
Search for cold dark matter non-baryonic particles in the EDELWEISS-II experiment



E.A. Yakushev – Senior Staff Scientist of the Lab. of Nuclear Problems, JINR, Dubna. A member of the coordination committee of the EDELWEISS-II experiment and its supervisor from JINR. The main areas of research are precision analysis in the field of low-energy nuclear and atomic spectroscopy, neutrino physics, neutrinoless double beta decay, dark matter search.

Abstract: The EDELWEISS-II experiment is dedicated to the direct detecting the weakly interacting massive particles (WIMPs) considered to be the main candidates to the role of non-baryonic dark matter. The experiment implements a search for the rare WIMP-Ge scattering events – for which aim the HPGe bolometer detectors at the temperature of 20 mK are being utilized. Due to the difference in the ionization energy losses of recoil nuclei and electrons, the using of detectors which allow simultaneous measurement of phonon and ionization signals permits a high-performance selection of the background events. For an active suppression of the only remaining source of events imitating the WIMP signature (namely, the surface events with incomplete charge acquisition), the detectors with coplanar circular electrodes were developed in the EDELWEISS-II. The factor of suppression of all background constituents in the EDELWEISS-II, experimentally obtained with help of a series of calibration measurements, will make it possible by 2012 to collect a 3500 kg·day statistics with the expected zero level of background events in the WIMP search domain. This will permit recording of the spin-independent WIMP-nucleon scatterings, providing that their cross section exceeds 10^{-45} cm^2 (10^{-9} pb) – the value which corresponds to the predictions of a wide class of SUSY models.

Поиск частиц холодной небарионной темной материи в эксперименте EDELWEISS-II

Е.А. Якушев¹, В.Б. Бруданин, А.В. Лубашевский, С.В. Розов, С.С. Семих и
Д.В. Философов (от коллаборации EDELWEISS)

Лаборатория Ядерных Проблем им. Дзелепова, ОИЯИ, Жолио-Кюри 6,
141980 Дубна, Россия

¹ e-mail : yakushev@jinr.ru

Аннотация

Эксперимент EDELWEISS-II направлен на прямое детектирование слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP), считающихся основными кандидатами на роль небарионной темной материи. В эксперименте осуществляется поиск редких актов рассеяния WIMP-Ge, для чего применяются HPGe детекторы-болометры при температуре 20 мК. Из-за различия ионизационных потерь ядер отдачи и электронов использование детекторов, позволяющих одновременное измерение фоновых и ионизационных сигналов, дает возможность проводить высокоэффективный отбор фоновых событий. Для активного подавления единственного оставшегося источника событий имитирующих сигнатуру WIMP, а именно поверхностных событий с неполным сбором заряда, в EDELWEISS-II разработаны детекторы с копланарными кольцевыми электродами. Полученный экспериментально, при помощи калибровочных измерений, фактор подавления всех составляющих фона в EDELWEISS-II позволит к 2012 году набрать 3500 кг-дней статистики с ожидаемым нулевым уровнем фоновых событий в области поиска WIMP. Это даст возможность зарегистрировать спин-независимые рассеяния WIMP-нуклон если их сечение больше 10^{-45} см² (10^{-9} пб), что соответствует предсказаниям большого класса SUSY моделей.

1 Введение

Одним из наиболее важных вопросов в современной физике является проблема существования скрытой массы во Вселенной. Большое количество различных экспериментальных данных неопровержимо свидетельствует о существовании холодной небарионной темной материи [1], однако ее природа является загадкой. Довольно интригующим является тот факт, что суперсимметрия (SUSY)

