

Краткое описание проекта на русском языке

EDELWEISS/Ricochet

Объединенный проект прямого поиска темной материи и прецизионного исследования CEvNS с новыми криогенными детекторами

Участники от ОИЯИ: В.В. Белов, В.Б. Бруданин, Ю.А. Ваганов, В.П. Вольных, Ю.Б. Гуров, С.А. Евсеев, В.А. Евсенкин, А.Х. Иноятов, Б.Е. Калинова, Д.В. Караиванов, С.В. Казарцев, А.В. Лубашевский, Н.А. Мирзаев, Л.Л. Перевошиков, Д.В. Пономарев, А.В. Рахимов, И.Е. Розова, С.В. Розов, А.В. Саламатин, Н. Темербулатова, В.Н. Трофимов, Д.В. Философов, Ж.Х. Хушвактов, К.В. Шахов и Е.А. Якушев

Введение

Новые детекторы-болометры, разработанные в международном эксперименте по поиску темной материи EDELWEISS, обладают уникальными свойствами по регистрации низкоэнергетических ядер отдачи. Ожидается, что влияние Новой физики будет приводить к спектральным искажениям в области энергий ядер отдачи, индуцированных когерентным рассеянием нейтрино, ниже 100 эВ. В настоящее время только детекторы-болометры имеют возможность исследовать данную область энергий с прецизионной точностью. Предлагается расширить использование детекторов, разработанных EDELWEISS, на исследования CEvNS (coherent elastic neutrino-nucleus scattering) в области полной когерентности (реакторные антинейтрино). Эта часть проекта получила название Ricochet. Детекторы в предлагающейся новой ветви эксперимента, которые будут иметь порог регистрации от 50 эВ, позволят исследовать с прецизионной точностью фундаментальные свойства нейтрино. Новейшие детекторы будут продолжать использоваться в EDELWEISS, для прямого поиска частиц темной материи из галактического гало.

В проекте для поиска темной материи и исследования CEvNS основными детекторами будут HPGe детекторы при температуре ниже 20 мК, с одновременным измерением ионизационных и фоновых сигналов, что позволит проводить высокоэффективный отбор фоновых событий. Эксперимент EDELWEISS экспериментально продемонстрировал, что основной фон для исследования ядерных отдач с ионизационно-фонными детекторами возникает из-за событий с неполным сбором заряда вблизи поверхности детекторов. Для решения данной проблемы в EDELWEISS были разработаны инновационные детекторы с системой кольцевых электродов для активного отбора событий на глубине меньшей 1 мм от поверхности. Удалось продемонстрировать, что данные детекторы на порядок лучше подавляют фон, по сравнению с конкурирующими технологиями.

EDELWEISS и полученные результаты в текущей фазе проекта

Эксперимент EDELWEISS проводится при активном участии ОИЯИ (Дубна) с 2005 года. Основной целью эксперимента является прямой поиск слабовзаимодействующих частиц темной материи (WIMP) из галактического гало нашей галактики Млечный путь по их

рассеянию в HPGe детекторах-болометрах. Благодаря высокому энергетическому разрешению и низкому порогу регистрации, детекторы-болометры позволяют проводить поиски легких WIMP и аксионо-подобных 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 осуществляется в глубокой (~4700 метров водного эквивалента) подземной лаборатории LSM (Франция) для подавления космогенной составляющей фона и использует специальные детекторы: HPGe болометры (рис. 1 и 2), 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).



Рис. 1: HPGe детекторы-болометры, разработанные EDELWEISS для прямого поиска частиц темной материи.



Рис. 2: HPGe детекторы во время установки в криостат EDELWEISS.

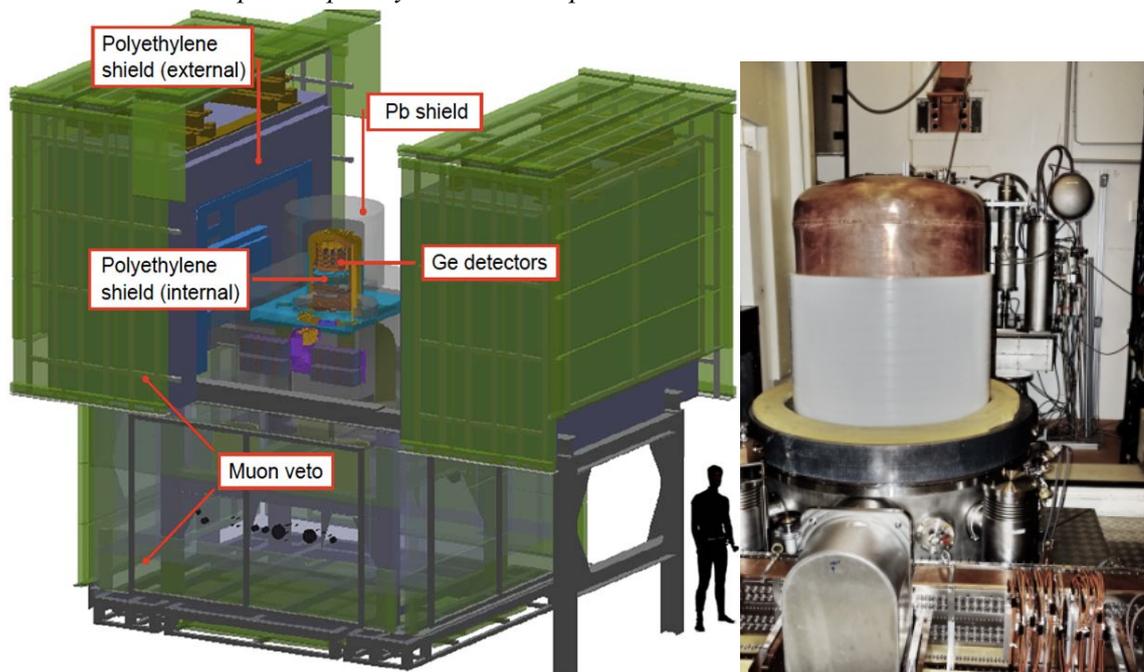


Рис. 3: Схема установки EDELWEISS и фотография криостата.

Центральной частью и основой эксперимента EDELWEISS (рис. 3) является низкофоновый криостат растворения ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ с HPGe детекторами-болометрами. Защита EDELWEISS окружает детекторы со всех сторон и состоит из 20 см свинца (36 тонн, включая внутреннюю часть защиты из археологического свинца), 50 см полиэтилена для защиты от нейтронов (30 тонн) и активной μ -вето системы. В пространство возле криостата непрерывно поставляется очищенный от радона воздух. Криостат с защитой установлен внутри чистой комнаты. Все конструкционные материалы, используемые в EDELWEISS, были отобраны в зависимости от уровня их радиоактивного загрязнения.

