

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Розов Сергей Владимирович

Поиск частиц тёмной материи в эксперименте

EDELWEISS

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Дубна – 2017

Работа выполнена в *Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова Объединенного института ядерных исследований*.

Научный руководитель: *Якушев Евгений Александрович*, кандидат физико-математических наук, начальник сектора, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна.

Официальные оппоненты: *Барабаш Александр Степанович*, доктор физико-математических наук, начальник лаборатории, ФГБУ "Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".
Гангашиев Альберт Мусаевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Филиал Баксанская нейтринная обсерватория Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук.

Ведущая организация: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*.

Защита состоится «_____» _____ 201 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 при *Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова в Объединенном институте ядерных исследований*, расположенном по адресу: *Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, б.*
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований и на сайте http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm

Автореферат разослан «_____» _____ 201 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Карамышева Г.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы Одной из основных задач современной физики является определение природы тёмной материи. Проблема тёмной материи впервые возникла в астрофизике из анализа кинематического поведения скопления галактик и звёзд в галактиках. Существование тёмной материи нашло подтверждение из большой совокупности данных, включающих: анализ анизотропии реликтового излучения, гравитационное линзирование и других.

Согласно астрофизическим и космологическим данным Вселенная, в основном, состоит из тёмной материи и тёмной энергии, и только $\sim 5\%$ составляют известные нам частицы [A1]. Неизвестные частицы, не являющиеся барионами, составляют $\sim 22\%$ от общей массы Вселенной. Из современных моделей следует, что эти частицы являются стабильными и могут взаимодействовать с обычным веществом гравитационно и, возможно, слабым образом. В последнем случае, такие частицы называются слабо-взаимодействующими массивными частицами (на английском языке название – Weakly Interacting Massive Particles, сокращенно WIMP).

В тоже время, необходимо отметить тот факт, что суперсимметрия (SUSY) также предсказывает, что Вселенная заполнена слабо-взаимодействующими массивными стабильными частицами. Для большого пространства параметров SUSY моделей предсказываемые свойства WIMP согласуются с требованиями астрофизики. Неудивительно, что поиск SUSY на большом адронном коллайдере является одним из основных экспериментов современной физики. Подтверждением того, что WIMP составляют основу гало тёмной материи нашей галактики, будет экспериментальное наблюдение рассеяния таких частиц на обычной материи.

Целью диссертации является прямое детектирование WIMP из галактического гало с помощью поиска их возможного рассеяния на ядрах германия в эксперименте EDELWEISS. Для регистрации WIMP, на необходимом уровне чувствительности, в работе применяются уникальные германиевые детекторы-боллометры [1], позволяющие про-

водить мощную дискриминацию фона от редких искомым событий. Основой для этого является одновременное измерение фононного и ионизационного сигналов.

Реализация эксперимента EDELWEISS была выполнена в три этапа. На первом этапе (EDELWEISS-I) была показана принципиальная возможность и перспективность использования германиевых болометров (масса каждого детектора ~ 320 г) для поиска WIMP. Результатом стало лучшее, в то время, ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон ($1,5 \times 10^{-42}$ см² для WIMP массой 80 ГэВ/c²) [A2].

Для улучшения фоновых характеристик и уровня чувствительности на втором этапе эксперимента (EDELWEISS-II) была создана новая установка. Для её создания были использованы три вида защиты: пассивная защита, 4л активная защита от мюонов (мюонное вето) и антирадоновая защита. При создании установки все материалы подверглись тщательному контролю на радиоактивную чистоту (для медных оправок удельная активность ⁶⁰Со на втором этапе составила $\sim 0,05$ мБк/кг, тогда как на первом этапе составляла $\sim 0,6$ мБк/кг). На первом этапе чувствительность эксперимента была ограничена не полным сбором заряда в детекторах. Этот эффект обусловил проблему отделения поверхностных событий от событий, произошедших во внутреннем объёме. В EDELWEISS-II, нами был предложен и реализован новый метод решения данной проблемы, используя ионизационный сигнал детектора, который снимался с системы чередующихся кольцевых электродов. Масса каждого детектора составила ~ 400 г [1].

На третьем этапе эксперимента (EDELWEISS-III) используются усовершенствованные детекторы с увеличенной массой (масса каждого детектора ~ 800 г), улучшена пассивная защита, также были изготовлены новые конструкционные элементы из более низкофоновых материалов (для медных оправок удельная активность ⁶⁰Со на третьем этапе составила не более 0,02 мБк/кг) [2]. В третьей фазе эксперимента удалось значительно снизить величину фоновых событий, образованных как γ - (снижен на 15%), так и нейтронным фоном. При реализации третьей фазы эксперимента более детально исследовалась область так называемых лёгких WIMP (с массой ниже 10 ГэВ/c²).

