках другого проекта, в котором много лет участвуют сотрудники ОИЯИ — EDELWEISS. Детекторы будут помещены в так называемый «сухой» криостат растворения ^3He - ^4He , который может работать на протяжении нескольких лет без дозаправок гелием. Криостат был разработан в сотрудничестве между ОИЯИ и IP2I и изготовлен компанией CryoConcept. Аналогичный криостат уже используется для проведения фазы R&D [Physical Review D 99 (8), 082003]. Эксперимент RICOCHET будет проводиться вблизи ядерного реактора ILL мощностью 58 МВт.

Криогенные детекторы

Детекторы RICOCHET разработаны в соответствии со следующими требованиями:

- Энергетический порог в районе $O(10)$ эВ;
- Использование низкорadioактивных материалов, в сочетании со значительным подавлением фоновых событий. Так как чувствительность эксперимента линейно зависит от отношения полезного сигнала к фону;
- Полная масса детекторов-мишеней около 1 кг, достаточна для значительной чувствительности эксперимента к Новой физике;
- Разные типы материалов для создания детекторов-мишеней, так как большинство явлений Новой физики, такие как нестандартные взаимодействия, зависят от ядерных свойств мишени.

В эксперименте Ricochet будут использованы два типа детекторов: на основе германиевых полупроводников и металлического сверхпроводящего цинка. Оба типа детекторов хорошо подходят для разделения электромагнитного фона и ядер отдачи при низких энергиях. На Рисунке 6 показан упрощенный вид детекторной части установки RICOCHET. Оба массива детекторов будут располагаться в общей радиоактивно чистой медной капсуле, защищающей их от инфракрасного излучения.

Ge полупроводники

В полупроводниковых болометрах отделение фона от нейтринных событий осуществляется благодаря регистрации теплового и ионизационного сигналов, соотношение между которыми зависит от типа вызвавшей их частицы: γ -кванты и β -частицы вызывают электроны отдачи, а CEvNS и нейтроны — ядра отдачи.

Цель RICOCHET достигнуть параметров детекторов, обладающих энергетическим разрешением ~10 эВ (RMS) для теплового канала и ~10 эВ для ионизационного канала, что в несколько раз лучше, чем у других, аналогичных по массе, криогенных болометров. Такое высокое разрешение для ионизационного канала обеспечивается применением малошумящего НЕМТ-предусилителя, в сочетании с малой емкостью кабелей и детекторов. Поверхность детекторов покрыта чередующимися кольцевыми (FID) электродами, наличие которых позволяет отделять события, возникшие на поверхности детектора, от событий, произошедших

внутри детектора. Такая система электродов была впервые разработана коллаборацией EDELWEISS [JINST, 12, 08, P08010]. Все вышеприведенные преимущества детекторов RICOCHET обеспечивают подавление электромагнитного фона в 10^3 раз в области энергетического порога.

Германиевые детекторы будут изготовлены силами коллаборации. Кристаллы из сверхчистого германия является коммерчески доступным. При изготовлении детектора на первом этапе, на поверхность кристалла наносится аморфный слой Ge:H, необходимый для улучшения сбора заряда. Поверх аморфного слоя напыляются FID алюминиевые электроды. На втором этапе, к поверхности кристалла прикрепляется тепловой датчик (NTD-Ge). После этого детектор устанавливается в медную оправку.

Коллаборация RICOCHET совместно с группой EDELWEISS успешно продемонстрировала возможность достижения порога 55 эВ на германиевом болометре массой 33г, работающем на поверхности [Phys. Rev. D 99 (8), 082003], а также на нескольких детекторах в подземной лаборатории [Phys. Rev. Lett. 125, 141301]. Ожидаемый порог регистрации у детекторов RICOCHET составляет 50 эВ. В настоящее время в IP2I идет установка германиевых болометров в криостат.

Сверхпроводящий цинк

Вторым типом детекторов, планируемых в RICOCHET, являются металлические (Zn) сверхпроводники. Уникальным преимуществом таких детекторов является их высокая способность разделения сигналов, вызванных индуцированными CEvNS ядрами отдачи, от большинства фонов. Теоретически, такие детекторы позволят регистрировать события с крайне низкими энергиями, вплоть до энергии связи куперовской пары [JHEP 1608, 057 (2016)]. На каждый детектор установлены две золотые пластинки. Одна прикреплена непосредственно на цинковый кристалл, а вторая имеет подложку из ZnO, толщиной 50-100 нм. Такая схема детекторов дает возможность регистрировать и фононы, и фононы + квазичастицы, возникшие при взаимодействии частицы с детектором. Для считывания обоих сигналов будут использованы сверхпроводящие датчики TES.

Благодаря высокому сечению CEvNS, установка RICOCHET будет представлять собой компактный нейтринный детектор, с эффективной массой около 1 кг. Для подавления окружающего фона криостат с детекторами будет окружен пассивной защитой из свинца и полиэтилена. На Рисунке 8 показан общий вид установки RICOCHET. Экспериментальная установка будет включать в себя:

- Криостат, состоящий из многоступенчатого (50К, 4К, 1К, 100мК и 10мК) блока растворения. Капсула с детекторами будет расположена под камерой растворения. Для уменьшения паразитных емкостей кабелей, front-end электроника будет охлаждаться до 1К и располагаться в одном объеме с детекторами.
- Две независимые рамы, удерживающие криостат. Одна для блока растворения, вторая для подавления вибраций от пульсирующей трубки охладителя.
- Газовая система, включающая в себя все насосы, резервуар с $^3\text{He}/^4\text{He}$, компрессор с пульсирующей трубкой и трубопровод. Охлаждение первых двух ступеней криостата осуществляется компрессором с пульсирующей трубкой. Следующие две ступени (50К и 4К) охлаждаются посредством цикла Стирлинга. Температура 10 мК в последней стадии достигается с помощью замкнутого контура растворения $^3\text{He}/^4\text{He}$.
- Многослойная пассивная защита от внешнего фона, окружающая криостат.
- Рядом с экспериментальной установкой будет создано чистое помещение, необходимое для хранения детекторов перед их установкой в криостат.

Место проведения эксперимента RICOCHET

Эксперимент RICOCHET будет проводиться на экспериментальной площадке H7 реактора Института Лауэ – Ланжевена (далее ILL) в Гренобле (Франция). Ранее в этом же месте

располагался другой нейтринный эксперимент — STEREO. Площадка H7 расположена на расстоянии 8 метров от активной зоны ядерного реактора, номинальная мощность которого составляет $\sim 57,8$ МВт. Поток нейтрино в H7 составляет $1.4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Реактор работает непрерывно в 50-дневном цикле, после чего останавливается на длительный промежуток времени. Такой режим работы реактора позволяет хорошо измерить независимые от работы реактора фоны (например, внутренние загрязнения и космогенный фон). Место проведения эксперимента расположено под водным каналом, который обеспечивает 15 метров водного эквивалента эффективной защиты от космического излучения. Площадка H7 хорошо защищена от реактора и соседних экспериментов и в нее не выводится нейтронный пучок. Фоновые условия H7 были хорошо изучены при проведении эксперимента STEREO [JINST 13, 07, P07009 (2018)].

Ожидаемые результаты

На Рисунке 10 показана ожидаемая скорость счета CEvNS сигналов и фоновых событий в эксперименте RICOCHET. Согласно разработанной и экспериментально проверенной модели фона, статистическая значимость регистрации CEvNS в эксперименте RICOCHET составит от 7,5 до 13,6 σ , после одного реакторного цикла, в зависимости от эффективности мюонного вето.