На рис. 4 и 5 представлены калибровочные спектры EDELWEISS, демонстрирующие возможности эксперимента по подавлению фоновых событий.

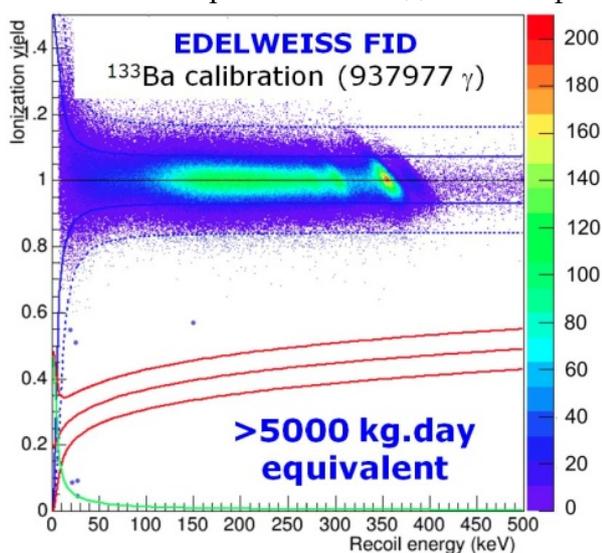


Рис. 4: Калибровка EDELWEISS с радиоактивным источником Ba-133. Область поиска частиц темной материи (ядра отдачи) выделена красными линиями. Все 939977 событий от источника (γ кванты) были успешно идентифицированы по отношению ионизация/фонный сигнал.

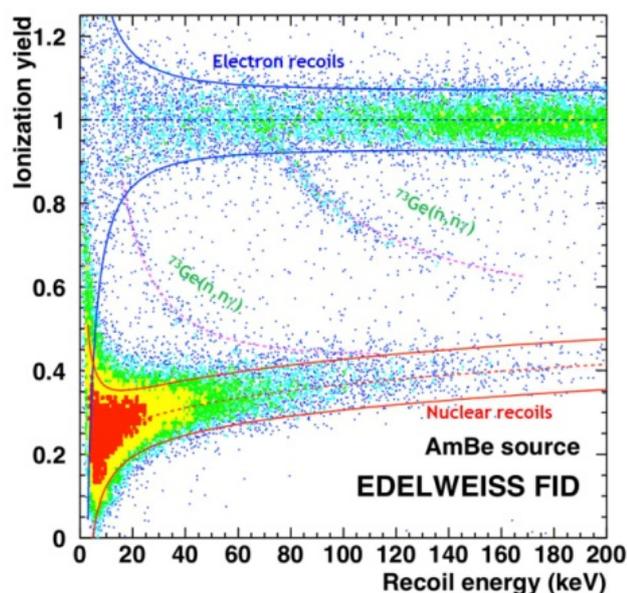


Рис. 5: Калибровка EDELWEISS с нейтронным источником.

В эксперименте EDELWEISS получен целый ряд результатов мирового уровня. Основными результатами являются ограничения на сечения взаимодействия частиц темной материи с обычным веществом. Результаты опубликованы в престижных научных изданиях и ряд из них имеет индекс цитирования превышающий 100. Например, статья: E. Armengaud et al. “Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes”, опубликованная в Phys.Lett. B702 (2011), pp. 329–335, процитирована более 300 раз.

В настоящее время основные новые результаты эксперимента связаны с разработкой новых низкопороговых детекторов. В 2018-2020 годах удалось создать детекторы-болометры, позволяющие детектировать ядра отдачи с энергиями от ~20 эВ (что является рекордным показателем). Таких параметров удалось достичь благодаря: 1) внутреннему усилению сигнала, используя эффект Трофимова-Неганова-Люка [1,2]; 2) использованию транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT); 3) специальной системе подвеса детекторов в оправке, приводящей к уменьшению влияния вибраций криостата на детекторы при работающих криокулерах. В настоящее время новые детекторы тестируются в подземной лаборатории LSM.

К настоящему времени детекторы прошли две фазы тестирования: на поверхности и в подземной лаборатории. Результаты, полученные в ходе тестовых измерений на поверхности в 2018-2019 годах, представляют самостоятельный интерес для поиска частиц темной материи, из-за уникально низкого энергетического порога. Результаты опубликованы в [3]. Как видно из рис. 6, для процессов с низкими энергиями получены наилучшие ограничения в мире (на момент публикации).

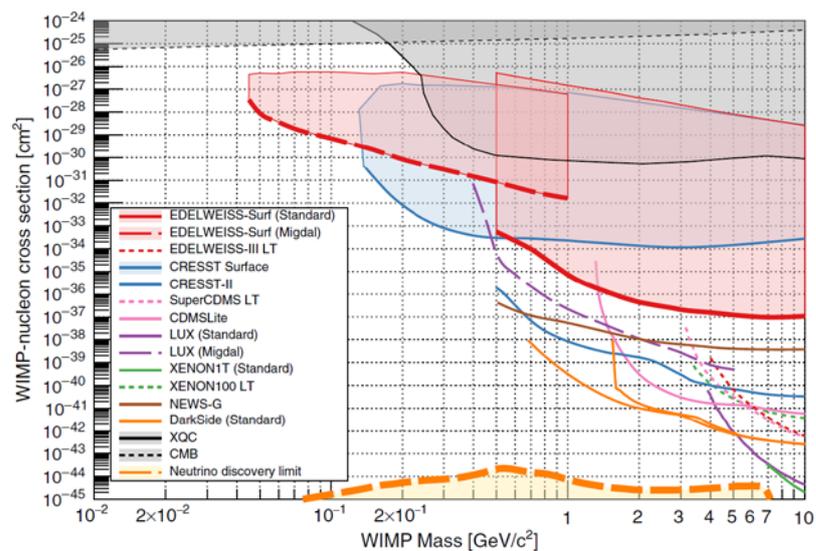


Рис. 6: Результаты по поиску WIMP, полученные с детекторами-болометрами, являющимися прототипами детекторов для следующей фазы эксперимента EDELWEISS и Ricochet [3].

В ходе набора данных новые детекторы продемонстрировали уникальные свойства, касающиеся энергетического разрешения (рис. 7) и порога регистрации (рис. 8).

