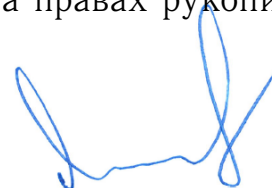


ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



ЯКУШЕВ Евгений Александрович

**Применение спектрометрических методов и
низкотемпературных германиевых
детекторов-болометров для прямого поиска
частиц темной материи и других редких
процессов**

1.3.15. – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких
энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна – 2022

Работа выполнена в *Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Объединённого Института Ядерных Исследований.*

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук **Барабаш Александр Степанович**
ККТЭФ “Курчатовский институт”
начальник Лаборатории физики слабых взаимодействий;

доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН **Данилов Михаил Владимирович**
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН
высококвалифицированный главный научный сотрудник Лаборатории
тяжелых кварков и лептонов;

доктор физико-математических наук **Джилкибаев Жан-Арыс Магисович**
Институт ядерных исследований РАН
ведущий научный сотрудник Лаборатории нейтринной астрофизики
высоких энергий.

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединённого института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Существование частиц небарионной темной материи (ТМ) считается практически безальтернативным объяснением многочисленных данных астрофизики и космологии, полученным в последнее время [34–37]. Более того, оказалось, что известная нам материя составляет только $\sim 5\%$. Оставшаяся доля распределена между неизвестной темной материей и темной энергией. В Стандартной модели нет частиц, которые могли бы составлять темную материю, поэтому поиск частиц темной материи различными методами одновременно является поиском Новой физики. Довольно интригующим является тот факт, что суперсимметрия (SUSY) предсказывает, что Вселенная заполнена слабо взаимодействующими массивными частицами (WIMP). При этом для большого пространства параметров таких моделей предсказываемая плотность WIMP согласуется с требованиями астрофизики. Поэтому перспектива подтверждения SUSY на Большом адронном коллайдере является довольно захватывающей. Однако, ключевым элементом для подтверждения того, что WIMP, аксионы, или другие частицы, действительно образуют галактическое гало ТМ, является наблюдение в лаборатории рассеяния таких частиц на обычной материи.

Настоящая диссертационная работа подводит итог результатам многолетних усилий автора, совместно с коллегами, по созданию и проведению проекта мирового уровня, направленного на прямое детектирование частиц темной материи из галактического гало по их рассеянию в Ge детекторах-болометрах. Общее название проекта EDELWEISS на разных этапах его выполнения приобретало дополнительные приставки-индексы, говорящие о фазе выполнения проекта: EDELWEISS-II, EDELWEISS-III, EDELWEISS-LT. В настоящее время из проекта EDELWEISS по прямому детектированию темной материи вырос новый проект (Ricochet), связанный с применением создан-

ных EDELWEISS детекторов для прецизионного изучения свойств нейтрино по его когерентному рассеянию на ядрах.

Из-за экстремально низкого ожидаемого количества событий рассеяния частиц темной материи на обычной материи основные ограничения на чувствительность их прямого поиска связаны с фоновой радиоактивностью. Поэтому, эксперимент проводился в глубокой подземной лаборатории и применял специальные детекторы, позволяющие выполнять высокоэффективную дискриминацию фоновых событий.

В ходе реализации проекта, EDELWEISS осуществил прорыв в технике детектирования, последовательно создавая HPGe детекторы-болометры, применение которых позволяет проводить исследования с все более низким фоном и исследовать область энергии вблизи нуля. В результате, получены данные на передовом уровне для частиц-кандидатов на роль темной материи в области энергий недоступных для других экспериментов.

Уникальность EDELWEISS состоит в многообразии применяемых методов для дискриминации фона:

- Идентификация типа события из двух каналов измерений (фононного и ионизационного);
- Использование детекторов со специальной схемой электродов, позволяющей отсеивать фонповерхностных загрязнений;
- Применение комплексной низкофоновой пассивной и активной защиты;
- Создание экспериментальной установки из низкорadioактивных материалов;
- Обеспечение непрерывного контроля за уровнем радона;
- Контроль внешних фонов;
- Отбор событий по форме импульса.

На последнем завершеном этапе выполнения эксперимента эффективное подавление фонов было дополнено несколькими уникальными особенностями: 1) применено внутреннее усиление сигналов, используя эффект Неганова-Трофимова-Люка; 2) новейшие транзисторы с высокой подвижностью электронов позволили уменьшить уровень шума; 3) специальная система подвеса детекторов в оправках, привела к уменьшению влияния вибраций криостата на детекторы при работающих криокулерах. Все в совокупности дает возможность получать результаты мирового уровня.

Цели и задачи диссертационной работы:

Для достижения необходимых уровней чувствительности для прямого поиска частиц темной материи нужно было решить следующий комплекс задач:

- Создать низкофоновую установку в глубокой подземной лаборатории, создать инфраструктуру для выполнения эксперимента; Разработать процедуры и методы понижения общего радиоактивного уровня создаваемой установки и ее окружения, в частности процедуры по сертификации новых радиоактивных источников, по использованию радиоактивных источников в низкофоновом эксперименте, по работе в чистой комнате и т.д.
- Создать необходимое количество (масса) новых германиевых детекторов, в частности детекторов обладающих хорошим энергетическим разрешением, низким порогом регистрации, и применение которых позволяет проводить активное подавление фоновых событий; Необходимо проводить многочисленные тесты детекторов в условиях подземной лаборатории, проводить наладку систем набора данных. Было необходимо создавать новые детекторы для каждой, все более чувствительной, фазы эксперимента.
- Запустить стабильные измерения в подземной лаборатории с иннова-

ционными HPGe детекторами - болометрами, применение которых позволяет: а) дискриминировать фоновые события благодаря сравнению ионизационных и фононных сигналов; б) дискриминировать приповерхностных событий (дочерние долгоживущие продукты распада радона, ^{14}C); в) имеющих низкий энергетический порог регистрации.