Через 10 реакторных циклов (3 года измерений) ожидается достижение целевой $\sim 1\%$ точности измерения CEvNS . Это на порядок увеличит вероятность открытия Новой Физики, по сравнению с существующими экспериментами. Указанные выше результаты получены в предположении о 5% систематической неопределенности оценки фона и 70% эффективности регистрации CEvNS . Такая эффективность регистрации CEvNS в основном обусловлена мертвым временем из-за работы мюонного вето.

Участие ОИЯИ:

В задачи группы ОИЯИ в эксперименте RICOCHET входит:

- Разработка и запуск криогенной системы;
- Разработка низкофоновых методов измерений; Новые вспомогательные детекторы;
- Разработка и создание части системы мюонного вето;
- Участие в наборе экспериментальных данных, включая калибровочные измерения;
- Изучение низких уровней фона и разработка новых методов регистрации нейтронов и радона;
- Отбор и изготовление низкофоновых материалов;
- Моделирование детекторов и анализ данных; Публикация результатов.

Риски

График проведения эксперимента зависит от стабильности работы его компонентов, включая криогенную систему, электронику и другие системы. Отказ любой из систем трудно прогнозируем. В то же время участники коллаборации имеют почти 20-летний опыт эксплуатации криогенных установок (EDELWEISS), который позволяет устранять проблемы в криогенных системах в кратчайшие сроки

Важным моментом при проведении любого низкофонового эксперимента является предотвращение радиационного загрязнения его элементов. Причиной загрязнений могут быть негерметичные калибровочные источники, радон и другие радиоактивные газы в воздухе, пыль и грязь. Во избежание подобных проблем на всех этапах проведения эксперимента (от создания детектора до его калибровки) необходимо придерживаться особых правил работы.

Главным вызовом при проведении эксперимента RICOCHET является отделение CEvNS сигналов от фона. Это в свою очередь требует идентификации с высокой точностью фоновых событий, имитирующих CEvNS . Помимо традиционных методов подавления фона, в

RICOCHET применяются специальные методы учета фоновых сигналов (измерения теплового и ионизационного сигналов, дискриминация поверхностных событий, разделение сигналов по форме импульса). Корректность интерпретации данных в RICOCHET сильно зависит от стабильности нейтронного фона, особенно при сравнении данных, полученных с включенным и выключенным реактором. Результаты изучения нейтронного фона были опубликованы в [Eur. Phys. J. C (2023) 83:20].

Целью эксперимента является достижение 1% точности измерения CEvNS, поэтому крайне важным является вопрос о систематических ошибках.

2.3. Предполагаемый срок выполнения

2.3.1 DANSS

В 2023 году – предварительные методические работы и закупки по эксперименту DANSS-2.

2023-2024 – продолжение измерений на установке DANSS, анализ данных измерений

2023-2024 – разработка и финальная сборка DANSS-2 на Калининской атомной станции.

Начало набора данных

Планируется проведение измерений до 2028. Продолжение эксперимента после 2028 года будет зависеть от полученных результатов.

2.3.2 vGeN

2023-2024 проведение измерений в текущей конфигурации.

2024 планируется модернизация установки, установка нового внутреннего вето, усовершенствование подъемного механизма для работы на более близком расстоянии к детектору, реконфигурация мюонного вето.

2024-2028 набор данных. Продолжение эксперимента после 2028 года будет зависеть от полученных результатов.

2.3.3 RICOCHET

2024 год: ввод в эксплуатацию установки в ILL. Начало набора данных с германиевыми болометрами, продолжение работ по усовершенствованию детекторов. Создание улучшенной Монте-Карло модели, на основе экспериментальных данных.

Для достижения 1% уровня точности эксперименту потребуется минимум 10 реакторных циклов. Таким образом измерения будут продолжаться не менее трех лет, в зависимости от работы реактора ILL.

Разрабатываемый массив цинковых детекторов будет добавлен в установку сразу после его изготовления (скорее всего, не ранее конца 2024 года).

В течение всего времени выполнения эксперимента мы будем изучать фоновые условия и проводить многочисленные калибровки, анализ данных, R&D для будущих экспериментов, а также готовить публикации к печати.

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты	400	550	700	850	1000
Tier 1 (ядро-час)	300000	360000	420000	480000	540000
Tier 2 (ядро-час)	30000	36000	42000	48000	54000
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU	-	-	-	-	-
Облака (CPU ядер)	-	-	-	-	-

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

2.5.1 Эксперимент DANSS

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
НИЦ "Курчатовский институт" - ИТЭФ	РФ	Москва	И.Г. Алексеев, А.С.Кобякин, В.М. Нестеров, К.А.Перминов, В.Ю. Русинов, Э.И. Самигуллин, Д.Н.Свирида, Н.А.Скробова, Е.И. Тарковский	Scientific collaboration agreement
ФИАН	РФ	Москва	М.В. Данилов А.М. Коновалов А.Н. Тулупов	Scientific collaboration agreement

2.5.3 Эксперимент ν GeN

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
ФИАН	РФ	Москва	М.В. Данилов А.М.Коновалов	Scientific collaboration agreement
IEAP	Чехия	Прага	К.Balej К.Smolek	Scientific collaboration agreement

2.5.3 Эксперимент RICOCHET

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Univ Lyon, Universite Lyon 1, CNRS/IN2P3,	France	Lyon (Villeurbanne)	Billard J. Juillard A. De Jesus M.	Scientific collaboration agreement

IP2I-Lyon			<p>Augier C. Gascon J. Cazes A. Sanglard V. Misiak D. Colas J. Filippini J.-B. Salagnac T. Martini N. Lattaud H. Guy E. Vagneron L. Guerin C. Ferriol S. Baulieu G. Chaize D. Ianigro J.-C. Mounier F.</p>	
Centre de Spectroscopie Nucleaire et de Spectroscopie de Masse, IN2P3-CNRS, Universite Paris XI	France	Orsay	<p>Marnieros S. Giuliani A. Olivieri E. Oriol C. Poda D. Berge L. Broniatowski A. Dumoulin L. Chapellier M. de Marcillac P. Redon T.</p>	
Univ. Grenoble Alpes, CNRS	France	Grenoble	<p>Monfardini A. Calvo M. Goupy J. Exshaw O. Minet J. Bres G. Bret J.-L. Mocellin J.-L. Chala M. Chemin G. Goy C. Heusch M. Real J.-S. Ricol J.-S. Lamblin J. Perbet E. Rarbi F. Scorza S. Stutz A. Vezzu F.</p>	
Institut Laue-Langevin	France	Grenoble	<p>Fuard S. Robert A. Soldner T.</p>	

Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology	USA	Cambridge	Formaggio J. A. Li M. Heine S.T. Mayer D.W. Harrington P. Stachurska J. Winslow L. Sibille V. Johnston J. P. Reyes F. C. Van De Pontseele W.
Department of Physics & Astronomy, Northwestern University	USA	Evanston	Figuroa-Feliciano E. Chen R. Schmidt B. Ovalle Mateo L. Novati V.
University of Massachusetts	USA	Amherst	Hertel S.A. Pinckney H.D. Patel P.K. Chaplinsky L.