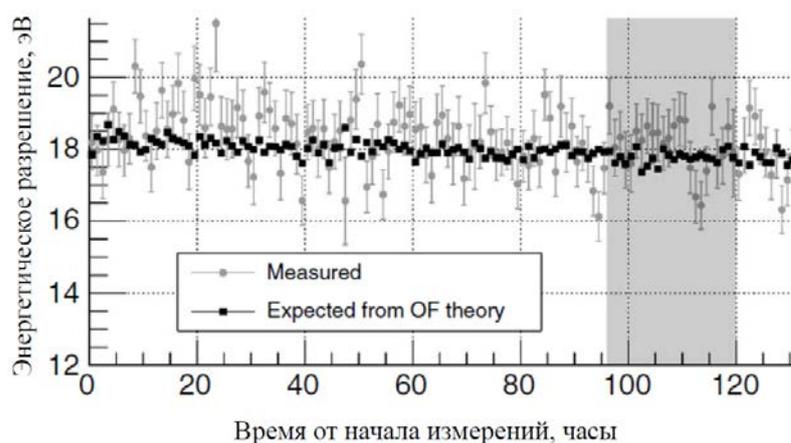


Рис. 7: Энергетическое разрешение вблизи порога для тестового болометра EDELWEISS / Ricochet.

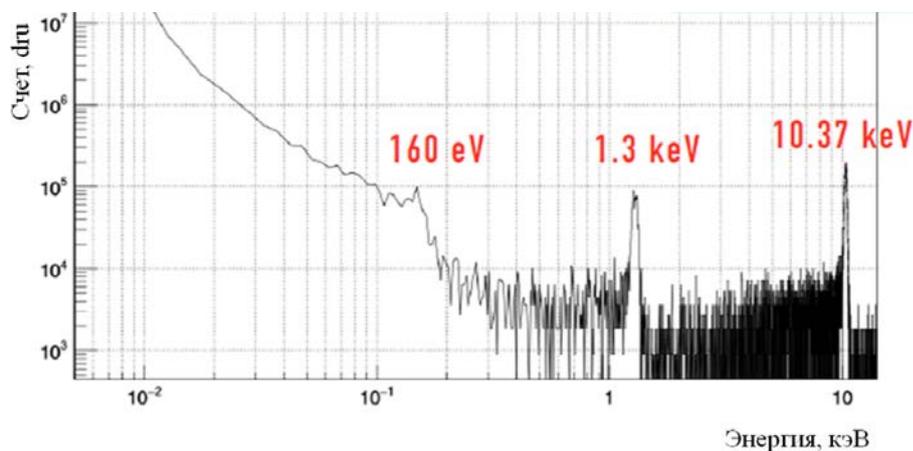


Рис. 8: Спектр линий, индуцированных космическим излучением в германии, демонстрирующий возможность проведения измерений со сверхнизкими порогами регистрации.

В фазе тестирования, осуществляемой в глубокой подземной лаборатории LSM, в настоящее время используется 11 разных Ge детекторов. Детекторы имеют разные массы в 32, 200 и 800 г. Проводятся сравнения разных технологий термисторов: NTD и NbSi-TES (Рис. 9).

К настоящему времени EDELWEISS смог достичь разрешения в 0,53 электрон-дырочных пар с использованием усиления Неганова-Трофимова-Люка. Из анализа накопленных данных в 2020 году были получены ограничения на взаимодействия сверхлегких частиц темной материи на электронах и на поглощение бозонной темной материи (Рис. 10). Новые ограничения существенно улучшают предыдущие результаты. Важнейшей текущей задачей является изучение низкоэнергетического фона в германиевых детекторах, работающих с большим внутренним усилением фоновый сигнал при использовании эффекта Неганова-Трофимова-Люка.

Задачами на 2020-2021 гг является создание по крайней мере 1 кг EDELWEISS/Ricochet детекторов с энергетическими разрешениями в 10 эВ для фоновый канал измерений и 20 эВ_{ee} для ионизационного канала.

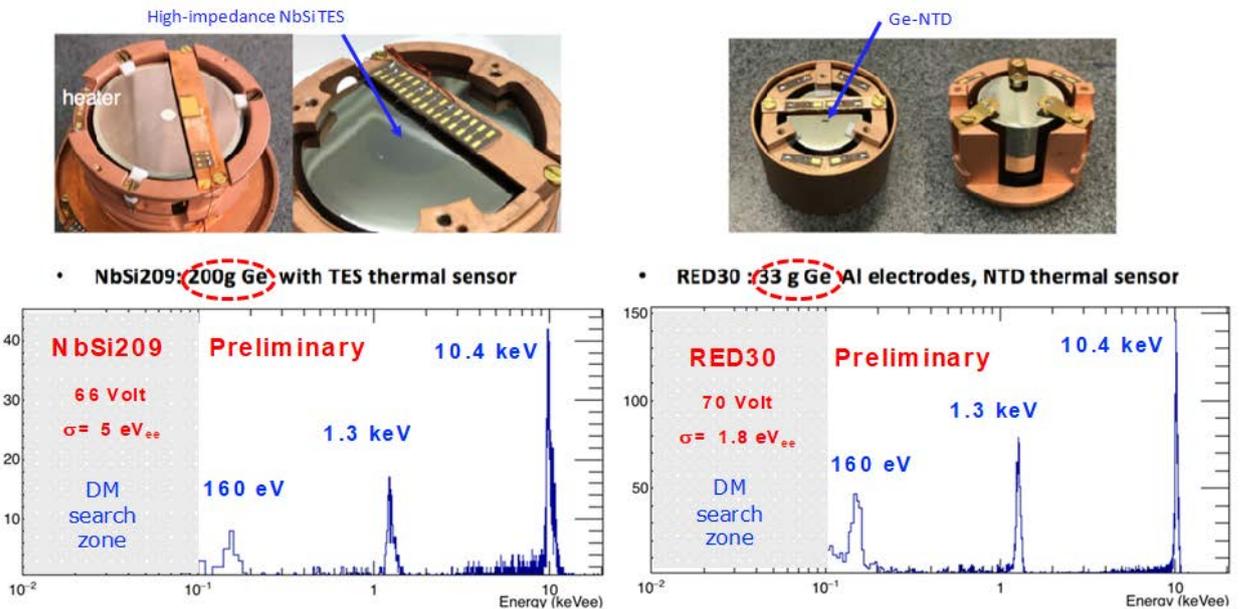


Рис. 9: Два разных типа детекторов, используемых EDELWEISS, и их калибровочные спектры.

