

1. Общие сведения по проекту

1.1. Научное направление

Ядерная физика

1.2. Наименования проектов

LEGEND, TGV+Obelix+Idefix, SuperNEMO, MONUMENT, EDELEWEISS

1.4. Шифр темы

03-2-1100-2010/2024

1.5. Руководители проектов

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

2. Научный отчет

2.1. Аннотация

Проект **LEGEND**, как и предшествующий ему эксперимент GERDA, направлен на поиск безнейтринного двойного бета-распада – единственного известного способа экспериментально подтвердить майорановскую природу нейтрино. В $0\nu\beta\beta$ распада не сохраняется лептонный заряд, поэтому его открытие доказало бы существование новой физики за пределами Стандартной модели. В эксперименте LEGEND используется тот же подход, который был успешно применен в GERDA – открытые германиевые детекторы, обогащенные ^{76}Ge , непосредственно погружаются в жидкий аргон, который охлаждает детекторы до необходимой температуры и, одновременно, служит дополнительной пассивной и активной защитой от внешнего радиоактивного фона. Эта методика позволила GERDA достичь беспрецедентного уровня фона и установить лучший в мире предел на период полураспада ^{76}Ge по данному каналу $T_{1/2}^{0\nu} > 1,8 \times 10^{26}$ лет (90% CL) при рекордной чувствительности $1,8 \times 10^{26}$ лет [Phys. Rev. Lett. 125, 252502]. Данный результат доказывает успешность нашего подхода и открывает оптимистичные перспективы для германиевого эксперимента LEGEND.

До настоящего времени основное внимание в исследованиях двойного бета-распада уделялось $\beta^-\beta^-$ -распаду, но существуют и другие каналы двойного бета распада - EC/EC, β^+ /EC и $\beta^+\beta^+$ распады. В последнее время интерес к другим двойным бета процессам существенно возрос, в частности к EC/EC захвату. В отличие от других экспериментов по поиску $2\nu\text{EC/EC}$ распада, эксперимент **TGV** направлен на прямое детектирование $2\nu\text{EC/EC}$ распада ^{106}Cd путем регистрации совпадений двух квантов характеристического рентгеновского X-излучения палладия (Pd) (энергия ~ 21 кэВ) испускаемых в этом редком распаде. ^{106}Cd – один из наиболее перспективных кандидатов для поиска $2\nu\text{EC/EC}$ распада. Теоретическое предсказание для периода полураспада этого процесса находится в пределах 1.1×10^{20} и 2.5×10^{22} лет. ^{106}Cd является также реальным кандидатом для поиска резонансного без-нейтринного EC/EC распада на возбужденное состояние дочернего – ^{106}Pd . Эксперимент TGV продолжался несколько лет. В

результате этого исследования в предыдущей фазе II эксперимента был получен лучший экспериментальный предел на $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ распад of ^{106}Cd - $T_{1/2} \geq 4.2 \times 10^{20}$ лет (90% CL) [Rukhadze N I et al 2012 *J. Phys.: Conf. Ser.* **375** 042020]. В течение фазы II эксперимента TGV оказалось возможным наблюдение $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ распада в ^{106}Cd . Но статистика совпадающих КХ(Pd)-КХ(Pd) событий в этой фазе была недостаточной для объявления наблюдения этого процесса. Экспериментальные возможности фазы II были ограничены в том числе и из-за радиоактивного загрязнения ^{241}Am нескольких исследуемых фольг ^{106}Cd . Поэтому масса исследуемого изотопа в эксперименте TGV существенно увеличена – с $\sim 5.787 \times 10^{22}$ атомов ^{106}Cd (~ 13.6 г ^{106}Cd с обогащением 75%) в фазе II до $\sim 1.3 \times 10^{23}$ атомов of ^{106}Cd (~ 23.2 г ^{106}Cd с обогащением 99.57%) в текущей фазе III.

Следующий проект **SuperNEMO** также направлен на поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$). Основным преимуществом проекта SuperNEMO является уникальная треко-калориметрическая методика, которая была разработана в коллаборации NEMO. Потенциально с нулевым фоном, она позволяет 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 серьезно подавить фон, проверку различных гипотез о механизмах $0\nu\beta\beta$ -распада в случае его открытия. Для проверки работоспособности треко-калориметрической методики и фонов на данном этапе создается демонстратор SuperNEMO. Для защиты от космических мюонов спектрометры NEMO-3 и демонстратор SuperNEMO были установлены в подземной лаборатории LSM в г. Модане, Франция. SuperNEMO детектор имеет модульную конструкцию со способностью измерять одновременно несколько разных изотопов, в настоящее время основным изотопом является ^{82}Se . Ожидаемая чувствительность за 5 лет измерений на 20 модулях детектора SuperNEMO (100 кг ^{82}Se) составит $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 10^{26}$ лет ($\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.04 - 0.11$ эВ), что сравнимо с другими проектами нашего поколения.

Целью проекта **MONUMENT** является проведение экспериментальных измерений мюонного захвата на обогащенных ядрах, являющихся дочерними к кандидатам на $0\nu 2\beta$ -распад. Получаемые результаты используются для расчетов ядерных матричных элементов.

