

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Е.А.Якушев
ОИЯИ (г. Дубна)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

А.С. Барабаш
ИТЭФ (г.Москва)

кандидат физико-математических наук

А.В.Гладышев
ЛТФ, ОИЯИ (г.Дубна)

Ведущая организация:

Баксанская нейтринная обсерватория, ИЯИ
(Кабардино-Балкария)

Защита состоится "___" _____ 2010 г. в ___ часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном институте ядерных
исследований по адресу: 141980, г.Дубна Московской области, ОИЯИ,
конференц-зал ЛЯП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А.Батусов

Актуальность темы исследований

Одним из наиболее важных вопросов в современной физике частиц является проблема существования скрытой массы во Вселенной. Большое количество различных астрофизических экспериментальных данных свидетельствует о наличии холодной небарионной темной материи. Возможным объяснением данного факта является существование во Вселенной неизвестных слабо взаимодействующих массивных частиц (Weakly Interacting Massive Particle – WIMP), как например, нейтрино, предсказываемые суперсимметричными теориями (SUSY). Прямое наблюдение таких частиц в лаборатории является ключевым элементом для подтверждения их существования и понимания их свойств, и поэтому имеет первостепенную важность и для астрофизики, и для физики частиц. WIMPs можно обнаружить при их упругом рассеянии на ядрах вещества, в частности, по регистрации ядер отдачи, образующихся при таком рассеянии в германиевом детекторе. Так как WIMP взаимодействует с нуклонами слабым образом, то рассеяние WIMP на обычной материи является редким событием (менее десяти событий на килограмм материи в год). Этот факт, а также низкая энергия отдачи, являются основными трудностями для прямого детектирования WIMP. Один из возможных путей решения данной проблемы – проведение экспериментов с использованием новой генерации криогенных детекторов, сочетающих низкий энергетический порог, высокое инструментальное разрешение и мощную возможность выделения фоновых событий.

Данная экспериментальная техника используется во франко-немецко-российском эксперименте EDELWEISS (Expérience pour DEtecter Les WIMPs En Site Souterrain). Регистрация ядер отдачи в эксперименте осуществляется с помощью криогенных германиевых болометров, способных одновременно регистрировать ионизационный и тепловой сигналы в области поиска WIMP. Одновременное измерение детекторами ионизационного и теплового сигнала позволяет производить эффективную дискриминацию событий от ядер отдачи, и событий от фотонов и электронов, и таким образом понизить фон при поиске WIMP на 4 порядка. Однако, события от электронов, зарегистрированные в поверхностном слое детекторов, из-за неполного сбора заряда не поддаются такой дискриминации и приводят к ограничению чувствительности эксперимента. В данной работе производится моделирование, анализ таких событий и рассматриваются позиционно-чувствительные детекторы нового типа, обладающие возможностью значительного устранения данного фона, что впервые открывает возможность прямого поиска WIMP при ожидаемом нулевом уровне ложных событий.

Несмотря на уникальные методы, используемые в эксперименте для снижения фона, его полное подавление возможно только при низком начальном уровне. Одним из наиболее опасных источников фона в эксперименте является ²²²Rn. Представляя собой благородный радиоактивный газ, он может проникать внутрь защиты установки, что приводит к увеличению количества фоновых

