

Форма продления Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

_____/_____
“ ____ ” _____ 2023 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы

03-2-1100-2010/2024

1.2. Шифр проекта

--

1.2. Лаборатория

Лаборатория Ядерных Проблем

1.3. Научное направление

Ядерная физика

1.4. Наименование проекта

Ядерная спектрометрия для поиска и исследования редких явлений

1.5. Руководитель проекта

Зинатулина Д.Р.

1.6. Заместители руководителя проекта

Гусев К.Н., Рухадзе Н.И., Кочетов О.И, Розов С.В.

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Проект «Ядерная спектрометрия для поиска и исследования редких явлений» состоит из пяти основных экспериментов: LEGEND (The Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless double beta Decay), TGV (Telescope Germanium Vertical), SuperNEMO (Neutrino

Ettore Majorana Observatory), MONUMENT (Muon Ordinary capture for the NUClear Matrix elemENTS) и EDELWEISS (Expérience pour DEtecter Les WIMPs En Site Souterrain). Первые четыре эксперимента решают задачи поиска и исследования безнейтринного двойного бета-распада. Эксперимент EDELWEISS направлен на поиск частиц темной материи.

Поиск двойного безнейтринного бета распада ($0\nu\beta\beta$) является одной из приоритетных задач современной физики. Его обнаружение будет иметь фундаментальное влияние не только на саму физику нейтрино, но и на физику элементарных частиц и космологию в целом. Это позволит определить природу нейтрино (майорановская или дираковская частица), протестировать иерархию нейтринных масс и, возможно, найти эффекты, происходящие с нарушением CP-инвариантности. Открытие $0\nu\beta\beta$ распада может пролить свет на причину преобладания в нашей Вселенной материи над антиматерией.

Эксперимент **LEGEND** создан для поиска безнейтринного двойного бета ($0\nu\beta\beta$) распада ^{76}Ge . В LEGEND, как и в предшествующем эксперименте GERDA, используются открытые детекторы из германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge , погруженные в жидкий аргон. Ультимативной целью проекта является достижение чувствительности по периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ распада $^{76}\text{Ge} > 10^{28}$ лет (90% C.L.).

Первая фаза проекта (LEGEND-200) проводится на базе модифицированной установки GERDA в Национальной лаборатории Гран Сассо в Италии. В LEGEND-200 применяются как уже существующие (из экспериментов GERDA и Majorana), так и производимые сейчас новые детекторы из обогащенного германия с общей массой около 200 кг. Необходимый для успешной реализации первой фазы уровень фона должен составить $< 10^{-4}$ отсчета/(кэВ кг год), что приблизительно в 5 раз лучше, чем достигнутый на сегодня уровень фона в эксперименте GERDA. Во второй фазе проекта (LEGEND-1000) запланировано использовать около 1000 кг обогащенных германиевых детекторов, а также уменьшить индекс фона еще в 10 раз, доведя его до уровня $< 10^{-5}$ отсчета/(кэВ кг год). В случае успеха LEGEND-1000 позволит однозначно ответить на вопрос об иерархии масс нейтрино.

Следующая активность основана на исследовании процесса ECES распада с помощью низкофонового много-детекторного германиевого спектрометра **TGV** (Телескоп Германиевый Вертикальный) и пассивного источника двойного бета-распада из обогащенного изотопа. Высокочувствительный спектрометр TGV разработан в ОИЯИ для исследований двойного бета-распада с небольшим количеством редких обогащенных изотопов и смонтирован в глубокой подземной лаборатории. Близкое расположение внешних (пассивных) источников двойного бета-распада от HPGe детекторов позволяет достичь высокой эффективности регистрации различных типов полезных событий, как одиночных, так и (β - β , β - γ , γ - γ , X- γ , X-X) совпадений достигая тем самым сильного подавления внешнего фона. Это преимущество TGV особенно важно при регистрации двойных совпадений низкоэнергетических KX-KX событий, сопровождающих ECES распад. Целью эксперимента является улучшение энергетического разрешения детекторов TGV, подавление их фона, модификация электронной части спектрометра и программы накопления данных. После завершения этих обновлений спектрометр TGV будет использоваться для дальнейших исследований ECES распада ^{106}Cd и ^{130}Ba . Согласно нашим оценкам и теоретическим предсказаниям для этих редких процессов мы надеемся впервые зарегистрировать оба этих распада в прямом эксперименте. Следует также отметить, что в последнее время возрос интерес к изучению двойного бета распада на возбужденные состояния дочерних ядер из-за поиска резонансного безнейтринного двойного электронного захвата ($0\nu\text{EC}/\text{EC}$) в некоторых ядрах и исследованию процессов двух-нейтринного двойного бета распада ($2\nu 2\beta^-$, $2\nu\beta^+\text{EC}$, $2\nu\text{EC}/\text{EC}$) на возбужденные состояния дочерних ядер. Меньшие энергии переходов приводят к существенному уменьшению вероятностей для $2\nu\beta\beta$ – распада на возбужденные состояния относительно $2\nu\beta\beta$ переходов на основное состояние. Но такие процессы сопровождаются испусканием гамма-квантов при разрядке возбужденных состояний, и $2\nu\beta\beta$ –распад на возбужденные состояния дочерних ядер может быть зарегистрирован для некоторых ядер (таких как ^{100}Mo ,

^{82}Se , ^{96}Zr , ^{150}Nd) с помощью высокоэффективных низкофоновых HPGe детекторов, например, **Obelix** и **Idefix**. Поиск $2\nu\beta\beta$ распада с помощью детекторов Obelix и Idefix является еще одной дополнительной активностью в данном проекте.

Основным преимуществом эксперимента **SuperNEMO** является уникальная треко-калориметрическая методика, разработанная в коллаборации NEMO. Потенциально с нулевым фоном, она позволяет провести идентификацию α , γ , e^+ и e^- частиц, реконструировать топологию и полную кинематику события, включая индивидуальные энергии частиц, вершину треков для $\beta\beta$ -распадных электронов и углы их вылета. Это позволяет подавить фон, осуществить проверку различных гипотез о механизмах $0\nu\beta\beta$ -распада в случае его открытия. Демонстрационный модуль SuperNEMO введен в эксплуатацию в подземной лаборатории LSM, расположенной на глубине 4800 м.в.э. в туннеле Фрежюс во Франции. Тестовая программа демонстрационного модуля SuperNEMO включает прецизионные измерения двухнейтринного двойного бета распада $2\nu\beta\beta$, направлена на достижение наилучших ограничений на $0\nu\beta\beta$ для изотопа ^{82}Se .

Целью эксперимента **MONUMENT** является проведение измерений мюонного захвата на нескольких дочерних, по отношению к кандидатам на $0\nu2\beta$ распад, ядрах. Получаемые результаты критически важны для проверки точности теоретических расчетов ядерных матричных элементов. Эксперимент MONUMENT продолжает и расширяет предшествующую программу измерений мюонного захвата, предложенную и осуществляемую под руководством сотрудников ОИЯИ в период с 1998 по 2006 годы.

В период с 2020 по 2023 гг., проведены измерения обычного мюонного захвата (ОМЗ) для изотопов ^{136}Ba , ^{76}Se и ^{100}Mo на мезонной фабрике Института Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии. ОМЗ на ^{136}Ba и ^{76}Se имеет особое значение для ведущих экспериментов по поиску $0\nu2\beta$ распада – ^{136}Xe - nEXO, KamLAND2-Zen, NEXT, DARWIN и PandaX-III – и ^{76}Ge – LEGEND. В данный момент предлагается продлить проект с программой измерений еще на три года и провести измерения изотопов ^{48}Ti , ^{56}Fe , ^{32}S и ^{96}Mo , результаты которых важны для экспериментальной проверки корректности теоретических расчетов, а также могут быть полезны для астрофизики. ОИЯИ будет играть ведущую роль в эксперименте. За исключением экспериментальной инфраструктуры на ускорительном комплексе, которая будет обеспечена нашими коллаборантами, все остальное проведение проекта будет проходить под нашим руководством.

Для прямого поиска частиц Темной Материи (ТМ) в проекте **EDELWEISS** используется массив монокристаллических германиевых детекторов-болометров, работающих при температуре в несколько мК и оснащенных электродами и термодатчиками. Применяя небольшое (несколько В/см) внешнее поле, одновременное измерение ионизационных и тепловых сигналов позволяет эффективно идентифицировать ядерные и электронные отдачи. Последние результаты продемонстрировали высокую актуальность криогенных детекторов для поиска взаимодействий частиц ТМ, генерирующих сигналы масштаба эВ. Область "легких WIMP" может быть исследована в эксперименте EDELWEISS благодаря энергетическому разрешению лучше 20 эВ, достигнутому с помощью новейших HPGe болометров. Настоящий этап выполнения эксперимента связан как с НИОКР по созданию улучшенных детекторов, их оправок и держателей, улучшению фона, так и с набором данных, позволяющих проводить поиск частиц ТМ в ранее неисследованных областях. Целью текущих исследований, разработок и измерений в эксперименте EDELWEISS является достижение чувствительности, позволяющей регистрировать В-8 солнечные нейтрино по их когерентному упругому рассеянию на ядрах. Проект находится на этапе существенной модификации, когда старая установка, использовавшаяся с 2005 года, выводится из эксплуатации. Новой целью является создание установки с более низким уровнем фона, и шумов, с использованием новой генерации криосистем, что позволит своевременно выполнять НИОКР и новые поиски ТМ. В течение

нескольких следующих лет детекторы EDELWEISS будут размещены в установке BINGO (продолжение программы CUPID-Mo, которая ранее была в свою очередь размещена в EDELWEISS).

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

Экспериментальное подтверждение существования нейтринных осцилляций позволило доказать наличие массы у нейтрино. Однако принципиальный вопрос о его природе (является ли нейтрино частицей Майораны (частица тождественна своей античастице) или Дирака) до сих пор не получил ответа. Эксперименты по поиску двойного безнейтринного бета ($0\nu\beta\beta$) распада призваны помочь в разрешении этой важнейшей проблемы. В данном процессе изменяется лептонное число, поэтому он однозначно запрещен в доминирующей в настоящее время Стандартной Модели (СМ) электрослабого взаимодействия. Следовательно, регистрация $0\nu\beta\beta$ распада будет безусловным подтверждением наличия «новой физики» за пределами СМ.

Чувствительность $0\nu\beta\beta$ экспериментов линейно растет со временем до тех пор, пока в узком энергетическом интервале вблизи искомого пика не будет зарегистрировано фоновых событий. Проект GERDA стал первым бесфоновым экспериментом по поиску $0\nu\beta\beta$ распада благодаря беспрецедентному уровню фона $< 10^{-3}$ отсчета на кэВ на кг в год. Это позволило нам достичь намеченной чувствительности $> 10^{26}$ лет после накопления необходимой статистики в 100 кг лет. Опыт, полученный в GERDA в области снижения фона, позволяет рассчитывать на достижение бесфоновых режимов накопления данных и в проекте нового поколения LEGEND, в котором предусмотрено, как минимум, две фазы. В первой из них (LEGEND-200) масса исследуемого изотопа составит ~ 200 кг, а расчетная чувствительность – 10^{27} лет, во второй (LEGEND-1000) – 1000 кг и 10^{28} лет соответственно. Реализация этого проекта позволит однозначно ответить на вопрос об иерархии масс нейтрино. Не менее важным является то, что ультранизкофоновый германиевый эксперимент, благодаря высокому энергетическому разрешению применяемых детекторов, имеет заметно большую перспективу открытия $0\nu\beta\beta$ распада по сравнению с конкурирующими проектами.

Актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики

Эксперимент LEGEND, являющийся преемником проекта GERDA, создается для поиска $0\nu\beta\beta$ распада ^{76}Ge . В обоих экспериментах применяются полупроводниковые детекторы, изготовленные из особо чистого германия, обогащенного изотопом ^{76}Ge , то есть детектор одновременно является источником искомого события. Детекторы погружены в криостат, заполненный жидким аргоном, который охлаждает детекторы до необходимой температуры и, одновременно, служит дополнительной пассивной и активной защитой от внешнего радиоактивного фона.