Фундаментальной научной проблемой, решаемой в проекте **EDELWEISS**, является прямой поиск частиц Темной Материи (ТМ). Для поиска используются германиевые детекторы-боллометры, имеющие возможность одновременного измерения фонов и ионизационного сигналов, что дает возможность проводить идентификацию типа события (ядра отдачи, электроны). В настоящее время значительно вырос интерес к поиску WIMP малой массы и других частиц-кандидатов на роль ТМ (аксионы и др.), что связано как с отсутствием SUSY на LHC, так и новыми теоретическими моделями.

2.2. Развернутый научный отчет

В 2022 году продолжен анализ данных, накопленных в эксперименте GERDA, что привело к появлению новых публикаций. В течение прошедшего года в рамках коллаборации **LEGEND** при определяющем участии специалистов ОИЯИ производился поэтапный запуск эксперимента LEGEND-200 в Национальной лаборатории Гран-Сассо (Италия). Летом были установлены первые 60 кг детекторов из обогащенного ^{76}Ge . Нашей группой из ОИЯИ собраны гирлянды детекторов и изготовлены кожухи из высокочистого нейлона, применяемые для снижения радиоактивного фона эксперимента. Впервые осуществлен монтаж полной системы активного аргонового вето, разработанной и созданной объединенной группой ученых из ОИЯИ и Мюнхенского технического университета. Осенью сотрудники ЛЯП вернулись в Гран-Сассо, чтобы продолжить установку детекторов. Проведены подготовительные работы, необходимые для полномасштабного запуска эксперимента. Заново произведен монтаж системы активного

аргонового вето и всех имеющихся на сегодняшний день детекторов из ^{76}Ge . Сейчас в эксперименте установлен 101 германиевый детектор и начат набор данных. Масса обогащенного изотопа ^{76}Ge впервые превысила 100 кг и составила ~ 140 кг.

В 2023 году, когда изготовят оставшиеся детекторы, они будут добавлены в установку, чтобы довести массу ^{76}Ge до финального значения в 200 кг. После 5 лет набора данных планируется достичь расчетной чувствительности **LEGEND-200** к двойному безнейтринному бета-распаду в 10^{27} лет.

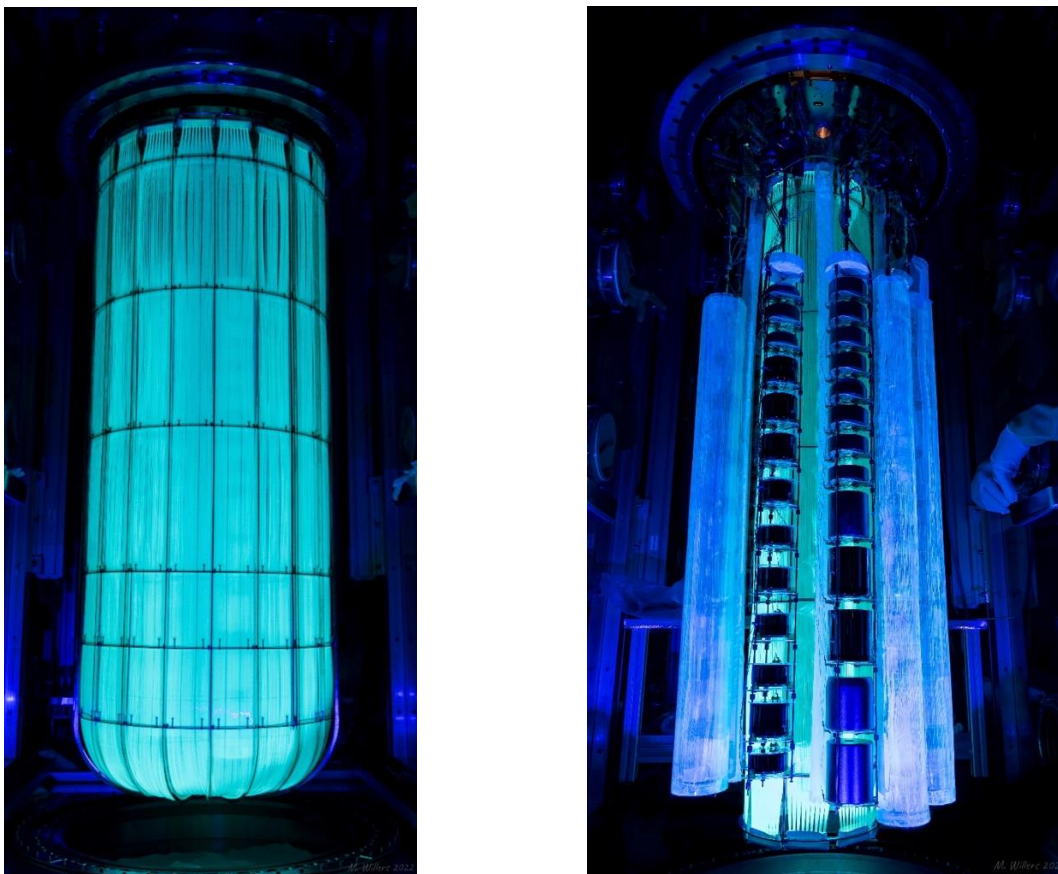


Рис. 1: слева: внутренняя часть системы аргонового вето и гирлянды германиевых детекторов (надеты не все нейлоновые кожухи); справа: LEGEND-200 перед погружением в аргон (видна внешняя часть вето).