Цель и задачи работы Целью работы является поиск частиц WIMP путем возможного наблюдения рассеяния этих частиц с помощью германиевых детекторов-болометров в экспериментах EDELWEISS-II/III.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка и создание нового типа германиевых детекторов-болометров, имеющих рекордные характеристики (масса, энергетический порог, энергетическое разрешение, стабильность работы) для поиска рассеяния WIMP. Разработанные детекторы позволили отобрать фоновые события для достижения рекордных чувствительностей эксперимента EDELWEISS.
2. Разработка метода изучения нейтронного фона для эксперимента EDELWEISS. Мониторинг и создание расчётной модели фоновых условий эксперимента EDELWEISS (γ -фон, поля нейтронов, радона).
3. Проведение измерений с германиевыми детекторами-болометрами в низкофоновой установке EDELWEISS. Обработка и анализ экспериментальных данных EDELWEISS.
4. Достижение чувствительности на уровне необходимом для проверки положительных результатов, полученных в ряде других экспериментов, в области так называемых лёгких WIMP (масса WIMP порядка $10 \text{ ГэВ}/c^2$).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка детекторов-болометров большого объёма со специальной схемой электродов – чередующейся кольцевой структурой, позволяющей отбирать фоновые события с неполным сбором заряда на поверхности детектора.
2. Метод определения нейтронного фона для установки EDELWEISS и в подземной низкофоновой лаборатории LSM. Определение стабильности нейтронного фона вокруг экспериментальной установки EDELWEISS и в подземной низкофоновой лаборатории LSM (месте проведения эксперимента), результаты получены при помощи сверхнизкофоновых нейтронных детекторов.
3. Метод улучшения пассивной защиты эксперимента EDELWEISS, позволивший уменьшить фон для поиска WIMP.

4. Ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон в экспериментах EDELWEISS-II/III в диапазоне масс от 4 до 1000 ГэВ/c². Для WIMP массой равной 85 ГэВ/c² получено ограничение сечения взаимодействия WIMP-нуклон на уровне $4,4 \times 10^{-44}$ см² (90% CL), а для WIMP с массой 4 ГэВ/c² получено ограничение на уровне $1,6 \times 10^{-39}$ см² (90% CL).

Научная новизна и практическая значимость

1. Впервые с помощью сверхнизкофоновых детекторов на рекордном уровне чувствительности измерена величина и флуктуации потока нейтронов для эксперимента EDELWEISS и в лаборатории LSM. Величина потока нейтронов в LSM составляет $\sim 10^{-6}$ нейтрона/см²/с. Полученные значения позволили создать расчётную модель установки EDELWEISS и улучшить её чувствительность. Флуктуации нейтронного потока в LSM с течением времени составляют не более $\sim 5\%$. Полученные данные важны как для проводимых (TGV, SEDINE, NEMO и другие), так и для планируемых экспериментов (демонстратор SuperNEMO и другие) в подземной лаборатории LSM.
2. Создана и проверена новая пассивная нейтронная защита экспериментальной установки EDELWEISS-II/III, которая позволила в ~ 500 раз снизить поток тепловых нейтронов по сравнению с фоном лаборатории. Данное решение позволило получить для EDELWEISS-II/III новое ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон, на уровне лучших мировых результатов, в диапазоне масс от 4 до 1000 ГэВ/c². Впервые было выполнено независимое измерение потока тепловых нейтронов внутри защиты установки в ходе набора данных, предназначенных для поиска WIMP. Величина измеренного потока составила $(7,3 \pm 1,8) \times 10^{-9}$ нейтрона/см²/с, что стало важным параметром для проверки расчётной модели фоновых условий эксперимента.
3. В третьей фазе эксперимента EDELWEISS удалось снизить величину фоновых событий, образованных как γ - так и нейтронным фоном, что позволило достичь чувствительности по поиску WIMP на уровне лучших мировых результатов. Средний

экспериментальный индекс γ -фона для энергии от 20 до 200 кэВ в EDELWEISS-III снижен на 15% и составил 0,39 события на кг/кэВ/день.

4. Впервые в EDELWEISS с германиевыми болометрами массой 400 г получено ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон в $4,4 \times 10^{-44}$ см² для WIMP массой 85 ГэВ/c² (90% CL). Впервые с германиевыми болометрами (массой 800 г, каждый) получено ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон для WIMP с массой 4 ГэВ/c² на уровне $1,6 \times 10^{-39}$ см² (90% CL). Для области лёгких WIMP полученные ограничения на взаимодействие WIMP-нуклон позволяют полностью закрыть область предположительной регистрации частиц тёмной материи в ряде других экспериментов. Что особенно важно, полностью закрыта область положительного результата эксперимента CoGeNT, полученная с тем же ядром (Ge).

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием между экспериментальными и расчётными фоновыми спектрами от γ - и нейтронного фона. Результат ограничения на сечение рассеяния для диапазона масс WIMP от 30 до 1000 ГэВ/c² EDELWEISS-II согласуется с экспериментами CDMS [A3] и XENON100 [A4]. Для диапазона масс WIMP от 4 до 30 ГэВ/c² результат согласуется с экспериментами LUX [A5], PANDAX [A6], XENON100 [A7].