- Для корректной интерпретации данных было необходимо провести тщательные калибровки: энергетической шкалы и эффективности регистрации детекторов, в зависимости от энергии.
- Необходимо контролировать уровень и стабильность фона в ходе всего времени набора данных и монтажных работ. Для сравнения экспериментальных данных с моделью необходима информация по радиоактивности всех элементов. Поэтому, новые материалы и элементы конструкции должны быть проверены на низкофоновых HPGe детекторах, имеющихся в распоряжении нашей группы и с помощью других методов (нейтрон-активационный анализ, ICP-MS).
- Провести собственно измерения с HPGe детекторами-болометрами.
- Построить реалистичную модель установки и провести всестороннее моделирование.
- Провести анализ получаемых данных, на основании которого поставить ограничение на сечение рассеяния, либо, в случае наблюдения отклонения от уровня ожидаемого фона, определить параметры частиц ТМ.
- На основе полученных данных провести следующую итерацию для дальнейшего улучшения чувствительности эксперимента: улучшить фоновые и шумовые условия (замена материалов на еще менее радиоактивные, усовершенствование пассивной защиты, замена элементов

крио-системы с использованием дополнительных демпферов и новых крио-куллеров).

Как показано в данной диссертации все вышеизложенные задачи были успешно решены на разных этапах эксперимента EDELWEISS.

Результаты выносимые на защиту их научная новизна и значимость

Результаты выносимые на защиту связаны с решением основной научной проблемы диссертации: осуществить прямой поиск частиц темной материи ядерно-спектрометрическими методами с использованием HPGe детекторов-болометров на уровне чувствительности, необходимом для проверки актуальных теоретических моделей, таким образом ограничивая пространство свободных параметров для поиска и исследования темной материи альтернативными методами. Все результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, являются новыми. На защиту выносятся следующие результаты, определяющие практическую ценность и научную новизну диссертации:

- Из анализа экспериментальных данных EDELWEISS-I и построения модели фона была выяснена природа событий в области экспериментального поиска WIMP с криогенными детекторами-болометрами: события с неполным сбором заряда на поверхности от следовых загрязнений дочерними продуктами распада радона и органическими соединениями, содержащими ^{14}C .
- В EDELWEISS-II были использованы детекторы, применение которых позволило эффективно подавлять фоновые события от загрязнений на их поверхности, в результате чего при длительном наборе данных было получено лучшее минимальное сечение на спин-независимое сечение упругого рассеяния WIMP-нуклон, которое составило $4,4 \times 10^{-44} \text{ см}^2$ (90% CL) для WIMP с массой 85 ГэВ/ c^2 .

- Результаты EDELWEISS-II закрыли результаты DAMA, интерпретируемые как неупругое рассеяния WIMP, для масс > 90 ГэВ/ c^2 .
- В EDELWEISS-III были поставлены ограничения (90% CL) на сечение рассеяния WIMP–нуклон на уровне: $\sigma = 1,6 \times 10^{-39}$ см² и $6,9 \times 10^{-44}$ см² для WIMP с массой $m_\chi = 4$ ГэВ/ c^2 и $m_\chi = 30$ ГэВ/ c^2 , соответственно. Результаты, полученные EDELWEISS-III, полностью исключили область предположительной регистрации частиц темной материи в ряде других экспериментов. Что особенно важно, эти ограничения на сечение взаимодействия WIMP-нуклон позволили проверить положительные результаты, полученные с тем же ядром (Ge), в эксперименте CoGeNT.
- Получены ограничения на солнечные аксионы: из данных EDELWEISS-II $g_{A\gamma} < 2,13$ ГэВ⁻¹ получена из солнечного канала Примакова, что ограничивает модели аксионов в диапазоне масс $\sim 1-100$ эВ для адронных аксионов. Независимая от модели оценка g_{Ae} , полученная в результате поиска аксионов комптоновского-тормозного излучения на Солнце, достигает лучшей чувствительности, чем косвенная оценка, полученная из измерений потока солнечных нейтрино. Объединение результатов всех солнечных аксионных каналов обеспечивает широкий диапазон исключения массы, зависящий от модели, $0,91$ эВ $< m_A < 80$ кэВ и $5,73$ эВ $< m_A < 40$ кэВ для двух наиболее распространенных моделей невидимых аксионов DFSZ (Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitskii) и KSVZ (Kim-Shifman-Vainstein-Zakharov), соответственно.
- Из данных EDELWEISS-III из поиска аксионов от Солнца получены следующие ограничения на параметры связи $g_{Ae} < 1,1 \times 10^{-11}$ и $g_{Ae} \times g_{AN}^{\text{eff}} < 3,5 \times 10^{-17}$ (90% CL). Нами также получены ограничения на поглощение бозонных частиц темной материи, которые могли бы со-

ставлять галактическое гало темной материи. Получены ограничения мирового уровня на ALP и скрытой фотонной темной материи в диапазоне масс $0,8 - 500 \text{ кэВ}/c^2$.

- С новейшими детекторами EDELWEISS-LT удалось провести поиск различных частиц кандидатов темной материи в лаборатории на поверхности и в подземной лаборатории. Благодаря уникальным свойствам новых детекторов, в измерениях EDELWEISS-LT, выполненных на поверхности, был получен самый строгий экспериментальный предел для спин-независимых взаимодействий WIMP-нуклон в области масс выше $600 \text{ МэВ}/c^2$. В измерениях, выполненных в LSM, благодаря использованию внутреннего усиления Неганова-Трофимова-Люка, удалось достичь рекордного энергетического разрешения на уровне $0,53$ электрондырочных пар. Из анализа накопленных данных были получены ограничения на взаимодействия сверхлегких частиц темной материи на электронах и на поглощение бозонной темной материи. Новые ограничения существенно улучшают предыдущие результаты.
- Ряд новых результатов получен при тщательном изучении фонов, так впервые экспериментально получена скорость наработки космическим излучением трития в германии, равная 82 ± 21 ядер трития/кг/день.
- При проведении EDELWEISS удалось создать и ввести в эксплуатацию новейшие детекторы, которые стали основой для эксперимента Ricochet, направленного на прецизионное исследование когерентного рассеяния нейтрино с целью поиска Новой физики.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались автором на следующих конференциях:

The 5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics

(ICPPA-2020); Рабочее совещание: “Тёмная материя: теоретические предположения и экспериментальные поиски” 2020, ЛТФ, ОИЯИ, Дубна; New Trends in High-Energy Physics, 2018, Бечичи, Черногория; VLVnT-2018, Дубна, Россия; International Workshop «40 years IN2P3-JINR collaboration anniversary», The International Workshop on Non-Accelerator New Physics, (2013); German-JINR projects in Astroparticle Physics: status and perspectives; International Workshop “Low Threshold Detectors and Their Application in Neutrino Physics”(2013), нескольких International Conference on Nuclear Physics “Nucleus”, Рабочее совещание по возможности применения сцинтилляционных кристаллов LiF в экспериментах по поиску частиц темной материи, ИЯИ РАН (2012), 9-я Международная Байкальская Школа по Физике Элементарных Частиц и Астрофизике (2009), 2nd Topical Workshop in Low Radioactivity Techniques, CNRS and Laboratoire Souterrain de Modane, Aussois, Франция.

Результаты работ, положенных в основу диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в ряде ведущих отечественных институтов: НИЯУ МИФИ, ВГУ, ИЯИ и др. Ежегодно результаты проводимой работы обсуждались на Семинаре по физике низких энергий и структуре атомного ядра ЛЯП ОИЯИ. Раз в три года результаты докладывались на лабораторном семинаре ЛЯП ОИЯИ. Проводились семинары в других лабораториях Института (ЛТФ, ЛФВЭ).

Автор диссертации читал лекции по направлению исследований: 3-я весенняя школа ОИЯИ–Болгария, г. Бачиново, Болгария: “Experimental non accelerator neutrino physics and astrophysics in JINR”; лекции для студентов физфака ВГУ (Воронежский ГУ, 2011 год): “Поиск небарионной темной материи ядерно-физическими методами”; лекция на 14-й Международной школе по физике нейтрино и астрофизике (Саров, 2022 год): “Direct search for Dark Matter”.

Достоверность диссертации определяется публикацией всех представ-

ленных результатов в ведущих рецензируемых журналах. В течение последних двух десятилетий результаты прямого поиска частиц темной материи при помощи детекторов-болометров оказывали существенное влияние на развитие данной области физики, свидетельством чего является общий индекс цитирования работ, составляющий несколько тысяч. Наиболее цитируемые работы¹ [1]: 350 раз, [2]: 200 раз, [3]: 170 раз, [4]: 137 раз, [5]: 124 раза, [6]: 116 раз, [7]: 110 раз, [8]: 104 раза и [9]: 104 раза.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 33 печатных работах, из них 28 статей в рецензируемых журналах [1–28] и 5 статей в сборниках трудов конференций [29–33].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором. Автор является одним из руководителей экспериментальной программы EDELWEISS и руководителем проекта EDELWEISS в ОИЯИ.

С целью выполнения описанных в диссертации исследований в ЛЯП ОИЯИ была создана группа, которая активно участвовала в решении всех значимых задач эксперимента. В частности, в:

- Создании новых германиевых детекторов, а именно детекторов с низким порогом регистрации для изучения легких WIMP; Установке и тестах новых детекторов в подземной лаборатории, наладке систем набора данных;
- Создании экспериментальной инфраструктуры проекта в подземной лаборатории LSM и в ЛЯП ОИЯИ;
- Разработке процедур и методов понижения общего радиоактивного

¹ В соответствии с <https://scholar.google.com/> на 1 августа 2022 года

уровня установки и ее окружения, в частности процедур по сертификации новых радиоактивных источников, по использованию радиоактивных источников в низкофоновом эксперименте, по работе в чистой комнате и т.д.

- Организации набора данных (включая как каждодневные регулярные процедуры, например регенерацию детекторов, так и подготовку и проведение специальных калибровочных измерений с гамма и нейтронными источниками для выяснения характеристик детекторов и их стабильности во времени);
- В экспериментальном изучении фона, в частности контроле уровня радона и поля быстрых и тепловых нейтронов в подземной лаборатории - месте проведения эксперимента; Создании детекторов для таких исследований. Проведении отбора материалов по их минимальному радиоактивному загрязнению с HPGe детекторами, и другими современными методами. Разработке новейших методов проведения таких исследований;
- Моделировании детекторов и анализе экспериментальных данных;
- Подготовке публикаций на основе полученных в эксперименте результатов.

В ходе выполнения проекта под руководством автора диссертации в ОИЯИ были защищены две диссертации к.ф.-м.н. (С.В. Розов и А.В. Лубашевский).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, словаря терминов и библиографии. Общий объем диссертации 248 страниц, включая 85 рисунков и 17 таблиц. Библиография включает 230 наименований.

Во введении обсуждаются основные научные проблемы и вопросы, решению которых посвящена диссертация.

В первой главе обсуждается самое общее введение в проблему небарионной темной материи и прямого поиска, составляющих ее частиц. Основой всех представленных исследований является современная стандартная космологическая модель Λ CDM. В конце двадцатого века начала вырисовываться картина с превалированием темной массы во Вселенной, при этом оказалось, что сама темная материя по большей части состоит из одной или нескольких неизвестных нам элементарных частиц. Поиск таких частиц в широком диапазоне масс является одновременно и важным тестом Новой физики. Убедительные доказательства, указывающие на существование темной материи, оставляют самый важный вопрос без ответа: что такое темная материя? Самый эффективный способ ответить на этот вопрос - найти темную материю, т.е. зарегистрировать ее в лаборатории. Из-за огромной значимости проблемы для современной науки, десятки независимых экспериментов по прямому и непрямому поиску частиц темной материи создают среду, которая является одновременно высоко конкурентной и в тоже время взаимодополняющей.

