

Изучение свойств нейтрино с помощью низкофонового германиевого спектрометра ν GEN

Авторы из ОИЯИ: Белов В.В., Бруданин В.Б., Вольных В.П., Грубчин Л., Гуров Ю.Б., Евсенкин В.А., Евсеев С.А., Житников И.В., Зинатулина Д.Р, Иноятов А.Х., Катулина С.Л., Казарцев С.В., Киянов С.П., Кузнецов А.С., Лубашевский А.В., Медведев Д.В., Пономарев Д.В., Пушков Д.С., Саламатин А.В., Розов С.В., Розова И.Е., Сандуковский В.Г., Философов Д.В., Фомина М.В., Шахов К.В., Шевчик Е.А., Ширченко М.В., Шухватов З.Х., Якушев Е.А.

Аннотация:

Проект ν GEN направлен на исследование фундаментальных свойств нейтрино при помощи реакторных нейтрино от энергетического реактора Калининской АЭС (КАЭС). Поиск упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах вещества осуществляется в данном проекте. Этот процесс до сих пор не был обнаружен для реакторных нейтрино. В случае обнаружения, это откроет возможность поиска Новой физики через поиск нестандартных взаимодействий нейтрино и поиск стерильных нейтрино. Также это откроет возможность для проведения прикладных исследований, таких как мониторинг мощности реакторов. Экспериментальная установка ν GEN строится под реактором №3 КАЭС на расстоянии около 10 м от центра активной зоны реактора. Это позволяет оперировать рекордным потоком нейтрино более чем $5 \cdot 10^{13}$ нейтрино/(см²·сек). Специальный подъемный механизм был разработан для движения всей экспериментальной установки по направлению к активной зоне реактора. Это позволяет изменять поток антинейтрино и значительно снижать систематическую ошибку, связанную с неопределенностями в определении уровня фона. Специально разработанные низкороговые, низкофоновые германиевые детекторы используются для регистрации сигнала от нейтрино. С новыми детекторами удалось добиться разрешения в лучшем, чем 80 эВ (FWHM), что позволяет достичь порога измерений лучше, чем 250 эВ. Суммарная масса четырех используемых детекторов составляет 5.5 кг. Для уменьшения количества фоновых событий в области интереса используется специальная система из активной и пассивной защиты от радиоактивного излучения. Кроме когерентного рассеяния нейтрино в проекте осуществляется и поиск магнитного момента нейтрино. Обнаружение его будет обнаружением Новой физики за пределами Стандартной Модели и свидетельствовать Майорановской природе нейтрино. В первой фазе проекта GEMMA-I был установлен лучший в настоящее время предел на величину магнитного момента нейтрино в $< 2.9 \cdot 10^{-11}$ μ_B . В настоящей фазе планируется увеличить чувствительность к уровню $(5-9) \cdot 10^{-12}$ μ_B после нескольких лет измерений.

Изучение свойств нейтрино является 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. Когерентное упругое 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. Большой интерес к этому процессу вызван еще тем, что с помощью него можно производить поиск нестандартных взаимодействий нейтрино, стерильного нейтрино и других интересных исследований. Однако вследствие низкого сечения рассеяния и малого энерговыделения обнаружение данного эффекта является нетривиальной задачей, требующего использования низкопороговых детекторов и методов по подавлению 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.

ν GEN это эксперимент, который создается под реактором №3 КАЭС для детектирования вышеперечисленных процессов. Этот эксперимент является эволюцией наших предыдущих проектов GEMMA. 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 ν GEN 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.

