

Изучение свойств нейтрино с помощью низкофонового германиевого спектрометра GEMMA-III

Авторы из ОИЯИ: Белов В.В., Бруданин В.Б., Егоров В.Г., Житников И.В., Зинатулина Д.Р., Лубашевский А.В., Медведев Д.В., Пономарев Д.В., Розов С.В., Розова И.Е., Сандуковский В.Г., Фомина М.В., Ширченко М.В., Якушев Е.А..

Проект GEMMA-III направлен на исследование фундаментальных свойств нейтрино. Экспериментальная установка расположена вблизи промышленного реактора Калининской АЭС (КАЭС). Коллаборация GEMMA состоит из ученых ОИЯИ (Дубна), ИТЭФ(Москва) и МИФИ(Москва).

Изучение свойств нейтрино является очень важной задачей для физики частиц, астрофизики и космологии. Несмотря на то, что нейтрино – одна из самых распространённых частиц во Вселенной, ее детектирование является сложной задачей вследствие крайне слабого взаимодействия этой частицы с веществом. Поэтому, чтобы изучить ее свойства необходим очень сильный источник нейтрино и использование различных методик подавления фоновых событий. Магнитный Момент Нейтрино (ММН) это фундаментальный параметр, исследование которого может привести к результатам, выходящим за рамки Стандартной Модели. Минимально Расширенная Стандартная Модель предсказывает очень малое значение магнитного момента для массивных нейтрино ($\mu_\nu < 10^{-19} \mu_B$), которое не может быть измерено в современных экспериментах. Однако, в большом количестве расширений Стандартной Модели предсказывается, что значение ММН может быть на уровне $10^{-(10-12)} \mu_B$ для Майорановских нейтрино. Наблюдение значения ММН выше чем $10^{-14} \mu_B$ будет свидетельствовать об обнаружении физики за пределами Стандартной Модели и о Майорановской природе нейтрино. Когерентное Рассеяние Нейтрино на ядрах вещества (КРН) – это процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели. Однако он еще никогда не был обнаружен для реакторных нейтрино. Детектирование этого процесса является важным тестом Стандартной Модели. Также это позволяет производить поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильного нейтрино и другое. Однако вследствие низкого сечения рассеяния и малого энерговыделения обнаружение данного эффекта является нетривиальной задачей.

GEMMA-III это новый эксперимент, который создается под реактором №3 КАЭС для детектирования вышеперечисленных процессов. Этот эксперимент является эволюцией наших предыдущих проектов GEMMA и ν GEN. На первой фазе проекта GEMMA-I было получено лучшее ограничение на верхний предел ММН в $< 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ (90% CL). Измерения производились с помощью 1.5 кг германиевого детектора, порог измерений составлял около 2.8 кэВ. Используя пассивные и активные методы подавления фона в эксперименте был достигнут уровень фона в низкой области энергий ~ 2.5 отсчет/(кэВ·кг·сут)⁻¹.

В GEMMA-III планируется значительно улучшить чувствительность установки по сравнению с предыдущими проектами. В частности, экспериментальная установка будет находиться на расстоянии около 10 м от 3 ГВт реактора КАЭС. Это позволяет оперировать гигантским потоком нейтрино - свыше $5 \cdot 10^{13}$ нейтрино на см^2 в секунду. Более того, экспериментальный зал расположен непосредственно под реактором, что

дает хорошую защиту от космического излучения, эквивалентную 50 м в.э. Схема реактора показана на Рис.1, слева.