2.6. Организации-соисполнители (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	11.45	-
2.	инженеры	8.15	-
3.	специалисты	0.4	-
4.	служащие	-	-
5.	рабочие	0.6	-
	Итого:	20.6	-

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Белов Вячеслав Валерьевич	ЛЯП	Научный сотрудник	0.5
		Быстряков Артём Дмитриевич	ЛЯП	Младший научный сотрудник	1

		Ваганов Юрий Аркадьевич	ЛЯП	Научный сотрудник	0.1
		Васильев Сергей Иванович	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.5
		Воробьева Марина Юрьевна	ЛЯП	Научный сотрудник	0.1
		Гуров Юрий Борисович	ЛЯП	Начальник сектора	0.1
		Гусев Константин Николаевич	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.2
		Житников Игорь Викторович	ЛЯП	Научный сотрудник	0.8
		Иноятов Анвар Хидоятович	ЛЯП	Начальник сектора	0.4
		Казарцев Сергей Вячеславович	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.5
		Караиванов Димитр Веселинов	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.2
		Лубашевский Алексей Владимирович	ЛЯП	Начальник сектора	0.9
		Медведев Дмитрий Владимирович	ЛЯП	Научный сотрудник	1.0
		Мирзаев Ниджат Агиль оглы	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.1
		Морозов Владимир Александрович	ЛЯП	Главный научный сотрудник	0.2
		Пономарев Дмитрий Владимирович	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.5
		Розов Сергей Владимирович	ЛЯП	Заместитель начальника отдела	0.5
		Саламатин Александр Васильевич	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.3
		Саламатин Денис Александрович	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.1
		Сандуковский Вячеслав Григорьевич	ЛЯП	Консультант при дирекции ЛЯП	0.25
		Суслов Иван Андреевич	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.5
		Темербулатова Наргиза	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.1
		Тимкин Виктор Владимирович	ЛЯП	Научный сотрудник	0.4
		Философов Дмитрий Владимирович	ЛЯП	Начальник сектора	0.1
		Фомина Мария	ЛЯП	Научный сотрудник	0.2

		Викторовна			
		Хушвактов Журабек Хатамович	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.5
		Ширченко Марк Владиславович	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.6
		Шитов Юрий Александрович	ЛЯП	Старший научный сотрудник	0.5
		Якушев Евгений Александрович	ЛЯП	Начальник отдела	0.2
		Немченко Игорь Борисович	ЛЯП	Начальник группы	0.1
2.	инженеры	Абд Альнгар Махмуд Абдулилах Махмуд	ЛЯП	Инженер	0.1
		Аксенова Юлия Викторовна	ЛЯП	Инженер	0.5
		Алексеев Игорь Васильевич	ЛЯП	Старший инженер	0.3
		Вагина Ольга Васильевна	ЛЯП	Инженер	0.2
		Вольных Владимир Петрович	ЛЯП	Ведущий инженер	0.25
		Довбненко Максим Станиславович	ЛЯП	Старший инженер	1.0
		Доценко Иван Сергеевич	ЛЯП	Старший инженер	0.1
		Евсеев Сергей Александрович	ЛЯП	Инженер	0.2
		Калинова Боряна Евтимова	ЛЯП	Инженер	0.2
		Камнев Илья Ильич	ЛЯП	Инженер	0.2
		Катулин Сергей Анатольевич	ЛЯП	Старший инженер	0.1
		Катулина Светлана Леонидовна	ЛЯП	Старший инженер	0.2
		Киянов Сергей Павлович	ЛЯП	Старший инженер	0.5
		Кузнецов Алексей Сергеевич	ЛЯП	Инженер	1.0
		Пушков Дмитрий Сергеевич	ЛЯП	Старший инженер	0.5
		Розова Ирина Евгеньевна	ЛЯП	Инженер	0.8
		Фатеев Сергей Вадимович	ЛЯП	Инженер	0.1
		Шахов Константин Викторович	ЛЯП	Младший научный сотрудник	0.8
		Шевченко Марина Юрьевна	ЛЯП	Инженер	0.3
		Шевчик Егор	ЛЯП	Старший инженер	0.5

		Андреевич			
		Щербакова Ирина Сергеевна	ЛЯП	Инженер	0.3
3.	специалисты	Кулькова Елена Дмитриевна	ЛЯП	Специалист по документообороту	0.1
		Ледницка Татьяна	ЛЯП	Лаборант	0.1
		Морозова Татьяна Анатольевна	ЛЯП	Старший инспектор	0.2
4.	рабочие	Емельянов Андрей Николаевич	ЛЯП	Слесарь-ремонтник	0.2
		Заикин Андрей Анатольевич	ЛЯП	Механик экспериментальных стендов и установок	0.1
		Фарисеева Валентина Васильевна	ЛЯП	Старший техник	0.3
	Итого:				20.6

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	-	-
2.	инженеры	-	-
3.	специалисты	-	-
4.	рабочие	-	-
	Итого:	-	-

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП). Детализация приводится в отдельной форме.

2 900 000 USD

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

-

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____/_____

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта / подпроекта КИП _____

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту _____

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта / Подпроекта КИП**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)	550	110	110	110	110	110
	Материалы	550	110	110	110	110	110
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	1500	300	300	300	300	300
	Пуско-наладочные работы	100	20	20	20	20	20
	Услуги научно- исследовательских организаций	-	-	-	-	-	-
	Приобретение программного обеспечения	50	10	10	10	10	10
	Проектирование/строительство	50	10	10	10	10	10
	Сервисные расходы <i>(планируются в случае прямой принадлежности к проекту)</i>	100	20	20	20	20	20
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы					
		– сумма FTE,	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
		– ускорителя/установки,	-	-	-	-	-
		– реактора,.....	-	-	-	-	-
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ <i>(статьи бюджета)</i>	2900	580	580	580	580
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	-	-	-	-	-

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /
ПОДПРОЕКТА КИП

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

Приложение 1.

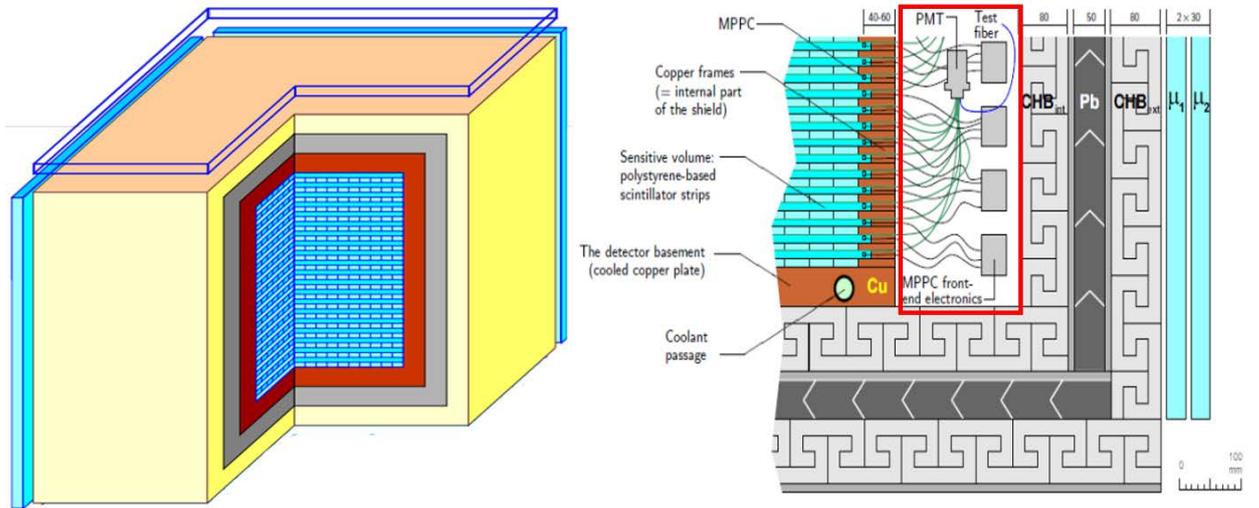


Рисунок 1. Спектрометр DANSS в сборе (слева) и конструкция его защиты (справа).