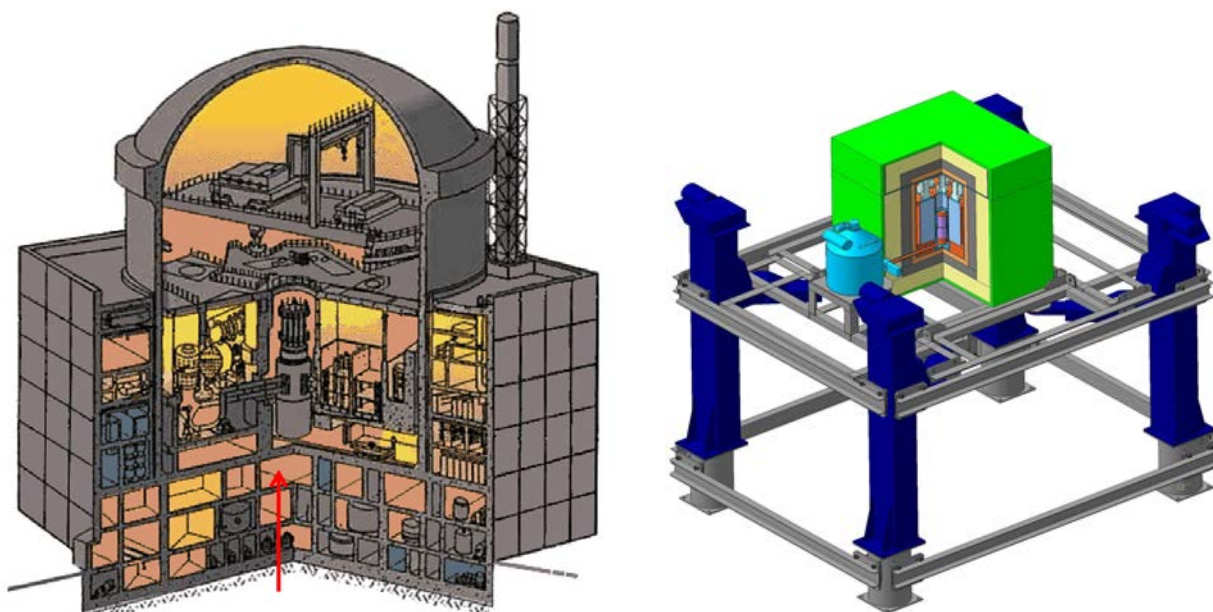


Рисунок 1. Слева: схема реактора №3 КАЭС. Стрелкой указан комната, в которой будет находиться экспериментальная установка. **Справа:** схема спектрометра, помещенного на подъемный механизм.

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).

Сигнал от нейтрино детектируется с помощью специальных низкофоновых низкопороговых германиевых детекторов, произведенных в коллаборации с MIRION (Лингольсхайм, Франция). Были произведены четыре детектора общей массой около 5.5 кг. Энергетическое разрешение одного из детекторов составило 77.99 ± 0.33 эВ (FWHM). Измерения эффективности регистрации событий показали, что эффективность регистрации событий с энергией в 200 эВ составляет примерно 75%. Что является большим шагом по сравнению с экспериментом GEMMA-I, где эффективный порог измерений составлял 2.8 кэВ. Радиоактивная чистота детекторов vGEN была исследована в подземной лаборатории LSM (Модан, Франция) и она удовлетворяет требованиям эксперимента, однако в условиях атомной станции достичь подобных значений гораздо сложнее. Для обеспечения требуемых параметров работы детекторов и уровня радиоактивного фона предприняты специальные усилия. Схема пассивной и активной защиты спектрометра показана на рисунке 2. Внутренняя часть защиты представляет собой специальный нейлон изготовленный на 3D принтере, далее идет 10 см слой меди, 8 см борированного полиэтилена, 10 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. Снаружи установлено активное мюонное вето.

Энергетический спектр полученный в первых измерениях на КАЭС показан на рисунке 3. Все наблюдаемые пики в показанном спектре появляются в результате распада космогенных изотопов и уменьшаются с течением времени. Возможно также дальнейшее снижение уровня фона с помощью использования внутреннего NaI сцинтилятора.