событий. Основной проблемой, связанной с радоном, является наличие в его цепочке распада долгоживущего изотопа ^{210}Pb , следовые количества которого на детекторах приводят к возникновению трудноустраняемых поверхностных событий. Другим источником таких событий может являться углерод-14, бета-радиоактивный изотоп с граничной энергией частиц в 156 кэВ, входящий в состав природных углеродных соединений. В отсутствие дискриминации поверхностных событий, этот вид фона будет главным фактором, снижающим чувствительность эксперимента. Поэтому задача по его детальному изучению является ключевой при проведении эксперимента. В частности, необходимо определить какие именно поверхности, и в каком количестве загрязнены ^{210}Pb и ^{14}C , ожидаемый от них аппаратный спектр, глубину проникновения частиц внутрь детектора. Для получения данной информации необходимо детальное моделирование и калибровки в условиях реального эксперимента. В ходе выполнения работы было показано, что загрязнение ^{210}Pb действительно является основным неустранимым источником фона в EDELWEISS. Для его подавления были разработаны позиционно-чувствительные детекторы, параметры которых выбирались с учетом моделирования. Экспериментально было показано, что при использовании криогенных позиционно-чувствительных детекторов, можно полностью подавить фоновые события, что является потенциалом для достижения чувствительности к сечению рассеяния частиц темной материи в области возможного обнаружения WIMP, согласно некоторым теоретическим предсказаниям SUSY.

Все вышперечисленное легло в основу настоящей работы, а также позволило считать выбранную тему актуальной.

Цель работы

Главной целью диссертационной работы является поиск рассеяния WIMP-нуклон с помощью криогенных германиевых детекторов в эксперименте EDELWEISS. Одной из первостепенных задач при этом является изучение и снижение количества фоновых событий. Обеспечение набора данных на низком уровне фона необходимо для успешного поиска WIMP-нуклон рассеяния на ядрах германиевых болометров. При проведении поиска рассеяния WIMP необходимо было решить следующие задачи:

- Провести набор данных в эксперименте EDELWEISS. Обеспечить стабильность набора данных. Проанализировать полученные результаты.
- Исследовать фоновые условия в эксперименте, в частности, определить содержание радона внутри пассивной защиты эксперимента и обеспечить его непрерывный контроль. Исследовать содержание радона в чистой комнате, в которой находится экспериментальная установка, и местах хранения детекторов. Понизить концентрацию радона внутри пассивной защиты эксперимента.
- Выполнить моделирование загрязнения поверхностей детекторов радиоактивными изотопами ^{210}Pb и ^{14}C . Необходимо определить возможное количество возникающих фоновых событий в эксперименте, понять их структуру и место энерговыделения.

- На основании сравнения моделирования и экспериментальных данных произвести идентификацию наблюдаемых фоновых событий в EDELWEISS.

Научная повизна работы заключается в следующем:

- С помощью криогенных германиевых болометров получено новое ограничение на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ пб, для WIMP с массой в районе 100 ГэВ.
- С помощью данных моделирования и калибровочных данных было показано, что основной фон в EDELWEISS вызван дочерними продуктами распада ^{210}Pb и ^{14}C . Была разработана методика моделирования загрязнения ^{210}Pb и ^{14}C . В частности, была создана оригинальная программа генерирующая низкоэнергетические частицы из распада ^{210}Pb .
- Были созданы инструменты для исследования фона, такие как детектор радона со способностью детектирования концентраций радона-222 на уровне нескольких мБк/м³ за один день измерений.
- Впервые была показана высокая эффективность отбора поверхностных событий с использованием позиционно-чувствительных детекторов. Экспериментально полученный уровень фона в области поиска WIMP составил 0.1 событие за время измерений эквивалентное 3500 кг*суток. Это означает, что после набора данных в течение трех лет EDELWEISS будет иметь лучшую в мире чувствительность к сечению рассеяния частиц темной материи на нуклоне на уровне $4 \cdot 10^{-9}$ пб.

Практическая ценность работы определяется следующим:

- Разработан высокочувствительный радоновый детектор, способный измерять низкие концентрации ^{222}Rn . Данный прибор может иметь широкое практическое применение везде, где необходимы точные измерения и контроль содержания ^{222}Rn в атмосфере. Это актуально для большинства низкофоновых экспериментов, как например, для экспериментов NEMO-3, GERDA по поиску двойного безнейтринного бета-распада и других.
- Созданные инструменты для моделирования загрязнения поверхности ^{210}Pb , в частности оригинальный генератор низкоэнергетических частиц из распада ^{210}Pb , могут иметь применение и в других низкофоновых измерениях, в частности для всех экспериментов по прямому поиску темной материи (CDMS, XENON, CRESST и другие).