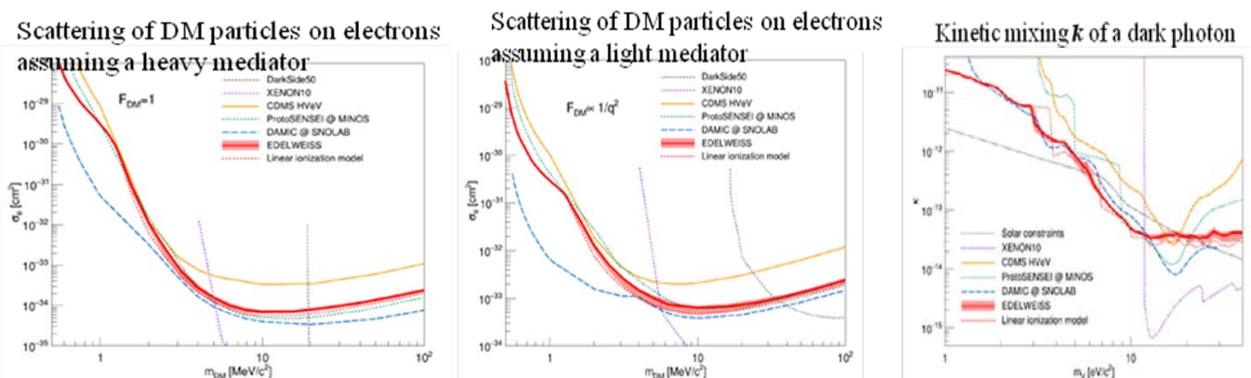


Рис. 10: 90% доверительный интервал на сечение рассеяния частиц темной материи на электронах для разных сценариев взаимодействия между темной материи и веществом. Результаты EDELWEISS 2020 года показаны красной линией. Для детальной информации смотри [4].

В дальнейшем задачей EDELWEISS будет являться достижение чувствительности на уровне нейтринного сигнала (когерентное рассеяние ^8B солнечных нейтрино). Рис. 11 показывает ожидаемую чувствительность для статистики в 50000 кг.суток и разрешениях не хуже 100 эВ. Сплошные линии на рис. 11 соответствуют имеющемуся уровню фона. Тонкие прерывистые линии соответствуют чувствительности при значительном улучшении всех фоновых условий.

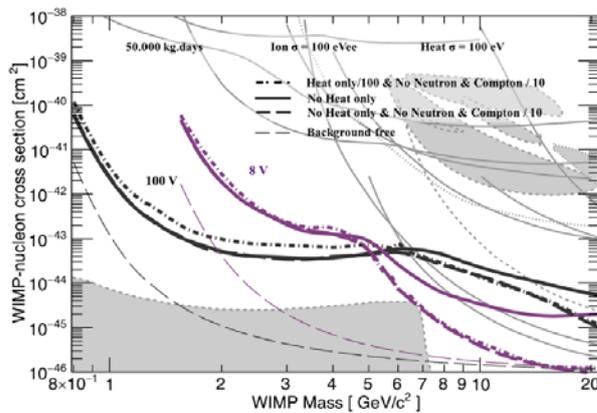


Рис. 11: Ожидаемая чувствительность EDELWEISS после набора 50000 кг.суток данных в значительно улучшенных фоновых условиях.

Публикации EDELWEISS за последние 5 лет:

- NA Mirzayev et al, Low radioactive NH_4Cl flux, Journal of Instrumentation 15 (05), T05004, 2020
- Q Arnaud et al (EDELWEISS collaboration), First germanium-based constraints on sub-MeV Dark Matter with the EDELWEISS experiment, arXiv:2003.01046, 2020
- DV Ponomarev et al, Measuring Low Neutron Fluxes at the Modane Underground Laboratory Using Iodine-Containing Scintillators, Instruments and Experimental Techniques 62 (3), 309-311, 2019
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration), Searching for low-mass dark matter particles with a massive Ge bolometer operated above ground, Physical Review D 99 (8), 082003, 2019
- PS Fedotov, NN Fedyunina, DV Filosofov, EA Yakushev, G Warot, A novel combined countercurrent chromatography–inductively coupled plasma mass spectrometry method for the determination of ultra trace uranium and thorium in Roman lead, Talanta 192, 395-399, 2019
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration), Searches for electron interactions induced by new physics in the EDELWEISS-III germanium bolometers, Physical Review D 98 (8), 082004, 2018
- Q Arnaud, et al (EDELWEISS collaboration) Optimizing EDELWEISS detectors for low-mass WIMP searches, Physical Review D 97 (2), 022003, 2018
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration), Measurement of the cosmogenic activation of germanium detectors in EDELWEISS-III, Astroparticle Physics, 91, 2017, 51-64
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Performance of the EDELWEISS-III experiment for direct dark matter searches, Journal of Instrumentation, 12, 08, P08010, 2017, arXiv preprint arXiv:1706.01070
- L Hehn, et al (EDELWEISS collaboration) Improved EDELWEISS-III sensitivity for low-mass WIMPs using a profile likelihood approach, 2016, The European Physical Journal C 76 (10), 548
- E Armengaud, et al (EDELWEISS collaboration) Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search, 2016, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2016 (05), 019
- AV Rakhimov, et al, Neutron activation analysis of polyethylene from neutron shield of EDELWEISS experiment, Radiochimica Acta 103 (9), 673-678, 2015

Ricochet

Данная часть проекта будет осуществляться расширенной международной коллаборацией. В настоящее время в коллаборации, кроме ОИЯИ, Дубна (Россия), участвуют: США: MIT, Northwestern University, The University of Wisconsin – Madison, Umass Amherst; Франция: CSNSM, IPNL, LPSC, L'institut NEEL, ILL. Первая рабочая встреча, посвященная созданию Ricochet, состоялась с 5 по 8 мая 2019 года.

Для исследования CEvNS будет создана установка, центральной частью которой будет являться массив детекторов-болометров массой в 1-1.3 кг, называемый крио-куб. На первом этапе измерений установка будет размещена в 8 метрах от 57,8 МВт исследовательского реактора в ILL (Гренобль, Франция). Рассматривается возможность проведения будущих измерений на энергетическом реакторе в России, где может быть получено значительно лучшее соотношение сигнал/фон.

Основной детектирующей частью будут являться HPGe болометры массой ~35 г, каждый. Вид одного из болометров в ходе проведения тестов показан на рис. 12. Кроме того предполагается использование Zn сверхпроводящих детекторов.