Во второй главе диссертации приводится тщательный анализ данных измерений в фазе EDELWEISS-I, с целью определения фонов и принятия решений, которые оказали влияние на создание установки EDLWEISS-II, ставшей базой для всех последующих этапов эксперимента. В ходе проведения современных экспериментов, изучающих редкие события, зачастую только сама установка может дать информацию об уровнях фонов и помочь выявить их природу. Это приводит к необходимости реализации экспериментальной программы через этапы, на каждом из которых требуется усовершенствовать установку на основе накопленных данных. Основной выявленной проблемой при анализе фонов EDELWEISS-I является фон от событий с неполным сбором заряда в детекторе от ничтожных загрязнений на поверхности. Его устранение оказалось невозможным без привлечения новых технологий,

реализованных в EDELWEISS-II

В третьей главе диссертации дается обзор реализации экспериментальной программы EDELWEISS-II и получены важные ограничения на параметры частиц ТМ. В этой фазе эксперимента была создана экспериментальная установка (левая часть рисунка 1), ставшая базой для проведения этой и последующих стадий проекта.

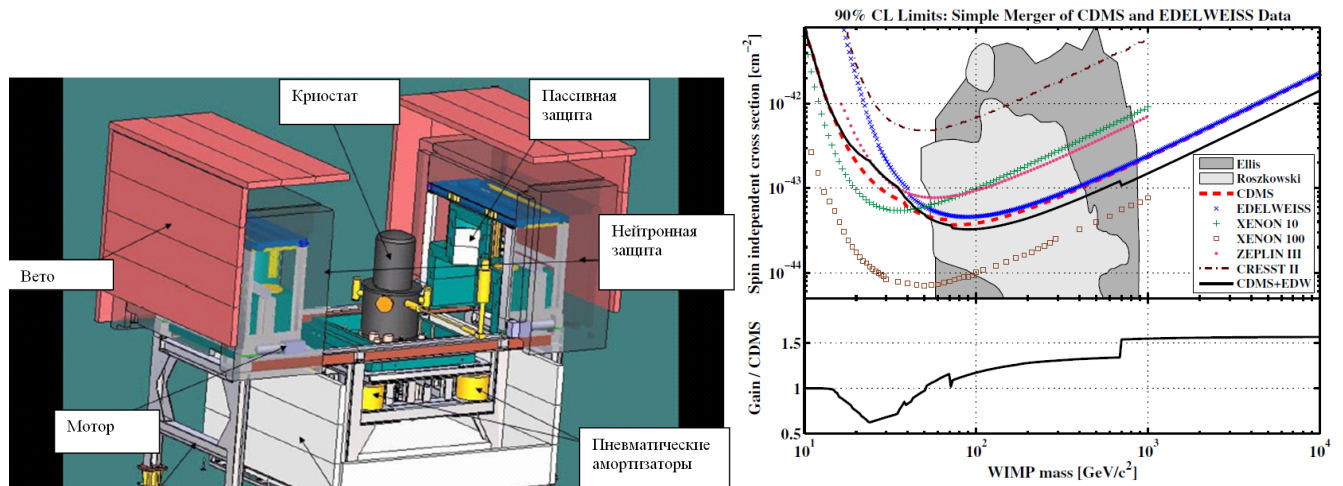


Рис. 1. Слева: Общая схема установки EDELWEISS-II. Справа сверху: 90% верхний предел на спин-независимое взаимодействие WIMP-нуклон из результатов CDMS [38] и EDELWEISS и из комбинированного анализа (черная линия). Данные других экспериментов приведены на дату публикации нашего результата: XENON 100 [39], XENON 10 [40], CRESST II [41] и ZEPLIN III [42] и пространство параметров SUSY из [43]. Справа внизу: выигрыш, достигнутый благодаря объединению результатов.

В этой фазе эксперимента было найдено решение проблемы фона на поверхности, который ограничивал чувствительность эксперимента. Были применены детекторы со специальной схемой электродов, описание которой дается в этой главе диссертации (ID детекторы). В ходе реализации экспериментальной программы EDELWEISS-II было использовано 10 ID детекторов. После 14 месяцев измерений было накоплено 384 кг×дней данных поиска WIMP. Используя эти данные, нам удалось поставить ограничения мирового уровня на взаимодействие WIMP-нуклон:

- Минимальное сечение на спин-независимое сечение упругого рассеяния WIMP-нуклон составило $4,4 \times 10^{-44} \text{ см}^2$ (90%CL) для WIMP с массой

85 ГэВ/с².

- Полученный предел на сечение неупругого рассеяния закрывает результаты DAMA для всех WIMP с массой более 90 ГэВ/с².
- Проведенный совместный анализ данных с CDMS позволил улучшить ограничения на спин-независимое сечение упругого рассеяния WIMP-нуклон. Для WIMP с массой 90 ГэВ/с² получено наилучшее ограничение $3,3 \times 10^{-44}$ см². Результат совместного анализа представлен на правой части рисунка 1.

В четвертой главе диссертации описана реализация EDELWEISS-III фазы эксперимента, первоначальной целью которого являлось достижение чувствительности к сечению WIMP-нуклон лучше 10^{-45} см² для масс WIMP ~ 50 ГэВ/с² с 12000 кг×дней данных. Для улучшения чувствительности эксперимента до нужного уровня, наряду с увеличением статистики в десятки раз, было необходимо существенно понизить индекс ожидаемого фона. В частности, нейтронный фон, связанный с остаточной радиоактивностью электроники, коннекторов и кабелей, расположенных внутри и на криостате установки, было необходимо подавить, по крайней мере, на порядок. Еще один потенциальный источник фоновых событий для поиска WIMP – события, которые возникают в области детектора, где на электрическое поле велико влияние охранного электрода. Для решения данной проблемы были созданы новые детекторы с кольцевыми электродами улучшенной конструкции (Fully Interdigitized Detectors, или, сокращенно: FID800 детекторы): все поверхности этих детекторов, включая боковые, имеют систему кольцевых электродов.