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Ограничение, полученное с помощью криогенных германиевых детекторов в эксперименте EDELWEISS, на сечение спин-независимого рассеяния WIMP-нуклон на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ пб, для WIMP с массой в районе 100 ГэВ.

2. Введение в эксплуатацию и результаты калибровки детекторов нового типа с копланарными кольцевыми электродами. При этом была экспериментально продемонстрирована возможность осуществлять при помощи этих детекторов поиск WIMP при уровне фона ~ 1 события-в год на 100 кг вещества. Впервые показана принципиальная возможность достижения чувствительности 5×10^{-9} пб при полном подавлении фона, что позволит проверить большой класс SUSY моделей.
3. Создание высокочувствительного детектора ^{222}Rn . Была разработана методика измерений и разработано программное обеспечение для анализа данных.
4. Двукратное снижение гамма-фона в эксперименте, вызванное снижением содержания ^{222}Rn внутри пассивной защиты эксперимента EDELWEISS до уровня менее 50 мБк/м³ и обеспечением его непрерывного контроля.
5. Результаты идентификации фоновых событий в эксперименте с помощью сравнения данных моделирования и экспериментальных данных. Моделирование поверхностных событий, вызванных дочерними продуктами распада ^{210}Pb и ^{14}C , предсказывает количество фоновых событий в области поиска WIMP, и позволяет определить параметры отбора в позиционно-чувствительных детекторах, используемых в EDELWEISS.

Апробация работы и публикации

Результаты исследований, положенные в основу диссертации, представлялись и докладывались:

- на международных конференциях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Воронеж-2007, Москва-2008, Чебоксары-2009).
- на международных рабочих совещаниях коллаборации EDELWEISS (Альбервиль-2006, Париж-2007, Дубна-2007, Асуа-2008, Карсруэ-2009).
- на международных научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна-2006, Дубна-2007, Дубна-2008, Дубна-2009), а также на семинарах в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Материалы, являющиеся основой диссертации, изложены в 10 публикациях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания и заключения. Содержит 115 страниц печатного текста, 108 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 130 наименований. Полный объем 128 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность научных проблем, изучению которых посвящена работа. Изложены цели и методы поиска рассеяния WIMP-

нуклон в эксперименте EDELWEISS с помощью криогенных германиевых болометров. Дано краткое содержание диссертации по главам.

В **первой главе** диссертации описывается современное состояние накопленных знаний о темной материи, вводятся основные термины и определения, используемые в данной работе. В первом разделе обосновывается очевидность существования небарионной темной материи на основании большого количества экспериментальных данных. При этом доля такой материи во много раз превышает количество известной. Во втором разделе приводятся теоретические гипотезы, в которых возникают кандидаты на роль темной материи. Необходимо отметить, что все известные частицы, в том числе три известных типа нейтрино, не способны описать наблюдаемый дефицит материи. В настоящее время одним из наиболее вероятных кандидатов на роль частиц темной материи является класс слабовазаимодействующих массивных частиц (WIMP), таких как, например, нейтралино, возникающих в суперсимметричных теориях. В третьем разделе описываются ядерно-физические методы детектирования слабовазаимодействующих частиц. Одним из способов регистрации WIMP является поиск их упругого рассеяния на ядрах обычного вещества. При этом возникает характеристический спектр ядер отдачи. В этом разделе приводятся ожидаемые характеристики этого спектра. Приводится описание различных экспериментальных методов регистрации ядер отдачи. Процесс рассеяния WIMP на ядре является редким процессом, поэтому для надежной регистрации такого события необходимо принимать серьезнейшие меры по борьбе с фоном. В четвертом разделе описываются современные эксперименты по прямому поиску WIMP. Приводятся результаты, полученные в этих экспериментах, в том числе обсуждается положительный результат коллаборации DAMA. Обсуждаются перспективы существующих и будущих экспериментов. Одной из самых перспективных методик является использование криогенных германиевых болометров, которая и применяется в эксперименте EDELWEISS.