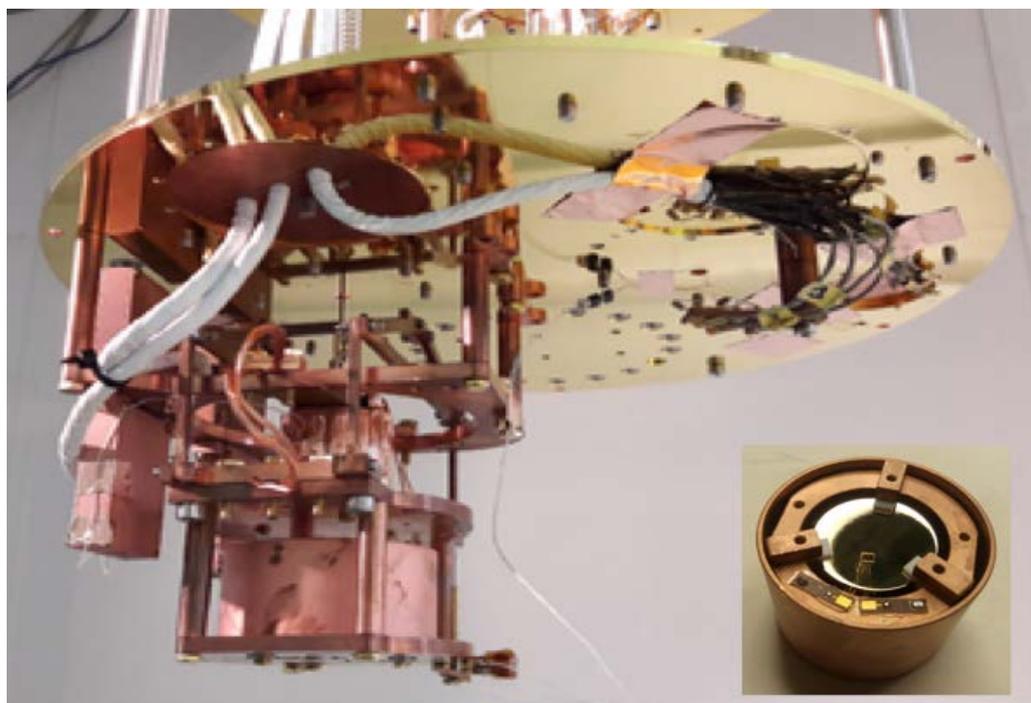


Рис. 12: Тестовый HPGe болометр EDELWEISS / Ricochet в ходе тестовых измерений.

Предполагается создать 27 детекторов общей массой порядка одного кг, которые будут компактно установлены в непрозрачную для инфракрасного излучения медную оболочку (крио-куб), размером всего $8 \times 8 \times 8$ см³ (рис. 13). Данная детекторная сборка будет помещаться внизу криостата растворения, рис. 14. Охлаждаемый первый усилительный каскад будет располагаться в непосредственной близости от детекторов.

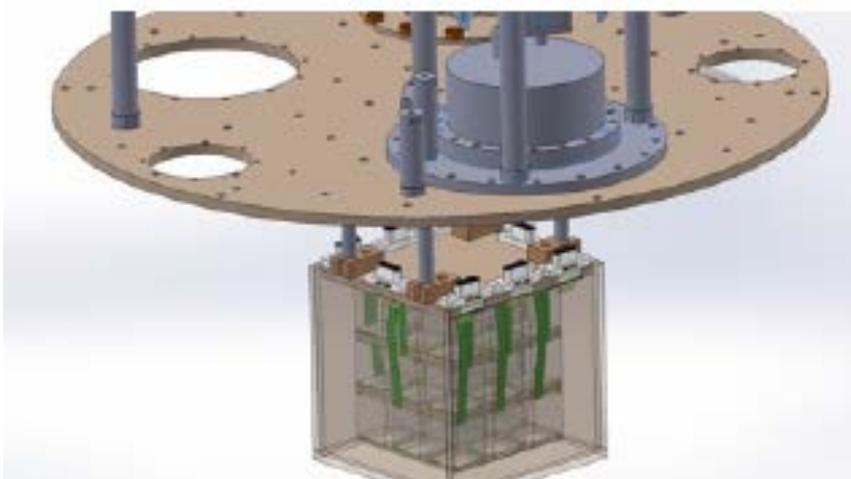


Рис. 13: Предполагаемая схема сборки 27 детекторов в крио-куб внутри криостата установки Ricochet.

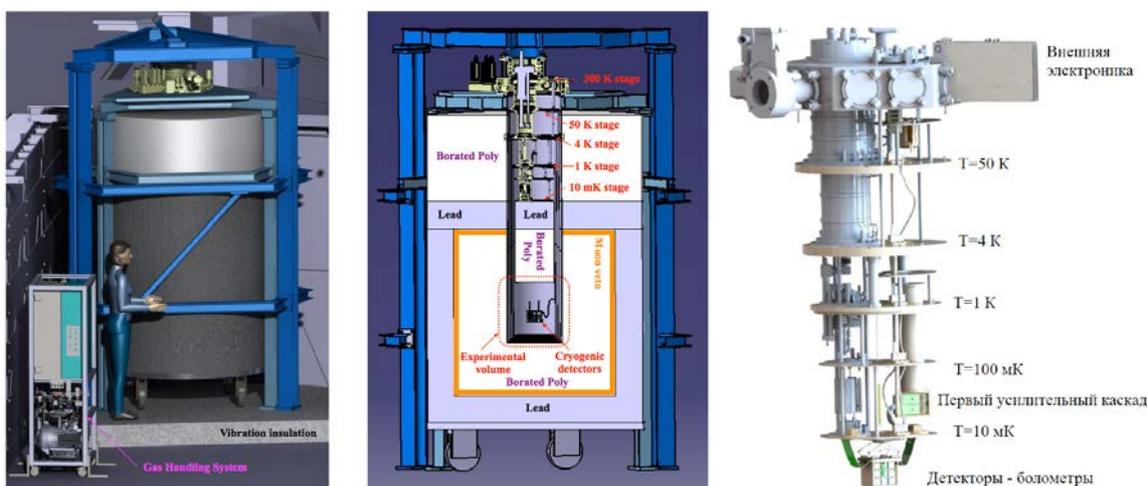


Рис. 14: Слева и в центре: предварительная схема эксперимента Ricochet. Криостат в центре подвешен на двойной раме. Подвижная раздвижная пассивная защита будет состоять из свинца и полиэтилена. Справа: иллюстрация интеграции детекторов Ricochet и электроники в криостат растворения.