Схема с концентрическими электродами, основанная на методе копланарной сетки для локализации событий, впервые примененная в EDELWEISS-II, была улучшена для детекторов FID, как показано на рисунке 2: Al-электроды толщиной 200 нм напыляются на все поверхности кристалла Ge, как

на плоские верхнюю и нижнюю, так и на боковые поверхности, в виде кольцевых концентрических колец 150 мкм шириной с шагом 2 мм. Пассивация поверхности с нанесением аморфного слоя Ge толщиной от 60 до 80 нм делается только под электродами, поверхность между электродами остается необработанной. Чтобы уменьшить возможный остаточный ток утечки, применяется превентивная обработка (сухое травление детектора) XeF_2 .

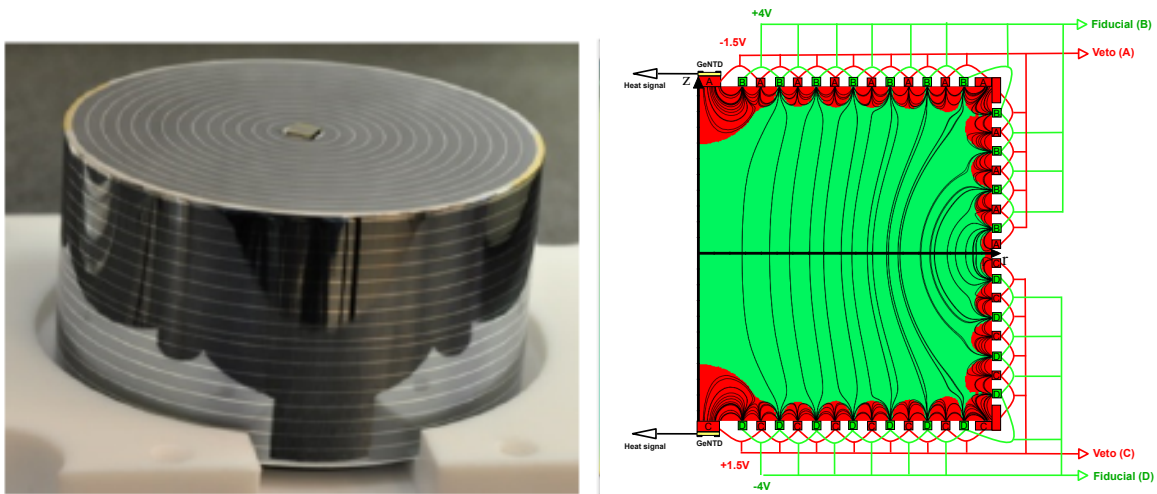


Рис. 2. Слева: FID детектор массой 800-г с концентрическими электродами на всех поверхностях. Справа: Сечение в разрезе FID детектора, показывающее схему электродов. В стандартной конфигурации собирающие электроды B и D имеют $V_B = +4$ В и $V_D = -4$ В и определяют внутренний объем (выделен зеленым). A и C – veto электроды имеют $V_A = -1,5$ В и $V_C = +1,5$ В и определяют поверхностный объем (красный). Внутри детектора линии поля практически вертикальные, в то время как у поверхностей они им параллельны.

Все условно четные и нечетные электроды соединены между собой ультразвуковой пайкой. Имеется два набора электродов - на верхней половине и нижней половине. Такая схема детекторов была впервые предложена и реализована EDELWEISS. В отличие от планарной схемы, FID детекторы создают собирающее поле на всех поверхностях детектора, позволяя проводить эффективную дискриминацию событий на поверхности.

Прикладывая напряжения, как показано на правой стороне рисунка 2, становится возможным определить событие произошедшее у поверхности.

В ходе выполнения EDELWEISS-III ряд параллельно идущих экспери-

ментов заявили о наблюдении частиц ТМ в области относительно малых масс WIMP, исследование которой требует хорошего энергетического разрешения. В это же время, проведение экспериментов с сжиженными благородными газами (Ar, Xe) значительно улучшило ограничение на сечение WIMP-нуклон для масс более $20 \text{ ГэВ}/c^2$. Поэтому основной анализ данных EDELWEISS-III был проведен для области малых масс. Поставлены ограничения (90% C.L.) на сечение рассеяния WIMP-нуклон на уровне: $\sigma = 1,6 \times 10^{-39} \text{ см}^2$ и $6,9 \times 10^{-44} \text{ см}^2$ для WIMP с массой $m_\chi = 4 \text{ ГэВ}/c^2$ и $m_\chi = 30 \text{ ГэВ}/c^2$, соответственно.

Контуры ограничений на WIMP, полученные из EDELWEISS-III данных, приведены на рисунке 3.