Во **второй главе** дается обзор экспериментальной техники и методов, используемых в эксперименте EDELWEISS. Вначале описан прототип экспериментальной установки (первая фаза эксперимента, названная EDELWEISS-I), и полученные на нем данные. Исследования, проведенные в EDELWEISS-I, позволили сделать выводы о влиянии фоновых условий на экспериментальный спектр и получить лучшую для того времени чувствительность к детектированию рассеяния WIMP. Во втором разделе приводится общее описание эксперимента EDELWEISS-II. С учетом первой фазы эксперимента были приняты специальные меры по защите от фоновых событий. Был разработан низкофонный криостат растворения реверсного типа, способный охлаждать до 120 детекторов с общей массой до 40 кг. Температура детекторов поддерживается на уровне около 20 мК на протяжении длительного времени (месяцы измерений). Обеспечиваемая стабильность температурного режима составляет лучше 0.01 мК. В третьем разделе дается описание детекторов, используемых в эксперименте для поиска рассеяния WIMP, а именно криогенных германиевых болометров различного типа. Основными

детекторами (NTD), используемыми в EDELWEISS, являются HPGe детекторы, массой 320 грамм каждый. Данные детекторы позволяют проводить одновременное измерение ионизационного и теплового сигнала, что позволяет эффективно отбирать события от ядер отдачи, и событий от фотонов и электронов, и таким образом понизить фон для поиска WIMP на 4 порядка. Измерение ионизационного сигнала осуществляется традиционным образом, а для снятия теплового сигнала используется NTD термисторы. Дальнейшее подавление фона обеспечивается использованием системы из концентрических электродов, позволяющих эффективно подавлять поверхностные события. Это реализовано в новых детекторах INTERDIGIT типа. В четвертом разделе рассматриваются принципы защиты от фоновых событий. Для устранения космогенного фона эксперимент проводится в подземной лаборатории LSM, расположенной на границе Франции и Италии. Толщина скальных пород над лабораторией соответствуют 4700 метров водного эквивалента, что позволяет ослабить поток мюонов на 6 порядков и поток нейтронов на 4 порядка. Для защиты от естественной радиоактивности в эксперименте используется как пассивная, так и активная системы защиты. На рисунке 1 представлена схема защиты и находящихся внутри нее детекторов.

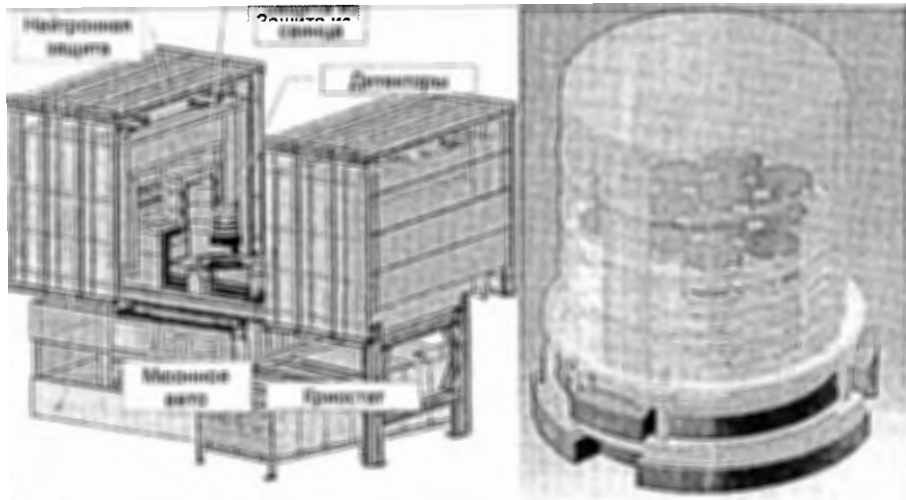


Рис. 1. Схема защиты от фона, применяемая в эксперименте EDELWEISS. Слева показаны все части установки, включая криостат растворения с детекторами и активную и пассивную защиты; справа показана верхняя часть криостата с детекторами.