Рабочая температура детекторов будет находиться на уровне 20 мК. Для этого крио-куб будет помещен в так называемый "сухой" криостат растворения ^3He - ^4He , работающий по замкнутому циклу, не требующему заливки гелия. Сам криостат будет располагаться на поддерживающей платформе, предварительный дизайн которой представлен на рис. 14, слева. Для защиты от естественной радиоактивности, криостат будет окружен слоями пассивной и активной защиты. Точный детальный технический дизайн всей установки будет разработан с учетом требований, предъявляемых в месте проведения измерений.

На рисунке 15 представлен вид тестового криостата, используемого в ИЯФ (Лион, Франция) для проведения R&D фазы эксперимента. Криостат Ricochet по размерам и форме не будет иметь значительных отличий от тестового, однако будет создан из специально отобранных чистых материалов, с учетом необходимости размещения крио-куба и первого усилительного каскада для 27 детекторов.



Рис. 15: Вид тестового криостата Ricochet в ИЯФ (Лион, Франция).

Ожидаемые результаты Ricochet

Для оценки ожидаемых энергетических спектров и возможностей по дискриминации фоновых событий нами были использованы данные, полученные в ходе тестовых измерений в установке EDELWEISS и тестовом криостате Ricochet в ИЯФ (Лион, Франция) и результаты модельных расчетов (рис. 16). Как видно из рисунка, ожидается существенная дискриминация по типу событий (события от нейтрино на рисунке – синие точки).

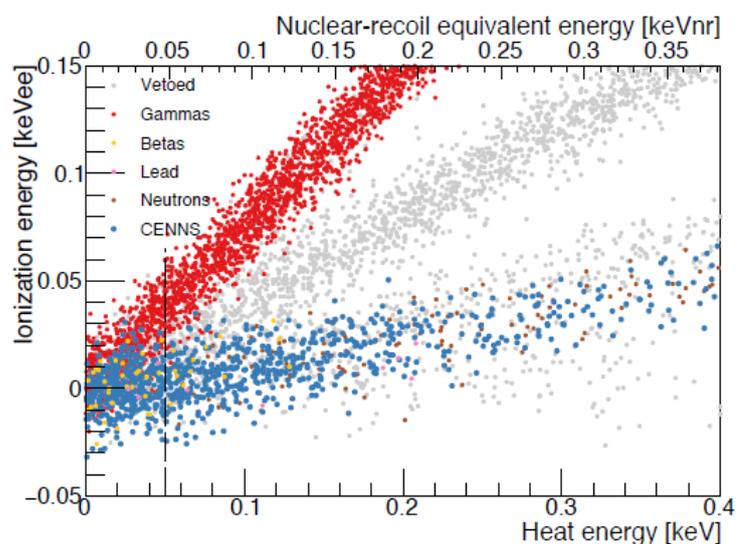


Рис. 16: Результаты моделирования спектра событий в шкале ионизационная – фононная энергия после набора 10000 нейтринных событий при уровне фона, соответствующего минимальной защите от космических лучей в 3 метра водного эквивалента. Энергетический порог в 50 эВ обозначен вертикальной линией.

Один из основных результатов, требуемых от экспериментов CEvNS, является **измерение угла Вайнберга** с процентной точностью. Данный угол, являющийся одним из

основных параметров теории электрослабого взаимодействия, может быть определен с высокой точностью, т.к. усиление когерентного сечения зависит от числа нейтронов (N) и протонов (Z) в ядре как $\sim (N - Z(1 - 4 \sin^2\theta_w))^2$. В настоящее время точность определения данного угла (рис. 17) не высока и имеются значительные разногласия между экспериментами. Как видно из вышеприведенной формулы, при значении квадрата синуса угла Вайнберга $\sim 0,25$ усиление когерентного рассеяния зависит только от числа нейтронов, однако отклонения от этого значения приводит к сильной зависимости и от Z^2 , на уровне 5-10% (в зависимости от изотопа) в числе отсчетов на каждое изменение в $\sin^2\theta_w$ на 0,01.

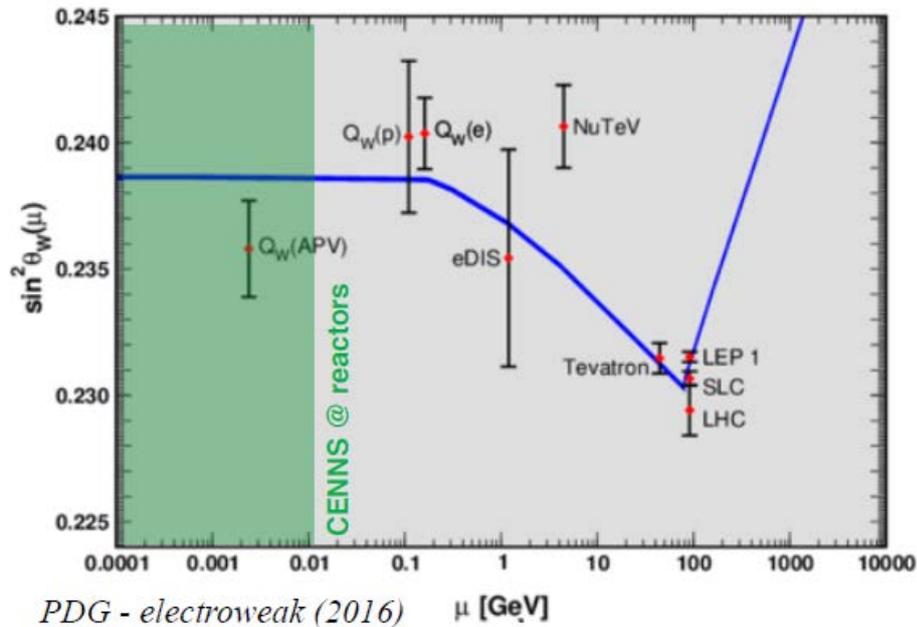


Рис. 17: Чувствительность $CE\nu NS$ к углу Вайнберга и предыдущие экспериментальные данные.

Определение фона для экспериментов по поиску частиц темной материи.

Как видно из рис. 18 чувствительность современных экспериментов по прямому поиску частиц темной материи находится вблизи от нейтринного фона, связанного с когерентным рассеянием. Ожидается, что в ближайшие 10 лет, с развитием детекторов темной материи, нейтринный фон станет неустранимым для большинства проводящихся экспериментов. Поэтому, для корректной интерпретации их результатов необходимо знание этого фона с как можно лучшей точностью, для чего необходимы независимые измерения $CE\nu NS$.