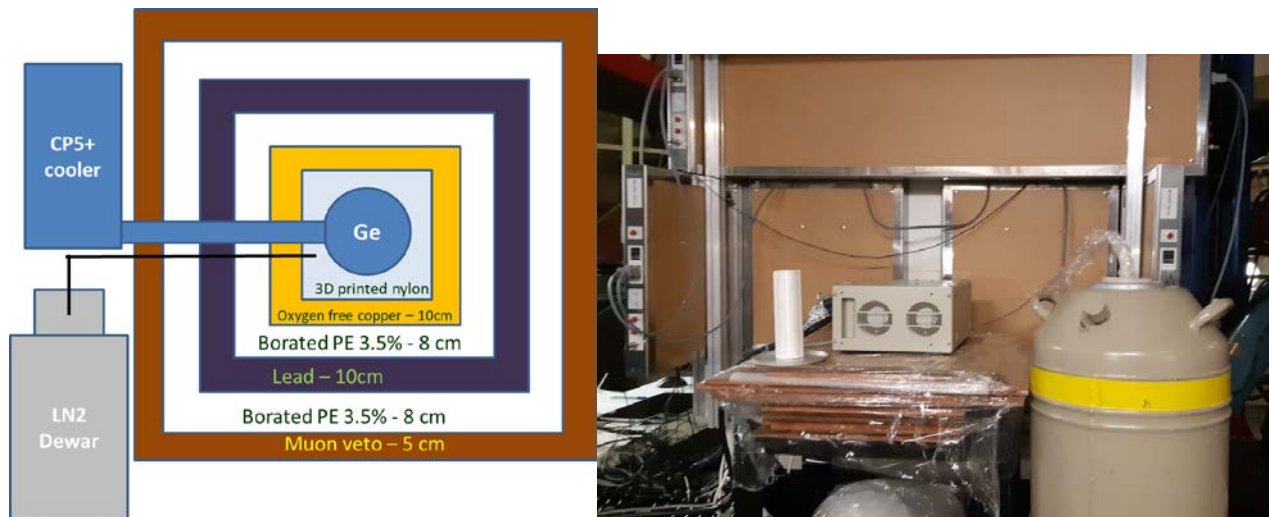


Рисунок 2. Слева: схема защиты от радиоактивного излучения используемая на КАЭС. Справа: фото экспериментальной установки на КАЭС.

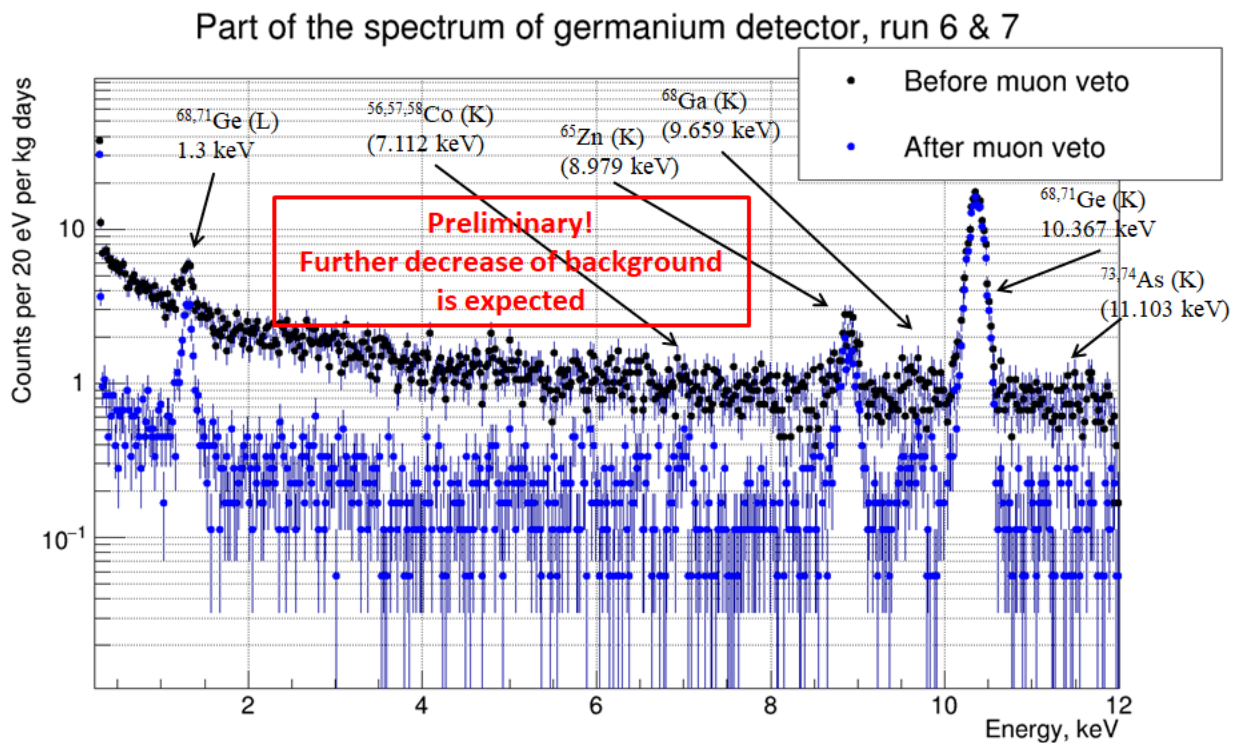


Рисунок 3. Часть энергетического спектра, полученного в первых измерениях с одним детектором на КАЭС. Дальнейшее снижение уровня фона ожидается вследствие распада космогенных изотопов и оптимизации защиты.

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