В следующем разделе описываются методы получения экспериментальных данных. Приводится описание процедур калибровок, необходимых для последующего анализа данных, и процедур регенерации детекторов,

необходимых для обеспечения стабильного набора данных при неизменной функции отклика.

Третья глава посвящена изучению фоновых условий в эксперименте. В первом разделе описывается конструкция радонового детектора. Радиоактивный благородный газ ^{222}Rn представляет опасность для большинства низкофоновых экспериментов, кроме того, в цепочке его распада имеется долгоживущий изотоп ^{210}Pb , накопление которого приводит к появлению трудноустраняемого постоянного источника фона. Кроме того, непрерывный контроль радона, и в частности его сезонных изменений, необходим для корректной интерпретации данных по поиску WIMP, ожидаемый энергетический спектр которых также имеет сезонные вариации. Поэтому для исследования фоновых условий в эксперименте был создан высокочувствительный радоновый детектор. Принципиальная схема радонового детектора показана на рисунке 2.

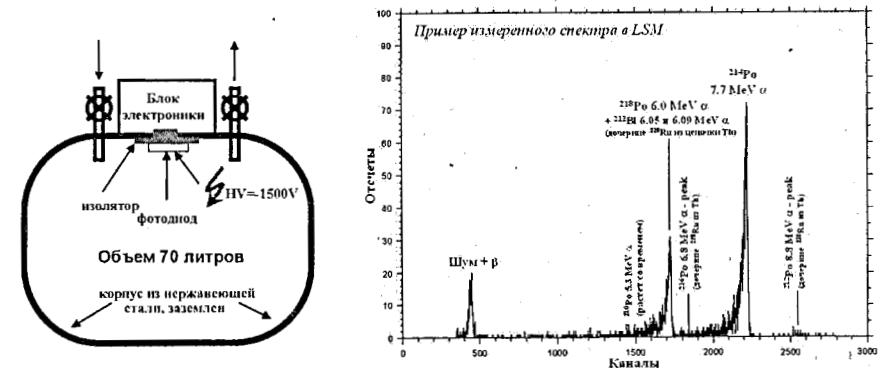


Рис. 2. Схема радонового детектора и полученный энергетический спектр.

В основе действия радонового детектора лежит метод электростатического сбора на альфа-детекторе дочерних альфа-радиоактивных продуктов распада ^{222}Rn из газовой смеси. Данный детектор способен измерять низкие концентрации радона в атмосфере вплоть до нескольких мБк/м^3 . С помощью этого детектора были исследованы фоновые условия в подземной лаборатории LSM, в том числе содержание радона внутри защиты эксперимента EDELWEISS. При помощи детектора была оптимизирована анти-радоновая защита криостата. В настоящее время набор WIMP данных ведется на контролируемом уровне ^{222}Rn внутри защиты ниже 50 мБк/м^3 . Это привело к двукратному понижению уровня гамма фона в эксперименте. Второй раздел посвящен моделированию фоновых событий от дочерних продуктов распада ^{222}Rn , в частности ^{210}Pb . Для этого был создан генератор частиц, возникающих в результате распада ^{210}Pb . При этом были подробно описаны низкоэнергетические частицы из атомных процессов. С использованием пакетов Penelope и Geant4 была создана геометрия эксперимента и были смоделированы фоновые события, возникающие в детекторах. Для проверки

моделирования фона были проведены калибровочные измерения с источником ^{210}Pb . Эти измерения были проведены с одним из детекторов, установленным в EDELWEISS.

