

# На пути к прямому наблюдению темной материи... в ОИЯИ

На общелабораторном семинаре ЛЯП 20 января руководитель эксперимента EDELWEISS от ОИЯИ Евгений Якушев представил новые, интересные результаты этого эксперимента, полученные в период с апреля по сентябрь 2009 года.

Пожалуй, мало у кого сегодня вызывает сомнение то, что основная масса вещества нашей Вселенной *не* сосредоточена в форме обычной для нас материи – электронов и атомных ядер (которые состоят из барионов – протонов и нейтронов).

Согласно современной космологии, основанной на идее Большого Взрыва, Вселенная образовалась путем расширения из некоторого сверхсжатого и сверхгорячего состояния, существовавшего примерно 15 миллиардов лет назад. Три краевых камня модели Большого Взрыва: расширение Вселенной, первоначальный синтез легких элементов и космическое микроволновое фоновое излучение, – имеют под собой прочный экспериментальный фундамент.

Точность астрофизических измерений достигла такого высокого уровня, что исследование характеристик этих процессов позволяет прояснить детальную структуру и характер эволюции Вселенной. На основе измеренной распространенности легких элементов – результате первоначального ядерного синтеза – можно достаточно точно определить вклад барионов в плотность вещества во Вселенной. Принимая во внимание наблюдаемую динамику галактических скоплений, данные гравитационного линзирования, характер излучения сверхновых звезд, анизотропию фонового микроволнового излучения и некоторые другие факторы, можно уже сделать практически абсолютно достоверное заключение о существовании так называемой скрытой или темной материи, которая совершенно не чувствительна к электромагнитному излучению и проявляется только гравитационно. При этом анализ показывает, что вещества во Вселенной должно быть как минимум в пять раз больше, чем мы «видим» в космосе в виде галактик, их скоплений, межзвездной пыли, черных дыр, космических лучей, нейтронных звезд и всех других известных нам сегодня космических объектов.

Таким образом, эта невидимая, скрытая, или темная материя должна быть экзотической, небарионной. Для полноты картины отметим, что, помимо темной материи, в современной космологии «обоснова-

лась» также и темная энергия (правда, на несколько меньшем уровне достоверности), которая в простейшем случае отвечает вакуумной энергии, соответствующей Эйнштейновской «космологической постоянной».

Итак, надежно установлено, что темная материя существует во Вселенной, но неясно, из каких электрически нейтральных частиц (их называют WIMP – weakly interacting massive particle) она состоит. Наличие таких частиц – один из важнейших открытых вопросов современной космологии, и это самое прямое указание на физику за рамками Стандартной модели.

Справедливости ради надо отметить, что «достоверно существующие» нейтрино вполне подходили бы на роль небарионной темной материи, поскольку, будучи изначально нейтральными и слабо взаимодействующими, они приобрели статус массивных частиц после результатов поиска нейтринных осцилляций и безнейтринного двойного бета-распада ядер германия. Однако следующий отсюда масштаб нейтринных масс – 0,1–0,3 эВ – оказывается слишком малым, чтобы полностью решить проблему темной материи, хотя такие нейтрино способны дать вклад в полную массу Вселенной, равный вкладу всех видимых звезд. Однако структуру галактик и их скоплений невозможно объяснить темной материей только нейтринного происхождения.

Вопрос о природе WIMP-частиц интенсивно разрабатывается в ли-

тературе. Число обсуждаемых кандидатов достигает нескольких десятков и постоянно растет. С нашей точки зрения, наиболее «перспективный» кандидат на роль частиц темной материи – нейтрально, легчайшая суперсимметричная (SUSY) частица. Она нейтральная, стабильная, массивная, слабо взаимодействующая, майорановская. Довольно интригующим является тот факт, что SUSY предсказывает: Вселенная заполнена слабо взаимодействующими массивными частицами. При этом для большого пространства параметров SUSY-моделей реликтовая плотность таких частиц согласуется с требованиями астрофизики.

В этой связи очевидно стремление экспериментально обнаружить эти частицы. В настоящее время имеются два пути регистрации частиц темной материи в лабораторных экспериментах: напрямую, то есть путем наблюдения в детекторе определенного типа результатов взаимодействия WIMP-частиц с веществом, и косвенно, то есть путем наблюдения в детекторе уже совершенно другого типа вторичных продуктов аннигиляции WIMP-частиц, которая имеет место внутри астрономических объектов типа Солнца, Земли или галактического гало.

К сожалению, ситуация осложняется тем, что в рамках SUSY-моделей имеются весьма неопределенные предсказания об основных характеристиках WIMP-частиц – их массах и сечениях взаимодействия. В частности, по этой причине вопрос о поиске SUSY на коллайдере LHC является одним из главных, поскольку в случае их обнаружения можно будет сделать заключе-



Коллаборация EDELWEISS-II.