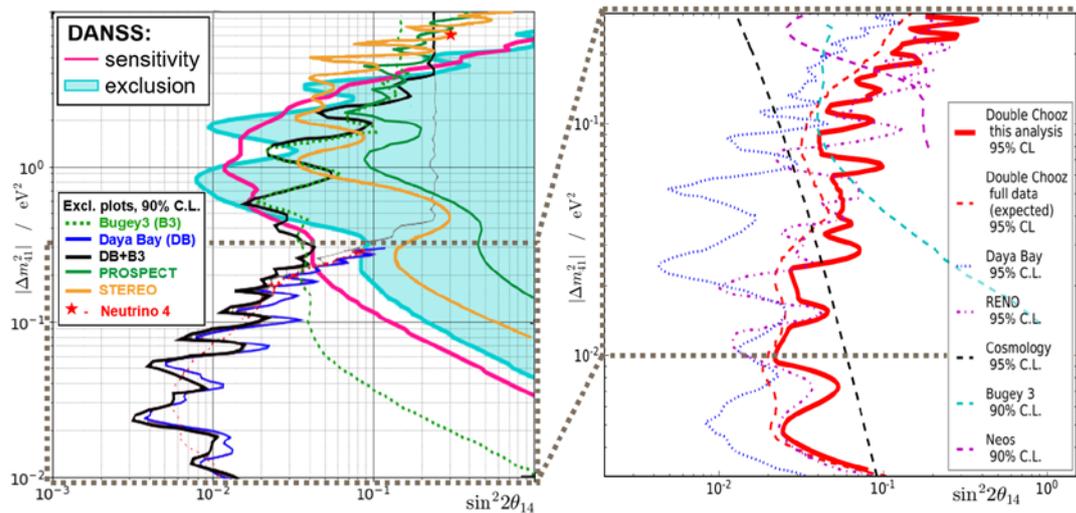


Рисунок 2. Слева – исключенные области осцилляций в стерильное нейтрино в ведущих реакторных экспериментах на короткой базе (<15 м); справа – результаты (контуры исключения) космологии и нейтринных осцилляционных экспериментов на большей базе (>100 м) [2].

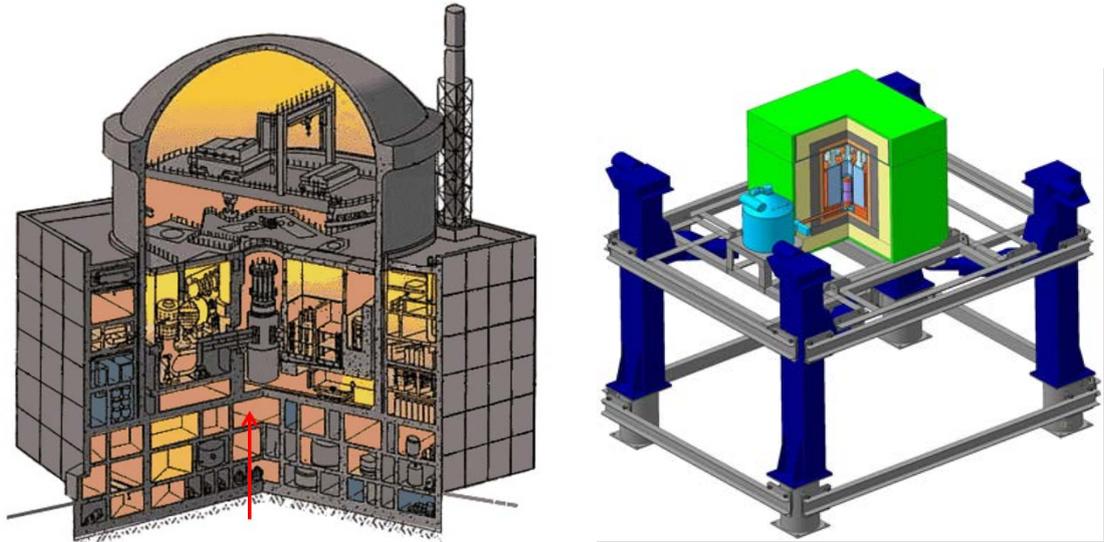


Рисунок 3. Слева: схема реактора №3 КАЭС. Стрелкой указан комната с экспериментальной установкой ν GeN. Справа: схема спектрометра, помещенного на подъемный механизм.

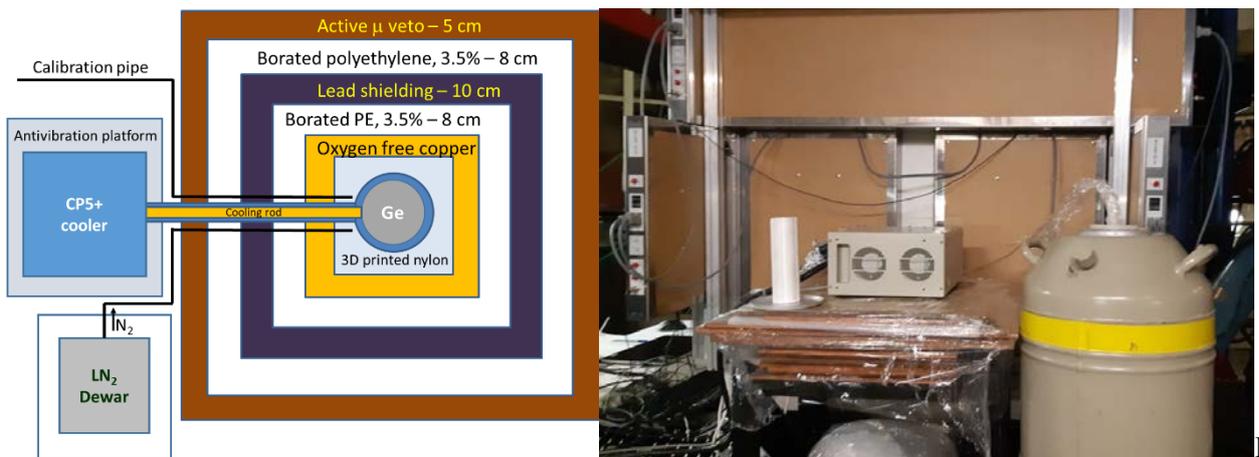


Рисунок 4. Слева: схема защиты от радиоактивного излучения, используемая на КАЭС. Справа: фото экспериментальной установки ν GeN на КАЭС.