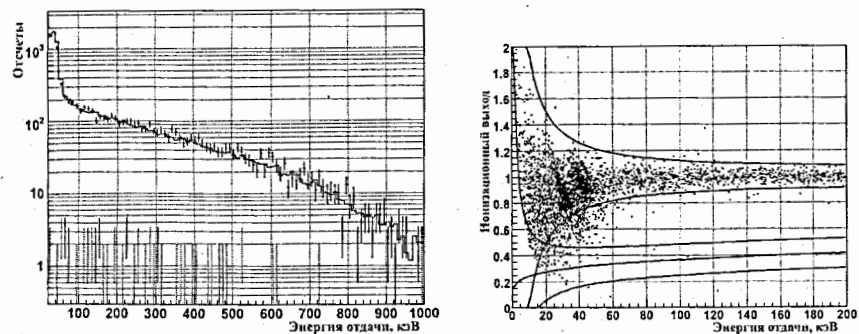


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и смоделированных данных. На графике слева энергетический спектр, черные точки с погрешностями – экспериментальный спектр с источником ^{210}Pb , красная линия результат моделирования, зеленые точки с погрешностями – экспериментальный счет без источника. Справа по оси у – ионизационный выход. Черные точки соответствуют экспериментальным данным, красные – моделированию. Смоделированный спектр нормирован только на количество зарегистрированных альфа-частиц.

Из рисунка 3 видно, что моделирование хорошо предсказывает интенсивность и положение пиков в экспериментальном калибровочном спектре. Эта информация позволяет корректно анализировать экспериментальные данные и определить происхождения фоновых событий. Было показано, что количество фоновых событий можно оценить, зная число зарегистрированных альфа-частиц. Проведенный анализ месторасположения событий от ^{210}Pb показывает эффективность позиционно-чувствительных детекторов в дискриминации поверхностных событий. В третьем разделе описывается моделирование загрязнения поверхности детекторов ^{14}C , входящим в состав углеродосодержащих соединений, которые предположительно могут находиться на поверхности детекторов. Испуская электроны при распаде, ^{14}C представляет собой источник поверхностных событий. Было произведено моделирование его влияния на структуру экспериментального спектра. Рассчитанный спектр и интенсивность фоновых событий, вызванных распадом углерода-14, необходимо учитывать при анализе существующих данных и планировании будущих экспериментов.

В четвертой главе описываются первые результаты, полученные в эксперименте EDELWEISS-II. Большую часть из 28 детекторов, находящихся в эксперименте в 2007-2008 годах, составляли NTD детекторы. Полученный экспериментальный спектр и результат его анализа представлены на рисунке 4.

Экспериментальный спектр, NTD детекторы, $V = -7\text{В}$, 93.5 кг*сутки

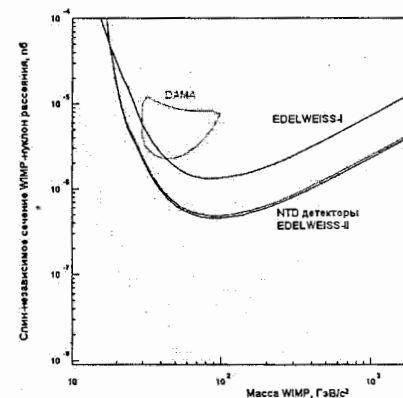
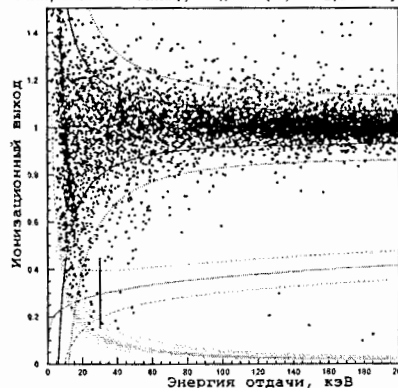


Рис. 4. Экспериментальный спектр, полученный в измерениях с NTD детекторами (слева) и полученное ограничение на спин-независимое сечение WIMP-нуклон рассеяния (справа).