Текущая фаза III эксперимента **TGV** стартовала в Моданской подземной лаборатории в конце февраля 2014 с 32-х детекторным спектрометром **TGV** и 16-ю образцами ^{106}Cd с общей массой ~ 23.2 г ($\sim 1.3 \times 10^{23}$ атомов ^{106}Cd). Уровень фона в текущей фазе III эксперимента оказался значительно ниже (особенно в области низких энергий) чем был в предыдущей фазе из-за более низкого уровня радиоактивного загрязнения исследуемых образцов.

Исследуемые образцы изготовлены путем проката в виде металлических фольг с диаметром 52 мм, и толщиной $\sim 70(10)$ мкм. Детекторная часть спектрометра состоит из 32-х планарных HPGe детекторов с чувствительным объемом $20.4 \text{ см}^2 \times 0.6 \text{ см}$. 16 фольг ^{106}Cd используемых в текущем исследовании (фаза III) размещены между входными окнами детекторов. Расстояние между фольгами и детекторами составляет около 1.5 мм. 16 пар детекторов с кадмиевыми фольгами смонтированы друг над другом в общем вертикальном криостате. Общий чувствительный объем

32-х детекторов TGV составляет около 400 см^3 и их общая масса около 3 кг Ge. Энергетическое разрешение детекторов, измеренное на гамма-линии $1332 \text{ кэВ } ^{60}\text{Co}$ находится в пределах от 3.0 до 4.0 кэВ. Конструкция детекторной части спектрометра TGV обеспечивает высокую эффективность регистрации полезных событий (одиночных и различных совпадений) и существенное подавление внешнего фона. Детекторная часть спектрометра TGV окружена пассивной защитой, состоящей из меди ($\geq 20 \text{ см}$), герметичного бокса против радона, свинца ($\geq 10 \text{ см}$) и нейтронной защиты из борированного полиэтилена (16 см). Местонахождение спектрометра TGV в глубокой подземной лаборатории (4800 м в.э.) позволяет подавить космическое излучение (коэффициент подавления $\sim 2 \times 10^6$) и вклад от быстрых нейтронов (коэффициент подавления $\sim 10^3$). Дополнительное подавление фона в области низких энергий ($< 50 \text{ кэВ}$) достигается путем подавления электронных и микрофонных шумов путем оцифровки сигнала с детекторов с различной полосой пропускания (2 и 8 мкс). Поиск $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ распада ^{106}Cd на основное состояние $0^+ ^{106}\text{Pd}$ основан на анализе двойных совпадений между характеристическим КХ-излучением Pd зарегистрированных в соседних детекторах. Анализ КХ-КХ совпадений показывает увеличенное число измеренных событий в области $\sim 21 \text{ кэВ}$ (KXPd), которые могут быть искомыми событиями от $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ распада ^{106}Cd . Но полученной статистики недостаточно для заявления об экспериментальном обнаружении $2\nu\text{EC}/\text{EC}$ распада ^{106}Cd в эксперименте TGV. Вычисление других ветвей двойного бета распада основано на анализе различных типов КХ- γ , γ - γ , and КХ- γ - γ совпадений. Новые экспериментальные результаты (на 90% уровне достоверности), полученные на текущем этапе фазы III эксперимента TGV представлены в Таблице 1 в сравнении с результатами предыдущей фазы II.

Таблица 1. Пределы на двойной бета распад ^{106}Cd (90% У.Д.) полученные в эксперименте TGV.

Decay mode	Final level of ^{106}Pd	$T_{1/2}, \text{ y}$ Phase II (2012) ¹	$T_{1/2}, \text{ y}$ Phase III ($T=42500\text{h}$) ²	$T_{1/2}, \text{ y}$ Phase III ($T=47860\text{h}$) ³
$2\nu\text{EC}/\text{EC}$	0^+g.s.	4.2×10^{20}	7.2×10^{20}	1.2×10^{21}
	$2^+_{1, 511.9 \text{ keV}}$	1.2×10^{20}	8.9×10^{20}	1.2×10^{21}
	$0^+_{1, 1134 \text{ keV}}$	1.0×10^{20}	7.2×10^{20}	9.6×10^{20}
$2\nu\beta^+/\text{EC}$	0^+g.s.	1.1×10^{20}	6.6×10^{20}	8.4×10^{20}
	$2^+_{1, 511.9 \text{ keV}}$	1.1×10^{20}	7.9×10^{20}	1.0×10^{21}
	$0^+_{1, 1134 \text{ keV}}$	1.6×10^{20}	9.0×10^{20}	1.2×10^{21}
$2\nu\beta^+\beta^+$	0^+g.s.	1.4×10^{20}	3.9×10^{20}	4.9×10^{20}
	$2^+_{1, 511.9 \text{ keV}}$	1.7×10^{20}	4.7×10^{20}	6.0×10^{20}

$T_{1/2} \text{ theor. } (2\nu\text{EC}/\text{EC})$
– $10^{20} - 10^{22} \text{ y}$

¹ N.I.Rukhadze et al., *Journal of Physics: Conference Series* 375 (2012) 042020

² N.I.Rukhadze et al., *Journal of Physics: Conference Series* 2156 (2022) 012134

³ N.I.Rukhadze on behalf of TGV collaboration, LXXII International conference Nucleus-2022, Moscow, 2022