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях, рабочих совещаниях коллаборации EDELWEISS и семинарах ЛЯП ОИЯИ.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в виде 8 статей в ведущих российских и зарубежных физических журналах, входящих в перечень ВАК и международные базы данных Web of Science и Scopus [1–8], и в 8 тезисах докладов [9–16].

Личный вклад автора Автор принял активное участие в проведении исследований и получении представленных в работе результатов. Результаты, представленные в работе, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 130 страниц с 57 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 96 наименований.

Содержание работы

Во Введении приводится актуальность проделанной работы, выполняется постановка цели работы и задач, решение которых необходимо для её достижения. Излагается научная и практическая значимость полученных результатов диссертационной работы. Перечисляются положения, выносимые на защиту, и указываются данные об апробации работы и личном вкладе автора.

В первой главе кратко рассмотрены факты, говорящие в пользу существования тёмной материи. Являясь актуальной задачей современной физики поиск WIMP затруднен, так как ожидаемая скорость счёта соответствует нескольким событиям на один килограмм мишени в год в энергетическом диапазоне ниже 250 кэВ. В настоящее время имеется довольно большое количество конкурирующих и одновременно дополняющих друг друга экспериментов, направленных на поиск тёмной материи. В некоторых из них в ходе поиска WIMP получено превышения числа наблюдаемых событий над уровнем известного фона. Из-за разногласий полученных положительных результатов с результатами целого ряда других экспериментов, пока нельзя утверждать, что частицы тёмной материи экспериментально зарегистрированы, поэтому, их свойства остаются неизвестными. Проведение измерений при помощи германиевых детекторов-боллометров в специальных низкофоновых лабораториях позволяет исследовать широкий диапазон масс WIMP, включающий область не подтвержденных положительных результатов. Необходимо подчеркнуть, что потенциал всех проводящихся экспериментов по прямому поиску небарионной тёмной материи главным образом определяется уровнем остаточного фона в области поиска. Как будет продемонстрировано в данной работе новейшие разработки по идентификации фоновых событий в германиевых детекторах-боллометрах позволят получить экспериментальные данные, которые либо подтвердят наличие лёгких WIMP, либо поставят сильные ограничения на параметры частиц тёмной материи. В совокупности с данными других экспериментов по прямому поиску тёмной материи, астрофизики и результатов поиска SUSY на БАК удастся значительно улучшить наши знания о том, что представляют собой частицы тёмной материи.

В главе два дано общее описание эксперимента EDELWEISS (рисунок 1). Чув-

ствительность эксперимента поэтапно улучшалась при выполнении каждой его фазы от EDELWEISS-I до EDELWEISS-III. С этой целью вносились изменения в защиту установки от фоновых событий, в криостат установки, в конструкцию германиевых детекторов-болометров.

В главе 2 представлен результат, полученный на первом этапе эксперимента EDELWEISS. Далее дан подробный обзор экспериментальной установки EDELWEISS-II. Была улучшена пассивная защита от нейтронов и от γ -фона, добавлено мюонное вето, позволяющее производить дискриминацию событий от космических лучей и вызванных ими вторичных частиц, в особенности быстрых нейтронов. Верхняя часть пассивной защиты состоит из двух подвижных частей, стоящих на рельсах и приводящихся в движение электромоторами.

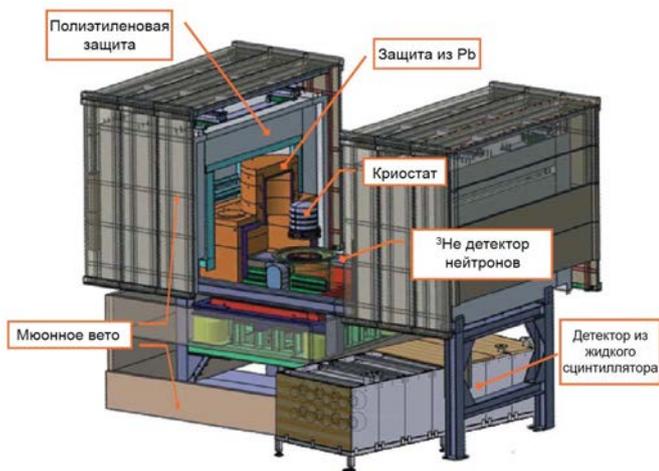


Рис. 1. Схема экспериментальной установки EDELWEISS-II. Показаны части установки, включая криостат растворения с детекторами, активную и пассивную защиты.

Описан новый увеличенный по сравнению с EDELWEISS-I криостат способный охладить до 40 кг детекторов. Для поиска тёмной материи детекторы охлаждаются до температуры ~ 20 мК. На третьем этапе эксперимента были заменены конструкционные материалы на более низкофоновые и добавлена дополнительная пассивная защита. Так же в этой главе указаны возможные источники происхождения фоновых событий, которые могут повлиять на результат эксперимента.

