

УДК 539.123; 539.123.6

ПОИСК УПРУГОГО КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРИНО И ДРУГИХ РЕДКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ νGeN НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС

А. В. Лубашевский^{1,2}

Эксперимент νGeN направлен на исследование свойств антинейтрино с помощью энергетического реактора. Экспериментальная установка расположена под третьим блоком Калининской атомной электростанции, что позволяет оперировать гигантским потоком антинейтрино в $(3.6 - 4.4) \cdot 10^{13}$ частиц/(см²·сек), превышающим поток солнечных нейтрино на Земле почти на три порядка. Большое количество конструкционных материалов реактора, соответствующих 50 м в.э., служит хорошей защитой от космического излучения. Искомые сигналы регистрируются с помощью специально разработанного низкофонового низкорогового германиевого детектора, окруженного со всех сторон комбинированной активной и пассивной защитой от радиоактивного излучения. Сравнение данных, набранных при остановленном и работающем реакторе, не выявило существенных различий в уровне фона детектора. На основе полученных первичных данных была оценена чувствительность эксперимента к поиску упругого когерентного рассеяния нейтрино.

Ключевые слова: упругое когерентное рассеяние нейтрино, νGeN , антинейтрино.

Введение. 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

¹ ОИЯИ, Лаборатория ядерных проблем, 141980 Россия, Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6; e-mail: lubashev@jinr.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

крайне слабого взаимодействия этой частицы с веществом. Упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах вещества (УКРН) – это процесс, предсказанный в рамках Стандартной модели [1, 2]. Однако в области полной когерентности и для реакторных антинейтрино этот процесс еще никогда надежно зарегистрирован не был. Большой интерес к УКРН в настоящее время вызван еще и тем, что с помощью этого процесса можно осуществлять поиск нестандартных взаимодействий нейтрино и производить другие исследования, в том числе поиск Новой физики за пределами Стандартной модели. Магнитный момент нейтрино (ММН) – это фундаментальный параметр, исследование которого может привести к результатам, выходящим за рамки Стандартной модели. Наблюдение значения ММН выше чем $10^{-15} \mu_B$ будет свидетельствовать об обнаружении физики за пределами Стандартной модели, а также о майорановской природе нейтрино [3]. Регистрация нейтрино от реактора также имеет и прикладные значения, такие как мониторинг мощности реакторов и контроль за нераспространением ядерного оружия. Вследствие низкого сечения рассеяния и малого энерговыделения обнаружение вышеописанных эффектов является нетривиальной задачей, требующей использования низкопороговых детекторов и различных методов подавления фоновых событий. Более того, зачастую (напр., для полупроводникового детектора) только часть энергии, оставленной ядром отдачи, может быть зарегистрирована детектором из-за квенчинга (отношение ионизационных потерь к общим потерям энергий частицы) [4]. Для того чтобы зарегистрировать УКРН, необходим очень сильный источник нейтрино и использование специальных методик подавления фоновых событий. В настоящее время существует большое количество различных экспериментов, направленных на поиск УКРН [5].

Экспериментальная часть. Проект νGeN направлен на исследование фундаментальных свойств нейтрино при помощи реакторных антинейтрино от энергетического реактора Калининской АЭС (КАЭС, Удомля) [6]. Для изучения вышеперечисленных процессов на КАЭС под блоком № 3 строится эксперимент νGeN . Экспериментальная установка расположена на специальном подъемном механизме, позволяющем перемещать ее по направлению к активной зоне реактора (рис. 1) и обратно (11.1–12.2 м от центра активной зоны реактора). Это позволяет оперировать рекордным потоком нейтрино в $(3.6 - 4.4) \cdot 10^{13}$ частиц/(см²·сек). Возможность изменять поток антинейтрино также позволяет снизить систематическую ошибку, связанную с неопределенностями в оценке уровня фона детектора. Экспериментальный зал расположен непосредственно под реактором, его конструкционные материалы обеспечивают хорошую защиту от