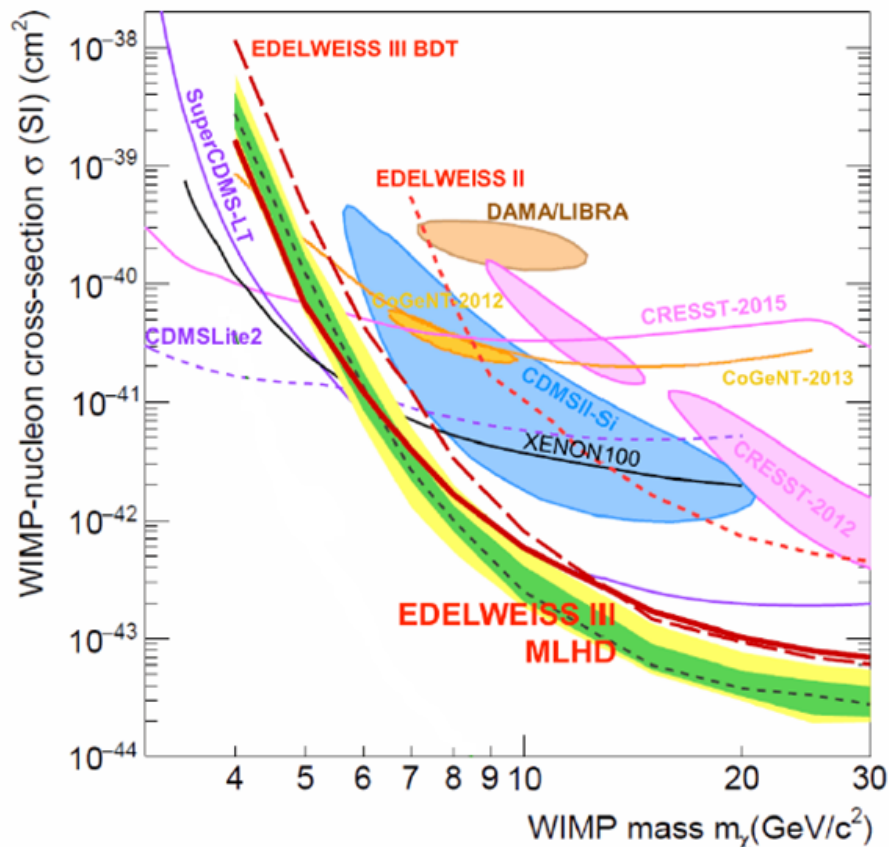


Рис. 3. Ограничения (90% C.L.) на сечение рассеяния WIMP-нуклон. Результаты, полученные экспериментом EDELWEISS-III. EDELWEISS-III BDT - результат анализа методом регрессивного дерева, EDELWEISS III MLHD - методом максимального правдоподобия. Дается сравнение с наилучшими актуальными результатами на момент проведенного анализа.

Результаты, полученные EDELWEISS-III, полностью закрывают области

предположительной регистрации частиц темной материи в ряде других экспериментов. Что особенно важно, наше ограничение на сечение взаимодействия WIMP-нуклон позволило проверить положительные результаты, полученные с тем же “обычным веществом” детектора – $^{\text{nat}}\text{Ge}$, в эксперименте CoGeNT [44].

Пятая глава диссертации посвящена одной из важнейших проблем в экспериментах по поиску исследованию редких событий – проблеме фона. Понимание фонов является одной из основных задач таких экспериментов для корректной интерпретации получаемых данных. В данной главе диссертации были в деталях описаны фоновые условия в EDELWEISS-II и их улучшение для последующих фаз эксперимента. Тщательная и многолетняя работа, проделанная по изучению фонов и нахождение методов их устранения, привела к созданию установки, имеющей возможность проводить прямой поиск частиц на мировом уровне.

При анализе космогенных фонов в Ge детекторах EDELWEISS-III нам удалось установить важные для будущего развития техники низкофоновых измерений скорости наработки ряда долгоживущих изотопов, дающих вклад в низкоэнергетический спектр. Впервые экспериментально была получена скорость наработки космическим излучением трития в германии, равная 82 ± 21 ядер трития/кг/день. Эти данные особенно ценны для нейтринных экспериментов по исследованию когерентного рассеяния нейтрино на ядрах германия.

В шестой главе диссертации мы показали, что детекторы и установка, первоначально разработанные для прямого поиска частиц темной материи в форме WIMP, являются высокоэффективными для исследования аксионов. Данные EDELWEISS-II и -III фаз эксперимента были использованы для поиска аксионов для различных сценариев их происхождения. Некоторые из полученных результатов обеспечивают наилучшие ограничения из прямого поиска. Из EDELWEISS-II $g_{A\gamma} < 2,13 \text{ ГэВ}^{-1}$, полученная из солнечного канала

Примакова, ограничивает модели аксионов в диапазоне масс $\sim 1 - 100$ эВ/ c^2 для адронных аксионов. Примечательно, что независимая от модели оценка g_{Ae} , полученная в результате поиска аксионов комптоновского-тормозного излучения на Солнце, достигает лучшей чувствительности, чем косвенная оценка, полученная из измерений потока солнечных нейтрино. Объединение результатов всех солнечных аксионных каналов обеспечивает широкий диапазон исключения массы, зависящий от модели: $0,91 \text{ эВ}/c^2 < m_A < 80 \text{ кэВ}/c^2$ в рамках DFSZ и $5,73 \text{ эВ}/c^2 < m_A < 40 \text{ кэВ}/c^2$ для аксионов KSVZ.

Из данных EDELWEISS-III из поиска аксионов от Солнца получены следующие ограничения на параметры связи $g_{Ae} < 1,1 \times 10^{-11}$ и $g_{Ae} \times g_{AN}^{\text{eff}} < 3,5 \times 10^{-17}$ (90% C.L.). Также получены ограничения на поглощение бозонных частиц темной материи, которые могли бы составлять галактическое гало ТМ. Получены ограничения мирового уровня на ALP и скрытой фотонной темной материи в диапазоне масс $0,8 - 500 \text{ кэВ}/c^2$.

В седьмой главе диссертации приводится актуальный статус исследований. Благодаря хорошему энергетическому разрешению и низкому порогу регистрации, детекторы-болометры позволяют проводить поиск частиц темной материи в областях масс недоступных для Ar/Xe детекторов (легких WIMP и аксионо-подобных частиц в области низких энергий). При этом, как не удивительно, отрицательные результаты больших экспериментов мотивируют развивать технологии болометрических измерений до своих предельных параметров и увеличивают актуальность поиска в области легких масс. С новыми детекторами EDELWEISS удалось провести поиск различных частиц кандидатов темной материи в лаборатории на поверхности и в подземной лаборатории. Благодаря уникальным свойствам новых детекторов результат EDELWEISS на поверхности устанавливают самый строгий экспериментальный предел для спин-независимых взаимодействий WIMP-нуклон в области масс выше $600 \text{ МэВ}/c^2$. В измерениях в подземной лаборатории удалось достичь разрешения в $0,53$ электрон-дырочных пар с использованием усиления

Неганова-Трофимова-Люка. Из анализа накопленных данных были получены ограничения на взаимодействия сверхлегких частиц темной материи на электронах и на поглощение бозонной темной материи (рисунок 4).

Новые ограничения существенно улучшают предыдущие результаты. Разработанные EDELWEISS детекторы являются основой для нового проекта Ricochet [52], цель которого – прецизионное изучение свойств нейтрино по изучению спектра ядер отдачи при упругом когерентном рассеянии, с энергиями менее 100 эВ, где ожидается проявление Новой физики.

В заключении подводятся итоги проделанной работы.