Аппаратурная сигнатура $0\nu\beta\beta$ распада – это узкий пик с энергией, эквивалентной энергии распада в суммарном электронном спектре. Поэтому энергетическое разрешение детектора имеет решающее значение, а значит эксперименты, в которых используются полупроводниковые детекторы, обладают несомненным преимуществом.

Главным преимуществом LEGEND-200 является использование существующей инфраструктуры эксперимента GERDA, поскольку создание крупной экспериментальной установки «с нуля» требует значительных финансовых и временных затрат. В нашем же случае речь идет о модификации уже имеющегося оборудования. Установка (см. Рис. 1 слева) расположена в Национальной лаборатории Гран Сассо в Италии на глубине 3500 метров водного эквивалента что позволяет снизить поток мюонов до $\sim 1,25/(\text{м}^2 \text{ ч})$. LEGEND-200, как и GERDA, использует германиевые детекторы, смонтированные в гирлянды (покрытые

нейлоновыми кожухами для уменьшения фона от ^{42}Ar) внутри криостата, заполненного 64 м^3 жидкого аргона. Криостат расположен в резервуаре с водой диаметром 10 м. 590 м^3 воды высокой чистоты снижают фон от нейтронов и γ -излучения. Резервуар оснащен 66 фотоумножителями и используется как черенковское мюонное вето для дополнительного уменьшения космического фона до незначительных уровней для эксперимента LEGEND. Перчаточный бокс и система погружения Ge детекторов размещены в чистой комнате над криостатом и в водным резервуаром.

Первые каскады предусилителей в LEGEND-200 созданы на базе конструкции, успешно использованной в Majorana, в то время как вторые каскады усиления, также погруженные в жидкий аргон, но на расстоянии более 40 см от детекторов – адаптированные и модифицированные предусилители из GERDA.

Аргоновое вето LEGEND-200 базируется на концепции, предложенной и успешно реализованной в рамках эксперимента GERDA. Разработанная объединенной группой специалистов ОИЯИ и Мюнхенского технического университета вето система LEGEND-200 состоит из двух концентрических цилиндров из спектросмещающих фибр, соединенных с кремниевыми фотоумножителями (см. Рис. 1 справа).

Фон от ^{42}Ar остается принципиальным и для LEGEND-200, поэтому, как и в GERDA, необходимо было создать кожух, ограждающий пространство вокруг детекторной гирлянды, который предотвращает дрейф ионов ^{42}K к поверхности детекторов. Этот кожух должен быть прозрачным, иначе аргоновое вето не сможет регистрировать сцинтилляции из области возле детекторов. Все необходимые кожухи для LEGEND-200 были изготовлены по усовершенствованной методике в специальном перчаточном боксе специалистами ЛЯП ОИЯИ.

Перчаточный бокс для операций с открытыми германиевыми детекторами для LEGEND-200, включающий в себя систему автоматизации операций, разработан, доставлен и смонтирован специалистами ОИЯИ на основании опыта, полученного при организации операций с детекторами в эксперименте GERDA. С помощью новой системы в эксперименте уже смонтирован 101 Ge детектор.

LEGEND-1000 сейчас находится на стадии CDR. Место проведения эксперимента еще не определено окончательно (SNOLAB, Канада или LNGS, Италия). Однако в обоих случаях базовый дизайн одинаков и включает следующие основные отличия по сравнению с LEGEND-200:

- Использование подземного Ar, обедненного ^{42}Ar , то есть отпадает необходимость в нейлоновых кожухах.
- Использование только больших инвертированных коаксиальных детекторов – средняя масса детектора более 2 кг.
- Использование ASICs в качестве считывающей электроники.
- Новый подход к формированию массива детекторов: теперь каждая из гирлянд будет включать в себя не только детекторы, но и аргоновое вето и погружаться в аргон независимо от других гирлянд.

Группа ОИЯИ планирует внести вклад в проект по следующим направлениям: 1) разработка и производство низкофоновых капсулей для детекторов; 2) разработка и создание систем активированного аргонового вето; 3) разработка и закупка перчаточного бокса с системой перемещения гирлянд детекторов; 4) участие в наборе данных (включая дежурства на месте); 5) участие в моделировании и анализе данных; 6) участие в публикации результатов.

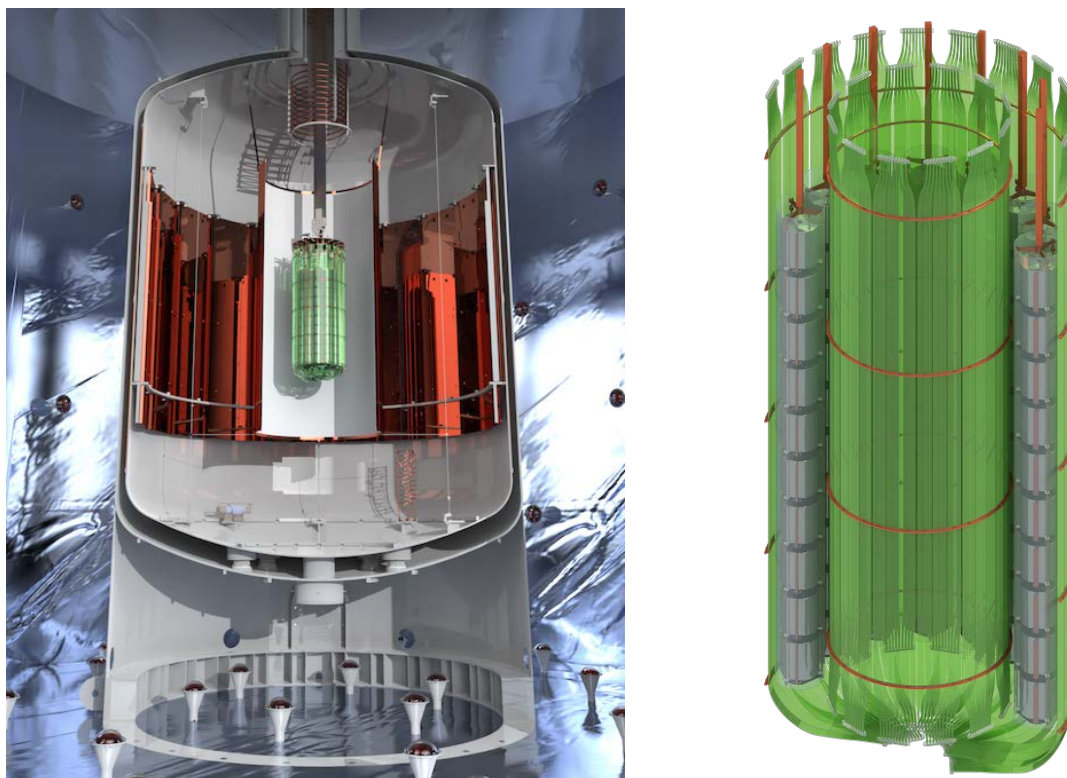


Рис. 1: Схема установки LEGEND-200 (слева) и финальный дизайн активного аргонового вето (справа).

Ожидаемые результаты

Чувствительность эксперимента как функция экспозиции и уровня радиоактивного фона представлена на Рис. 2. В случае, если удастся достичь бесфонового режима набора данных, чувствительность линейно растет с экспозицией, если же в области интереса имеются фоновые события – то она пропорциональна квадратному корню из накопленной статистики. Из Рис. 2 видно, что даже при консервативной оценке возможного фона в 2×10^{-4} отсчета на кэВ на кг в год (или 0.6 отсчета на FWHM на тонну в год) LEGEND-200 сумеет достичь запланированной чувствительности в 10^{27} лет уже после 5 лет набора данных. Еще более низкий уровень фона в LEGEND-1000 должен позволить приблизиться к желаемой чувствительности $> 10^{28}$ лет после 10 лет измерений с 1 тонной обогащенных германиевых детекторов.

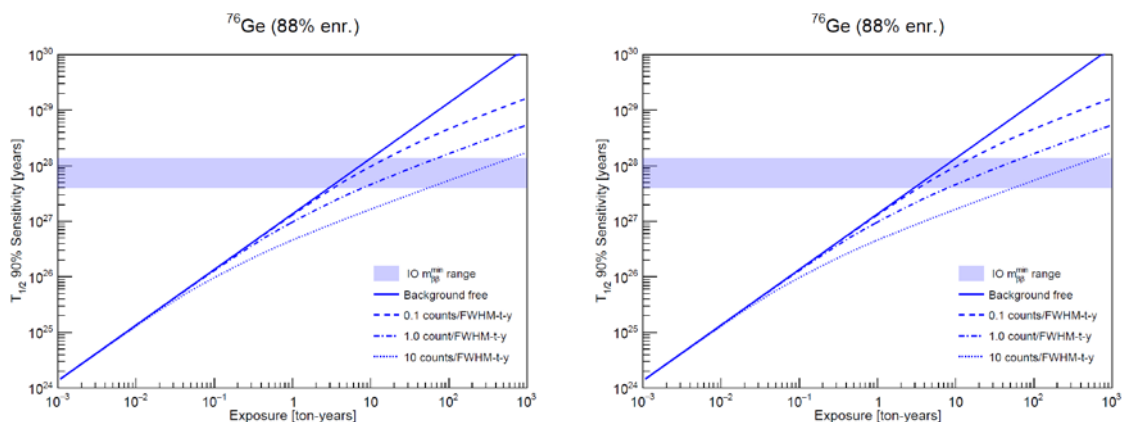


Рис. 2: Ожидаемая чувствительность LEGEND для установления предела (слева) и для открытия эффекта на уровне 3σ (справа).

Риски

Риск не достичь расчетную чувствительность **LEGEND-200** после 5 лет после набора данных достаточно мал, поскольку эксперимент запущен. Единственная активность, запланированная на 2024 год – это добавление новых детекторов для достижения желаемой массы в 200 кг (сейчас 140 кг). Для этого потребуются полная разборка аргонового вето и детекторных гирлянд с последующей сборкой установки со всеми имеющимися детекторами из ^{76}Ge . Все операции будут выполняться при непосредственном участии специалистов ОИЯИ и, как ожидается, силами все той же группы, что и осуществляла запуск эксперимента. Это значительно снижает риск неуспеха как этой активности, так и, в целом, эксперимента **LEGEND-200**.

LEGEND-1000 будет создаваться на основе опыта, полученного в ходе работы над **LEGEND-200**. Начало набора данных **LEGEND-1000** может быть отложено в основном из-за более низкого, чем ожидалось, темпа производства детекторов или высокого уровня отказов произведенных детекторов. И то, и другое не позволит получить всю необходимую массу обогащенного германия. Однако этот риск довольно низок благодаря хорошо отработанной технологии изготовления детекторов. Более того, производственные возможности двух существующих компаний уже проверены – недавно изготовленные новые детекторы уже используются в **LEGEND-200** и демонстрируют прекрасные характеристики.

Ещё один риск связан с разработкой ASICs, которая может продвигаться медленнее, чем запланировано. Чтобы избежать подобного риска, в коллаборации **LEGEND** работают 3 группы, которые параллельно занимаются этими разработками.

Последней, но не менее важной проблемой является вероятность не достичь желаемого уровня фона. Однако, крайне тщательный отбор и поиск низкофоновых материалов, а также уникальный уровень фона, достигнутый **GERDA**, значительно снижают этот риск.

Основная цель эксперимента **TGV** это прямой поиск $2\nu\text{ECEC}$ распада в ^{106}Cd и ^{130}Ba . Эксперимент стартовал в 2005 году с $\sim 10\text{г}$ ^{106}Cd с обогащением 75%, и основным участием ученых ОИЯИ. В третьей фазе эксперимента, которая продолжается в настоящее время, масса источников двойного бета-распада значительно увеличена - до $\sim 23.2\text{ г}$ ^{106}Cd с обогащением 99.57%.