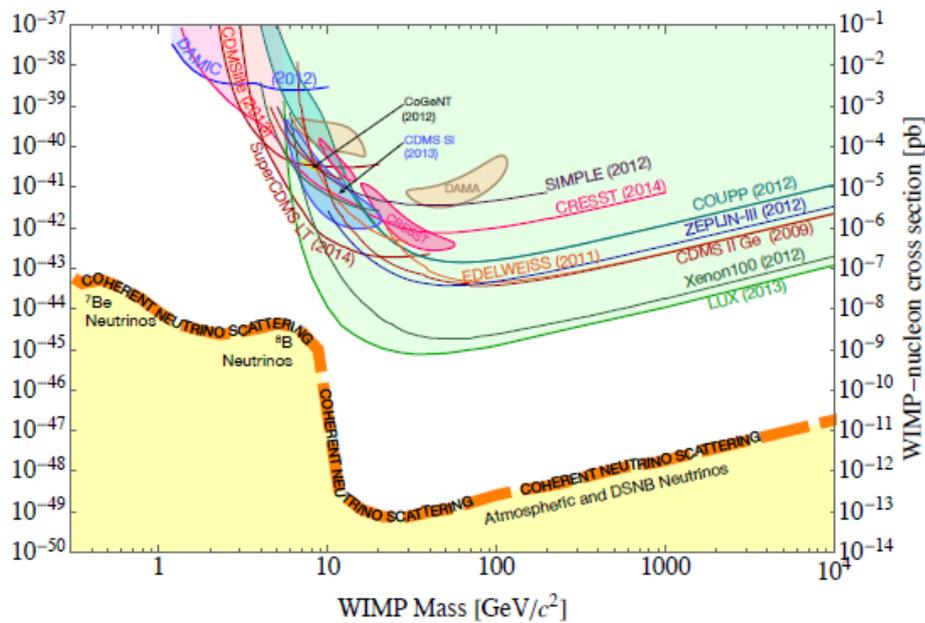


Рис. 18: Чувствительность современных экспериментов к сечению взаимодействия (в см^2) слабовзаимодействующих частиц темной материи WIMP с нуклоном в зависимости от массы WIMP. Желтым цветом закрашена область соответствующая фону от когерентного взаимодействия солнечных и атмосферных нейтрино [5].

Целый ряд результатов будет касаться Новой физики за пределами Стандартной модели.

Поиск нового переносчика взаимодействия: в Стандартной модели CEvNS описывается через обмен Z - бозоном. Некоторые расширения Стандартной модели предполагают существование дополнительного Z' бозона – переносчика векторного взаимодействия [7], который связывает нейтрино и кварки. В этом случае, вероятность CEvNS будет зависеть от массы такого бозона и его связи с нейтрино, что можно будет обнаружить в эксперименте. На рис. 19 (слева) представлен ожидаемый уровень чувствительности Ricochet. При проведении измерений с реактором ILL за один год измерений удастся улучшить современный уровень, достигнутый в эксперименте COHERENT [8], на два порядка. В отличие от других экспериментов (например, выполняемых на Большом адронном коллайдере [9, 10]) Ricochet обладает возможностью сканирования массы Z'.

Поиск нестандартных взаимодействий (NSI): Новая физика для нейтрино-нуклеонных взаимодействий возникает в некоторых теоретических сценариях вне Стандартной модели [11], что приводит к изменению в ожидаемом количестве событий CEvNS. На рис. 19 справа показано, что после 1 года набора данных Ricochet будет способен открыть или полностью исключить NSI для области низких энергий в электрослабом секторе. Такие данные являются основополагающими при интерпретации будущих нейтринных экспериментов на большой базе для определения иерархии нейтринных масс, например для эксперимента DUNE [12].

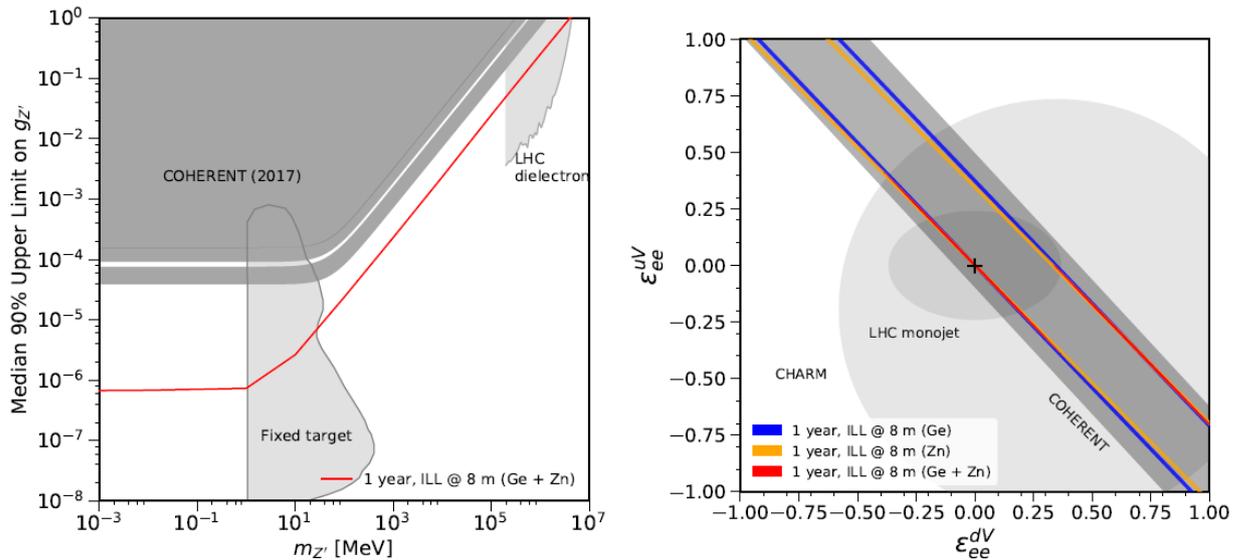


Рис. 19: Предполагаемая чувствительность Ricochet к Новой физике, рассчитанная для реактора ILL (8 м) при пороге регистрации 50 эВ, подавлении фона 10^3 . Слева: чувствительность к Z' бозону. Справа: ожидаемые ограничения на Нестандартные взаимодействия нейтрино-кварк. Также показаны существующие экспериментальные ограничения из LHC [13], CHARM [14] и COHERENT [8]. Крестик соответствует ожиданиям Стандартной модели. Рисунок адаптирован из [15].