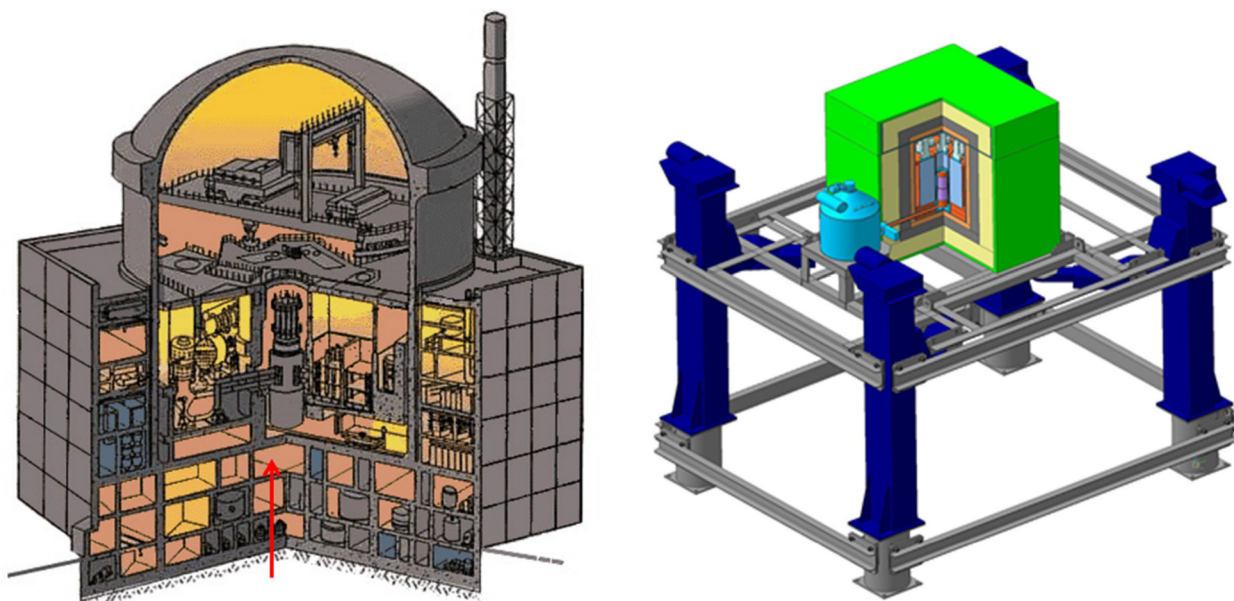


Рис. 1: Слева: схема реактора №3 КАЭС, стрелкой указана комната с экспериментальной установкой. Справа: схема спектрометра, помещенного на подземный механизм.

космического излучения (соответствует 50 м в.э.). Для уменьшения уровня фона от радиоактивного излучения окружающих установку материалов используется специальная система активной и пассивной защиты.

Внутренняя часть защиты выполнена из специального нейлона, изготовленного на 3D-принтере, далее идут слои из 10 см бескислородной меди, 8 см борированного полиэтилена, 10 см свинца и 8 см борированного полиэтилена. С внешней стороны защиты установлено активное мюонное veto, созданное из сцинтиллятора толщиной 5 см. Для снижения микровибраций и шумовых событий детектор установлен на специальную антивибрационную платформу. Она позволяет существенно улучшить энергетическое разрешение детектора и снизить порог измерений. Для уменьшения уровня радона во внутренних полостях защиты система постоянно продувается азотом. Стабильность температуры и влажности в экспериментальном помещении обеспечивается кондиционерами и постоянно контролируется. Для регистрации нейтрино за счет УКРН используется низкопороговый низкофоновый германиевый детектор массой 1.4 кг, специально разработанный в сотрудничестве с компанией MIRION TECHNOLOGIES. Детектор оснащен системой электронного охлаждения Cryo-Pulse 5 Plus [7]. Для обеспечения хорошего разрешения и снижения фоновых и шумовых событий была создана специальная си-

стема набора данных. Для дальнейшего снижения уровня шумов в электронном тракте и улучшения энергетического разрешения используются усилители с различным временем формирования сигнала. Калибровка детектора осуществляется с помощью ториевого источника, пиков от распадов космогенных изотопов в кристалле германия детектора и генератора импульсов. Энергетическое разрешение, полученное с генератором импульсов в условиях АЭС, составило 101.6(5) эВ (FWHM). В работе [6] также было продемонстрировано, что эффективность регистрации сигналов с энергией больше 250 эВ всегда остается выше 80%. Эффективность отбора сигналов, определенная по падению интенсивности космогенного пика 10.37 кэВ, составила 85.3(19)%.