Анализ экспериментальных данных позволил получить ограничение на спин-независимое (С-Н) сечение рассеяния WIMP-нуклон на уровне в 5×10^{-7} пб (для массы WIMP около 100 ГэВ). Как видно из рисунка 4 слева, измерения с NTD детекторами не позволили полностью избавиться от фоновых событий, которые при помощи моделирования были идентифицированы как поверхностные события, возникающие от ^{210}Pb . Таким образом, несмотря на принятые меры по снижению концентрации радона, его дочерние продукты распада присутствуют в эксперименте. Для подавления поверхностных событий необходимо использовать детекторы с возможностью их эффективного отбора. Одним из наиболее перспективных видов детекторов являются разработанные INTERDIGIT детекторы. Калибровочные измерения с источником ^{210}Pb с данным типом детекторов доказали высокую эффективность дискриминации поверхностных событий (см. рис. 5). Измеренный фактор подавления таких событий составил 1/20000, что позволяет полностью избавиться от фоновых событий при поиске рассеяния WIMP-нуклон. Также с данными детекторами был произведен короткий набор данных для измерения сечения рассеяния WIMP-нуклон. Из-за возможности полного подавления фоновых событий было получено ограничение на спин-независимое сечение рассеяния WIMP-нуклон на уровне 7×10^{-7} пб (для WIMP с массой около 100 ГэВ), рисунок 5, что сопоставимо с результатом, полученным из анализа данных с NTD детекторов с большей статистикой.

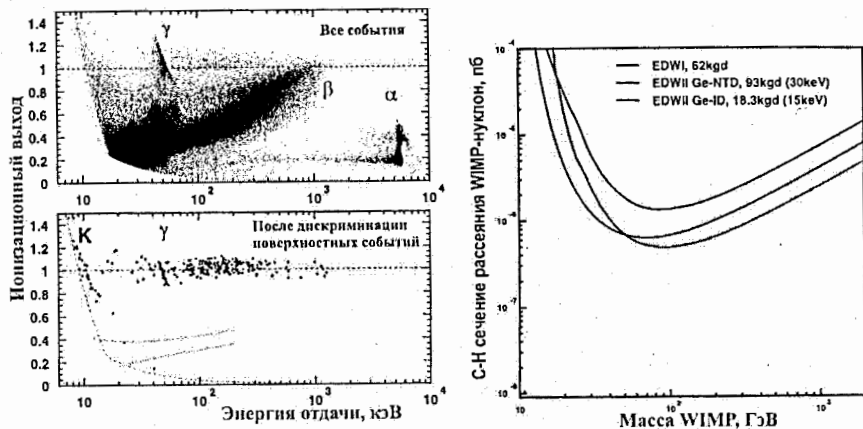


Рис. 5. Слева показаны калибровочные измерения с источником ^{210}Pb с помощью INTERDIGIT детектора. Демонстрируется устранение фоновых событий после выделения внутреннего объема детектора. Справа представлено ограничение на стин-независимое сечение рассеяния WIMP-нуклон, полученное из измерений с детекторами этого типа.

Характеристики INTERDIGIT детекторов позволят при наборе данных на протяжении трех лет достичь чувствительности 5×10^{-9} пб, что находится в области возможного обнаружения WIMP и проверить некоторые предсказания SUSY.