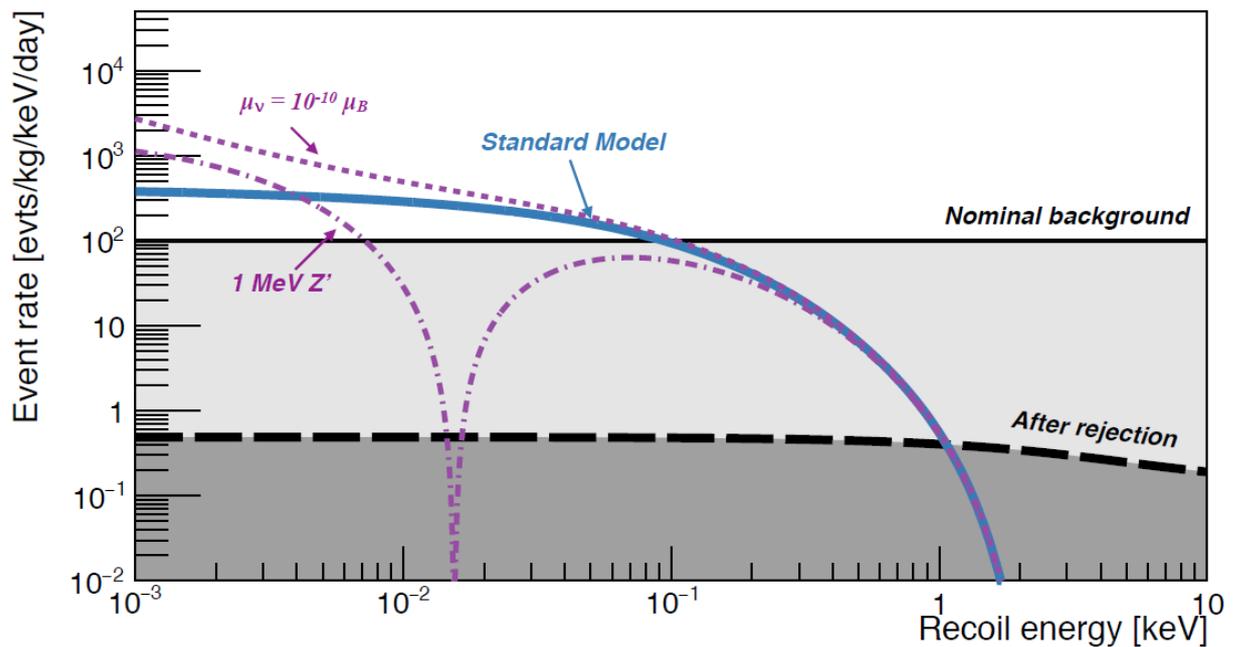


Рис. 20: Ожидаемый спектр в Ricochet для реактора ILL (расстояние – 8 метров). Голубая линия соответствует предсказаниям стандартной модели для CEvNS. Фиолетовые линии в виде черточек и точек соответствуют спектру в случае 1 MeV Z' бозона и Магнитному моменту нейтрино в $10^{-10} \mu_B$. Непрерывная черная линия – максимальный фон. Прерывистая черная линия – фон после его подавления в Ricochet (ниже порога в 50 эВ спектр приведен только в иллюстративных целях).

Магнитный момент нейтрино (ММН):

В некоторых расширениях стандартной модели, включая Новую физику на ТэВ-ной шкале, ММН может быть на уровне $10^{-15} \mu_B$ и $10^{-12} \mu_B$ для Дираковского и

Майорановского нейтрино, соответственно [16]. Поэтому, наблюдение аномально большого ММН, по измерению энергетического спектра в Ricochet (рис. 20), приведет к следующим выводам: 1) существовании Новой физики; 2) нейтрино – майорановский фермион, что будет иметь значительные последствия на всю физику частиц. Ricochet даже при проведении измерений вблизи реактора ILL способен достичь уровня чувствительности в 10^{-11} $\mu\text{В}$ за один год измерений. При проведении на Нововоронежской АЭС можно достичь уровня 10^{-12} $\mu\text{В}$, требуемого современной физикой и значительно превосходящий лучший результат нашего эксперимента GEMMA [5].

Стерильные нейтрино:

Когерентное рассеяние, которое будет прецизионно изучаться в эксперименте Ricochet, не чувствительно к типу нейтрино и поэтому может быть напрямую использовано для поиска осцилляций в стерильные состояния [17], предполагаемые из так называемой реакторной аномалии [18]. Что в свою очередь существенно дополняет данные нашего эксперимента DANSS и подобных экспериментов.

Список литературы

- [1] B. Neganov and V. Trofimov, *Otkryt. Izobret.* 146, 215 (1985).
- [2] P. N. Luke, *J. Appl. Phys.* 64, 6858 (1988).
- [3] E. Armengaud et al. EDELWEISS collaboration, *Physical Review D* 99 (8), 082003, (2019)
- [4] Q Arnaud et al., EDELWEISS collaboration, (2020) arXiv:2003.01046
- [5] GEMMA collaboration, *Phys. Part. Nucl. Lett.* 10, 139143 (2013);
- [6] J. Bilard et al, *Physical Review D* 89, 023524 (2014);
- [7] E. Bertuzzo, F. F. Deppisch, S. Kulkarni, Y. F. P. Gonzalez, R. Z. Funchal, *JHEP* 1704, 073 (2017);
- [8] COHERENT collaboration, *Science* 357 no.6356, 1123-1126 (2017);
- [9] ATLAS Collaboration, *Physics Letters B* 761, 372-392 (2016) ;
- [10] CMS Collaboration, *Physics Letters B* 768, 57-80 (2017);
- [11] J. Barranco, O. G. Miranda, and T. I. Rashba, *Physical Review D* 76, 073008 (2007);
- [12] P. Coloma and T. Schwetz, *Physical Review D* 95, 079903 (2017);
- [13] J. A. Friedland, M. L. Graesser, I. M. Shoemaker, and L. Vecchi, *Physics Letters B* 714, 267-275 (2012);
- [14] CHARM Collaboration, *Physics Letters B* 180, 303-307 (1986);
- [15] J. Billard, J. Johnston and B. J. Kavanagh, *JCAP* 1811, no. 11, 016 (2018);
- [16] M. Lindner, B. Radovicic, and J. Welter, *JHEP* 1707, 139 (2017);
- [17] B. Dutta et al., *Physical Review D* 94, 093002 (2016);
- [18] G. Mention, M. Fechner, Th. Lasserre et al., *Physical Review D* 83, 073006 (2011).