В течение последних трех лет проект демонстратора **SuperNEMO** был сосредоточен на интеграции различных компонент детектора в подземной лаборатории Модана (LSM). Завершено создание, сборка и установка всех основных внутренних элементов модуля: калориметра, трекера, системы VETO, фольг ^{82}Se и системы калибровки, после чего

демонстратор был закрыт. После проведения пуско-наладочных работ детектор введен в эксплуатацию. Это позволило начать набор данных в конфигурации без пассивной защиты. Достижение этой цели стало возможным благодаря решению комплекса следующих задач:

- собраны две стенки калориметра и две половины трекера, установлены фольги источников ^{82}Se , интегрирована и введена в эксплуатацию система погружения калибровочных источников, закрыт демонстрационный модуль SuperNEMO;
- выполнены работы по обеспечению герметичности корпуса трекового детектора;
- детектор находится в рабочем режиме, включая все кабели калориметра, кабели внутреннего трекера и оптоволоконные кабели для системы лазерной калибровки;
- калориметр введен в эксплуатацию, с калибровкой по времени и энергии каждого оптического модуля.
- проведены работы по восстановлению номинальной геометрии трекового детектора, трекер механически стабилизирован, доля неработающих каналов трекера составляет 1-2%, что вполне приемлемо.



Рис 2. SuperNEMO демонстратор (первый модуль), установленный под тентом в главном зале подземной лаборатории LSM (Модан, Франция)

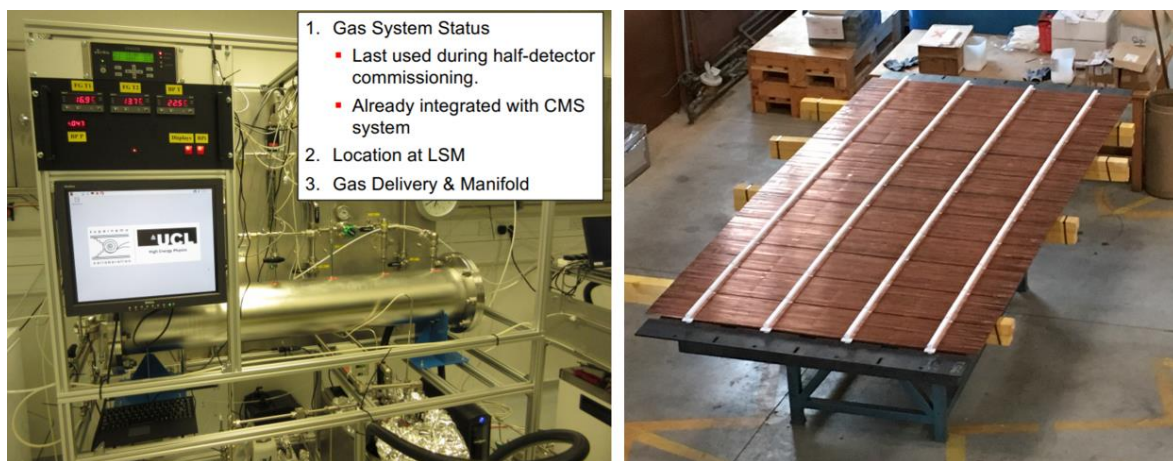


Рис 3. Слева: газовая система демонстратора SuperNEMO, установленная в LSM; справа: катушка магнита в процессе сборки.

- получено необходимое избыточное давление при проведении работ по устранению утечек газа из трекового объема;
- завершен ввод в эксплуатацию системы газоснабжения и системы подавления радона;
- доставлены и протестированы все источники высоковольтного питания для трекового детектора, трековый детектор полностью введен в эксплуатацию;
- начат набор данных с укомплектованным детектором (калориметер+трекер), регулярно проводятся сеансы набора данных, включая калибровки с радиоактивными источниками; триггер и процедуры сбора данных готовы к длительным операциям сбора данных.

RUN 609 – TRIGGER 9

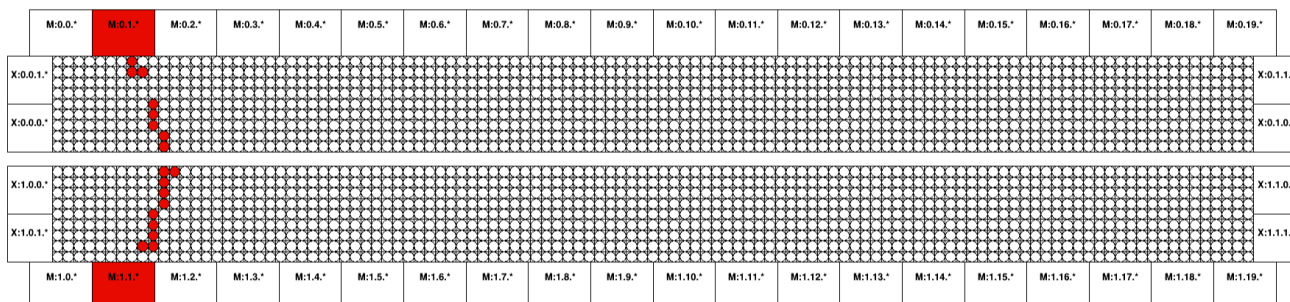


Рис 4. Первое событие – кандидат в события двойного бета распада ^{82}Se зарегистрированное в Демонстраторе SuperNEMO при совместном использовании трекового детектора и калориметра.