Результаты и обсуждение. С 2022 года измерения в эксперименте ν GeN проводятся в верхнем положении – на расстоянии 11.1 м от центра активной зоны реактора. После исключения шумных периодов было набрано 217 и 55 кг·суток данных при работающем и остановленном реакторе, соответственно. Сравнение этих данных не выявило существенных различий в уровне и форме энергетических спектров (рис. 2).

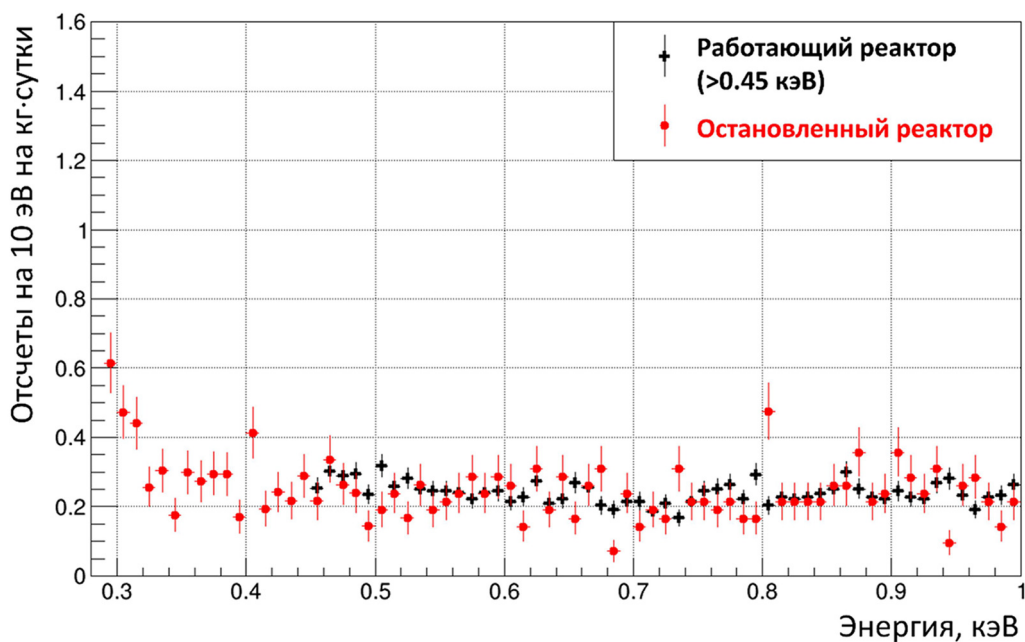


Рис. 2: Низкоэнергетическая часть спектров, набранных при работающем и остановленном реакторе (217 и 55 кг·суток, соответственно). Данные в спектре < 0.45 кэВ, набранные при работающем реакторе, временно скрыты для анализа.

Для оценки чувствительности эксперимента к поиску УКРН были взяты данные при остановленном реакторе и сгенерированные данные, представляющие собой сумму

перенормированного спектра при остановленном реакторе со статистикой, эквивалентной статистике при работающем реакторе (217 кг·суток), и искусственно внесенных ожидаемых спектров от УКРН (в зависимости от величины квенчинга). На основании этих сгенерированных спектров были рассчитаны предсказания чувствительности эксперимента в зависимости от величины квенчинга. Как видно из рис. 3, при величине квенчинга больше 0.2 возможно зарегистрировать сигнал от УКРН с достоверностью 90% (в зависимости от случайного статистического разброса событий).