Ри-

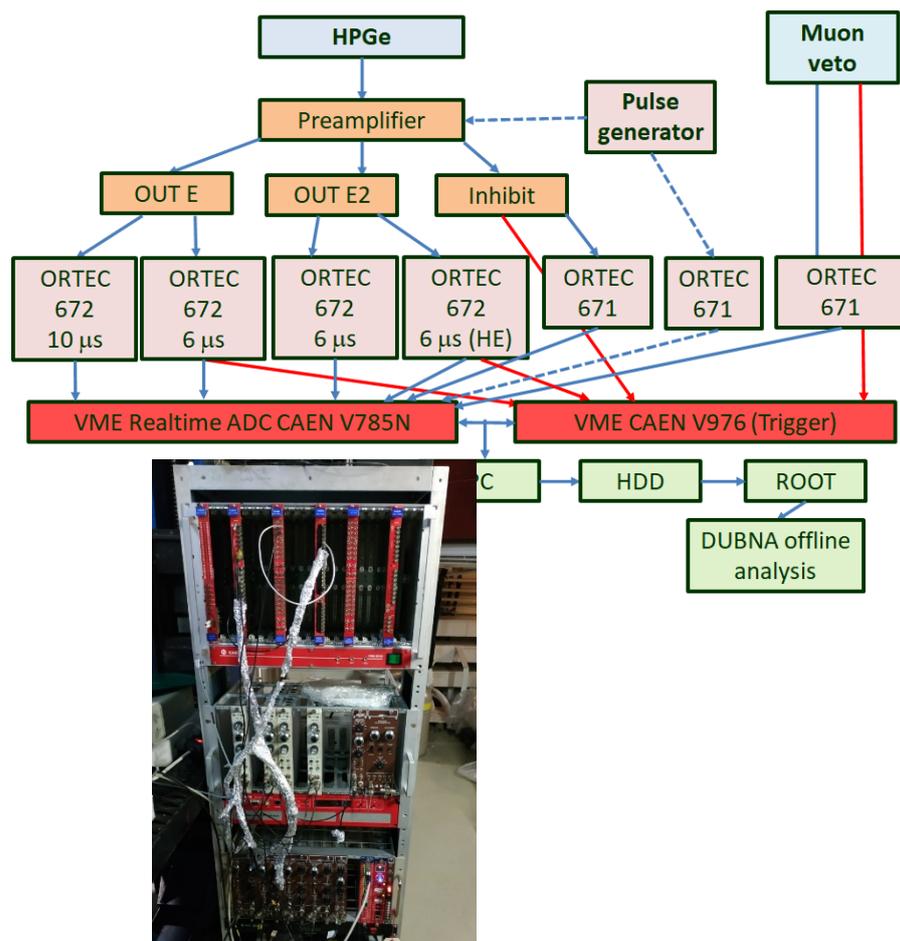


Рисунок 5. Слева: принципиальная схема набора данных эксперимента vGeN.

Справа: фото электроники на КАЭС.

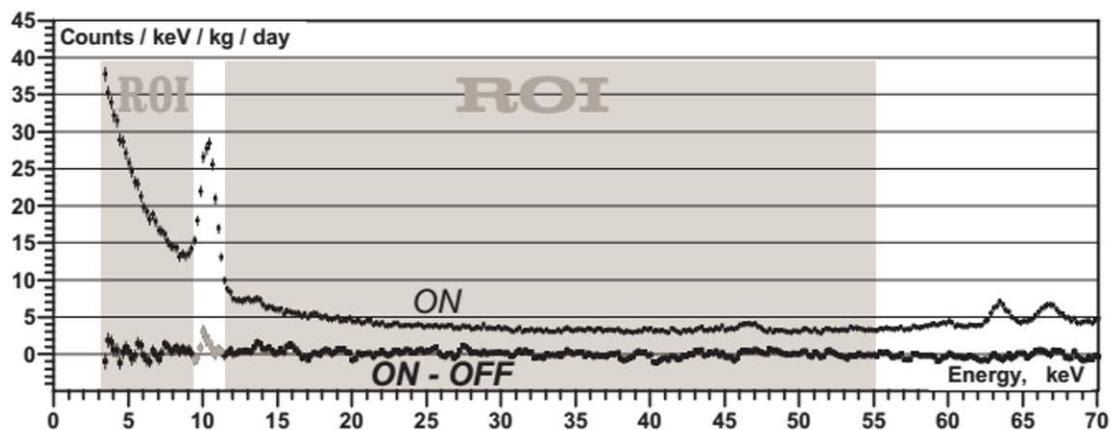


Рисунок 6. Вверху экспериментальный спектр, полученный в эксперименте **GEMMA**. Внизу предварительный экспериментальный спектр, полученный на установке **vGeN** (время экспозиции 173.6 суток, работающий реактор).

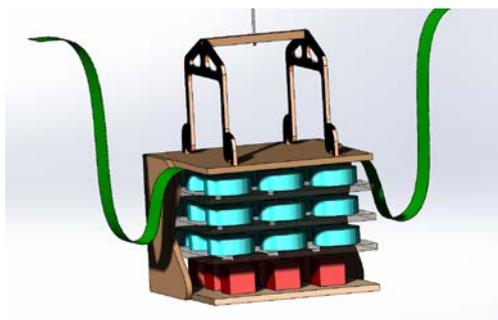


Рисунок 7. Упрощенный вид детекторной части установки **RICOCHET**. Голубым показан массив из 27 германиевых кристаллов (*CryoCube*). Красным — 9 цинковых кристаллов (*Q-Array*).

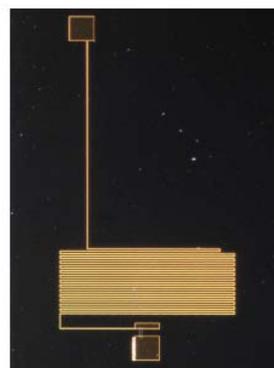


Рисунок 8. Слева показан цинковый кристалл с двумя золотыми пластинками (левая пластинка непосредственно прикреплена к цинку, а правая имеет подложку ZnO). Справа: TES датчик, разработанный в Аргоннской национальной лаборатории.

Экспериментальная установка RICOCHET

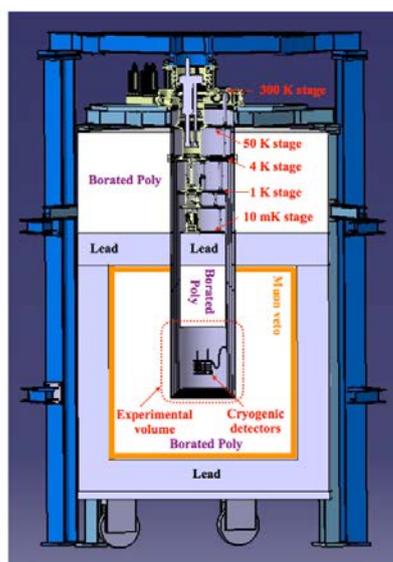


Рисунок 9. Слева: Общий вид планируемой установки *RICOCHET*. Справа: общий вид установки *RICOCHET* в разрезе, с показанными элементами криосистемы, пассивной защиты, мюонного вето.