Существуют подробные планы для остальных этапов интеграции, включая установку антирадонного тента и пассивной защиты. Разработан детальный проект пассивной защиты демонстратора SuperNEMO.

Наряду с работой над аппаратурой проделана работа по программному обеспечению и моделированию, и, кроме того, участники сотрудничества продолжали работать над анализом данных NEMO-3. Начат физический анализ данных SuperNEMO, включая первое исследование уровня радона в детекторе с событиями BiPo , анализ данных с сигналом от системы лазерной инъекции, анализ калибровочных данных с радиоактивным источником ^{207}Bi .

Программа анализа данных за первые 2,5 года работы демонстратора SuperNEMO выглядит следующим образом:

- в поиске безнейтринного двойного бета-распада ^{82}Se , где, благодаря уникальной треко-калориметрической технологии, рассчитывается установить новые конкурентные физические ограничения на нарушение лептонного числа, включая распады на возбужденные состояния;
- подробные исследования $2\nu\beta\beta$ распада ^{82}Se могут дать ценную информацию для развития ядерных моделей двойного бета-распада, особенно в контексте критического вопроса о подавлении аксиально-векторной константы связи g_A (входящей в четвертой степени в выражение для скорости распада как $2\nu\beta\beta$, так и $0\nu\beta\beta$). Недавние теоретические исследования продемонстрировали возможность определения эффективной величины g_A из формы спектров индивидуальной энергии $2\nu\beta\beta$ -электронов и, возможно, их угловой корреляции, доступные к измерению исключительно только с применением методики NEMO. С этой точки зрения новое исследование $2\nu\beta\beta$ -распада ^{82}Se и ^{96}Zr будет произведено с использованием данных демонстратора SuperNEMO и также будет продолжено в SuperNEMO, особенно предпочтительным для этого исследования является ^{82}Se ; демонстрация возможности расширения треко-калориметрического подхода для эксперимента большего масштаба, особенно в случае обнаружения сигнала $0\nu\beta\beta$ в ближайшие годы.

MONUMENT - Измерение обычного мюонного захвата для проверки ядерных матричных элементов 2β -распадов.

Первые два квартала 2022 года совместно с немецкими (Технический Университет Мюнхена, TUM) и швейцарскими коллегами (Институт Пауля Шеррера, PSI) были посвящены подготовке к проведению второго этапа проекта MONUMENT. На базе ОИЯИ модернизирована система мюонного триггера с мишенью и проведены тестирования в TUM (Рис. 5). Совместно с коллегами из TUM и UZH (Университет Цюриха) в течение 2022 года продолжался анализ данных с 2021 года. Полученные результаты представлены в Таблице 2 и готовятся к публикации. В сентябре-октябре 2022 г осуществлены измерения обычного мюонного захвата (ОМЗ) в обогащенном изотопе ^{100}Mo на мезонной фабрике в PSI. Измерение этого изотопа связано с изучением роли нейтрино в образовании сверхновых звёзд и синтеза в них тяжёлых изотопов. Статус и результаты проекта были представлены на международной конференции -- Physics of fundamental Symmetries and Interactions – PSI'2022 (16-21 октября 2022, PSI, Швейцария). На данный момент начат анализ полученных данных с мишенью ^{100}Mo . Следующий этап измерений планируется на сентябрь 2023 года с изотопически обогащенными мишенями ^{96}Mo , ^{56}Fe и ^{24}Mg .

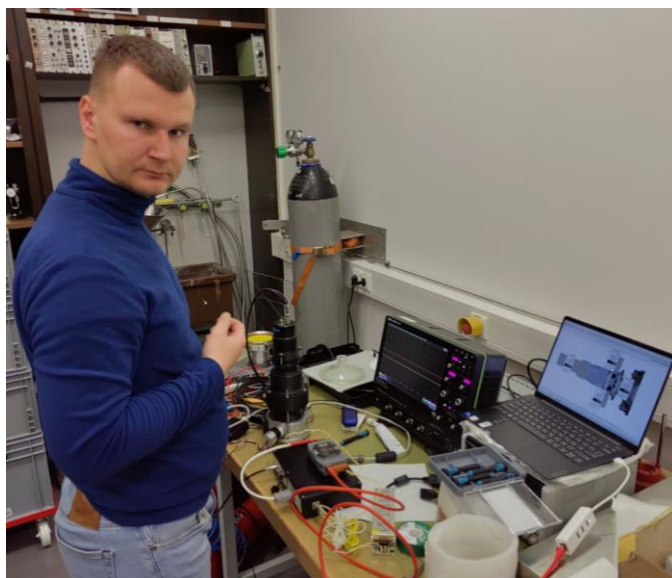


Рис. 5: Мюонный триггер и проведение тестирований в TUM.

Таблица 2. Среднее время жизни мюона в изотопически обогащенных ^{136}Ba и ^{76}Se .

Изотоп (% обогащения)	$\tau \pm \Delta\tau_{\text{stat}} \pm \Delta\tau_{\text{sys}}$ (нс)
^{136}Ba (95.67%)	$85.09 \pm 0.64 \pm 0.61$
^{76}Se (99.7%)	$136.30 \pm 0.07 \pm 0.76$

EDELWEISS – эксперимент первоначально направленный на поиск WIMP из галактического гало с массами $O(100 \text{ ГэВ}/c^2)$ в последние годы претерпел значительные изменения оптимизации детекторов по исследованию региона WIMP малых масс. Этот регион, может быть, в дальнейшем тщательно прощупан благодаря энергетическому разрешению выше 20 эВ, полученному в новейшей генерации HPGe детекторов-болометров EDELWEISS.