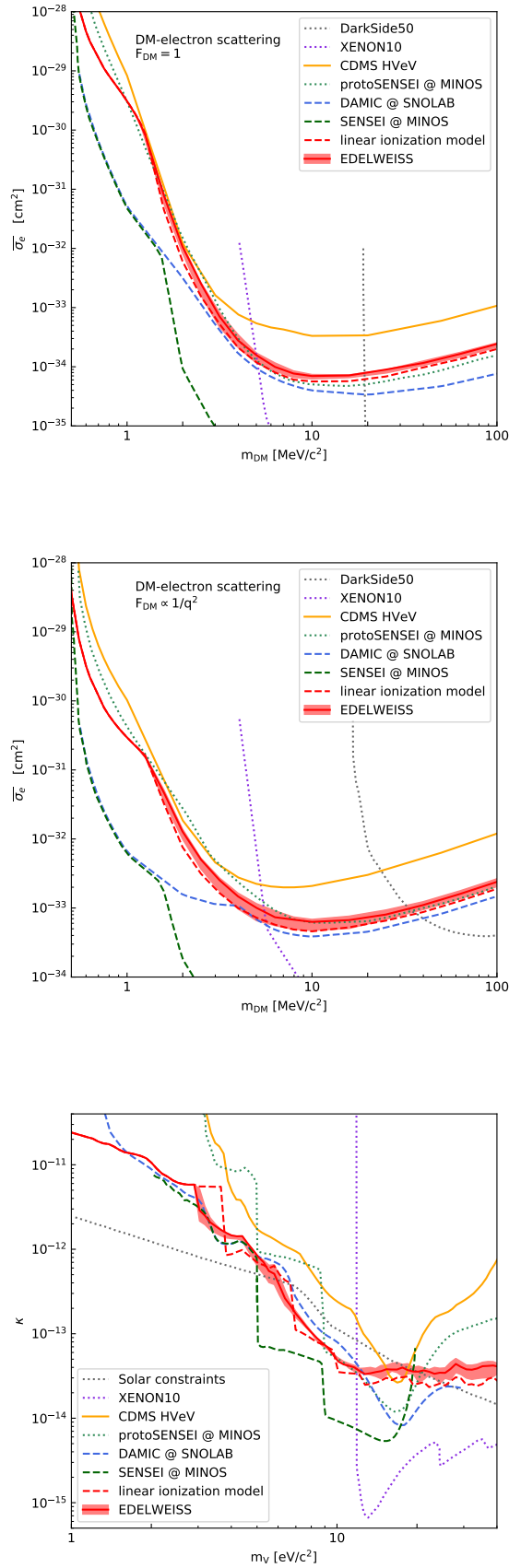


Рис. 4. Верхний предел на сечения для рассеяния частиц ТМ на электронах (90% С.Л.), предполагающий наличие тяжелого (вверху) или легкого (средняя панель) медиатора. Внизу: верхний предел кинетического смешивания κ темного фотона. Результаты наших исследований показаны в виде красной линии. Также показаны ограничения из других экспериментов [45–51].

Список публикаций автора диссертации

1. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes // *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*. 2011. Vol. 702. P. 329–335.
2. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. Search for low-mass WIMPs with EDELWEISS-II heat-and-ionization detectors // *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*. 2012. Vol. 86. P. 051701.
3. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. Searching for low-mass dark matter particles with a massive Ge bolometer operated above ground // *Physical Review D*. 2019. Vol. 99. P. 082003.
4. Armengaud E., Arnaud Q., **E. Yakushev** et al. Axion searches with the EDELWEISS-II experiment // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2013. Vol. 2013, no. 11. P. 067–067.
5. Broniatowski A., Defay X., **E. Yakushev** et al. A new high-background-rejection dark matter Ge cryogenic detector // *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*. 2009. Vol. 681. P. 305–309.
6. Ahmed Z., Akerib D. S., **E.A. Yakushev** et al. Combined limits on WIMPs from the CDMS and EDELWEISS experiments // *Phys. Rev. D*. 2011. Vol. 84. P. 011102. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.84.011102>.
7. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. First results of the EDELWEISS-II WIMP search using Ge cryogenic detectors with interleaved electrodes // *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*. 2010. Vol. 687. P. 294–298.
8. Arnaud Q., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. First Germanium-Based Constraints on Sub-MeV Dark Matter with the EDELWEISS Experiment //

- Physical Review Letters. 2020. Vol. 125. P. 141301.
9. Armengaud E., Arnaud Q., **E. Yakushev** et al. Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2016. Vol. 2016. P. 019.
 10. Fiorucci S., Benoit A., **E. Yakushev** et al. Identification of backgrounds in the EDELWEISS-I dark matter search experiment // Astroparticle Physics. 2007. Vol. 28. P. 143–153.
 11. Špalek A., Dragoun O., **E.A Yakushev** et al. Study of the conversion electron and XPS spectra of radioactive ^{57}Co sources // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2002. Vol. 196. P. 357–364.
 12. Lubashevskiy A., **E.A. Yakushev**. EDELWEISS experiment: Direct search for dark matter // Physics of Atomic Nuclei. 2008. Vol. 71. P. 1324–1327.
 13. Rozov S., Brudanin V., **E.A. Yakushev** et al. Monitoring of the thermal neutron flux in the EDELWEISS II dark matter direct search experiment // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2010. Vol. 74. P. 464.
 14. Kozlov V., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. A detection system to measure muon-induced neutrons for direct dark matter searches // Astroparticle Physics. 2010. Vol. 34. P. 97.
 15. **E.A. Yakushev**, Brudanin V., Lubashevskii A. et al. Search for particles of cold nonbarion dark matter in the EDELWEISS-II experiment // Russian Physics Journal. 2010. Vol. 53. P. 611–615.
 16. **E.A. Yakushev**, Lubashevskii A. Radon-induced background and methods of its elimination in the EDELWEISS-II experiment // Russian Physics Journal. 2010. Vol. 53. P. 616.
 17. Frolova A., Semikh S., Rozov S., **E.A. Yakushev**. Neutron background from the (α, n) reaction on ^{13}C in the EDELWEISS-II experiment on direct search for weakly interacting particles of nonbaryonic cold dark matter // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. Vol. 8. P. 786–788.