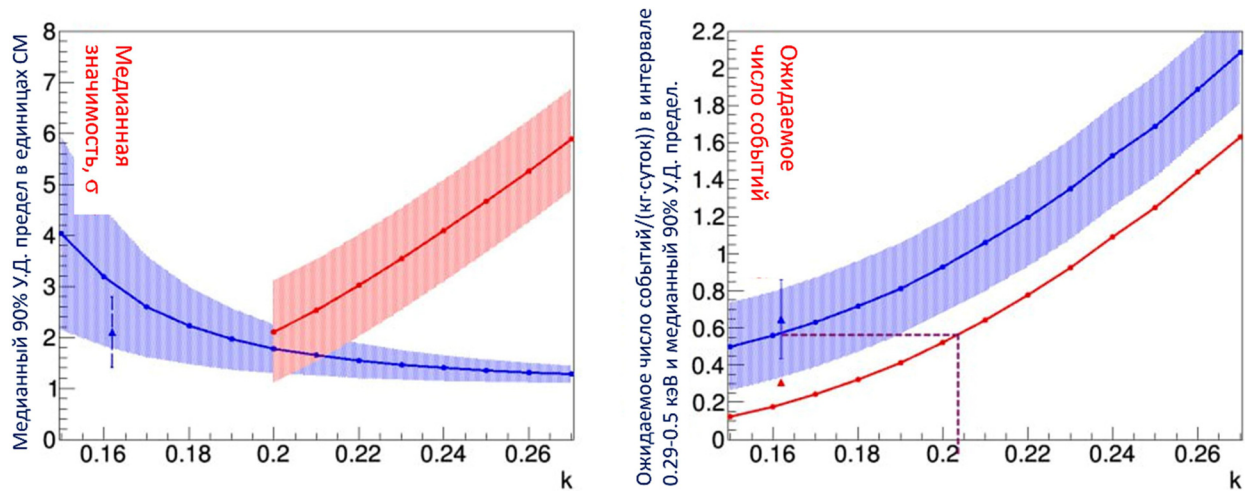


Рис. 3: Слева: ожидаемая медианная чувствительность к УКРН в единицах Стандартной модели и ее разброс в зависимости от величины квенчинга. Справа: ожидаемое число событий от УКРН и ожидаемое медианное ограничение на 90% УД.

Заключение. Созданная установка νGeN в настоящее время обладает одной из лучших в мире чувствительностью к УКРН для реакторных антинейтрино. Осуществляется поиск и других редких процессов. Всего по декабрь 2022 года было набрано 170 кг·суток данных при остановленном реакторе и около 1000 кг·суток при работающем реакторе. Набранная статистика сравнима со статистикой, набранной в эксперименте GEMMA [8] (1133.4 кг·суток ON, 280.4 кг·суток OFF). Поэтому после тщательного анализа данных νGeN ожидается существенное улучшение чувствительности к магнитному моменту нейтрино по сравнению с результатами, полученными в эксперименте GEMMA. В настоящее время набор данных в эксперименте продолжается. Планируется значительно улучшить чувствительность к обнаружению УКРН и провести модернизацию экспериментальной установки. Планируется изготовление внутреннего активного вето для снижения уровня фона в области интереса и улучшения параметров исполь-

зуемого детектора.

Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Z. Freedman, Phys. Rev. D **9**, 1389 (1974). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.9.1389>.
- [2] A. Drukier, L. Stodolsky, Phys. Rev. D **30**, 2295 (1984). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.30.2295>.
- [3] N. F. Bell, M. Gorchtein, M. J. Ramsey-Musolf, et al., Phys. Lett. B **642**, 377 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2006.09.055>.
- [4] B. J. Scholz, A. E. Chavarria, J. I. Collar, et al., Phys. Rev. D **94**, 122003 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.122003>.
- [5] M. Abdullah et al., “Coherent elastic neutrino-nucleus scattering: Terrestrial and astrophysical applications”, arXiv:2203.07361v1. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.07361>.
- [6] I. Alekseev et al. (on behalf of ν GeN collaboration), Phys. Rev. D **106**, L051101 (2022). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.L051101>.
- [7] Cryo-Pulse 5 Plus Electrically Refrigerated Cryostat, [Электронный ресурс], URL: <https://www.mirion.com/products/technologies/spectroscopy-scientific-analysis/gamma-spectroscopy/detectors/hpge-cryostats-coolers-options/cryo-pulse-5-plus-electrically-refrigerated-cryostat>, дата обращения 27.10.2023.
- [8] A. G. Beda et al. (on behalf of GEMMA collaboration), Phys. Part. Nucl. Lett. **10**, 139 (2013). <https://doi.org/10.1134/S1547477113020027>.

Поступила в редакцию 29 сентября 2023 г.

После доработки 30 октября 2023 г.

Принята к публикации 31 октября 2023 г.