До настоящего времени наибольшее внимание в исследованиях двойного бета-распада уделялось $\beta\beta^-$ распаду, однако существуют и другие каналы двойного бета-распада, в частности процесс с захватом двух связанных атомных электронов (EC/EC), захват связанного атомного электрона с испусканием позитрона (β^+/EC) и распад с испусканием двух позитронов ($\beta^+\beta^+$). В последнее время интерес к этим процессам существенно возрос, особенно к двойному электронному ECEC захвату. В отличие от $2\nu\beta\beta^-$ распада с испусканием двух электронов, которые могут быть зарегистрированы различными типами детекторов, регистрация других видов двойного бета распада в прямых экспериментах затруднительна. Например, процесс $2\nu\text{ECEC}$ распада с переходом на основное состояние дочернего ядра сопровождается только испусканием двух квантов характеристического рентгеновского X-излучения, которые трудно зарегистрировать с высокой эффективностью. Высокоэффективный много-детекторный спектрометр **TGV** на основе **HPGe** детекторов был разработан специально для постановки экспериментов по прямому поиску $2\nu\text{ECEC}$ распада. $2\nu\text{ECEC}$ распад ^{106}Cd до настоящего времени экспериментально не наблюдался. Положительный $2\nu\text{ECEC}$ сигнал был получен для ^{130}Ba в геохимическом эксперименте. Однако достоверность этого неявного

экспериментального метода сомнительна и этот результат необходимо подтвердить прямым экспериментом, таким как TGV.

Актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики

В рамках данной активности спектрометр TGV будет направлен на прямой поиск двухнейтринного двойного EC/EC распада ^{106}Cd и ^{130}Ba (см. Рис.3) с переходами на основные состояния дочерних ядер. Действительно прямое наблюдение этих редких процессов возможно только при регистрации двойных совпадений низкоэнергетических квантов характеристического КХ-КХ излучения дочерних изотопов, испускание которых сопровождается EC/EC распад. Детекторная часть TGV состоит из 32 планарных HPGe детекторов detectors с чувствительным объемом $2040 \text{ мм}^2 \times 6 \text{ мм}$ каждый (примерно 3 кг германия) и общим чувствительным объемом около 400 см^3 (Рис.4). Энергетическое разрешение детекторов находится в диапазоне от 3.0 до 4.0 кэВ на гамма-линии 1332 кэВ ^{60}Co . Общая эффективность спектрометра TGV от 50 до 70% в зависимости от энергетического порога. Основная детекторная ячейка TGV это напоминающая сэндвич пара детекторов, расположенных входными окнами друг к другу и источником двойного бета-распада помещенного между ними. Расстояние между исследуемыми образцами и детекторами $\leq 1.5 \text{ мм}$. 16 пар детекторов смонтированы друг над другом в общем вертикальном криостате. Конструкция детекторной части обеспечивает высокую эффективность регистрации различных типов полезных одиночных и совпадающих ($\beta\text{-}\beta$, $\beta\text{-}\gamma$, $\gamma\text{-}\gamma$, X- γ , X-X) событий добиваясь при этом сильного подавления внешнего фона.

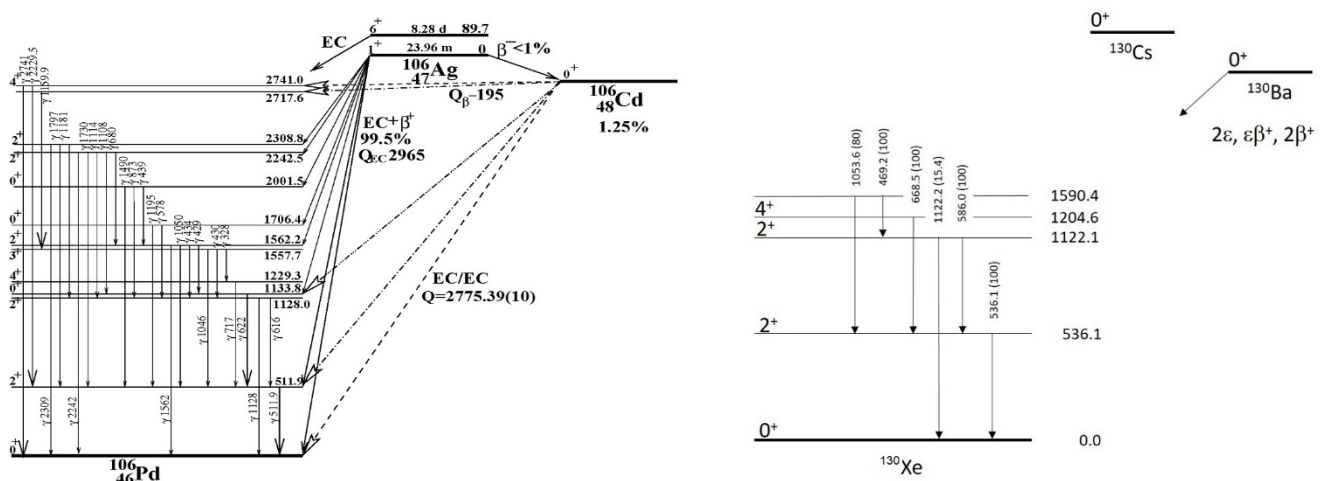


Рис.3: Схема двойного бета-распада ^{106}Cd (слева) и ^{130}Ba (справа).

Детекторная часть TGV окружена: а) пассивной защитой из меди толщиной $\geq 20 \text{ см}$; б) стальным герметичным колпаком, предохраняющим от скопления радона около детекторов; в) пассивной защитой из свинца толщиной $\geq 10 \text{ см}$; г) нейтронной защитой из борированного полиэтилена толщиной 16 см (Рис.5). Спектрометр находится в глубокой подземной лаборатории (4800 м водного эквивалента) что обеспечивает подавление космических лучей (коэффициент подавления $\sim 2 \times 10^6$) и быстрых нейтронов (коэффициент подавления $\sim 10^3$). Дальнейшее подавление фона достигается использованием техники совпадений и подавлением электронных и микрофонных шумов в области низких энергий ($< 50 \text{ кэВ}$) путем цифровой обработки сигнала с детекторов для различных полос пропускания (2 и 8 мкс). Для выполнения этой активности у нас уже имеется спектрометр TGV (детекторы, электроника, detectors,

electronics, программное обеспечение) и 16 источников двойного бета-распада из ^{106}Cd (обогащение 99.57%) с общей массой ~ 23.2 г установленных внутри детекторной части спектрометра TGV между входными окнами детекторов. В ближайшее время в эксперименте TGV планируется: 1) модернизация спектрометра; 2) набор данных; 3) обработка данных; 4) публикация результатов; будет проводиться в основном учеными ОИЯИ.

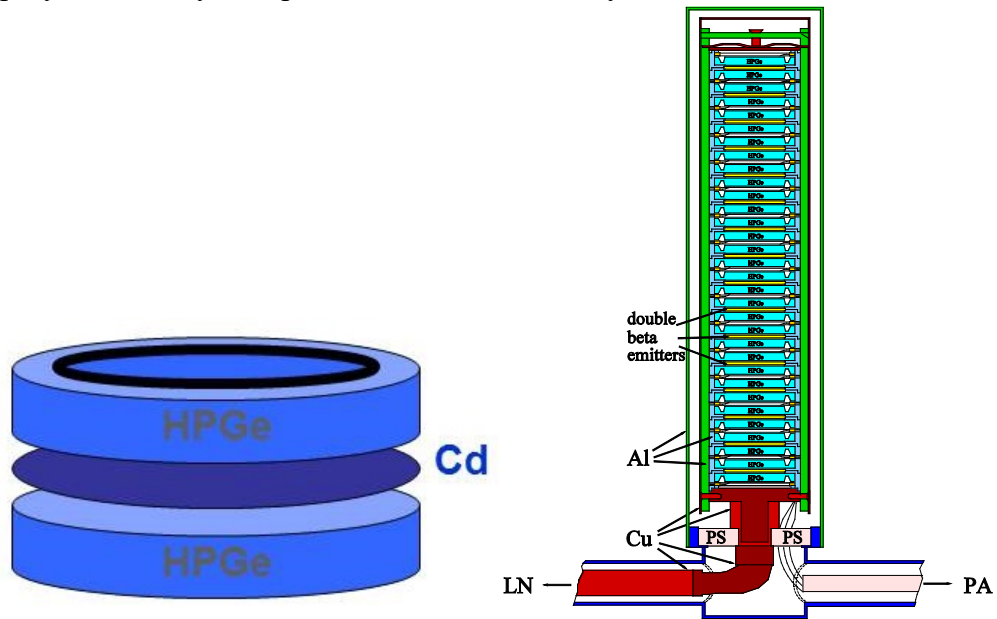


Рис. 4. Детекторная часть низкофонового спектрометра TGV с источниками двойного бета-распада. В левой части рисунка изображена пара детекторов с фольгой ^{106}Cd .

Ожидаемые результаты

В рамках настоящего проекта мы рассчитываем зарегистрировать $2\nu\text{ECEC}$ распад ^{106}Cd и $2\nu\text{ECEC}$ распад ^{130}Ba в прямом эксперименте.

Риски

Планируемая модернизация спектрометра TGV может не дать существенного улучшения энергетического разрешения детекторов и подавления фона. У нас еще нет обогащенного ^{130}Ba для запланированного исследования. Этот изотоп может не быть достаточно радиационно-чистым для проведения эксперимента.

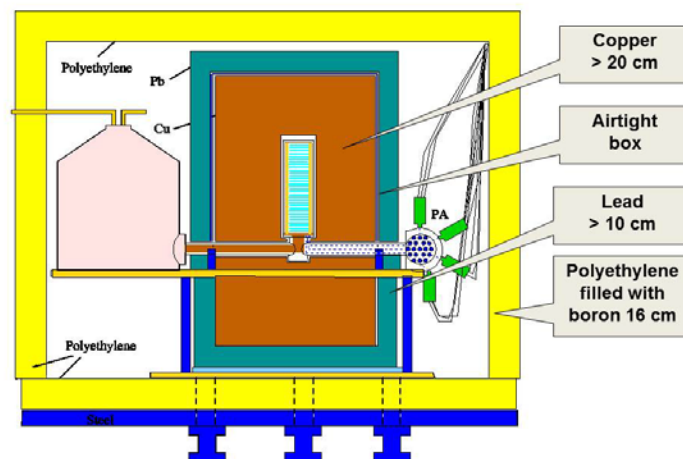


Рис.5. Детекторная часть спектрометра TGV в пассивной защите.

Целью дополнительной активности, связанной с детекторами **Obelix** и **Idefix** является поиск $2\nu\beta\beta$ распада ^{82}Se и ^{96}Zr на возбужденные состояния ^{82}Kr и ^{96}Mo , соответственно (см. Рис.6), а также поиск $2\nu\beta\beta$ распада ^{150}Nd на возбужденные состояния ^{150}Sm (Рис.7).

Двойной бета распад с испусканием двух нейтрино ($2\nu\beta\beta$) это разрешенный процесс второго порядка в рамках Стандартной Модели (СМ). $2\nu\beta\beta$ –распад предоставляет возможность экспериментального определения ядерных матричных элементов (ЯМЭ) вовлеченных в процессы двойного бета распада. Двойной бета распад может проходить путем переходов как на основное состояние дочернего ядра, так и на различные возбужденные состояния дочернего ядра. В настоящее время $2\nu\beta\beta$ распад на основное состояние дочерних ядер зарегистрирован в 11 ядрах. Изучение $2\nu\beta\beta$ переходов на возбужденные состояния дочерних ядер позволяет получить дополнительную информацию о $\beta\beta$ -распаде. Меньшая энергия перехода приводит к существенно уменьшенной вероятности $\beta\beta$ –распада на возбужденные состояния в сравнении с переходами на основное состояние. Но такие процессы сопровождаются испусканием гамма-квантов при разрядке возбужденных состояний, и $2\nu\beta\beta$ распад на возбужденные состояния дочерних ядер уже зарегистрирована для $^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}$ (0^+_1 , 1130.3 кэВ) и $^{150}\text{Nd} - ^{150}\text{Sm}$ (0^+_1 , 740.4 кэВ). $2\nu\beta\beta$ распад $^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}$ (0^+_1 , 1130.3 keV) был зарегистрирован в нескольких экспериментах, в том числе в измерениях, проведенных на HPGe спектрометре Obelix (Рис.8) в подземной лаборатории г. Модан (LSM, Франция).

Актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики

Поиск $2\nu\beta\beta$ распада ^{82}Se проводится сейчас на спектрометре Obelix (Рис.8) с образцом ~6 кг ^{82}Se с обогащением 95(1)%. До настоящего времени $2\nu\beta\beta$ распад ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr не наблюдался. Согласно нашим оценкам мы можем достичь уровня чувствительности $T_{1/2} \sim 6 \times 10^{22}$ лет за 3 года измерений, и согласно теоретическим предсказаниям, мы надеемся впервые зарегистрировать этот редкий процесс. Исследования других обогащенных изотопов ^{96}Zr и ^{150}Nd будет проводиться с использованием детектора Idefix, после его установки в пассивную защиту и детектора Obelix, после завершения текущих измерений ^{82}Se . Для обоих указанных исследований необходимо приобрести обогащенные изотопы ^{96}Zr и ^{150}Nd . Детекторы Obelix и Idefix были изготовлены фирмой Canberra на основе кристаллов германия Р-типа с чувствительным объемом ~600 см³. Масса детекторов 3.2 кг, а их относительные эффективности ~160%. Кристаллы смонтированы в ультранизкофоновых криостатах U-типа. Энергетическое разрешение (FWHM) детекторов ~1.2 кэВ при 122 кэВ (^{57}Co) и ~2 кэВ при 1332 кэВ (^{60}Co). Энергетический порог HPGe детекторов около 10 кэВ. Детекторная часть криостата Obelix окружена пассивной защитой из нескольких слоев археологического свинца (PbI) и низко активного свинца (PbII) (Рис.8). Детекторы Obelix и Idefix расположены в глубокой подземной лаборатории (4800 м в.э.) что позволяет подавить космическое излучение и быстрые нейтроны. Но по сравнению с детектором Obelix, у детектора Idefix пока еще нет пассивной защиты. Защита должна быть изготовлена в ходе выполнения данного проекта. Для выполнения этого проекта у нас уже есть спектрометр Obelix (детектор Obelix в пассивной защите, крейт NIM, АЦП Miltiport II, персональный компьютер с инсталлированным на нем программным обеспечением Genie 2000), детектор Idefix и образец обогащенного ^{82}Se .

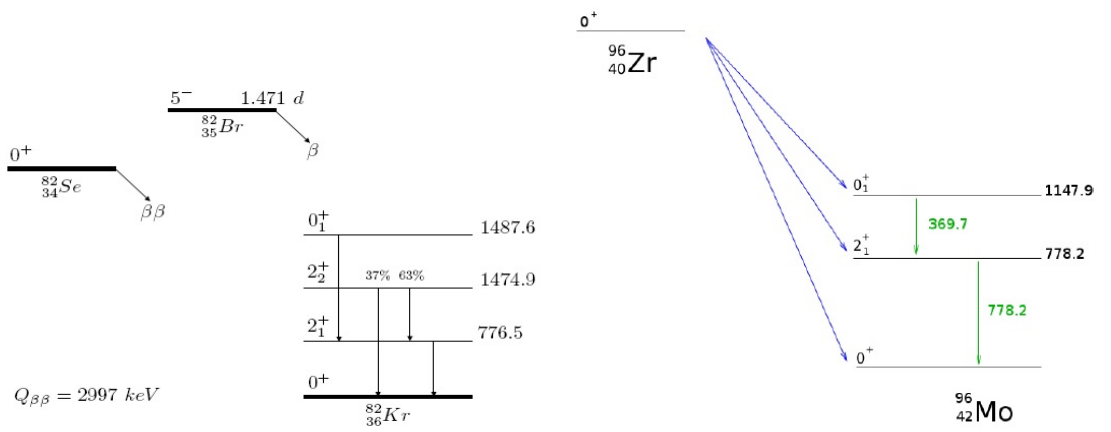


Рис.6. Схема двойного бета распада ^{82}Se (слева) и ^{96}Zr (справа).

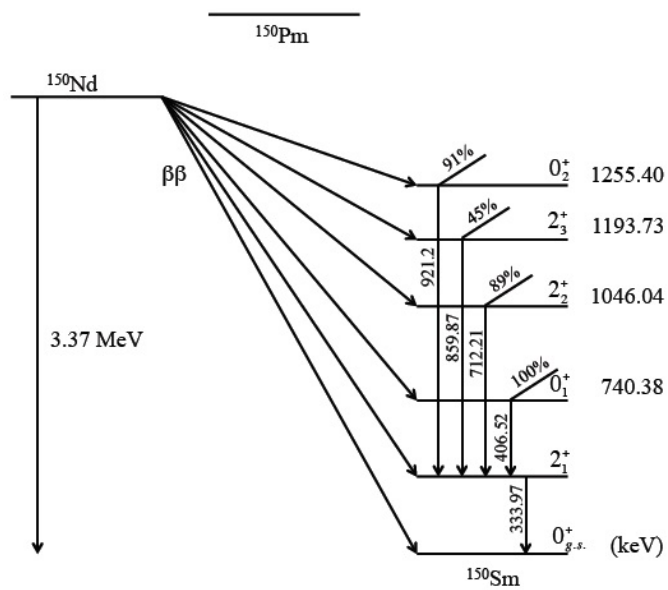


Рис.7. Схема двойного бета распада ^{150}Nd .

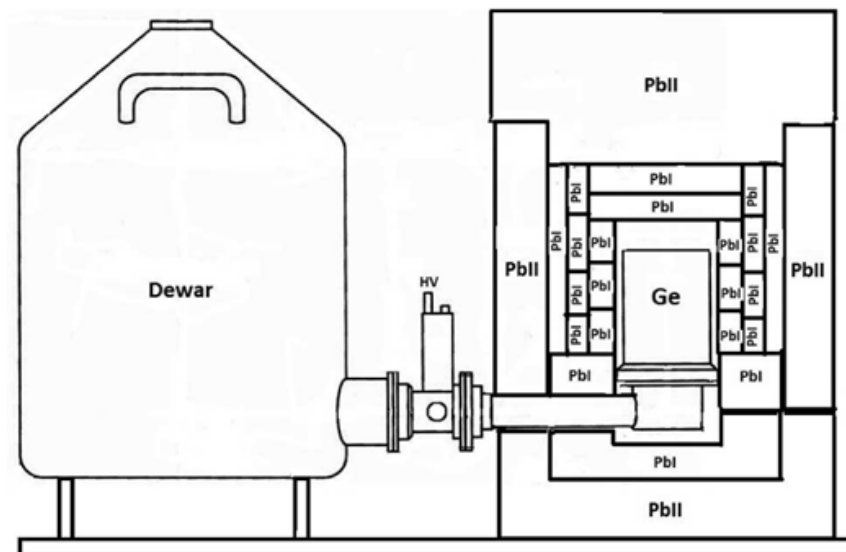


Fig.8. HPGe детектор Obelix в пассивной защите.

Ожидаемые результаты

В рамках этого проекта мы надеемся зарегистрировать $2\nu\beta\beta$ распад ^{82}Se на возбужденные состояния ^{82}Kr , а также зарегистрировать $2\nu\beta\beta$ распад ^{150}Nd на возбужденные состояния ^{150}Sm и $2\nu\beta\beta$ распад ^{96}Zr на возбужденные состояния ^{96}Mo .

Риски

Пассивная защита детектора Idefix может не обеспечить хорошее подавление фона. У нас еще нет обогащенных изотопов ^{150}Nd и ^{96}Zr для планируемых исследований. Эти изотопы могут не иметь необходимой радиационной чистоты для планируемых измерений.

Эксперименты по двойному бета-распаду **NEMO2/3** и **SuperNEMO** проводятся при активном участии ЛЯП ОИЯИ с 1992 года. Проект SuperNEMO наследует уникальную треко-калориметрическую методику, успешно зарекомендовавшую себя в эксперименте NEMO-3, с улучшенными характеристиками детектора и увеличенной до 100 кг массой изотопа $\beta\beta$. Задачей SuperNEMO является прямой поиск безнейтринного двойного бета-распада для нескольких изотопов (первоначально для ^{82}Se) с чувствительностью, позволяющей достичь области обратной иерархии масс нейтрино.

В настоящее время в мире насчитывается более 30 экспериментов по поиску двойного безнейтринного бета-распада находящихся в разной степени реализации. Один или несколько из них имеют хорошие шансы вскоре обнаружить $0\nu\beta\beta$ распад, если реализуется обратная иерархия масс нейтрино. Затем потребуются проверка этого прорывного достижения другими экспериментами с использованием других $\beta\beta$ -изотопов. В случае обнаружения $0\nu\beta\beta$ в одном из экспериментов, исследование этого распада будет оставаться актуальной задачей в связи с необходимостью проверки другими экспериментами и попытками раскрыть механизм (механизмы), ответственный за распад. В этом случае для определения механизма распада необходим такой детектор, как SuperNEMO, уникальный в области экспериментальных исследований $0\nu\beta\beta$ благодаря способности полностью реконструировать топологию события с измерением отдельных энергий и угловой корреляции испущенных электронов.

Методы и подходы, методики

Как указывалось выше, SuperNEMO — это эксперимент по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада следующего поколения, основанный на усовершенствованной треко-калориметрической методике NEMO-3, однако он использует прямоугольную геометрию, в отличие от цилиндрической в NEMO-3. В SuperNEMO предусмотрена модульная структура, с 20 идентичными модулями, каждый из которых содержит ~5 кг $\beta\beta$ -изотопа. Основным исследуемым изотопом является ^{82}Se , который можно относительно просто получить в большом количестве с высоким обогащением и высокой степенью очистки и, что актуально, за реальное время. Ведется разработка методик получения значительного количества ^{150}Nd и ^{96}Zr , которые очень интересны, поскольку имеют высокое значение $Q_{\beta\beta}$.

Демонстрационный Модуль SuperNEMO (см Рис. 9) имеет многослойную конструкцию, в которой фольги $\beta\beta$ -источника зажаты между модулями трекера, окруженными стенками калориметра. Используемый в качестве $\beta\beta$ -источника ^{82}Se смешивается с основой из ПВА для создания тонких фольг, подвешенных к каркасу. Модульная конструкция позволяет менять эти фольги для изучения других изотопов.

Трекер, состоящий из четырех С-образных секций, состоит из 2034 дрейфовых ячеек длиной 3 метра, работающих в гейгеровском режиме, расположенных рядами по девять ячеек с каждой стороны фольги источника. Каждая ячейка состоит из центрального анодной проволоки, окруженной 12 формирующими поле проволоками с медными катодными концевыми кольцами на каждом конце. Когда заряженная частица пересекает ячейку, время анодного сигнала сообщает нам расстояние от анодной проволоки, а относительные времена

катодных сигналов дают положение вдоль проволоки, что позволяет проводить трехмерную реконструкцию.