18. Cox G., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. A multi-tiered data structure and process management system based on ROOT and CouchDB // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2012. Vol. 684. P. 63–72.
19. Schmidt B., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. Muon-induced background in the EDELWEISS dark matter search // Astroparticle Physics. 2013. Vol. 44. P. 28–39.
20. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. Background studies for the EDELWEISS dark matter experiment // Astroparticle Physics. 2013. Vol. 47. P. 1–9.
21. Angloher G., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. EURECA conceptual design report // Physics of the Dark Universe. 2014. Vol. 3. P. 41–74.
22. Rakhimov A., Brudanin V., **E.A. Yakushev** et al. Neutron activation analysis of polyethylene from neutron shield of EDELWEISS experiment // Radiochimica Acta. 2015. Vol. 103. P. 673–678.
23. Hehn L., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. Improved EDELWEISS-III sensitivity for low-mass WIMPs using a profile likelihood approach // European Physical Journal C. 2016. Vol. 76. P. 1–10.
24. Arnaud Q., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. Signals induced by charge-trapping in EDELWEISS FID detectors: Analytical modeling and applications // Journal of Instrumentation. 2016. Vol. 11. P. P10008.
25. Armengaud E., de Boissire T., **E. Yakushev** et al. Measurement of the cosmogenic activation of germanium detectors in EDELWEISS-III // Astroparticle Physics. 2017. Vol. 91. P. 51–64.
26. Armengaud E., Arnaud Q., **E. Yakushev** et al. Performance of the EDELWEISS-III experiment for direct dark matter searches // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12. P. P08010.
27. Arnaud Q., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. Optimizing EDELWEISS

- detectors for low-mass WIMP searches // *Physical Review D*. 2018. Vol. 97. P. 022003.
28. Armengaud E., Augier C., **E. Yakushev** et al. Searches for electron interactions induced by new physics in the EDELWEISS-III germanium bolometers // *Physical Review D*. 2018. Vol. 98. P. 082004.
 29. Stefano P. D., Benoit A., **E. Yakushev** et al. Status and outlook of the EDELWEISS experiment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2006. Vol. 39. P. 70.
 30. Kraus H., Bauer M., **E. Yakushev** et al. EURECA - the European Future of Dark Matter Searches with Cryogenic Detectors // *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*. 2007. Vol. 173. P. 168–171.
 31. Marnieros S., Armengaud E., **E. Yakushev** et al. Full inter-digitized detectors for the EDELWEISS-II dark matter search // *AIP Conference Proceedings*. 2009. Vol. 1185. P. 635.
 32. **E.A. Yakushev**. Search for cold dark matter non-baryonic particles in the EDELWEISS-II experiment // *Proceedings of the International Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics 2009*. 2009.
 33. **E.A. Yakushev**. Background due to Radon and the means of its elimination in the EDELWEISS-II experiment // *Proceedings of the International Baikal Summer School on Physics of Elementary Particles and Astrophysics 2009*. 2009.

Цитированная литература

34. Peiris H. V., Komatsu E., Verde L. et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Implications For Inflation // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2003. Vol. 148. P. 213.
35. Bertone G. Particle dark matter: Observations, models and searches // Cambridge University Press. 2010. P. 1–738.

36. Caldwell R., Kamionkowski M. Cosmology: Dark matter and dark energy // Nature. 2009. Vol. 458. P. 587.
37. Zyla P. A., Barnett R. M., Beringer J. et al. Review of particle physics // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2020. Vol. 2020. P. 1.
38. Ahmed Z., et al. Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment // Science. 2010. Vol. 327. P. 1619.
39. Aprile E., al. First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 105. P. 131302.
40. Aprile E., et al. New measurement of the relative scintillation efficiency of xenon nuclear recoils below 10 keV // Phys. Rev. C. 2009. Vol. 79. P. 045807.
41. Angloher G., et al. Commissioning Run of the CRESSTII Dark Matter Search // Astrop. Phys. 2009. Vol. 31. P. 270.
42. Lebedenko V. N., et al. Results from the first science run of the ZEPLIN-III dark matter search experiment // Phys Rev. D. 2009. Vol. 80. P. 052010.
43. Ellis J., Olive K., Santoso Y., Spanos V. C. Update on the direct detection of supersymmetric dark matter // Phys. Rev. D. 2005. Vol. 71. P. 095007.
44. Aalseth C., al. Results from a Search for Light-Mass Dark Matter with a p-Type Point Contact Germanium Detector // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 106. P. 131301.
45. An H., Pospelov M., Pradler J., Ritz A. New limits on dark photons from solar emission and keV scale dark matter // Phys Lett. B. 2015. Vol. 747. P. 331.
46. Barak L. et al. SENSEI: Direct-Detection Results on sub-GeV Dark Matter from a New Skipper CCD // Phys Rev. Lett. 2020. Vol. 125. P. 171802.
47. Barreto J., al. Direct search for low mass dark matter particles with CCDs // Phys. Lett. B. 2012. Vol. 711. P. 264.
48. Agnese R. et al. First Dark Matter Constraints from a SuperCDMS Single-Charge Sensitive Detector // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 121. P. 051301.

49. Bloch I. M., Essig R., T. Volansky K. T., Yu T. Searching for dark absorption with direct detection experiments // Journal of High Energy Physics. 2017. Vol. 87.
50. Agnes P., al. Constraints on Sub-GeV Dark Matter-Electron Scattering from the DarkSide-50 Experiment // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 121. P. 111303.
51. An H., Pospelov M., Pradler J. New stellar constraints on dark photons // Phys Lett. B. 2013. Vol. 725. P. 190.
52. Augier C., Beaulieu G., Belov V. et al. Ricochet Progress and Status // 19th International Workshop on Low Temperature Detectors. Online Conference United States: 2021. — . URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03454410>.