Глава три посвящена описанию детекторов, применяющихся для поиска тёмной материи в эксперименте EDELWEISS. Для подавления фоновых событий используются специальные HPGe детекторы-болометры с возможностью одновременного измерения ионизационных и фоновых сигналов, что позволяет с высокой эффективностью отделить γ -фон от событий ядер отдачи. Рассмотрен принцип получения информации о

событиях, произошедших в таких детекторах. Особое значение имела проблема не полного сбора заряда и, соответственно, проблема отделения поверхностных событий от событий произошедших во внутреннем объёме детектора, которая ограничивала чувствительность детекторов EDELWEISS. Для решения данной проблемы в EDELWEISS-II/III разработаны и применены детекторы нового типа. Для разделения поверхностных событий от событий произошедших во внутреннем объёме детектора в эксперименте были разработаны новые детекторы с чередующимися кольцевыми электродами ID (~ 400 г каждый) и FID (~ 800 г каждый) типа (рисунок 2). Параметры детекторов (фак-

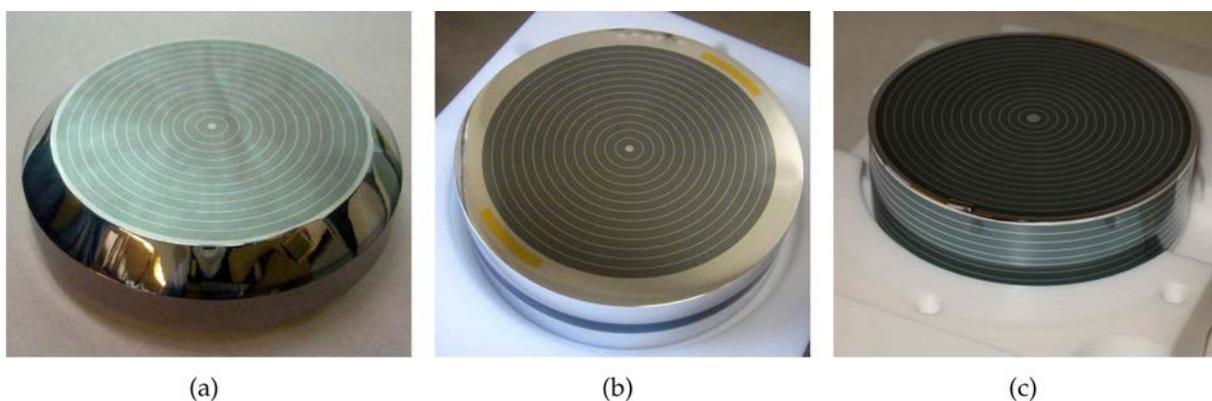


Рис. 2. Три разных типа детекторов EDELWEISS: (a) — детектор ID массой 320 г, (b) — детектор ID с массой ~ 400 г и (c) — детектор FID массой ~ 800 г.

торы отбора γ - и поверхностных событий, эффективный объём, энергетические калибровки и область поиска WIMP) были определены и контролировались с использованием радиоактивных источников: имплантированного источника продуктов распада Rn, γ -источников ^{60}Co , ^{133}Ba , нейтронного источника AmBe (рисунок 3).

Разработанные детекторы-болометры позволили достичь чувствительности для спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон на уровне сечений 10^{-44} см², и, благодаря хорошему энергетическому разрешению и порогу регистрации, исследовать область лёгких WIMP.

В главе **четыре** дано описание метода изучения нейтронного фона в эксперименте EDELWEISS с использованием детекторов наполненных ^3He . В основе используемых детекторов пропорциональный счётчик наполненный смесью газов ^3He (400 кПа) и ^{40}Ar

(500 кПа). Сечение взаимодействия тепловых нейтронов с ${}^3\text{He}$ составляет 5333(7) б [A8]. Для снижения собственного α -фона счётчик покрыт изнутри слоем тефлона 50-60 мкм и 1 мкм электролитической меди. Для изучения нейтронного фона в эксперименте EDELWEISS использовалось два детектора — детектор тепловых нейтронов [6]: используется один счётчик; и детектор быстрых нейтронов: используется 4 счётчика помещённых в полиэтиленовый замедлитель. На рисунке 4 показан детектор тепловых нейтронов (а) и план лаборатории, где точками показаны места измерения потока нейтронов (б). В некоторых точках измерения проводились как с детектором тепловых, так и с детектором быстрых нейтронов. Определена стабильность потока нейтронов в течение многолетних измерений. Флуктуации потока нейтронов с течением времени в лаборатории LSM не превышают 5% от среднего значения. При этом, значение потока в разных местах лаборатории может отличаться в несколько раз. Вблизи установки EDELWEISS для тепловых нейтронов средняя измеренная величина потока составляет $3,57 \pm 0,02 \times 10^{-6}$ нейтрона/см²/с, а величина полного потока нейтронов составила $9,54 \pm 0,03 \times 10^{-6}$ нейтрона/см²/с.