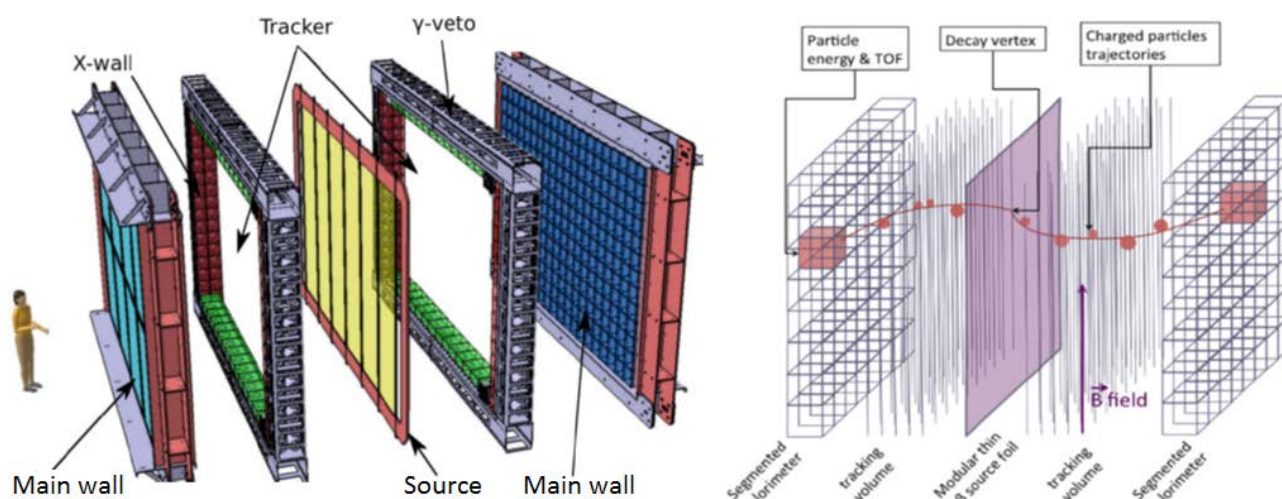


Рис. 9: Слева: изображение демонстрационного Модуля SuperNEMO. С каждой стороны от рамы с фольгами-источниками установлены трековые детекторы и стенки из оптических модулей калориметра. Справа: принцип детектирования SuperNEMO: траектории заряженных частиц, испускаемых из фольги-источника, измеряются в трекере, а их энергия – в оптических модулях калориметра.

Две стенки калориметра, расположенные снаружи трекера, состоят из 520 оптических модулей; 8-дюймовые радиоактивно чистые ФЭУ, соединенные с полистироловыми сцинтилляционными блоками, обернутыми тефлоном и майларом, с индивидуальной защитой из железа. Оптические модули с более низким разрешением по краям трекера (всего 712 модулей) обеспечивают акцептанс 4π (см. Рис. 10).

Ожидаемые результаты

В начальный период работы демонстрационный модуль будет иметь чувствительность к периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ $T_{1/2} > 6 \times 10^{24}$ лет, что соответствует эффективной массе майорановского нейтрино $\langle m_\nu \rangle < 200 - 400$ мэВ. Полномасштабный детектор SuperNEMO с использованием 20 модулей с экспозицией 500 кг лет (5 лет, 100 кг ^{82}Se) улучшит чувствительность к $0\nu\beta\beta$ до $T_{1/2} > 10^{26}$ лет, что соответствует $\langle m_\nu \rangle < 50 - 100$ мэВ.

Помимо поиска $0\nu\beta\beta$, будут проведены исследования двухнейтринного двойного бета-распада ^{82}Se на основное и возбужденное состояния ^{82}Kr . Новое детальное изучение $0\nu\beta\beta$ -распада ^{82}Se представляет интерес, в частности, с точки зрения возможности определения эффективной аксиально-векторной константы связи g_A при использовании измеренных спектров индивидуальных энергий электронов.

Риски

Главным для экспериментов по поиску редких событий является обеспечение низкофоновых условий. Предварительно все конструкционные материалы Демонстратора SuperNEMO проверялись с помощью низкофоновых HPGe-детекторов. Была произведена очистка селена от радиоактивных примесей. Все работы по изготовлению фольг-источников выполнялись в чистой комнате при постоянном контроле уровня пыли и радона. Оценка радиационной чистоты фольг-источников производилась с помощью специально созданного сверх-низкофонового ViPo-3 детектора.

Одним из наиболее опасных источников фона является радон, обладающий высокопроникающей способностью. Для борьбы с радоном, поступающим в трекер извне, под тент накрывающий детектор закачивается очищенный от радона воздух идущий от

«антирадоновой фабрики». Специальные электростатические детекторы были созданы для измерения загрязненности радоном рабочего газа на входе и выходе из объема трекового детектора и для контроля содержания радона в воздухе подземной лаборатории и под антирадоновым тентом.

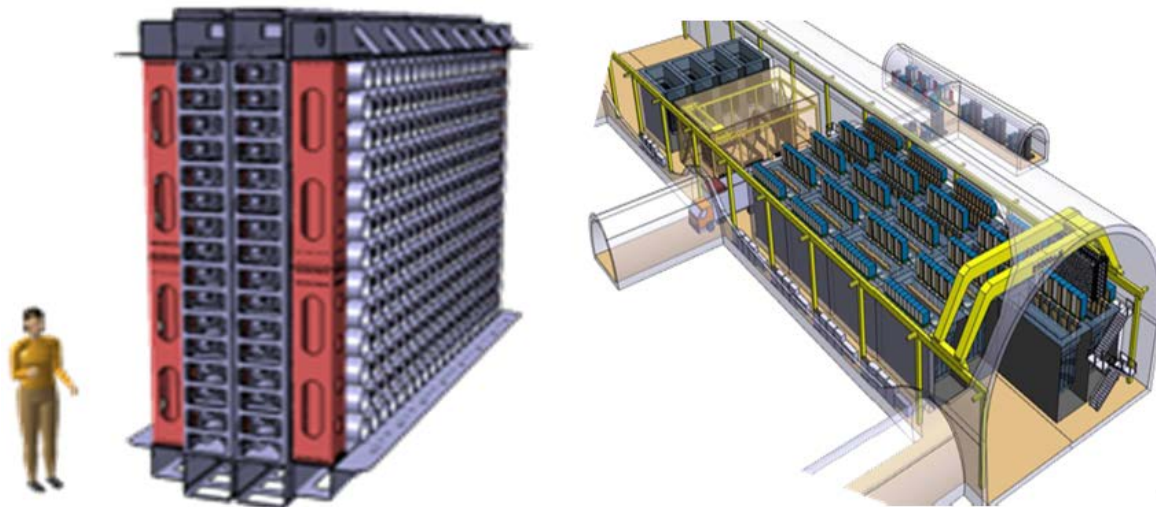


Рис. 10. Слева: Изображение одного модуля SuperNEMO. Справа: Полностью укомплектованный детектор SuperNEMO в подземной лаборатории.

Успешность мер по обеспечению низкофоновых условий будет проверена с помощью самого детектора SuperNEMO, способного идентифицировать и измерить внутренние загрязнения фольг и фоны от внешних по отношению к фольгам источников.

Возможная нестабильность временных и энергетических характеристик калориметра также может привести к появлению фоновых событий, имитирующих $0\nu\beta\beta$ распад. Для борьбы с этой проблемой, используя опыт NEMO-3 эксперимента, предусмотрены периодические (каждые 3 недели) абсолютные калибровки калориметра с использованием радиоактивных источников (^{207}Bi , ^{60}Co), а также ежедневный контроль стабильности работы калориметра с помощью лазерной системы.

Целью проекта **MONUMENT** (Muon Ordinary Capture for the Study of Nuclear Matrix Elements) является исследование обычного мюонного захвата (ОМЗ) в изотопически-обогащенных ^{96}Mo и ^{48}Ti . Основным используемым методом является высокопрецизионная пучковая спектроскопия с использованием полупроводниковых детекторов из высокочистого германия. В качестве дополнительных задач рассматривается получение полных и парциальных вероятностей ОМЗ в более легких элементах типа ^{56}Fe и ^{32}S , ^{12}C и ^{13}C , а также определение выходов продуктов реакции мюонного захвата в этих ядрах. Помимо этого, запланировано получение мезорентгеновских спектров излучения по исследуемым ядрам и добавление их в существующий электронный атлас таких спектров (<http://muxrays.jinr.ru>). Для реализации поставленных задач предлагается продлить экспериментальную программу еще на пять лет.

Актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики

Скорость $0\nu\beta\beta$ распада зависит не только от эффективной Майорановской массы электронного нейтрино и фактора фазового объема, пропорционального энергии распада, но и от величины ядерного матричного элемента (ЯМЭ) [Physics Pub. 1 edition. Bristol and Philadelphia,

1995. Vol. 1.]. Если фактор фазового объема считается известным, то расчет ЯМЭ является сложнейшей теоретической задачей. В наиболее распространенном случае двойного бета-распада в ядре (A, Z) два нейтрона одновременно переходят в два протона, в результате чего образуется ядро

($A, Z+2$). Расчеты двойного бета распада (ДБР) проводятся через вероятности виртуальных переходов в промежуточное ядро ($A, Z+1$) [Physics Reports. 1998. Vol. 300, no. 3. P.123]. Для проверки теоретических подходов необходимы экспериментальные данные, поскольку результаты расчетов, выполненных на основе различных моделей для описания ЯМЭ, имеют большие расхождения (2-3 порядка, АРРЕС-2019). Обычно используют вероятности бета распада и двухнейтринного двойного бета распада. Однако, в этом случае можно проверить только процесс, идущий через основное состояние или низколежащие возбужденные состояния промежуточного ядра, тогда как $0\nu\beta\beta$ распад может протекать через высоковозбужденные состояния, причем относительный вклад этих состояний может оказаться определяющим.

Экспериментально определить параметры возбужденного состояния промежуточного ядра с высокой энергией и мультипольностью достаточно трудно. Мюонный захват, наряду с зарядово-обменными реакциями, предоставляет такую возможность. Этот процесс протекает при высоком передаваемом моменте ($q \approx 100$ МэВ/с), в результате чего возможно заселение возбужденных состояний промежуточного ядра в широком диапазоне энергий и мультипольностей.

Таким образом, обычный мюонный захват является уникальным способом исследования волновых функций возбужденных состояний промежуточного ядра, относящегося к $0\nu\beta\beta$ распаду, как это было показано в рамках некоторых моделей [Physics Reports. 1998. Vol. 300, no. 3. P. 123, J. Phys. 2001. Vol. G27. P. 2429]. Используя экспериментальные данные по ОМЗ для переходов промежуточного ядра, образующегося при $0\nu\beta\beta$ распаде, можно сравнить рассчитанные силовые функции ОМЗ с измеренными. Это позволит проследить изменения эффективных значений параметров g_A и g_P , аксиального и псевдоскалярного токов, соответственно. Кроме того, процесс мю-захвата дает экспериментальную информацию о структуре ядер необходимую при расчетах ЯМЭ ДБР. Поэтому исследование мюонного захвата является актуальной задачей.

Идея экспериментов по мюонному захвату основана на точном измерении время-энергетического распределения γ -лучей после захвата мюона. Эти распределения предоставляют богатую экспериментальную информацию, и все они являются полезным вкладом в расчеты ЯМЭ для ДБР. Полные скорости мюонного захвата конкретными изотопами определяются путем анализа временного распределения задержанных γ -квантов. С помощью баланса интенсивностей, задержанных гамма квантов извлекаются парциальные вероятности мюонного захвата на связанные состояния дочернего ядра. Выходы короткоживущих изотопов получены с использованием офлайн измерений. Важным побочным продуктом измерений являются спектры мезорентгеновского излучения. Они являются неустраняемым фоном в наших измерениях и используются при идентификации энергетических спектров, а также при нормировке.

В продолжение проекта предлагается внести изменения в установку, подобрать оптимальные параметры для исследования и более точных расчетов парциальных скоростей захвата.