**Установка детекторов в криостат.**



**Криостат растворения, внутри которого находятся HPGe детекторы при температуре в 20 мК.**

ние об упомянутых выше характеристиках легчайшего нейтрино. Это имеет крайне важное практическое значение для экспериментов по прямому поиску частиц темной материи (в роли нейтрино).

С другой стороны, несмотря на то, что перспектива обнаружения SUSY на LHC представляется довольно захватывающей, ключевым элементом для подтверждения того, что предсказываемые SUSY частицы действительно образуют галактическое гало темной материи, станет наблюдение рассеяния таких частиц на обычной материи. Именно поэтому прямое детектирование частиц темной материи в лаборатории имеет первостепенную важность.

Поиск этих частиц ведется широким фронтом. По крайней мере, около двух десятков различных установок нацелены на прямую регистрацию событий взаимодействия этих частиц с веществом мишеней прецизионных детекторов.

В настоящее время проблема



**Один из уникальных HPGe детекторов, используемых для поиска частиц темной материи в эксперименте EDELWEISS-II.**

прямого детектирования темной материи приобрела особую интригу в связи с результатами эксперимента DAMA/LIBRA. Это единственная коллаборация, которая утверждает, что обнаружила свидетельства взаимодействия WIMP-частиц с веществом NaI путем измерения амплитуды годовой модуляции измеряемого спектра. Никакие другие эксперименты, несмотря на все возрастающую точность измерений и тщательность анализов, этот результат не подтверждают.

Одним из наиболее чувствительных экспериментов, направленных на решение этой задачи, является EDELWEISS-II (Experience pour DETecter Les WIMPs En Site Souterrain), самое активное участие в котором принимает Лаборатория ядерных проблем имени В. П. Джелепова.

Этот уникальный эксперимент осуществляется франко-немецко-российской коллаборацией в глубокой подземной лаборатории Фрежюс на границе Франции и Италии. Начиная с апреля 2009 года, в EDELWEISS-II идет набор данных с германиевыми детекторами нового типа, позволяющими провести прямую регистрацию одного столкновения частицы темной материи в день в 500 кг обычного вещества при ожидаемом практически нулевом уровне фоновых событий.

В настоящее время в эксперименте применяется 10 детекторов массой 400 г каждый. Сверхчистые германиевые детекторы-боллометры, используемые в эксперименте, имеют две уникальные особенности. Во-первых, набор данных ведется при температуре ниже 20 мК, с одновременным измерением ионизационных и фоновых сигналов от актов взаимодействия WIMP-частиц, что приводит к возможности активного подавления фона, в частности, от гамма-квантов, более чем в 10000 раз. Во-вторых, для устранения так называемых окоповерх-

ностных событий, полностью имитирующих ожидаемую сигнатуру редких событий рассеяния частиц темной материи на ядрах, применяется специальная схема копланарных концентрических электродов, придуманная и разработанная именно коллаборацией EDELWEISS-II.

Обе эти уникальные особенности приводят к лучшим в мире результатам по подавлению фона, а следовательно, и наилучшей потенциальной чувствительности, на порядок превосходящей другие конкурирующие эксперименты, например, CDMS.

В этой связи следует заметить, что в случае применения в эксперименте CDMS более жесткого критерия на отбор именно окоповерхностных событий, исчезают те два кандидата в WIMP, что были зарегистрированы в эксперименте CDMS в конце 2009 года.

В настоящее время в эксперименте EDELWEISS-II также обнаружено одно событие в зоне поиска частиц темной материи, при ожидаемом уровне известного фона ниже 0,1 события. Полученный предел на сечение взаимодействия частиц темной материи с нуклоном, в предположении, что зарегистрированное событие является фоном, является одним из лучших в мире и напрямую конкурирует с результатами CDMS.

Продолжающийся в настоящее время набор данных в эксперименте EDELWEISS-II позволит уже к апрелю 2010 года удвоить статистику, благодаря чему будет достигнута лучшая в мире экспериментальная чувствительность по прямому поиску слабовзаимодействующих частиц темной материи, а природа одного уже зарегистрированного события будет проверена.

Более 10 кг дополнительных детекторов будут добавлены в измерения в течение двух ближайших лет. Цель – набор к 2012 году статистики в чувствительном объеме, соответствующей измерениям с 10 кг детекторов в течение года. Это позволит исследовать область спин-независимых сечений рассеяния частиц темной материи на нуклоне до уровня порядка  $10^{-45}$  см<sup>2</sup>. Это даст возможность проверить большой класс суперсимметричных моделей, а возможно, и впервые надежно зарегистрировать темную материю в лаборатории – например, путем измерения сезонной модуляции регистрируемого спектра. Значимость такой возможности трудно переоценить.

**Вадим БЕДНЯКОВ,  
Евгений ЯКУШЕВ.**