предсказывает, что Вселенная заполнена слабовзаимодействующими массивными частицами (WIMP). При этом для большого пространства параметров SUSY моделей предсказываемая плотность WIMP согласуется с требованиями астрофизики. Поэтому перспектива подтверждения SUSY на LHC является довольно захватывающей. Однако, ключевым элементом для подтверждения того, что WIMPs действительно образуют галактическое гало темной материи, является наблюдение рассеяния таких частиц на обычной материи. Поэтому прямое детектирование частиц темной материи в лаборатории имеет первостепенную важность, как для астрофизики, так и для физики частиц. Возможность наблюдения частиц темной материи в лаборатории связана со следующим. Согласно современным астрофизическим представлениям о формировании космологических структур, обычная барионная материя в галактике (звезды, планеты, межзвездный газ и т.д.) связана гравитационно с более массивным неподвижным гало небарионной темной материи. Поэтому, частицы, составляющие эту темную материю, в нашей системе отсчета имеют среднюю скорость ~ 230 км/сек (сама скорость распределена по Максвелл-Больцману), равную нашей скорости в Галактике. Частица с массой порядка 100 ГэВ/ c^2 с такой скоростью при упругом рассеянии на ядрах германия передает им кинетическую энергию в диапазоне от 0 до нескольких десятков кэВ. Эксперименты по прямому детектированию WIMP в лаборатории, включая и представленный в данной работе EDELWEISS-II, пытаются зарегистрировать возникающие энергетические потери ядра отдачи в веществе детектора.

2 Эксперимент EDELWEISS-II

Основной экспериментальной проблемой при прямом поиске WIMP является чрезвычайно низкая вероятность их взаимодействия с барионами (не более 1 события/кг/год), что требует высокоэффективных методов подавления и дискриминации фоновых событий. Одной из наиболее перспективных методик, применяемых для этого, является одновременное измерение теплового и ионизационного сигналов. Ионизационные потери ядер отдачи, возникающих при рассеянии WIMP, значительно меньше, чем у электронов, что и позволяет проводить высокоэффективный отбор фоновых событий. В эксперименте EDELWEISS-II [2] данная методика реализована с использованием сверхчистых германиевых детекторов-болометров, охлаждаемых в криостате растворения ^3He - ^4He до температуры в 20 мК, что позволяет проводить измерения как ионизационного, так и фоновонного каналов с энергетическим порогом от нескольких кэВ. До недавнего времени чувствительность применяемого метода была ограничена фоновыми событиями в приповерхностном слое детекторов. Для таких событий происходит неполный сбор заряда, что имитирует сигнал от WIMP. Как будет показано далее, в экс-

перименте EDELWEISS-II было найдено решение этой проблемы при помощи использования детекторов с копланарными кольцевыми электродами. Наряду с инновационными методиками активного устранения фона, в EDELWEISS-II используются и все известные традиционные методы понижения фона. Защита EDELWEISS-II от естественной радиоактивности окружает детекторы со всех сторон и состоит из 20 см свинца (36 тонн, включая внутреннюю часть, сделанную из сверхнизкофоновой, археологического свинца) и 50 см полиэтилена для защиты от нейтронов (30 тонн). Дополнительно установка имеет активное μ -вент с эффективностью более 98% (100 м² сцинтилляционных панелей, толщиной 5 см). При закрытой защите в свободное пространство возле криостата с детекторами непрерывно поставляется очищенный от радона воздух (9 литров в минуту). Криостат с защитой установлен внутри чистой комнаты, класса 1000. Все конструкционные материалы, использованные для EDELWEISS-II, были тщательно отобраны в зависимости от уровня их радиоактивного загрязнения. Для устранения космогенного фона установка эксперимента EDELWEISS-II размещена в подземной лаборатории LSM, на глубине, соответствующей 4850 метрам водного эквивалента, что позволяет ослабить поток мюонов на 6 порядков и поток нейтронов на 4 порядка. Инфраструктура и криогенная система установки EDELWEISS-II были введены в строй в начале 2006 года. В течение 2006-2007 гг. проводились отладочные, тестовые и калибровочные измерения. Результатом проведенных работ стало создание стабильных условий измерений, позволивших получить разрешение фоновых и ионизационных каналов лучше 2 кэВ, а для некоторых детекторов и лучше 1 кэВ. Достигнутые энергетические разрешения определили порог, начиная с которого фактор отбора гамма событий больше 99.99%. Для данных приведенных в настоящей работе этот порог составил 15-30 кэВ. Энергетические пороги, с которыми ведется набор данных в ионизационном и тепловом каналах, составляют 1.5-3 кэВ. В эксперименте EDELWEISS-II используются детекторы двух типов. Во первых, классические HPGe детекторы, каждый массой 320 грамм, дополнительно имеющие термометр, работающий при мК температурах (Ge/NTD детекторы). В роли термометра выступает маленький германиевый кристалл, подвергшийся изменениям в сильном нейтронном потоке (Neutron Transmutation Doped Ge thermistances, или NTD). Изменения температуры с точностью до десятых долей микрокельвин регистрируются через измерения изменения сопротивления NTD. Основной проблемой детекторов этого типа является наличие фоновых событий вблизи поверхности с неполным сбором заряда. Данные события проникают в зону поиска WIMP и значительно ухудшают чувствительность эксперимента. В 2008-2009 годах, в рамках эксперимента EDELWEISS-II, были успешно протестированы германиевые детекторы нового типа [3] (Ge/NTD/ID детекторы). Основным отличием от детекторов, используемых ранее, является замена центрального электрода на систему электродов в виде копланарных концентрических колец (как показано на Рис. 1), при этом