Научная программа EDELWEISS – это эксперимент, направленный на поиск WIMP ТМ с HPGe детекторами-болометрами. Эти детекторы работают при $\sim 20 \text{ мК}$ для одновременного измерения фоновых и ионизационных сигналов. Сравнение двух сигналов позволяет проводить высокоэффективный отбор событий ядер отдачи (WIMP, нейтроны) и электронными отдачами. В последние 25 лет EDELWEISS является лидирующим экспериментом по прямому поиску частиц ТМ с германиевыми детекторами. В настоящее время интерес к поиску легких WIMP (массы ниже $10 \text{ ГэВ}/c^2$) значительно возрос. Существуют реалистичные модели ранней Вселенной, предсказывающие $m_w \sim 5 \text{ ГэВ}/c^2$, проверка которых является важной для современной физики. Криогенные болометры EDELWEISS с хорошим энергетическим разрешением являются естественным выбором для исследования WIMP малой массы.

Общей целью экспериментов по прямому поиску темной материи есть понижение энергетического порога, т.к. ожидаемый экспериментальный спектр представляется спадающей экспонентой. Это является обязательным условием поиска WIMP малой массы, для которых максимальные наблюдаемые энергии могут быть в районе кэВ и ниже. В EDELWEISS значительный прогресс получен после применения внутреннего усиления, связанного с эффектом Трофимова-Неганова-Люка. Последние результаты EDELWEISS связаны с тем, что удалось создать детекторы-болометры, позволяющие детектировать ядра отдачи с энергиями от $\sim 20 \text{ эВ}$ (что является рекордным показателем). Таких параметров удалось достичь благодаря:

- внутреннему усилению сигнала, используя эффект Трофимова-Неганова-Люка;
- использованию транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT);
- специальной системе подвеса детекторов в оправке, приводящей к уменьшению влияния вибраций криостата на детекторы при работающих криокулерах.

В измерениях, осуществляемых в подземной лаборатории LSM, в последней фазе эксперимента были применены 11 различных HPGe детекторов. Необходимо отметить, что одновременно криостат и установка EDELWEISS использовались для проведения научной программы эксперимента CUPID-Mo, направленного на поиск $0\nu 2\beta$ распада (по результатам этой программы опубликованы важные результаты, включающие лучшие ограничения на безнейтринный двойной бета распада ^{100}Mo и уточненные данные по двойному бета распаду этого изотопа на возбужденные состояния). Детекторы EDELWEISS имели разные массы в 32 г, 200 г и 800 г. Было проведено сравнения разных технологий термисторов: NTD и NbSi-TES. Технология TES, являющаяся новой для EDELWEISS, показала многообещающие результаты (Рис. 6). Чувствительность к единичным электронным событиям была получена для детекторов существенно разной массы 33 г. и 200 г.

В ходе выполнения эксперимента благодаря использованию внутреннего усиления сигналов из-за эффекта Трофимова-Неганова-Люка было достигнуто уникальное разрешение в 0,53 электрон-дырочной пары (RMS). Имея такое разрешение, в эксперименте удалось впервые получить экспериментальные ограничения на рассеяния на электронах частиц ТМ с массами ниже $\text{МэВ}/c^2$, и на темновые фотоны до $1 \text{ эВ}/c^2$ [Phys. Rev. Lett. 125, 141301] (Рис. 7). Эти результаты продемонстрировали высокую научную значимость поиска сигналов $\sim \text{эВ}$ диапазона энергий от частиц ТМ в Ge детекторах-болометрах.