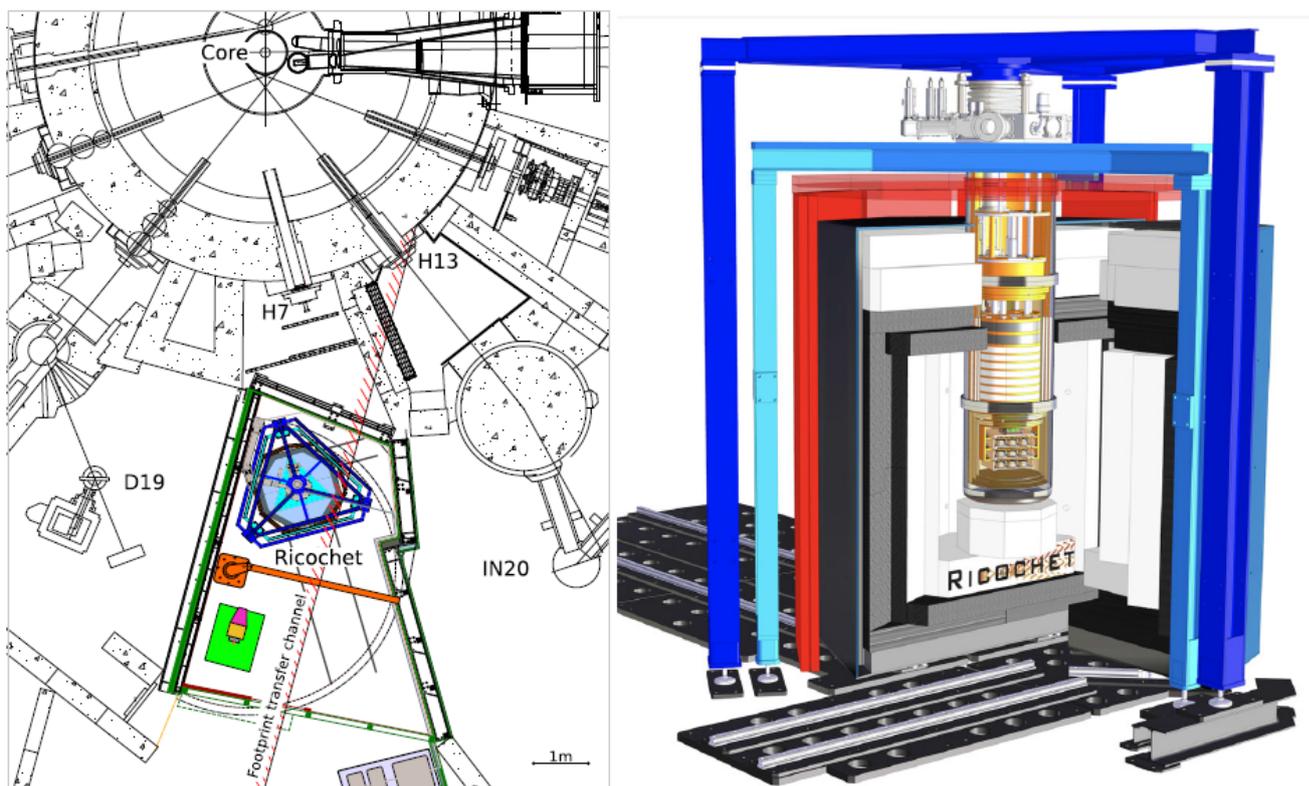


Рисунок 10. Слева: Схема площадки H7 в ILL (место проведения RICOCHET). Справа показан общий внешний вид установки RICOCHET.

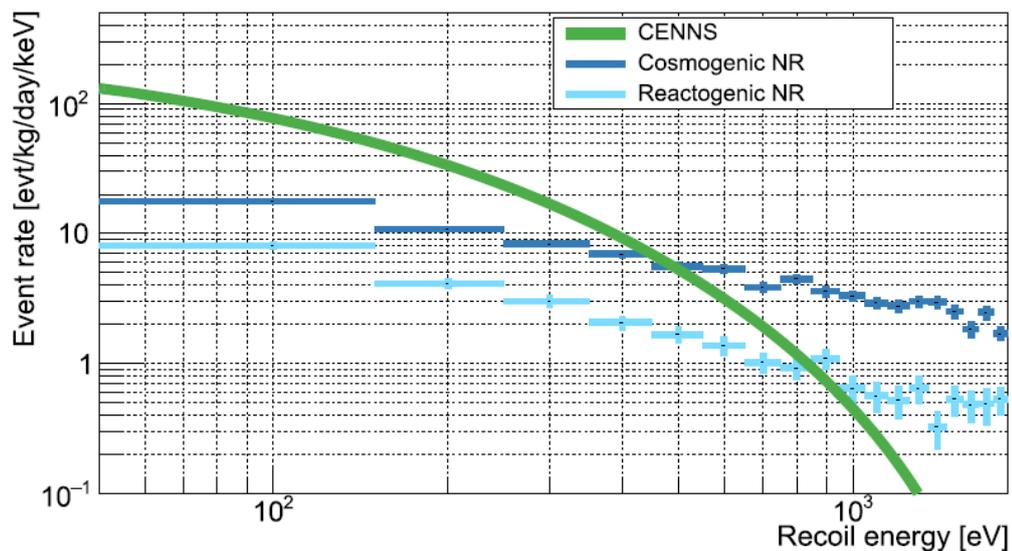


Рисунок 11. Ожидаемый энергетический спектр в эксперименте RICOCHET. Сигнал от CEvNS указан зеленой линией. Черной и голубой линиями показаны ядра отдачи, вызванные космогенным фоном и фоном от работы реактора, соответственно.

Приложение 2. ОТЧЕТЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАМ ПРОЕКТА ЗА 2021–2022 гг.

1. DANSS:

На протяжении рассматриваемого периода (2021-22 годы) эксперимент DANSS продолжал занимать лидирующие позиции в области измерений реакторных антинейтрино на короткой базе. Вместе с тем, объявленные результаты экспериментов НЕЙТРИНО-4 (ПИЯФ, Гатчина) с параметрами $\sin^2(2\theta_{14}) \sim 0.25$, $\Delta m_{14}^2 \sim 7 \text{ эВ}^2$ (arXiv:2005.05301) и BEST – $\sin^2(2\theta_{14}) \approx 0.4$, $\Delta m_{14}^2 < 0.5 \text{ эВ}^2$ только подогрели интерес к исследованиям подобного рода. Вопрос подтверждения/опровержения заявлений указанных коллабораций будет лежать в основе следующего поколения экспериментов с атомными реакторами в качестве источника нейтрино.

Именно поэтому коллаборацией DANSS были предприняты работы по разработке дизайна будущего эксперимента DANSS-2, а также начато тестирование оборудования и детекторных элементов этой установки. Главной их целью является существенное повышение разрешения с нынешних 34% @ МэВ до 15% @ МэВ. В таком случае ограничения, полученные с помощью спектрометра, будут способны достигнуть заявленных НЕЙТРИНО-4 параметров. Для этого будет собран новый спектрометр с использованием новых детекторных ячеек (стрипов) (пластмассовых сцинтилляторов размером 2 x 5 x 120 см³, с восемью вклеенными фибрами и съёмом оптического сигнала с помощью двух кремниевых фотоумножителей). При этом обновленный DANSS будет использовать ту же защиту и подвижную платформу, что позволит существенно снизить затраты на его модернизацию, которую планируется провести в течение 2023-2024 годов.

В рамках данных работ ведётся отбор новых пластмассовых сцинтилляторов, изготовленных по специальному заказу, а также закупки оптоволоконных фибр и кремниевых фотоумножителей. Также ведутся методические работы по улучшению световыхода, который в нашем случае и является критическим параметром, ограничивающим энергетическое разрешение спектрометра. Будет изменена также система сбора данных, так существующая на данный момент находится на пределе своей пропускной способности.

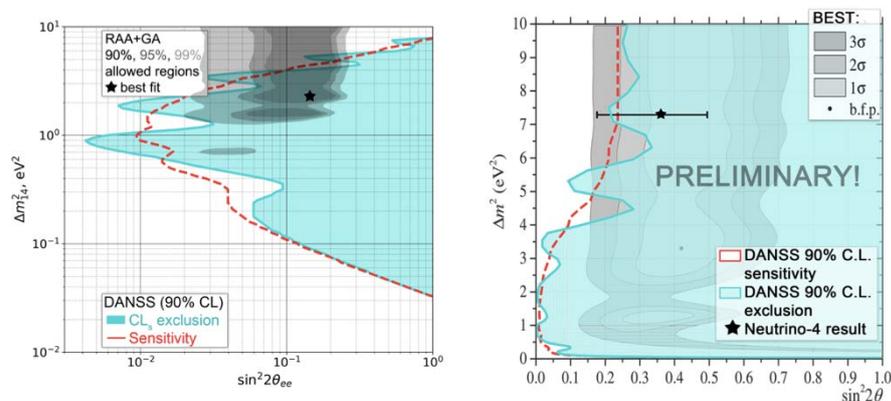


Рис. 1 Различные варианты анализа данных спектрометра DANSS. Модельно независимый (слева) и с моделированием абсолютного спектра (справа).

В то же время продолжался анализ данных работающего спектрометра DANSS. Необходимо отметить, что касался он не только последовательного улучшения ограничений на параметры стерильного нейтрино в рамках существующих методик обработки. Параллельно с ними был проведен анализ с моделированием абсолютного потока антинейтрино от реактора и сравнения с экспериментальным. Результаты, полученные при использовании обоих методов, показаны на рис. 1.