Экспериментально изучена эффективность пассивной защиты экспериментальной установки. Пассивная защита уменьшает поток тепловых нейтронов в ~ 500 раз. Особенно ценными являются данные, полученные в измерениях с сильным нейтронным источником, находящимся с внешней стороны защиты, с одновременным измерением потока тепловых нейтронов внутри защиты и ядер отдачи германиевыми детекторами. В этих измерениях были проверены результаты моделирования пассивной защиты экспериментальной установки, что позволило определить вклад нейтронов в возможное число фоновых событий при поиске WIMP. Измерения проводились при различном положении источника с внешней стороны защиты. После получения результатов проверки эффективности пассивной защиты было принято решение провести её оптимизацию на третьем этапе эксперимента, путём добавления новых полиэтиленовых частей вокруг криостата.

В целом, выполнены следующие работы, направленные на изучение нейтронного поля в подземной лаборатории LSM:

- измерен поток тепловых нейтронов в 16 точках лаборатории LSM, в том числе

внутри горной породы;

- измерен полный поток нейтронов в 6 точках лаборатории LSM;
- впервые проведены измерения потока нейтронов внутри защиты экспериментальной установки в ходе поиска WIMP.

Полученные данные по нейтронному фону имеют большое значение не только для EDELWEISS, но и для других проводимых или планируемых экспериментов в подземной лаборатории LSM.

Глава пять посвящена фоновым условиям EDELWEISS-II/III. Для реализации эксперимента EDELWEISS-II/III с необходимым уровнем чувствительности необходимо было как уменьшить число фоновых событий, так и создать реалистичную модель фона эксперимента. В Главе 5 описаны используемые в эксперименте различные методы борьбы с фоновыми событиями. Наиболее опасным источником фона для эксперимента по прямому поиску частиц темной материи (WIMP) являются нейтроны, поскольку сигнал от нейтронов имитирует рассеяние WIMP на ядрах мишени-детектора. Детальное изучение конструкционных материалов на содержание радиоактивных веществ и окружающего фона позволило создать адекватную модель фона экспериментальной установки. Представлены результаты

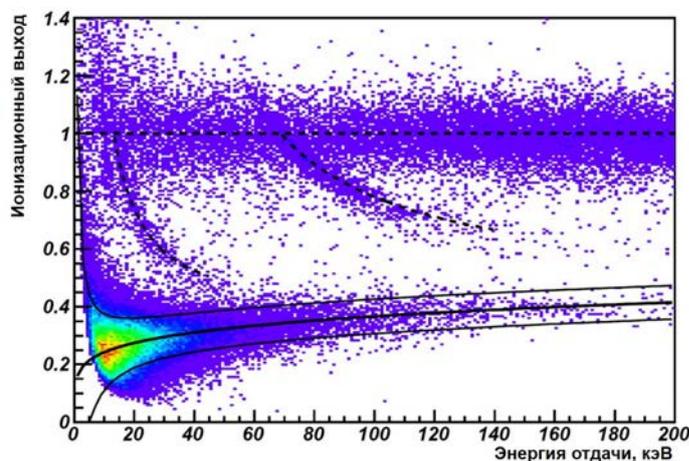


Рис. 3. Калибровочный спектр зависимости ионизационного выхода от энергии отдачи. Показаны все события, записанные в течении калибровок с источником нейтронов. В области, ограниченной сплошными линиями, обозначены события, лежащие в области детектирования ядер отдачи с 90% CL. Линии 13,36 и 68,75 кэВ являются неупругим рассеянием нейтронов на ^{73}Ge (пунктирные линии).

изучения фоновых условий для второй и третьей фазы эксперимента EDELWEISS. Результаты моделирования количества фоновых событий находятся в согласии с экспериментальными данными [2]. На рисунке 5 показан экспериментальный γ -фон в эффективном объёме детекторов EDELWEISS-II в сравнении с результатами моделирования [2] в GEANT4, время набора данных составило 185 кг \times суток. Создана расчётная модель фоновых условий эксперимента EDELWEISS, которая находится в согласии с экспериментальными данными. В третьей фазе эксперимента удалось снизить величину фоновых событий, образованных как γ - так и нейтронным фоном, что позволило достичь чувствительности по поиску WIMP на уровне лучших мировых результатов.

В главе шесть представлены результаты EDELWEISS-II/III по поиску частиц тёмной материи. В эксперименте EDELWEISS-II проведен поиск WIMP с использованием десяти ID детекторов-болометров с массой ~ 400 г, каждый. Благодаря специальной конфигурации электродов впервые удалось эффективно дискриминировать поверхностные события от событий, произошедших в эффективном объёме детекторов. В EDELWEISS-II суммарное время экспозиции составило ~ 384 кг \times суток. Получено ограничение на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон в $4,4 \times 10^{-44}$ см² для WIMP массой 85 ГэВ/c² [3]. В EDELWEISS-III для поиска лёгких WIMP использовались восемь FID детекторов с массой ~ 800 г, каждый. Накопленная статистика EDELWEISS-III к 2016 году составила ~ 496 кг \times суток. Получены ограничения на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон в $1,6 \times 10^{-39}$ и $6,9 \times 10^{-44}$ см² для WIMP массой 4 и 30 ГэВ/c², соответственно [4]. Вышеуказанных уровней чувствительности удалось достичь благодаря применению разработанных в EDELWEISS детекторов ID и FID типа.