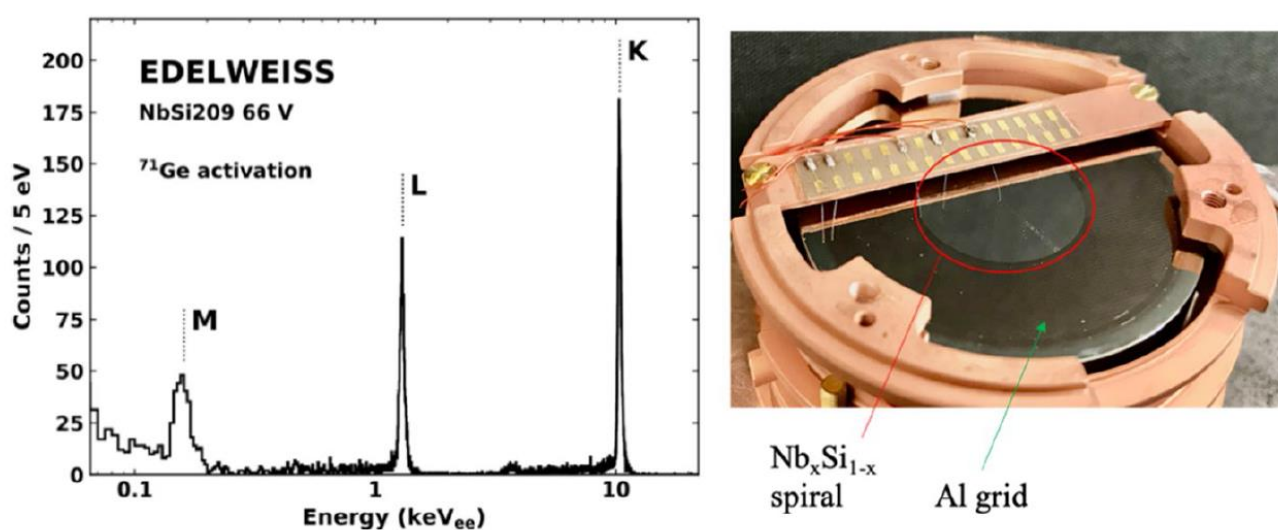


Рис 6. Слева: калибровочный спектр $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ Ge болометра массой 200 гр., полученный с применением активации нейтронами ^{71}Ge . Напряжение на электродах 66 В для использования усиления Трофимова-Неганова-Люка. Справа: верхняя поверхность детектора с TES пленкой (2% поверхности имеет Al электроды). Нижняя часть Ge полностью покрыта Al электродами.

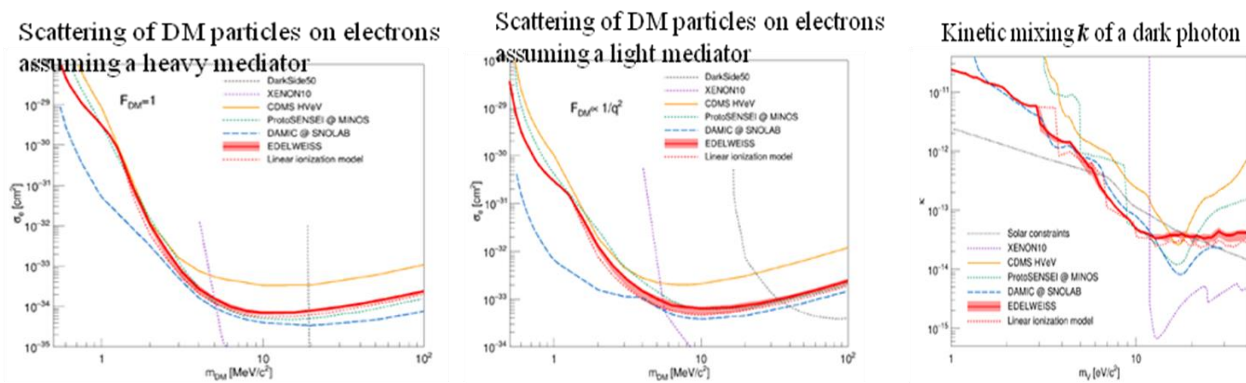


Рис. 7: 90% доверительный интервал на сечение рассеяния частиц темной материи на электронах для разных сценариев взаимодействия между темной материей и веществом. Результаты EDELWEISS 2020 года показаны красной линией. Для детальной информации смотрите [Phys. Rev. Lett. 125, 141301].

2.3. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).

- 1) Agostini, M et al. "Pulse shape analysis in Gerda Phase II." *European Physical Journal C* 82.4, 2022, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10163-w>
- 2) Armengaud, E et al. "Search for sub-GeV dark matter via the Migdal effect with an EDELWEISS germanium detector with NbSi transition-edge sensors." *Physical Review D* 106.6, 2022, ISSN 2470-0010, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.062004>
- 3) Agostini, M et al. "Search for exotic physics in double- β decays with GERDA Phase II." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2022.12, 2022, ISSN 1475-7516, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2022/12/012>
- 4) Marnieros, S et al. "High Impedance TES Bolometers for EDELWEISS." *Journal of Low Temperature Physics*, 2022, ISSN 0022-2291, <https://doi.org/10.1007/s10909-022-02899-2>
- 5) Augier, C et al. "Final results on the $0\nu\beta\beta$ decay half-life limit of ^{100}Mo from the CUPID-Mo experiment." *European Physical Journal C* 82.11, 2022, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10942-5>
- 6) Mirzayev, N.A et al. "High-purity ammonium acetate solution for low-background electronics." *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 331.12, 2022, pp. 5539-5545., ISSN 0236-5731, <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08608-3>
- 7) Agostini, M et al. "Erratum: First Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Particles with Masses up to 1 MeV / c^2 with GERDA (Physical Review Letters (2020) 125 (011801) DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.011801)." *Physical Review Letters* 129.8, 2022, ISSN 0031-9007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.129.089901>
- 8) Rukhadze, N.I et al. *Journal of Physics: Conference Series* 2156.1, 2022, ISSN 1742-6588, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2156/1/012134>
- 9) Armengaud, E et al. "New Limit for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo from the CUPID-Mo Experiment." *Physical Review Letters* 126.18, 2021, ISSN 0031-9007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.181802>
- 10) Huang, R et al. "Pulse shape discrimination in CUPID-Mo using principal component analysis." *Journal of Instrumentation* 16.3, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/03/P03032>