Было улучшено также согласие между нашими и стационарными данными по мониторингу мощности реактора. Изменение проиллюстрировано на рис. 2. Улучшение достигнуто путём введения поправки на состав топлива, с учётом его изменения в процессе работы реактора.

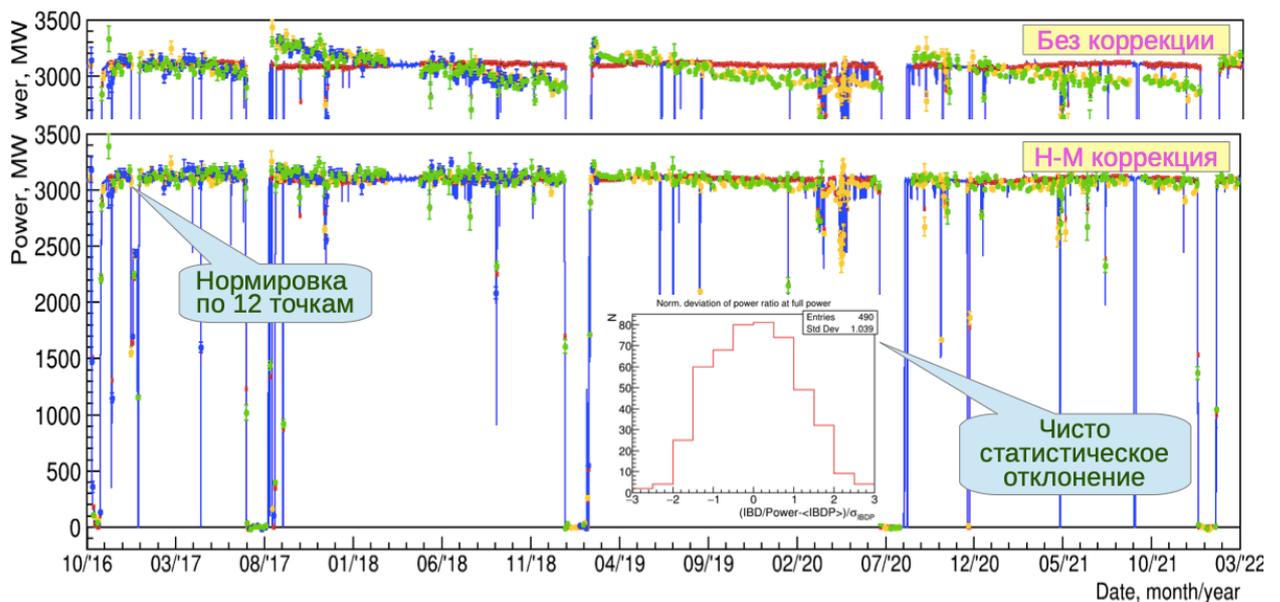


Рис. 2. Учёт состава топлива при определении мощности реактора с помощью потока антинейтрино.

Также был осуществлён детальный анализ фоновых условий в месте расположения установки DANSS. Он включал в себя как анализ гамма, так и нейтронного фона, включая фон от быстрых нейтронов, являющегося наиболее проблематичным, так как последний способен имитировать сигнатуру нейтринного события. По результатам анализа готовится обзорная статья.

В 2023-24 годах Житниковым И.В. планируется к защите кандидатская диссертация по результатам эксперимента.

2. ν GeN:

Была создана уникальная экспериментальная установка ν GeN для исследования свойств нейтрино и поиска редких событий. Сравнение первых данных, набранных при работающем и остановленном реакторе (94.5 и 47.1 суток соответственно), пока не выявило существенных различий в спектрах (см. рис.3).

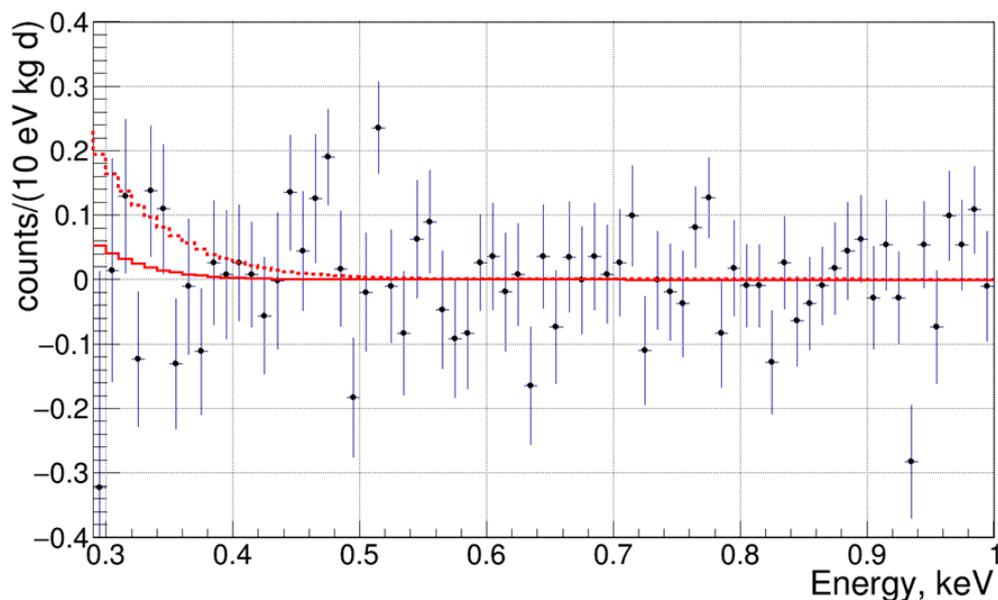


Рис.3. Разностный спектр (работающий – остановленный реактор). Красные линии - предсказанные спектры от когерентного рассеяния нейтрино в зависимости от величины параметра квенчинга $k = 0.179, 0.26$ (сплошная и прерывистая линия соответственно).

Анализ данных не выявил признаков ожидаемого сигнала от когерентного рассеяния нейтрино. Это позволило поставить ограничение на важный параметр ионизационных потерь в Ge (квенчинг) на уровне $k < 0.26$ (90% CL).

В 2022 году была завершена установка подъемного механизма, позволяющего производить измерения на более близком расстоянии к активной зоне реактора, чем это было ранее. Было завершено создание активной защиты установки. Была улучшена система электропитания, произведена оптимизация набора данных и настройка оборудования. Первые результаты измерений показали, что удалось достигнуть низкого уровня фона, хорошего энергетического разрешения и стабильности при наборе данных. Это позволяет рассчитывать на улучшение мировых результатов по поиску ММН. К концу 2022 года было набрано более 1100 кг·суток данных. В настоящее время проводится анализ полученных данных и подготавливаются публикации.

Получена первая премия ОИЯИ за 2022 в номинации "Научно-методические и научно-технические работы" в составе: В. В. Белов, И.В. Житников, С. В. Казарцев, А. В. Лубашевский, Д. В. Медведев, Д. В. Пономарев, С. В. Розов, К. В. Шахов, Е. А. Шевчик, Е. А. Якушев за цикл работ «Создание установки νGeN по исследованию свойств реакторных антинейтрино».