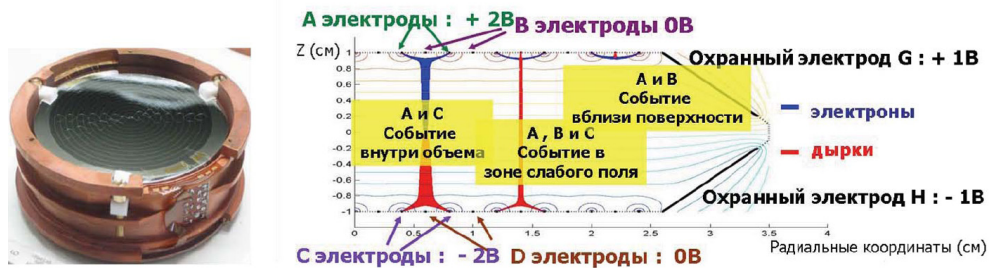


Рис. 1: Вид германиевого детектора нового типа, Ge/NTD/ID, разработанного коллаборацией EDELWEISS-II для активного подавления поверхностных фоновых событий (слева). Справа показано дискриминация поверхностных событий при помощи провисания поля возле электродов, как результат приложения потенциалов в +2, 0, -2, 0, +1 и -1 В на электродах А, В, С, D, G и H, соответственно.

измерение фоновых сигнала у детекторов обоих типов не отличается. Подавая небольшую разность потенциалов на соседние кольца, удается конфигурировать поле таким образом, что заряд от событий, происходящих в приповерхностном слое, собирается на разных электродах, по сравнению со случаем событий, расположенных далеко от поверхности. Как видно из рисунка, для событий внутри детектора (далеко от поверхности) линии поля вертикальны и ионизационный заряд собирается на электродах А и С. Около поверхности линии поля практически параллельны этой поверхности и сбор заряда происходит на электродах А и В, или С и D. Как будет показано в разделе 4, таким образом удастся определить практически все события на глубине менее 1 мм от поверхности.

3 Результаты измерений с Ge/NTD детекторами

В течение 2007-2008 гг. в EDELWEISS-II было выполнено несколько циклов набора данных WIMP с Ge/NTD детекторами. В каждом цикле WIMP измерений, продолжавшемся несколько месяцев, удалось набрать более 100 кг·дней статистики. На рис. 2 представлен полученный экспериментальный спектр, демонстрирующий зависимость отношения ионизационного сигнала к тепловому от энергии отдачи. Этот спектр получен после проведенного анализа, включающего в себя селекцию событий находящихся в одинаковых экспериментальных условиях и дискриминацию шумов. Для показанного на рисунке цикла измерений, энергетический порог, выше которого фактор отбора фоновых событий лучше $1/10^4$, составил 30 кэВ. В области поиска WIMP было зарегистрировано 3 события. Анализ имеющихся калибровочных данных с источником ^{210}Pb , с учетом количества

зарегистрированных альфа частиц в эксперименте (без источника), показал, что наблюдавшиеся события вызваны следовыми загрязнениями детекторов ^{210}Pb и являются фоновыми поверхностными событиями с подавленным ионизационным сигналом. Исходя из наличия кандидатов на роль WIMP, было получено ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон. Для получения верхнего ограничения при неизвестном уровне фона использовался метод оптимальных интервалов [4]. Найденное ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон показано на рисунке 2. Наилучшее значение $5 \cdot 10^{-7}$ пб получено для WIMP с массой в $80 \text{ ГэВ}/c^2$. Как видно из полученных данных чувствительность Ge/NTD детекторов ограничена фоновыми событиями в области поиска WIMP.