Результаты, полученные в EDELWEISS, находятся среди лучших мировых значений. Некоторые эксперименты (CoGeNT [A9], CRESST [A10], DAMA/LIBRA [A11]) интерпретируют свои данные, как положительный результат детектирования WIMP. Результаты, полученные EDELWEISS-III в 2016 году, исключают существование частиц тёмной материи с параметрами, указанными в этих экспериментах. На рисунке 6 показан результат поиска WIMP в EDELWEISS-II/III.

FID детекторы показали перспективность их использования для поиска лёгких

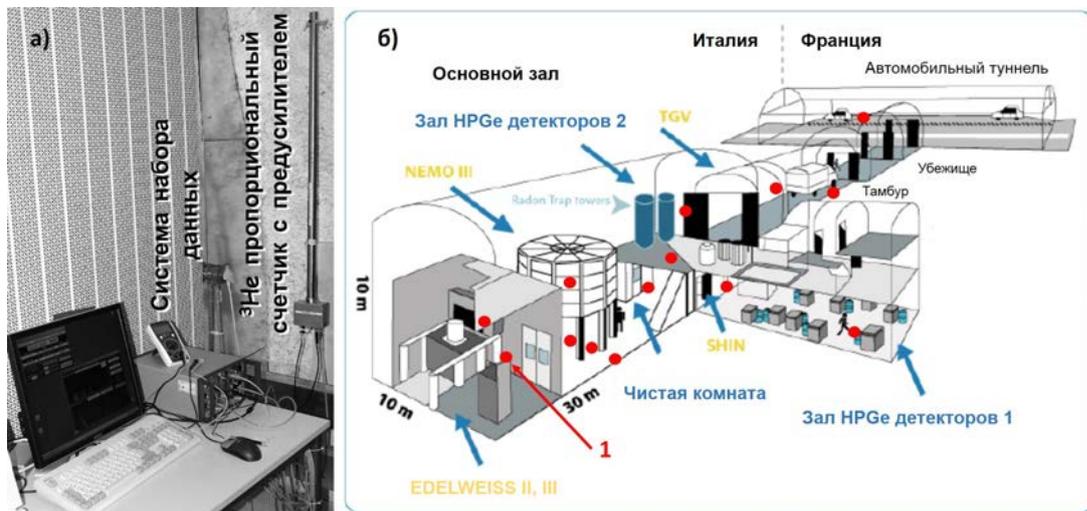


Рис. 4. (а) — фотография детектора тепловых нейтронов в одном из постоянных мест измерений, вблизи установки EDELWEISS: точка 1 на рисунке (б). (б) — схема лаборатории LSM, красными точками отмечены места измерения потока нейтронов.

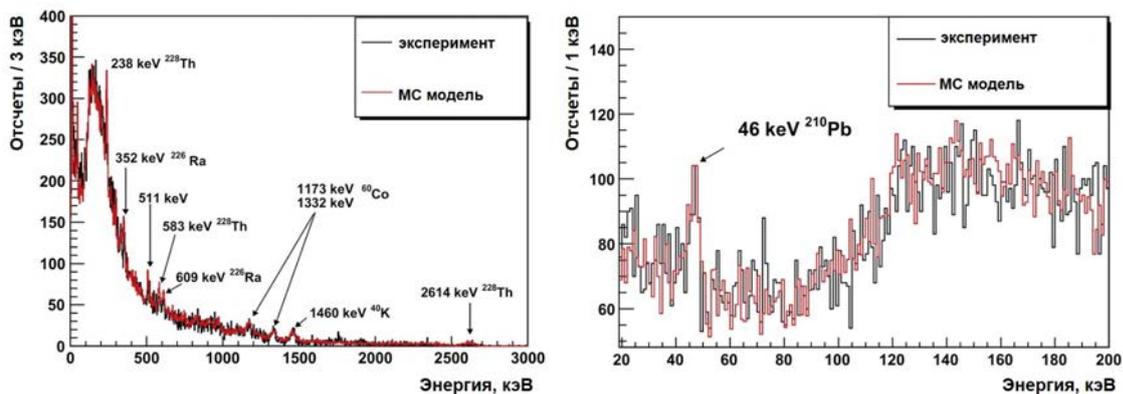


Рис. 5. Гамма спектр, зарегистрированных фоновых событий в эффективном объёме детекторов (чёрные линии) при накоплении 185 кг×суток данных, и результат моделирования (красные линии). Слева показан спектр в диапазоне от 0 до 3000 кэВ, а справа от 20 до 200 кэВ.