3. RICOCHET:

RICOCHET — это эксперимент реакторных нейтрино нового поколения, который в основном основан на детекторных технологиях, разработанных совместно с EDELWEISS (при активном участии ОИЯИ). Детекторы RICOCHET предназначены для обеспечения первого измерения когерентного упругого рассеяния нейтрино на ядрах с процентной точностью (CEvNS) в области энергий ниже 100 эВ (т.е. при условии полной когерентности) для поиска Новой физики в электрослабом секторе. Основное внимание в программе эксперимента, уделялось: разработке детекторов, испытаниям детекторов в наземных и подземных лабораториях, разработке криосистемы, определению места проведения, определению фоновых условий в будущем месте размещения установки. RICOCHET планируется разместить до конца 2023 года в Институте Лауэ Ланжевена (ILL) рядом с исследовательским ядерным реактором. В RICOCHET будут установлены две криогенные детекторные сборки: CRYOCUBE (Ge детекторы-болометры, в основе лежат разработки EDELWEISS) и Q-ARRAY (на основе Zn).

Основные экспериментальные результаты, лежащие в основе RICOCHET, связаны с разработкой уникальных низкопороговых детекторных болометров, которые позволяют регистрировать ядра отдачи при чрезвычайно низких энергиях ~20 эВ. Такие параметры были достигнуты благодаря: 1) внутреннему усилению сигнала с использованием эффекта Трофимова-Неганова-Люка; 2) использованию транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT); 3) специальной системе подвеса детекторов в оправках, которая уменьшает влияние вибраций криостата, связанных с работой криосистемы.

На первом этапе был проведен ряд испытаний в лаборатории “на земле” с новым криостатом сухого смешивания, который стал прототипом вводимой в эксплуатацию криосистемы установки RICOCHET. Криостат является основным вкладом ОИЯИ в эксперименте. Он был разработан в сотрудничестве с IP2I и произведен компанией Cryoconcept. Конструкция криосистемы снижает уровень вибрации камеры смешивания за счет механического разделения охлаждающей машины на пульсирующих трубках криокулера от камеры смешивания. Вибрации на уровне охлаждения детекторов были дополнительно

снижены с помощью специальной подвесной башни. Внутри башни расположена сборка их детекторов. Последняя состоит из эластичного маятника длиной 25 см, прикрепленного к ступени охлаждения 1 К с помощью кевларового шнура и пружины из нержавеющей стали, удерживающей башню детектора, расположенную под камерой смешивания, на уровне 10 мК. Башня термически прикреплена к промежуточной удерживающей конструкции с помощью гибких медных оплеток, на которых также расположены разъемы для считывания информации с детекторов. Такая конструкция подвесной башни значительно снижает вибрации детекторов, со смещениями порядка нескольких нанометров (среднеквадратичное значение) по всем трем осям, что приводит к существенному улучшению разрешения по энергии. Это было подтверждено с помощью энергетической калибровки с использованием низкоэнергетического источника рентгеновского излучения ^{55}Fe , облучающего нижнюю сторону кристалла Ge, противоположную тепловому датчику Ge-NTD, с частотой событий $\sim 0,3$ Гц. Источник ^{55}Fe дает два пика в спектре, соответствующие линиям Ka и K β Mn при 5,90 и 6,49 кэВ соответственно. Они хорошо видны на левой части **рис. 4**, показана энергетическая шкала как функция времени за 137-часовой период набора данных. Энергетическое разрешение этих пиков составляет 34 эВ (среднеквадратичное значение).

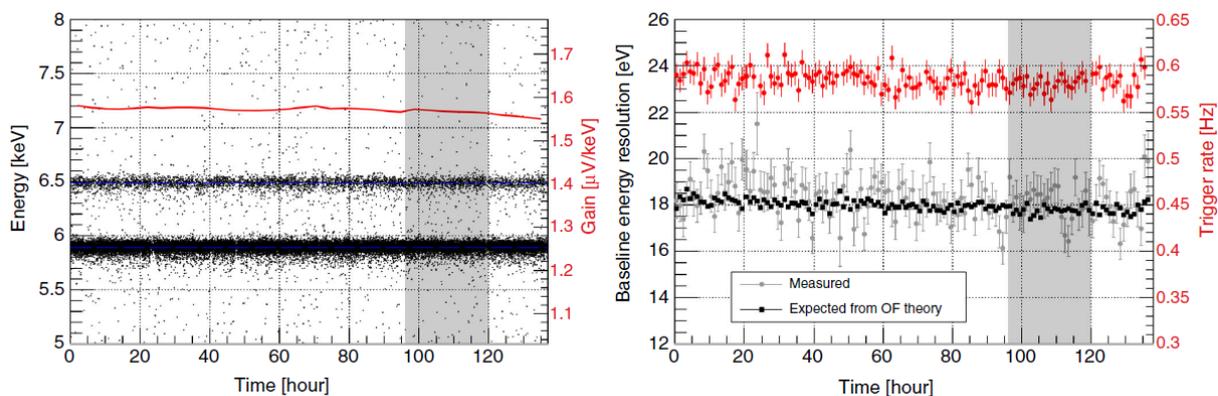


Рис. 4: Слева: Часть энергетического спектра между 5 и 8 кэВ в зависимости от времени. Горизонтальные полосы при 5,90 и 6,49 кэВ соответствуют линиям рентгеновского излучения Ka и K β , соответственно, Mn, излучаемого источником ^{55}Fe . Данные были скорректированы с учетом измеренной временной эволюции коэффициента усиления детектора в зависимости от времени, показанной красной линией и соответствующей правой оси. Справа: Разрешение базовой линии по тепловому каналу измерений (среднеквадратичное значение) в эВ в зависимости от времени. Серые точки - это значения, полученные в результате подгонки к распределениям энергии при выборе шумового события, а черные квадраты - значения, полученные из соотношения PSD сигнала и шума. Соответствующие частоты срабатывания триггера показаны красными точками в герцах. Каждая точка данных соответствует одному часу.

Другим важным достижением являются измерения потока быстрых нейтронов на месте проведения эксперимента с использованием новых методов, предложенных RICOCHET и опубликованных в [Eur. Phys. J. C (2023) 83:20]. Для эксперимента RICOCHET правильная интерпретация результатов сильно зависит от стабильности нейтронного фона. Используя эти экспериментальные данные, нами был сделан вывод, что статистическая значимость обнаружения CEvNS в RICOCHET только после одного цикла работы реактора должна составлять от 4,6 до 13,6 σ , в зависимости от эффективности мюонного вето.

На данный момент эксперимент RICOCHET находится на начальном этапе запуска установки с текущими финальными испытаниями криосистемы и детекторов в IP2I, в 2023 году планируется перемещение и запуск установки в ILL.

В 2023 г. планируется защита кандидатской диссертации Пономарев Д.В., диссертация написана.

Публикации экспериментов за 2021–2022 годы:

1. Augier, C et al. "Fast neutron background characterization of the future Ricochet experiment at the ILL research nuclear reactor." *European Physical Journal C* 83.1, 2023, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11150-x>
2. Alekseev, I et al. "First results of the vgeN experiment on coherent elastic neutrino-nucleus scattering." *Physical Review D* 106.5, 2022, ISSN 2470-0010, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.L051101>
3. Suslov, I.A et al. "Development of a new tellurium loaded liquid scintillator based on linear alkylbenzene." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1040, 2022, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167131>
4. Alekseev, I et al. "Observation of the temperature and barometric effects on the cosmic muon flux by the DANSS detector." *European Physical Journal C* 82.6, 2022, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10471-1>
5. Alekseev, I et al. "Optimized scintillation strip design for the DANSS upgrade." *Journal of Instrumentation* 17.4, 2022, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/04/P04009>
6. Sokolov, A et al. "Segmented HPGe Detector for Nuclear Reactions Research." *IEEE Transactions on Nuclear Science* 68.1, 2021, pp. 54-58., ISSN 0018-9499, <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.3037336>
7. Ponomarev, D et al. "NaI(Tl+Li) scintillator as multirange energies neutron detector." *Journal of Instrumentation* 16.12, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/12/P12011>