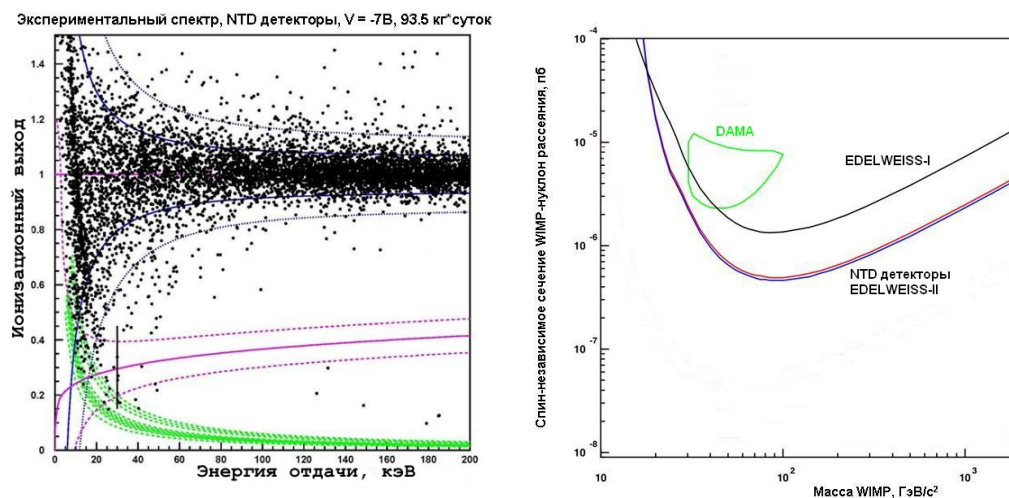


Рис. 2: Слева экспериментальный спектр, полученный в EDELWEISS-II с помощью Ge/NTD детекторов. Набранная статистика - 93.5 кг·дней, измерения выполнены в 2007-2008 гг. Справа полученное на основании этих данных ограничение на спин-независимое сечение рассеяния WIMP-нуклон. Также показаны результаты эксперимента EDELWEISS-I и положительный результат эксперимента DAMA [5] (замкнутая линия)

4 Результаты измерений с Ge/NTD/ID детекторами

Как уже указывалось ранее, для борьбы с поверхностными фоновыми событиями были разработаны и протестированы позиционно-чувствительные детекторы Ge/NTD/ID. Возможности по отбору приповерхностных событий с этими

детекторами были экспериментально продемонстрированы с помощью калибровочных измерений с радиоактивным источником ^{210}Pb (рис. 3). После отбора