- 11) Agostini, M et al. "Characterization of inverted coaxial ^{76}Ge detectors in GERDA for future double- β decay experiments." *European Physical Journal C* 81.6, 2021, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09184-8>
- 12) Agostini, M et al. "Calibration of the Gerda experiment." *European Physical Journal C* 81.8, 2021, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09403-2>
- 13) 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>
- 14) 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>
- 15) Arnold, R et al. "Search for periodic modulations of the rate of double- β decay of Mo 100 in the NEMO-3 detector." *Physical Review C* 104.6, 2021, ISSN 2469-9985, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.L061601>
- 16) Arnold, R et al. "Measurement of the distribution of ^{207}Bi depositions on calibration sources for SuperNEMO." *Journal of Instrumentation* 16.7, 2021, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/T07012>
- 17) Agostini, M et al. "Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay." *Physical Review Letters* 125.25, 2020, ISSN 0031-9007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.252502>
- 18) Arnaud, Q et al. "First Germanium-Based Constraints on Sub-MeV Dark Matter with the EDELWEISS Experiment." *Physical Review Letters* 125.14, 2020, ISSN 0031-9007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.141301>
- 19) Armengaud, E et al. "The CUPID-Mo experiment for neutrinoless double-beta decay: performance and prospects." *European Physical Journal C* 80.1, 2020, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7578-6>
- 20) Armengaud, E et al. "Precise measurement of $2\nu\beta\beta$ decay of ^{100}Mo with the CUPID-Mo detection technology." *European Physical Journal C* 80.7, 2020, ISSN 1434-6044, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8203-4>
- 21) Agostini, M et al. "First Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Particles with Masses up to 1 MeV/c 2 with GERDA." *Physical Review Letters* 125.1, 2020, ISSN 0031-9007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.011801>
- 22) Agostini, M et al. "Modeling of GERDA Phase II data." *Journal of High Energy Physics* 2020.3, 2020, ISSN 1126-6708, [https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2020\)139](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2020)139)
- 23) Barabash, A.S et al. *Nuclear Physics A* 996, 2020, ISSN 0375-9474, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121697>
- 24) Arnold, R et al. "Search for the double-beta decay of ^{82}Se to the excited states of ^{82}Kr with NEMO-3." *Nuclear Physics A* 996, 2020, ISSN 0375-9474, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121701>
- 25) Rakhimov, A.V et al. "Development of methods for the preparation of radiopure ^{82}Se sources for the SuperNEMO neutrinoless double-beta decay experiment." *Radiochimica Acta* 108.2, 2020, pp. 87-97., ISSN 0033-8230, <https://doi.org/10.1515/ract-2019-3129>
- 26) Belov, V.V et al. "Construction of the Gaseous and Solid-State Targets for the Muon Capture Measuring System in ^{130}Xe , ^{82}Kr , and ^{24}Mg ." *Physics of Particles and Nuclei Letters* 17.6, 2020, pp. 848-855., ISSN 1547-4771, <https://doi.org/10.1134/S1547477120060047>
- 27) Mirzayev, N.A et al. "Low radioactive ^4Cl flux." *Journal of Instrumentation* 15.5, 2020, ISSN 1748-0221, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/T05004>
- 28) Agostini, M et al. "Searching for neutrinoless double beta decay with GERDA." *Journal of Physics: Conference Series* 1342.1, 2020, ISSN 1742-6588, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012005>

- 29) Rukhadze, E et al. "Investigation of double beta decay of ^{58}Ni at the Modane Underground Laboratory." *Journal of Physics: Conference Series* 1342.1, 2020, ISSN 1742-6588, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1342/1/012041>
- 30) Rukhadze, N.I et al. "Searching for the βEC and EC/EC Decays of ^{74}Se ." *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 84.8, 2020, pp. 974-978., ISSN 1062-8738, <https://doi.org/10.3103/S1062873820080250>

2.4. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта

Эксперимент **LEGEND-200** уже реализуется. Проект **LEGEND-1000** находится на стадии CDR.

Планируемая модернизация спектрометра **TGV** может не дать существенного улучшения энергетического разрешения детекторов и подавления фона. С приобретением обогащенного ^{130}Ba станет возможным получение результатов запланированного исследования.

Эксперимент **SuperNEMO** находится на начальной стадии набора данных. Демонстратор SuperNEMO (первый модуль SuperNEMO) введен в эксплуатацию в конфигурации без пассивной защиты. Он установлен в низкофоновой подземной лаборатории LSM, Франция. Проводятся энергетическая и временная калибровки. В ближайшее время пассивная защита и анти-радоновый тент будут установлены и начнутся полномасштабные измерения.

Эксперимент **MONUMENT** уже реализуется. Каждый год осенью проводятся измерения мюонного захвата с различными мишенями на мезонной фабрике в PSI. После сеанса в течение года идет модернизация системы и непрерывный анализ данных.

EDELWEISS одновременно находится как на стадии выполнения (набора данных), так и на CDR для следующей фазы. Старая установка начинает выводиться из эксплуатации, новые прямые поиски частиц ТМ и НИОКР будут выполняться в криостате установки BINGO, новая установка EDELWEISS находится на фазе предварительного рассмотрения (концептуального дизайна).

2.5. Результаты сопутствующей деятельности

2.5.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

TGV: E.Rukhadze, IEAP, STU Prague, диссертация к.ф.-м.н.

SuperNEMO: Немченко И.Б. диссертация д.ф.-м.н.
Рахимов А.В. диссертация к.ф.-м.н.

EDELWEISS: Якушев Е.А. диссертация д.ф.-м.н.

2.5.2. Награды и премии.

Премия ОИЯИ за 2020 год в области научно-исследовательских экспериментальных работ за цикл публикаций «Бесфоновый поиск безнейтринного двойного бета распада Ge-76 в эксперименте GERDA».