Основные подходы и методы для реализации задачи:

1. Использование в качестве мишеней для мюонного захвата изотопически-обогащенных элементов. Этот метод сразу отсекает присутствие других ядер в мишени, при захвате мюона в которых могут получаться возбужденные уровни ядра, которые разряжаются гамма-квантами с энергией близкой или такой же, как и интересующая нас;
2. Использование монохроматического и узкоколлимированного пучка отрицательных мюонов, чтобы подавляющая часть мюонов останавливалась именно в мишени (пучок отрицательных мюонов $p_i E_1$ в PSI предоставляет такую возможность, обладая интенсивностью 10 кГц при моменте 28 МэВ/с);
3. Прецизионное измерение временных и энергетических распределений γ -лучей за счет применения системы германиевых детекторов различного объема, характерной особенностью которых является высокое энергетическое разрешение (см. Рис 11);

4. За счет прекрасного энергетического разрешения, появляется возможность точной идентификации изучаемых переходов, заселяющие конкретные состояния дочерних ядер;
5. Использование системы сбора данных (DAQ) на быстрых флэш-АЦП. Такая система имеет очень короткое время передачи данных и отличную временную привязку, а также за счет применения специальных трапезоидных фильтров позволяет дополнительно улучшить энергетическое разрешение;

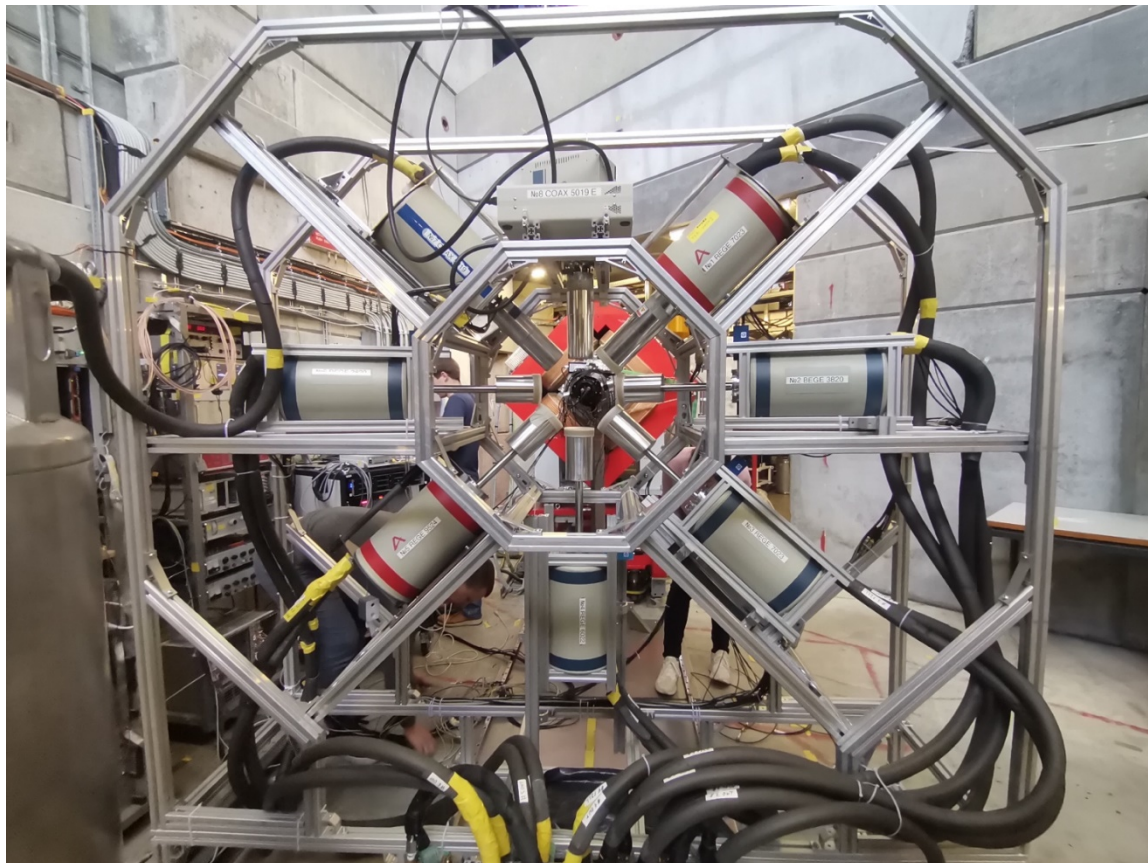


Рис. 11: Измерительная установка проекта MONUMENT в сборе с германиевыми детекторами.

6. Система мюонных счетчиков (см. Рис 12), включенных на (анти)совпадения, позволяет однозначно определить момент прихода мюона с точностью до 5 нс, что, в свою очередь, делает возможным разделение регистрируемого излучения на мгновенное (prompt) и задержанное (delayed);
7. Полученные с помощью новой системы сбора данных (см. п.5) мезорентгеновские спектры будут способствовать надежной идентификации линий, а также обеспечат нормировку по количеству мюонов, остановившихся в данном химическом элементе, что позволит нам избежать перерасчета абсолютной эффективности (учет телесного угла);
8. Офф-лайн измерения будут давать информацию о том, какие/сколько изотопов нарабатываются в результате мюонного захвата. Такая информация необходима для проверки расчетов парциальных скоростей захвата в обогащенных изотопах.

Ожидаемые результаты

1. Впервые будут получены значения парциальных скоростей ОМЗ в изотопе ^{136}Ba и ^{96}Mo , являющиеся основой новых расчетов ЯМЭ для двойного бета-распада ^{136}Xe и ^{96}Zr .
2. Впервые будут получены значения полных и парциальных скоростей ОМЗ в легких изотопах ^{56}Fe и ^{32}S , необходимые для интерпретации и оптимизации расчетных моделей ЯМЭ для $0\nu 2\beta$ - распада.

3. Впервые будут получены значения парциальных вероятностей ОМЗ в изотопе ^{100}Mo для расчета ЯМЭ с точки зрения поиска Сверхновой.

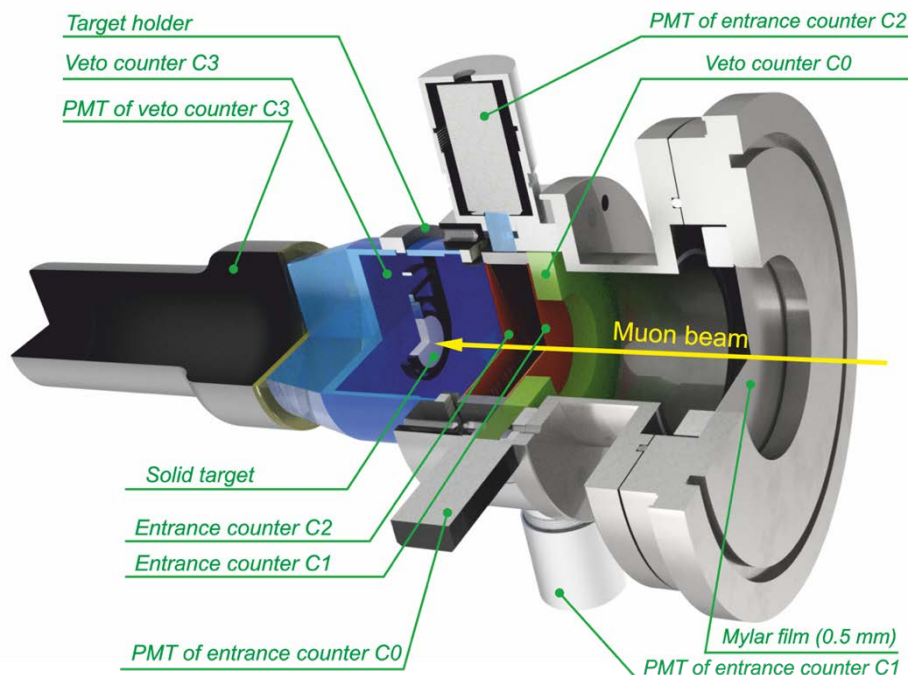


Рис. 12: Система мюонных счетчиков для отбора полезных данных в проекте MONUMENT

4. Будут уточнены ранее полученные значения полных и парциальных скоростей захвата в обогащенных изотопах ^{76}Se и ^{48}Ti , проведено сравнение новых результатов с теоретическими расчетами ЯМЭ, а также их интерпретация относительно различных моделей.

5. Будут получены значения выходов различных изотопов, нарабатываемых в результате мюонного захвата в вышеуказанных мишенях.

6. Полученные мезорентгеновские спектры излучения исследуемых мишеней дополняют существующую электронную библиотеку μX спектров, созданную в нашем отделе (<http://muxrays.jinr.ru>) и используемую группами, связанными с мюонной физикой.

7. Полученные результаты будут опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, а также представлены на международных конференциях.

Риски

С точки зрения методов измерения мюонного захвата в нашем проекте есть ряд нюансов, которые мы вкладываем в ошибку наших измерений.

Таковыми являются: резкое снижение эффективности регистрации детекторов в энергетическом диапазоне свыше 3 - 4 МэВ (этот момент может быть улучшен с использованием современных HPGe детекторов большого объема); большой вклад статистической ошибки измерений при итоговом балансе интенсивностей парциальных вероятностей мюонного захвата на связанные состояния дочернего ядра (этот вопрос также может быть решен с помощью использования инвертированных коаксиальных детекторов с лучшим разрешением и возможностью разделения сигнала по pulse-shape анализу); несовершенство расчетных моделей ЯМЭ по мюонному захвату на данный момент, что может явиться причиной не совсем верной интерпретации экспериментальных результатов с точки зрения расчетных моделей.

Потенциальную конкуренцию нашему проекту в ближайшие годы могли бы составить только ранее проводимые измерения по зарядово-обменным (n,p) и (p,n) реакциям. Но о существовании таких экспериментов, как (n,p)-реакции (проверка правого плеча, как в случае с ОМЗ) на данный момент нет достоверной информации. К тому же действительный вклад зарядово-обменных реакций в расчеты ЯМЭ, по крайней мере для безнейтринной моды двойного бета-распада, на сегодняшний день не оправдался.

На выполнение проекта MONUMENT могут существенно повлиять факторы, связанные со стабильностью работы самого мюонного тракта, а также детекторов, включая электронику, и систему сбора данных. В данном случае параллельная система сбора данных и имеющиеся в запасе дополнительные детекторы исключают часть факторов риска.

Основной целью проекта **EDELWEISS** является прямой поиск слабозаимодействующих частиц темной материи (WIMP) из галактического гало нашей галактики Млечный путь по их рассеянию в HPGe детекторах-болометрах. Эксперимент EDELWEISS проводится при активном участии ОИЯИ с 2005 года. Эксперимент EDELWEISS проводится при активном участии ОИЯИ с 2005 года.

Имеются убедительные доказательства существования небарионной ТМ почти на всех космических масштабах. В стандартной модели нет частиц, которые могли бы составлять ТМ, поэтому поиск частиц ТМ различными методами одновременно является поиском Новой физики. Довольно интригующим является тот факт, что суперсимметрия (SUSY) предсказывает, что Вселенная заполнена слабозаимодействующими массивными частицами (WIMP). При этом для большого пространства параметров таких моделей предсказываемая плотность WIMP согласуется с требованиями астрофизики. Ключевым элементом для подтверждения того, что WIMP действительно образуют галактическое гало темной материи, является наблюдение в лаборатории рассеяния таких частиц на обычной матери. Целью эксперимента EDELWEISS как раз и является прямое детектирование слабозаимодействующих массивных частиц (WIMP) из галактического гало. К настоящему времени основные результаты прямого поиска связаны с детекторами на сжиженных благородных газах и с криогенными детекторами.

В последнее время выросла актуальность поиска легких WIMP, что связано как с отсутствием доказательств SUSY на БАК, так и с новыми теоретическими моделями, отдающими предпочтение WIMP массой меньше $10 \text{ ГэВ}/c^2$ (например модели асимметричной темной материи). Поэтому, область интереса EDELWEISS сместилась в этот диапазон масс, который может быть исследован в эксперименте с HPGe детекторами - болометрами, работающими в специальных режимах (усиление фоновый сигнала благодаря эффекту Трофимова-Неганова-Люка), что позволяет достичь рекордно низких энергий регистрации, при энергетических разрешениях в 100 эВ.

Актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики

Благодаря высокому энергетическому разрешению и низкому порогу регистрации, детекторы-болометры EDELWEISS позволяют проводить поиски легких WIMP и аксионоподобных частиц в области низких энергий, недоступной для других экспериментов. Из-за экстремально низкого ожидаемого количества событий рассеяния частиц темной материи на ядрах германия (реже чем 1 раз в 1 кг детекторов в год) основные ограничения на чувствительность эксперимента связаны с фоновой радиоактивностью. Поэтому эксперимент использует специальные детекторы HPGe болометры, работающие при температуре ниже 20 мК, с одновременным измерением ионизационных и фоновых сигналов, что позволяет проводить высокоэффективный отбор фоновых событий. Отношение потерь на ионизацию для электронов (как и для легких заряженных частиц и γ) и ядер отдачи значительно отличается, что и является основой для отбора событий, связанных с рассеянием частиц темной материи на ядрах, и фона (в основном γ). К настоящему времени EDELWEISS смог достичь разрешения в 0,53 электрон-дырочных пар с использованием усиления Трофимова-Неганова-Люка. Из анализа накопленных данных были получены ограничения на взаимодействия сверхлегких частиц темной материи на электронах и на поглощение бозонной темной материи [Phys. Rev. Lett. 125, 141301]. Достигнутые результаты продемонстрировали, что детекторы EDELWEISS применимы даже для поиска рассеяния частиц ТМ, приводящего к электронным отдачам на уровне нескольких эВ. Поэтому регион "легких WIMPs" сможет в дальнейшем изучаться в EDELWEISS благодаря энергетическому разрешению новых HPGe болометров, которое лучше 20 эВ. Данный этап экс-

перимента находится в НИОКР фазе, в ходе которой необходимо создать улучшенные детекторы, их оправки и держатели в криостате, с одновременным улучшением фоновых параметров и новой современной системой набора данных. Установка EDELWEISS располагается в глубокой подземной лаборатории LSM. Детекторы охлаждаются до температур в ~ 20 мК для одновременного измерения фононного и ионизационного сигнала каждого события. Сбор заряда осуществляется системой концентрических электродов, позволяющей проводить отбор поверхностных событий. Настоящей целью проекта является достижение уровня чувствительности к легким WIMPs, который позволит зарегистрировать В-8 солнечные нейтрино по их когерентному рассеянию на ядрах (CEvNS).

Проект находится в фазе значительных изменений, старая установка 2005 года будет заменена новой, имеющей низкофоновую криосистему меньшего размера, которая позволит выполнять экстенсивную программу НИОКР и поиска ТМ. В течение нескольких следующих лет измерения с детекторами EDELWEISS будут проводиться в установке BINGO, являющейся продолжением эксперимента CUPID-Mo, который до этого располагался в криостате EDELWEISS. Одной из основных целей является установление природы “эксклюзивно фононных” фоновых событий и дальнейшее улучшение энергетического разрешения ионизационного канала. Новые дизайны электродов и термисторов (NTD и TES) будут разрабатываться с целью иметь близкие к бесфоновым условия в самом низу спектра регистрируемых энергий (т.е. ниже 100 эВ).

Задачами, решаемыми группой из ОИЯИ в ходе выполнения EDELWEISS, будут являться: 1) Создание новых германиевых детекторов, в частности детекторов с низким порогом регистрации для изучения легких WIMP; Установка и тестирование новых детекторов в подземной лаборатории, наладка систем набора данных; 2) Разработка и создание криогенной системы нового поколения; 3) Разработки процедур и методов понижения радиоактивного уровня, в частности процедур по сертификации новых радиоактивных источников, по использованию радиоактивных источников в низкофоновом эксперименте, по работе в чистой комнате и т.д. 4) Набор данных, включая как каждодневные регулярные процедуры, например регенерацию детекторов, так и подготовку и проведение специальных калибровочных измерений с γ - и нейтронными источниками для выяснения характеристик детекторов и их стабильности во времени; 5) Экспериментальное изучение фона, в частности контроль уровня радона и поля быстрых и тепловых нейтронов в подземной лаборатории - месте проведения эксперимента; 6) Моделирование детекторов и анализ данных; Подготовка публикаций на основе полученных в эксперименте результатов.

ОИЯИ имеет следующее оборудование в EDELWEISS: несколько разных низкофоновых детекторов нейтронов ($He-3$, NaI), низкофоновый альфа-спектрометр, два высокочувствительных низкофоновых детектора радона, два HPGe спектрометра большого объема (160% относительная эффективность) для проведения отбора материалов по их минимальной радиоактивной загрязненности.

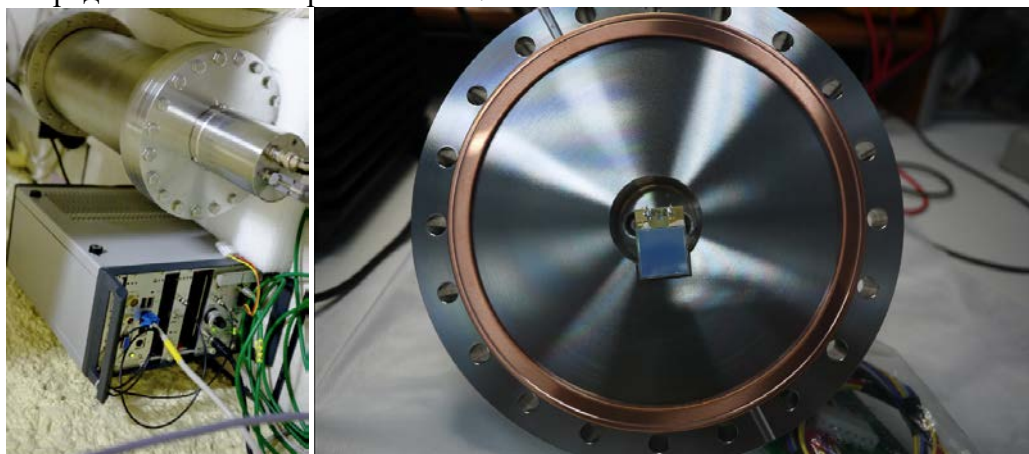


Рис. 13: Мобильный высокочувствительный детектор радона, разработанный для EDELWEISS в ОИЯИ.

Ожидаемые результаты

Задачей EDELWEISS является достижение чувствительности на уровне нейтринного сигнала (когерентное рассеяние ^8B солнечных нейтрино). Рис. 14 показывает ожидаемую чувствительность для статистики в 50000 кг.суток и разрешениях не хуже 100 эВ. Сплошные линии на рисунке соответствуют имеющемуся уровню фона. Тонкие прерывистые линии соответствуют чувствительности при значительном улучшении всех фоновых условий.

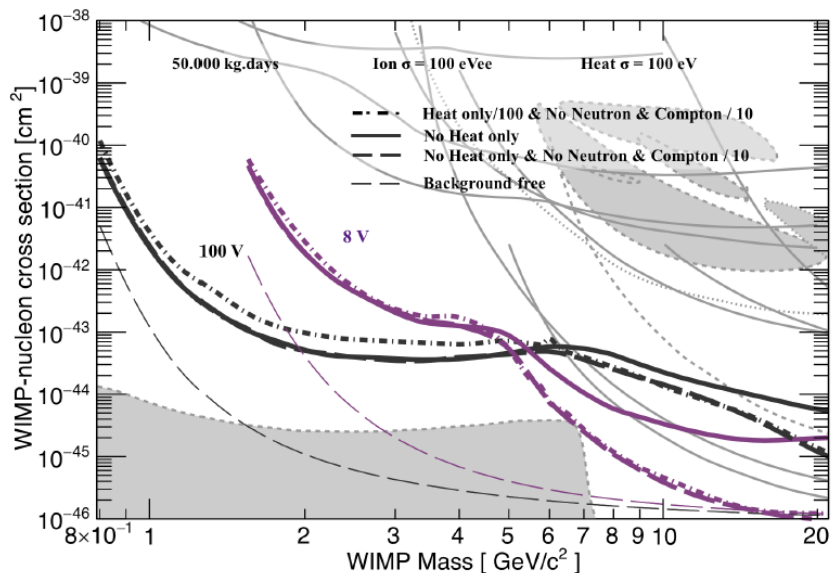


Рис. 14: Ожидаемая чувствительность EDELWEISS после набора 50000 кг.суток данных в значительно улучшенных фоновых условиях.

Риски

На выполнение проекта EDELWEISS могут существенно повлиять факторы, связанные со стабильностью работы всех компонентов эксперимента, включая криосистему с криостатом растворения, электронику, систему сбора данных, подсистемы. Хотя отказ различных компонентов установок трудно предсказать, в коллаборации накоплен более чем 20-летний опыт эксплуатации криогенных установок, с имеющимся опытом устранения возникающих проблем, включая проблемы с криосистемой, в короткие сроки.

Одной из важнейших задач любого низкофонового эксперимента является предотвращение внесения в него внешних загрязнений. Следовые количества радиоактивности на неприемлемом уровне могут накапливаться из-за калибровок с использованием ненадлежащим образом протестированных (на утечку радиации и целостность) радиоактивных источников, из-за радона и других радиоактивных газов в атмосфере, из-за пыли и т.д. Чтобы избежать этих проблем, на всех этапах эксперимента, начиная с его изготовления и заканчивая калибровочными измерениями, применяется набор специальных процедур и правил работы. Так, в чистую комнату, окружающую установку, можно вносить только специально сертифицированные (прошедшие определенные тесты) материалы. Все работы, выполняемые в чистом помещении, проводятся при постоянном контроле уровня пыли и радона. Для калибровок используются только радиоактивные источники в двойной капсуле, протестированные на поверхностные загрязнения и утечки.

Что касается научных задач: главная проблема экспериментов по поиску редких событий состоит в том, чтобы уверенно отличать искомые сигналы от ТМ, от событий, связанных с естественной радиоактивностью, космическими лучами и другими источниками. Другими словами, самая важная проблема – это фоновые условия. Таким образом, ключевым фактором успешности эксперимента является возможность высокоэффективной идентификации фоновых событий, особенно тех, которые имитируют искомый сигнал. Эксперимент EDELWEISS наряду с традиционными методами борьбы с фонами использует и несколько специальных методов

(измерения тепла/ионизации, детекторы FID для распознавания поверхностных явлений, PSD для уменьшения шума). Кроме того, фон независимо контролируется с помощью дополнительных детекторов. Несколько дополнительных таких детекторов будут дополнительно разработаны в ОИЯИ в ходе выполнения проекта.

2.3. Предполагаемый срок выполнения:

Срок продления проекта 5 лет, предполагается продолжить его и далее в зависимости от полученных результатов.

LEGEND (2024-2045)

2024: Добавление вновь изготовленных детекторов в LEGEND-200 для достижения конечной массы ^{76}Ge в 200 кг. Возобновление набора данных. Принятие решения о базовой лаборатории для LEGEND-1000. Завершение разработки CDR для LEGEND-1000.

2024-2031: Набор данных на LEGEND-200. НИОКР для аппаратных компонентов LEGEND-1000 (держатели детекторов, ASIC, система погружения детекторов, аргоновое veto и т.д.). Начало производства и тестирования новых детекторов из обогащенным Ge и монтажа установки LEGEND-1000 в базовой подземной лаборатории.

2031-2035: Демонтаж установки LEGEND-200. Инсталляция детекторов и аргового veto в LEGEND-1000 и начало набора данных.

2035-2045: Набор данных в LEGEND-1000.

Все годы: анализ данных, подготовка публикаций.

TGV

2024: Модернизация спектрометра TGV (детекторной части и электроники).

2024-2025: Измерение обогащенного ^{106}Cd .

2026: Измерение фона TGV без образцов. Приобретение обогащенного ^{130}Ba , проверка его радиационной чистоты, очистка обогащенного изотопа от радиоактивных примесей, изготовление образцов для исследования на спектрометре TGV.

2027: Монтаж образцов ^{130}Ba в спектрометр TGV.

2027-2028: Измерение обогащенного ^{130}Ba

Obelix и Idefix

2024: Монтаж детектора Idefix в пассивную защиту.

2024-2025: Измерение обогащенного ^{82}Se .