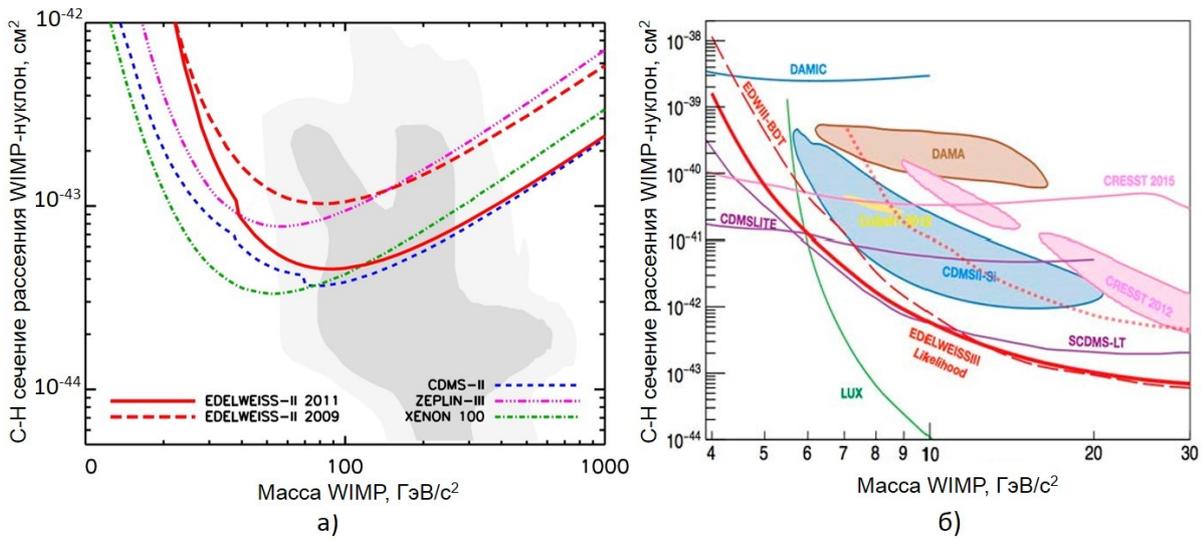


Рис. 6. Результат поиска WIMP в EDELWEISS-II – (а). Показано ограничение на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон. Сплошная линия — результат, полученный при использовании детекторов с чередующейся кольцевой конфигурацией электродов. Приведено сравнение с лучшими результатами других экспериментов (на момент публикации результатов EDELWEISS-II): CDMS [A3], ZEPLIN [A12] и XENON100 [A4]. Результаты, полученные экспериментом EDELWEISS-III в 2016 году – (б). EDW III BDT - результат анализа методом регрессивного дерева, EDELWEISSIII Likelihood - методом максимального правдоподобия. Дается сравнение с наилучшими результатами других экспериментов.

WIMP. Фактором, ограничивающим чувствительность, являются эксклюзивно-фононные события, которые являются основным фоном в области низких энергий. Устранение таких событий и увеличение числа стабильно работающих детекторов позволит за несколько лет достичь уровня чувствительности на спин-независимое рассеяние WIMP-нуклон $\sim 10^{-45}$ cm^2 для области лёгких WIMP.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. В эксперименте EDELWEISS-II получено ограничение на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон в $4,4 \times 10^{-44}$ см² для WIMP массой 85 ГэВ/c² (90% CL). В эксперименте EDELWEISS-III для WIMP с массой 4 ГэВ/c² получено ограничение на сечение спин-независимого взаимодействия WIMP-нуклон на уровне $1,6 \times 10^{-39}$ см² (90% CL).
2. Разработан новый метод изготовления детекторов-болометров большого объема со специальной схемой электродов (чередующейся кольцевой структурой), позволяющих проводить высокоэффективный отбор фоновых событий (~ 1000 кг×сутки без фона).
3. Разработан метод всестороннего изучения фона для эксперимента EDELWEISS. Проведен мониторинг и создана расчётная модель фоновых условий эксперимента EDELWEISS (γ- фон, поля нейтронов, радона). Измеренная величина потока нейтронов в LSM составляет ~ 10⁻⁶ нейтрона/см²/с. Флуктуации нейтронного потока в LSM составляют не более 5%.
4. Разработан метод улучшения пассивной защиты эксперимента EDELWEISS. В третьей фазе эксперимента удалось снизить величину фоновых событий, образованных как γ- так и нейтронным фоном, что позволило достичь чувствительности по поиску WIMP на уровне лучших мировых результатов. Средний экспериментальный индекс γ- фона для энергии от 20 до 200 кэВ в EDELWEISS-III снижен на 15% и составил 0,39 события на кг/кэВ/день.

Список публикаций

1. Broniatowski A. et al. A new high-background-rejection dark matter Ge cryogenic detector // Phys. Lett. 2009. Vol. B681. P. 305–309.
2. Armengaud E. et al. Background studies for the EDELWEISS dark matter experiment // Astropart. Phys. 2013. Vol. 47. P. 1–9.