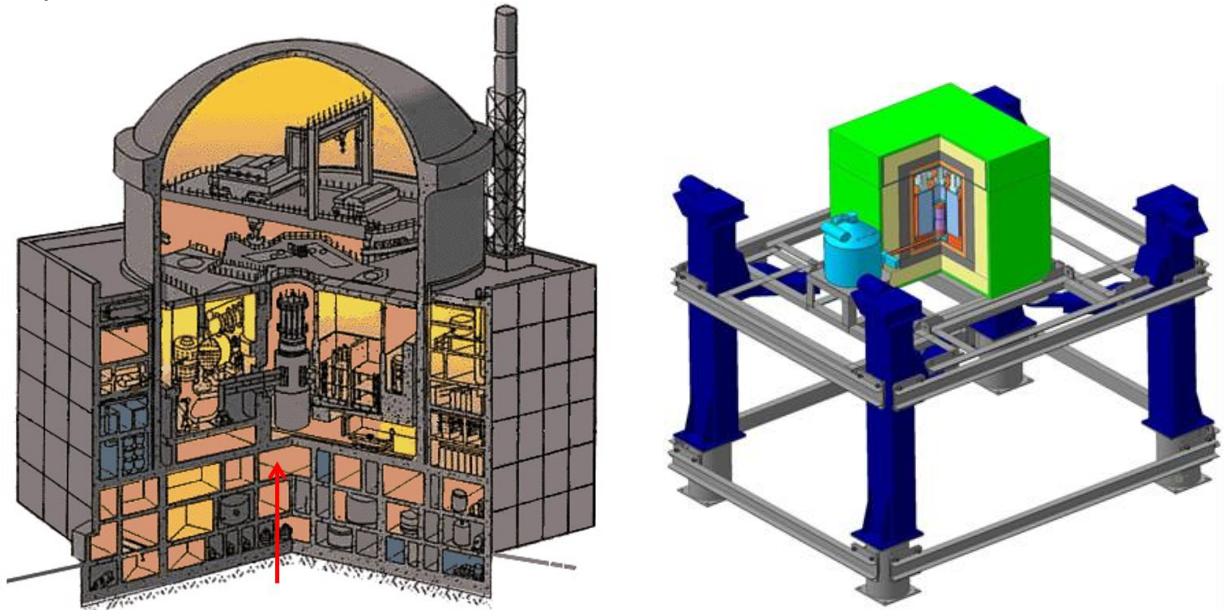


Рисунок 1. Слева: схема реактора №3 КАЭС. Стрелкой указан комната, в которой будет находиться экспериментальная установка. Справа: схема спектрометра, помещенного на подъемный механизм.

Был изготовлен специальный подъемный механизм, позволяющий передвигать спектрометр по направлению к ядру реактора. Это позволяет значительно изменять поток реакторных нейтрино, и снизить систематические ошибки, вызванные возможными нестабильностями и потоком нейтрино (Рис.1, справа).

В настоящее время исследования проводятся в рамках проекта vGEN. При этом используются 4 низкофоновых германиевых детектора созданных совместно BSI (Рига) и ОИЯИ (Дубна) для детектирования КРН. Общая масса детекторов составляет 1.6 кг. Детекторы находятся в низкофоновом U-образном криостате (Рис.2.)

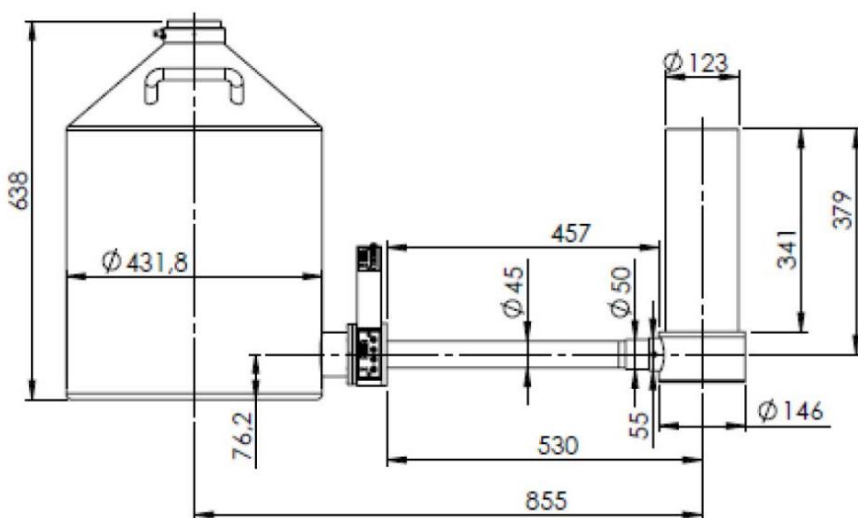


Рисунок 2. Слева: общая схема криостата vGEN с 4-мя германиевыми детекторами высокой чистоты. Справа: фотография внутренних частей, включающих в себя оправки детекторов.

Радиоактивная чистота детекторов vGEN была исследована в подземной лаборатории LSM(Модан) с использованием низкофоновой защиты из меди и свинца. Для энергетического региона (100-600) кэВ был получен индекс фона 0.66 ± 0.03 отсчет/(кг·кэВ·сут). Рис.3 демонстрирует низкоэнергетическую часть спектра одного из детекторов:

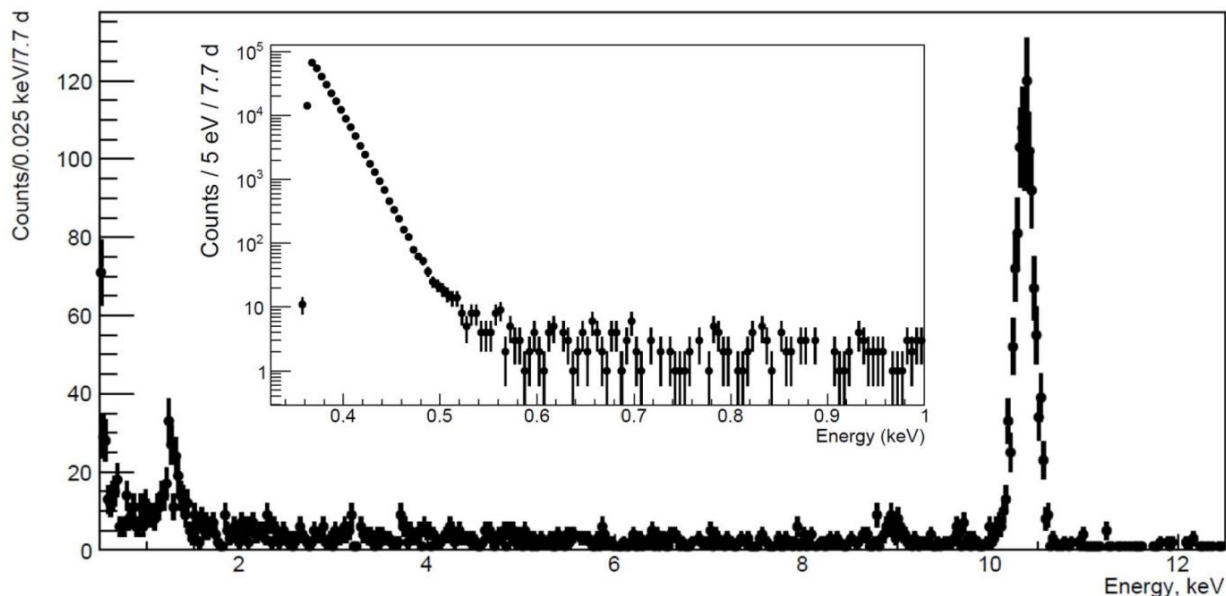


Рисунок 3. Низкоэнергетическая часть спектра детектора №4. Энергетический спектр был откалиброван с помощью космогенных линий 1.3 кэВ и 10.37 кэВ. Припороговая область в логарифмическом масштабе показана во вставленном рисунке.

В этих измерениях использовалась упрощенная схема электроники. Главный вывод из этих измерений состоял в том, что предварительные значения разрешений детекторов и достигнутый уровень фона позволяют продолжить подготовку к измерениям на КАЭС, с использованием более продвинутой схемы электроники.

После данных измерений, детекторы были перевезены в ЛЯП, ОИЯИ (Дубна). При этом используется новая схема электроники, с использованием схемы онлайн обработки сигналов. Лучшее разрешение, полученное с генератором импульсов, составило 170 эВ (FWHM). Шумовые события были дополнительно подавлены с использованием различных формировок при восстановлении сигнала и отюора по времени срабатывания. Калибровки показали, что после всех используемых отборов возможно иметь порог детектирования в 350 эВ, при этом эффективность регистрации составляла 70%. Эти параметры являются удовлетворительными для детектирования КРН. После этих измерений спектрометр был помещен в экспериментальный зал под реактором КАЭС. В настоящее время производится наладка оборудования и защиты спектрометра. В конце 2017 года планируется начать измерения.

Одновременно, мы планируем улучшить чувствительность установки с использованием новых детекторов с более низким порогом измерения и большей массой. Это улучшение установки входит в проект GEMMA-III. Последние разработки германиевых детекторов позволили значительно улучшить разрешение детекторов в низкой области измерений. Так новые детекторы, производимые CANBERRA, имеют разрешение лучше, чем 80 эВ (FWHM) при массе детектора свыше 1 кг. Это позволяет достичь порога измерений лучше, чем 200 эВ. Подобный порог измерений значительно увеличивает количество событий от нейтрино и сильно увеличивает чувствительность эксперимента.

Используя всю разработанную инфраструктуру для эксперимента vGEN, мы планируем заменить существующие детекторы на новые, от компании CANBERRA.

Планируется начать измерения с первым заказанным 1 кг детектором в начале 2018 года, после успешного тестирования в подземной лаборатории LSM. Суммарно планируется использовать 4 детектора общей массой в 5.5 кг. Детекторы должны быть изготовлены к концу 2018 года. Это позволит детектировать порядка 190 событий от КРН в день. Планируемая чувствительность к ММН составит $9 \cdot 10^{-12}$ мв после нескольких лет измерений.

Таким образом, проект GEMMA-III является продолжением предыдущих проектов GEMMA и ν GEN. На предыдущих этапах нами была продемонстрирована возможность достижения достаточно низкого уровня фона в надземной лаборатории. Ограничение на ММН полученное в эксперименте GEMMA-I является лучшим современным лабораторным результатом. Мы планируем продолжать данные исследования и получить больше знаний о вышеупомянутых параметрах нейтрино.