2025: Измерение фона детекторов Obelix и Idefix.

2025: Приобретение обогащенных изотопов ^{96}Zr и ^{150}Nd , проверка их радиационной чистоты, очистка обогащенных изотопов от радиоактивных примесей, изготовление образцов.

2026: Поиск резонансного $0\nu\text{ECEC}$ распада ^{106}Cd .

2026-2028: Исследование двойного бета распада of ^{96}Zr и ^{150}Nd с использованием детекторов Obelix и Idefix.

SuperNEMO

2024: Завершение набора данных Демонстратора SuperNEMO в конфигурации без пассивной защиты. Установка пассивной защиты детектора (борированный парафин + борированная вода + низкофоновое железо). Установка вокруг детектора анти-радонового тента с нагнетанием под него воздуха очищенного от радона в антирадоновой фабрике.

2025-2027: Набор данных с Демонстратора SuperNEMO в полной конфигурации с пассивной защитой и с анти-радоновой фабрикой.

2026-2028: основываясь на результатах Демонстратора подготовка CDR для новой фазы SuperNEMO.

В течение всего времени реализации проекта мы будем продолжать изучать и улучшать фон установки, выполнять интенсивную программу калибровки и проводить НИОКР для дальнейших фаз эксперимента.

Все годы: анализ данных, подготовка публикаций.

MONUMENT

2024: предполагается провести измерения мюонного захвата с газовыми мишенями углерода обогащенных по атомным массам 12 и 13;

2024-2027: исследование легких ядра с точки зрения проверки теоретических моделей, применимых для двойного бета распада, а также обогащенного ^{96}Mo ; НИОКР по применению мюонного захвата в других смежных с физикой областях, таких как радиобиология и мезохимия;

2025-2028: основываясь на НИОКР подготовка CDR для новой фазы MONUMENT.

В течение всего времени реализации проекта мы будем продолжать изучать и улучшать экспериментальную установку и проводить НИОКР для дальнейших фаз эксперимента.

Все годы: анализ данных, подготовка публикаций.

EDELWEISS

2024: Существующая в подземной лаборатории LSM установка EDELWEISS будет выведена из эксплуатации. Одновременно, в эксплуатацию будет введена установка BINGO, в которую будут интегрированы детекторы EDELWEISS. Это продолжение синергии между двумя программами (Cupid-Mo и EDELWEISS).

2024-2027: НИОКР по поиску природы и источников эксклюзивно фоновых событий в болометрах. Продолжение прямого поиска частиц ТМ в области их малых масс.

2025-2028: основываясь на НИОКР подготовка CDR для новой фазы EDELWEISS.

В течение всего времени реализации проекта мы будем продолжать изучать и улучшать фон установки, выполнять интенсивную программу калибровки и проводить НИОКР для дальнейших фаз эксперимента.

Все годы: анализ данных, подготовка публикаций.

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	EOS - 100	EOS - 100	EOS - 100	EOS - 100	EOS - 100
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)					

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
TUM	Германия	Мюнхен	S. Schoenert + 7 FTE	Соглашение о сотрудничестве
MPIK	Германия	Гейдельберг	B. Schwingenheuer + 2 FTE.	Соглашение о сотрудничестве
LNGS	Италия	Ассерджи	M. Laubenstein + 2 FTE	
UoT	Германия	Тюбинген	J. Jochum + 2 FTE	
UZH	Швейцария	Цюрих	L. Baudis + 2 FTE	
UNC	США	Чапел-Хилл	J. Wilkerson + 3 FTE	
Институт Пауля Шеррера (PSI)	Швейцария	Филлиген	A.Knecht + 1 FTE	Соглашение о сотрудничестве
Университет Алабамы, Отдел Физики и Астрономии	США	Тускалуза	I.Ostrovskiy + 1 FTE	
Институт Ядерной и Радиационной Физики, KU LEUVEN	Бельгия	Левен	T. Cocolios + 1 FTE	
Univ Lyon, Universite Lyon 1, CNRS/IN2P3, IP2I-Lyon	Франция	Лион	Gascon J. + 13 FTE	Соглашение о сотрудничестве
Centre de Spectroscopie Nucleaire et de Spectroscopie de Masse, IN2P3-CNRS, Universite Paris XI	Франция	Орсэ	Marnieros S. + 8 FTE (EDELWEISS), Sarazin X. + 10 FTE (SuperNEMO)	
Institut Néel	Франция	Гренобль	Benoit A. + 1 FTE	
Université Paris-Saclay	Франция	Орсэ	Jin Y.	
CEA	Франция	Гиф на р. Иветт	Armengaud E. + 5 FTE	
Laboratory Souterain de Modan, LSM	Франция	Модан		
University of	Великобритания	Эдинбург	Berschauer C. + 5 FTE	

Edinburgh				
The University of Warwick	Великобритания	Уорвик	Mitra F. + 2 FTE	
Wakasa Wan Energy Research Centre	Япония	Фукуй	Suzuki K.	
<u>Imperial College London</u>	Великобритания	Лондон	Franchini P. + 1 FTE	
Institute for Theoretical and Experimental Physics	Россия	Москва	Barabash A. + 2 FTE	
Osaka University	Япония	Осака	Nomachi M.	
The University of Manchester	Великобритания	Манчестер	De Capua S. + 6 FTE	
The University of Texas at Austin	США	Остин	Cesar J. + 3 FTE	
University College London	Великобритания	Лондон	Attree D. + 23 FTE	
CPPM, Centre de Physique des Particules de Marseille	Франция	Марсель	Busto J. + 2 FTE	Соглашение о сотрудничестве
<u>Charles University, Prague</u>	Чехия	Прага	Vorobel V. + 1 FTE	
<u>Comenius University, Bratislava</u>	Словакия	Братислава	Simkovic F. + 4 FTE	
Czech Technical University in Prague	Чехия	Прага	Stekl I. + 8 FTE	
LP2I-Bordeaux	Франция	Бордо	Piquemal F. + 5 FTE	
LPS CAEN	Франция	Каен	Depreumont H. + 7 FTE	
LAPP	Франция	Анси	Chabanne E. + 6 FTE	
Idaho National Laboratory	США	Айдахо	Caffrey G. + 2 FTE	

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)

DoE, США

Technische Universität München (TUM) - Технический университет Мюнхена, Германия, Мюнхен

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	16.95	--
2.	инженеры	3.55	--
3.	специалисты	1	—
4.	служащие	0	—
5.	рабочие	0.5	--
	Итого:	22	

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	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,5
		Ваганов Юрий Аркадьевич	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,2
		Васильев Сергей Иванович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,5
		Воробьева Мария Юрьевна	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,1
		Гуров Юрий Борисович	НЭОЯСиРХ	начальник сектора	0,7
		Гусев Константин Николаевич	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,8
		Житников Игорь Викторович	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,2
		Зинатулина Дания Раушановна	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Иноятов Анвар Хидоятovich	НЭОЯСиРХ	начальник сектора	0,3
		Казарцев Сергей Вячеславovich	НЭОЯСиРХ	младший научный сотрудник	0,5

		Караиванов Димитр Веселинов	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,1
		Картавцев Олег Иванович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,5
		Клименко Александр Адольфович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Кочетов Олег Иванович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Лубашевский Алексей Владимирович	НЭОЯСиРХ	начальник сектора	0,1
		Мирзаев Ниджат Агиль оглы	НЭОЯСиРХ	младший научный сотрудник	0,2
		Морозов Владимир Александрович	НЭОЯСиРХ	главный научный сотрудник	0,2
		Пономарев Дмитрий Владимирович	НЭОЯСиРХ	младший научный сотрудник	0,4
		Рахимов Алимардон Восибович	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,2
		Розов Сергей Владимирович	НЭОЯСиРХ	заместитель начальника отдела	0,2
		Румянцева Надежда Сергеевна	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	1
		Рухадзе Николай Ильич	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Саламатин Александр Васильевич	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,3
		Саламатин Денис Александрович	НЭОЯСиРХ	младший научный сотрудник	0,1
		Сандуковский Вячеслав Григорьевич	НЭОЯСиРХ	консультант при дирекции ЛЯП	0,25
		Смольников Анатолий Алексеевич	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Сушенок Евгений Олегович	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	1
		Темербулатова Наргиза	НЭОЯСиРХ	младший научный сотрудник	0,1
		Тимкин Виктор Владимирович	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,5
		Третьяк Виктор Иванович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	1
		Трофимов Владимир Николаевич	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,4
		Философов Дмитрий Владимирович	НЭОЯСиРХ	начальник сектора	0,1
		Фомина Мария Викторовна	НЭОЯСиРХ	научный сотрудник	0,3
		Ширченко Марк Владиславович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,4
		Шитов Юрий Александрович	НЭОЯСиРХ	старший научный сотрудник	0,5
		Якушев Евгений	НЭОЯСиРХ	начальник отдела	0,2

		Александрович			
		Немченко Игорь Борисович	НЭОЯСиРХ	начальник группы	0,1
2.	инженеры	Абд Альнгар Махмуд Абдулилах Махмуд	НЭОЯСиРХ	инженер	0,1
		Аксенова Юлия Викторовна	НЭОЯСиРХ	инженер	0,5
		Алексеев Игорь Васильевич	НЭОЯСиРХ	старший инженер	0,3
		Вагина Ольга Васильевна	НЭОЯСиРХ	инженер	0,3
		Вольных Владимир Петрович	НЭОЯСиРХ	ведущий инженер	0,25
		Доценко Иван Сергеевич	НЭОЯСиРХ	старший инженер	0,1
		Калинова Боряна Евтимова	НЭОЯСиРХ	инженер	0,2
		Камнев Илья Ильич	НЭОЯСиРХ	инженер	0,2
		Катулин Сергей Анатольевич	НЭОЯСиРХ	старший инженер	0,1
		Катулина Светлана Леонидовна	НЭОЯСиРХ	старший инженер	0,2
		Фатеев Сергей Вадимович	НЭОЯСиРХ	инженер	0,1
		Шахов Константин Викторович	НЭОЯСиРХ	инженер	0,1
		Шевченко Марина Юрьевна	НЭОЯСиРХ	инженер	0,3
		Шевчик Егор Андреевич	НЭОЯСиРХ	старший инженер	0,5
		Щербакова Ирина Сергеевна	НЭОЯСиРХ	инженер	0,3
3.	специалисты	Кулькова Елена Юрьевна	НЭОЯСиРХ	специалист по документообороту	0,1
		Ледницка Татьяна	НЭОЯСиРХ	лаборант	0,1
		Морозова Татьяна Анатольевна	НЭОЯСиРХ	старший инспектор	0,3
		Хусаинов Темирлан	НЭОЯСиРХ	лаборант	0,5
4.	рабочие	Емельянов Андрей Николаевич	НЭОЯСиРХ	слесарь-ремонтник	0,2
		Заикин Андрей Анатольевич	НЭОЯСиРХ	механик эксперимента-х стендов и установок	0,1
		Фарисеева Валентина Васильевна	НЭОЯСиРХ	старший техник	0,2
	Итого:	59			22

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.

3 000 000 \$

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Грант РФФИ (4 млн рублей, итоговый год финансирования 2023)

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

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
	Услуги научно-исследовательских организаций	100	20	20	20	20	20
	Приобретение программного обеспечения	50	10	10	10	10	10
	Проектирование/строительство	100	20	20	20	20	20
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)	50	10	10	10	10	10
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы					
		– сумма FTE,	22	22	22	22	22
		– ускорителя/установки,	-	-	-	-	-
		– реактора,.....	-	-	-	-	-
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (статьи бюджета)	3000	600	600	600	600
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	-	4 млн руб. (РФФИ)	-	-	-

Руководитель проекта / подпроекта КИП _____/_____/

Экономист Лаборатории _____/_____/

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

Ядерная спектрометрия для поиска и исследования редких явлений

ШИФР ТЕМЫ: **03-2-1100-2010/2024**

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА: Зинатулина Дания Раушановна

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