В заключении сформулированы общие выводы и результаты исследований.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Были проведены первые измерения в эксперименте EDELWEISS-II. Полученное ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон составило $5 \cdot 10^{-7}$ пб, что в три раза лучше ограничения, полученного в эксперименте EDELWEISS-I и сравнимо с лучшими мировыми результатами.
2. Разработаны и протестированы детекторы нового типа с копланарными кольцевыми электродами, позволяющие проводить высокоэффективный отбор поверхностных событий. Впервые экспериментально продемонстрирована способность детекторов этого типа осуществлять поиск WIMP при уровне фона ~ 1 события в год на 100 кг вещества.
3. Был разработан и создан высокочувствительный детектор ^{222}Rn . Данный детектор способен измерять низкие концентрации радона в атмосфере вплоть до нескольких мБк/м³ за день измерений. Была разработана методика измерений и разработано программное обеспечение для анализа данных. С помощью радонового детектора были произведены измерения уровня содержания радона внутри пассивной защиты EDELWEISS. С его помощью была оптимизирована анти-радоновая защита. В настоящее время набор данных ведется при контролируемом уровне ^{222}Rn внутри пассивной защиты ниже 50 мБк/м³. Это привело к двукратному понижению уровня гамма фона в эксперименте.
4. Было проведено моделирование фоновых поверхностных событий, вызванных загрязнением детекторов дочерним продуктом распада радона ^{210}Pb и ^{14}C . В результате сравнения моделирования с калибровочными данными удалось определить функцию эффективности сбора заряда на поверхности детекторов. Было рассчитано количество фоновых событий, возникающих в детекторах в результате распада ^{210}Pb и ^{14}C .
5. Впервые были идентифицированы фоновые события в эксперименте. Из данных по количеству альфа частиц был смоделирован весь спектр от ^{210}Pb . Это позволило показать, что фоновые события в EDELWEISS, в области поиска WIMP, вызваны распадом ^{210}Pb . На основании данной информации была доказана необходимость использования детекторов с возможностью дискриминации поверхностных событий.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. А.В.Лубашевский и Е.А.Якушев от Коллаборации EDELWEISS, “Эксперимент EDELWEISS. Прямой поиск темной материи”, Ядерная Физика, том 71, №7, с. 1–4 (2008).
2. S.Fiorucci, ... A.Lubashevskiy, ... et al., “Identification of backgrounds in the EDELWEISS-I dark matter search experiment” *Astroparticle Physics*, 28, 1, 143-153, (2007).
3. A.Broniyatovsky, ... A.Lubashevskiy, ... et al., “Coplanar grid cryogenic germanium detectors for dark matter search: a powerful solution for background discrimination”, *Physics Letters B* 681, 305-309, (2009).
4. P.Stefano, ... A.Lubashevski, ... et. al., “Status and outlook of the EDELWEISS experiment” *Journal of Physics CS*, 39, 70-74, (2006).
5. H.Kraus, ..., A.Lubashevsky, et al., “EURECA-the European Future of Dark Matter Searches with Cryogenic Detectors”, *Nuclear Physics B PS*, 173, 168-171, (2007).
6. E.Yakushev, V.Brudanin, A.Lubashevskiy, L.Perevoshchikov, “Measurement of neutron background at underground laboratory Frejus”, *Book of Abstracts, Voronezh, Nucleus-2007*, (2007).
7. А.В.Лубашевский и др., “Высокочувствительный детектор радона и исследование содержания ^{222}Rn в эксперименте по поиску темной материи EDELWEISS-II”, Тезисы докладов, ОМУС-2008 ОИЯИ, Дубна, Россия (2008).
8. А.В.Лубашевский и др., “Статус эксперимента EDELWEISS-II”, P13-2009-32, (2009).
9. H.Kraus, ..., A.Lubashevsky ... et al., “EURECA – The Future of Cryogenic Dark Matter Detection in Europe”, *EAS Publications Series*, 36, 249-255 (2009).
10. А.В.Лубашевский и др., “Фон в эксперименте по поиску темной материи Edelweiss, вызванный дочерними продуктами распада ^{222}Rn ”, Тезисы докладов, ОМУС-2006, ОИЯИ, Дубна, (2006).

Получено 17 февраля 2010 г.