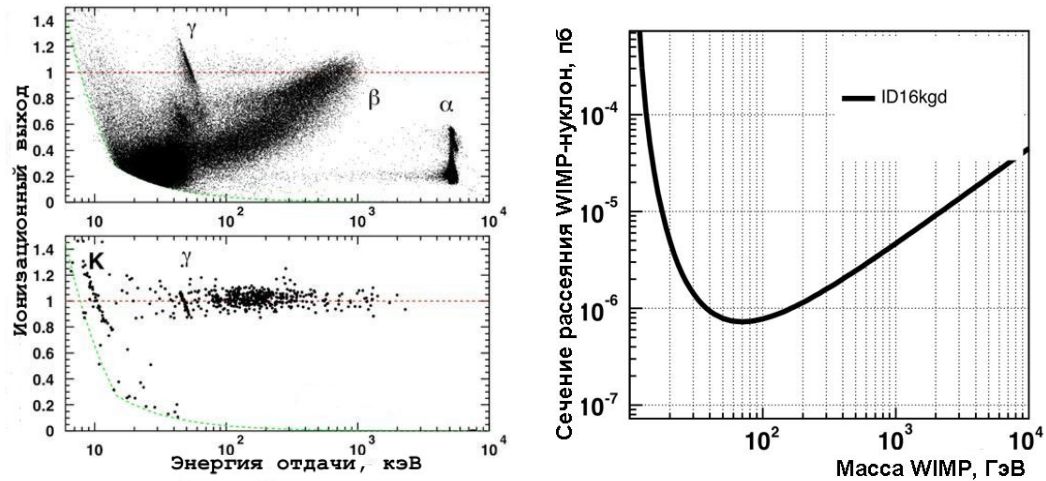


Рис. 3: Слева показан калибровочный экспериментальный спектр Ge/NTD/ID детектора с источником ^{210}Pb , демонстрирующий устранение фоновых событий, возникающих в приповерхностном слое. Сверху слева, все зарегистрированные события, снизу после подавления событий, лежащих вне эффективного объема детектора. Справа результат по поиску WIMP, полученный из анализа первых 16 кг·дней экспериментальных данных, полученных без источника с Ge/NTD/ID детекторами

поверхностных событий из их общего числа 210000, зарегистрированных в области интереса, осталось лишь 10, что соответствует фактору подавления фона $1 \text{ к } 2 \cdot 10^4$. Зная из уровня α -активности поверхностную загрязненность детекторов, и используя полученный фактор подавления фона, мы можем установить ожидаемый уровень фоновых событий в области поиска WIMP в $1/40000 \text{ кг·дней}$. В настоящее время в EDELWEISS-II ведутся измерения с девятью Ge/NTD/ID детекторами, общей массой более 3-х кг. Детекторы демонстрируют хорошее энергетическое разрешение, что позволяет использовать нижний порог анализа WIMP в 15 кэВ. Анализ всего 16 кг·дней WIMP данных позволил дать ограничение $7 \cdot 10^{-7} \text{ пб}$ (рис. 3) на сечение рассеяния WIMP-нуклон, которое сравнимо с результатом, полученным из измерений с 100 кг·дней с Ge/NTD детекторами, благодаря тому, что как и ожидалось из калибровок, в области поиска WIMP не наблюдалось ни одного фоновых события.

В течении 2010-2011 годов планируется увеличить общую массу детекторов нового типа Ge/NTD/ID до 10 кг. Это позволит набрать к 2012 году 3500 кг·дней статистики с ожидаемым нулевым уровнем фоновых событий в области поиска

WIMP. Ожидаемое полное подавление фона позволит исследовать область спин-независимых сечений рассеяния WIMP-нуклон до 10^{-9} пб, для WIMP с массой в районе 100 ГэВ, что позволит проверить большой класс суперсимметричных моделей и значительно улучшить имеющуюся экспериментальную чувствительность к детектированию WIMP.

5 Заключение

Из анализа первых экспериментальных данных, полученных в эксперименте EDELWEISS-II, установлено ограничение на сечение рассеяния WIMP-нуклон на уровне $< 5 \cdot 10^{-7}$ пб. В EDELWEISS-II экспериментально продемонстрирована перспективность использования криогенных германиевых болометров с активным подавлением фоновых событий на поверхности для прямого наблюдения WIMP. Результаты калибровочных и тестовых фоновых измерений показали возможность достижения в EDELWEISS-II чувствительности измерений достаточной для регистрации рассеяния WIMP-нуклон с сечениями на уровне 10^{-9} пб, что будет лучшим результатом в мире.

Эта работа проведена при поддержке гранта РФФИ-07-02-00355-а и частично при поддержке гранта для молодых ученых и специалистов ОИЯИ.

Литература

- [1] G. Bertone et al., hep-ph/0404175v2.
- [2] V. Sanglard et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **173** (2007) 0920–5632.
- [3] A. Broniatowski et al., arXiv:0905.0753 [astro-ph], принята к публикации в Phys. Lett. B (2009).
- [4] S. Yellin, Phys. Rev. D **66** (2002) 032005.
- [5] R. Bernabei, et al, arXiv:0804.2741v1 и 0804.2738v1 [astro-ph] (2008).