3. Armengaud E. et al. Final results of the EDELWEISS-II WIMP search using a 4-kg array of cryogenic germanium detectors with interleaved electrodes // *Phys. Lett.* 2011. Vol. B702. P. 329–335.
4. Hehn L. et al. Improved EDELWEISS-III sensitivity for low-mass WIMPs using a profile likelihood approach // *Eur. Phys. J.* 2016. Vol. C76, no. 10. P. 548.
5. Armengaud E. et al. Constraints on low-mass WIMPs from the EDELWEISS-III dark matter search // *JCAP.* 2016. Vol. 1605, no. 05. P. 019.
6. Розов С.В. и другие. Система мониторинга потока тепловых нейтронов в эксперименте по поиску тёмной материи EDELWEISS II // *Известия РАН. Серия физическая.* 2010. Т. 74, N4. С. 502–504.
7. Armengaud E. et al. First results of the EDELWEISS-II WIMP search using Ge cryogenic detectors with interleaved electrodes // *Phys. Lett.* 2010. Vol. B687. P. 294–298.
8. Schmidt B. et al. Muon-induced background in the EDELWEISS dark matter search // *Astropart.Phys.* 2013. Vol. 44. P. 28–39.
9. Лубашевский А.В., Якушев Е.А., Розов С.В. и другие. Измерение потока тепловых нейтронов в подземной лаборатории LSM // *Тезисы докладов, Ядро 2009, Чебоксары.* 2009.
10. Rozov S.V. et al. Neutron flux in EDELWEISS-II experiment // *Book of Abstracts, LLX International Conference on Nuclear Physics NUCLEUS 2010 “Methods of Nuclear Physics for Femto- and Nanotechnologies”*, July 6 – 9, 2010, Saint-Petersburg, Russia. 2010.
11. Лубашевский А.В., Якушев Е.А., Розов С.В. и другие. Фон в эксперименте по поиску тёмной материи EDELWEISS, вызванный дочерними продуктами распада ^{222}Rn // *Труды конференции, Десятая научная конференция молодых учёных и специалистов (ОМУС-2006), Дубна.* 2006.

12. Лубашевский А.В., Якушев Е.А. , Розов С.В. и другие. Измерение потока нейтронов внутри горной породы в подземной лаборатории LSM // Труды конференции, XVIII Научная конференция молодых учёных и специалистов (ОМУС-2014), Дубна. 2014.
13. Лубашевский А.В., Якушев Е.А. , Розов С.В. и другие. Эксперимент по поиску тёмной материи EDELWEISS-2 // Труды конференции, Пятнадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ, Дубна. 2011.
14. Лубашевский А.В., Якушев Е.А. , Розов С.В. и другие. Independent measurement of neutron flux in EDELWEISS-2 dark matter search experiment // Труды конференции, Пятнадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ, Дубна. 2011.
15. Лубашевский А.В., Якушев Е.А. , Розов С.В. и другие. Фон нейтронов в эксперименте по прямому поиску тёмной материи EDELWEISS-II // Труды конференции, Четырнадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ, Дубна. 2010.
16. Лубашевский А.В., Якушев Е.А. , Розов С.В. и другие. Измерение потока нейтронов в подземной лаборатории LSM // Труды конференции, Тринадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ, Дубна. 2009.

Цитированная литература

- A1. Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) website:. URL: <http://map.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 22.01.2016).
- A2. Sanglard V. et al. Final results of the EDELWEISS-I dark matter search with cryogenic heat-and-ionization Ge detectors // *Phys. Rev.* 2005. Vol. D71. P. 122002.
- A3. Ahmed Z. et al. Search for Weakly Interacting Massive Particles with the First Five-Tower Data from the Cryogenic Dark Matter Search at the Soudan Underground Laboratory // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 011301.

- A4. Aprile E. et al. First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment // Phys. Rev. Lett. 2010. Vol. 105. P. 131302.
- A5. Akerib D. S. et al. Improved Limits on Scattering of Weakly Interacting Massive Particles from Reanalysis of 2013 LUX Data // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116, no. 16. P. 161301.
- A6. Tan A. et al. Dark Matter Results from First 98.7 Days of Data from the PandaX-II Experiment // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 117, no. 12. P. 121303.
- A7. Aprile E. et al. XENON100 Dark Matter Results from a Combination of 477 Live Days // Phys. Rev. 2016. Vol. D94, no. 12. P. 122001.
- A8. Firestone R., et al. Table of isotopes. 8th edition. New York: Wiley, 1998.
- A9. Aalseth C. E., Barbeau P. S., Colaresi J. et al. Search for an Annual Modulation in a *p*-Type Point Contact Germanium Dark Matter Detector // Phys. Rev. Lett. 2011. — Sep. Vol. 107. P. 141301. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.141301>.
- A10. Angloher G., Bauer M., Bavykina I. et al. Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter search // The European Physical Journal C. 2012. Vol. 72, no. 4. P. 1971. URL: <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-1971-8>.
- A11. Savage C., Gelmini G., Gondolo P., Freese K. Compatibility of DAMA/LIBRA dark matter detection with other searches // JCAP. 2009. Vol. 0904. P. 010.
- A12. Lebedenko V. N. et al. Result from the First Science Run of the ZEPLIN-III Dark Matter Search Experiment // Phys. Rev. 2009. Vol. D80. P. 052010.