

**РАДИОАКТИВНАЯ ЧАСТОТА ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО БЕЗНЕЙТРИННОМУ ДВОЙНОМУ
БЕТА-РАСПАДУ НЕОДИМА-150: ВАЖНОСТЬ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ**

Пшуков А.М., *Кокоева А.А.

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
Центр новых детекторных технологии регистрации нейтрино*

***al-aneta@mail.ru**

В статье анализируется радиоактивное загрязнение кварцевых и стеклянных фотоумножителей, которые рассматриваются как кандидаты на использование для обнаружения безнейтринного двойного бета-распада неодима. Используя специальные методы повышения эффективности регистрации и унифицированное измерительное оборудование, выявили заметные различия в уровнях изотопов ^{40}K и ^{226}Ra между образцами кварца и стекла. Это подчеркивает преимущества использования кварца перед стеклом в этих чувствительных экспериментальных условиях.

Ключевые слова: безнейтринный двойной бета распад, неодим-150, кварц, стекло, радиоактивное загрязнение, световыход, флуоресцентные свойства, кварцевые фотоумножители.

**RADIOACTIVE FREQUENCY OF PHOTOMULTIPLIERS FOR NEODYMIUM-150 NEUTRINOLESS
DOUBLE BETA DECAY EXPERIMENTS: THE IMPORTANCE OF MATERIAL CHOICE**

Pshukov A.M., Kokoeva A.A.

*Kabardino-Balkarian State University
Center for New Detector Technologies for Neutrino Registration*

The article analyzes the radioactive contamination of quartz and glass photomultipliers, which are considered as candidates for use in detecting neutrinoless double beta decay of neodymium. Using special methods to increase the efficiency of registration and unified measuring equipment, we revealed noticeable differences in the levels of isotopes ^{40}K and ^{226}Ra between quartz and glass samples. This highlights the advantages of using quartz over glass in these sensitive experimental conditions.

Keywords: neutrino-free double beta decay, neodymium-150, quartz, glass, radioactive contamination, light output, fluorescent properties, quartz photomultipliers.

Введение

Чувствительные нейтринные эксперименты [1–5], включая исследования безнейтринного двойного бета-распада, требуют использования фотоумножителей (ФЭУ) с низким уровнем собственного радиоактивного фона и максимальной спектральной чувствительностью, которая совпадает со спектром излучения сцинтиллятора, обеспечивая тем самым лучшее энергетическое разрешение. Кварцевые ФЭУ удовлетворяют этим требованиям, однако, в крупных нейтринных экспериментах с массой порядка нескольких десятков килотонн обычно применяются стеклянные ФЭУ с большой входной площадью.

Кварцевые фотоумножители играют ключевую роль в низкорadioактивных исследованиях, таких как эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Их важность обусловлена значительно меньшим уровнем радиоактивных примесей, таких как уран-238, торий-232 и особенно калий-40, по сравне-

нию со стеклянными ФЭУ. Эти элементы присутствуют в стекле и могут существенно влиять на общий радиоактивный фон, что критично для точных и чувствительных экспериментов [2, 3].

В работе проводится оценка кварцевых фотоумножителей, которые являются более предпочтительными для экспериментов с массой до одной тонны, как, например, в случае поиска безнейтринного двойного бета-распада неодима-150, чтобы определить оптимальный материал с учетом их уровня радиоактивного загрязнения.

Материалы и методы

Оборудование. Использована спектрометрическая установка МКС-01А «МУЛЬТИРАД», описанная в статье [6].

Конфигурация детектора. Конфигурация стаканов Маринелли использовалась для оптимизации геометрии обнаружения гамма-излучения, что позволяло проводить всестороннюю оценку образцов.

Калибровка. Калибровка системы выполнялась с использованием известных стандартов ^{137}Cs и ^{40}K для обеспечения точности. Проверки калибровки проводились периодически для обеспечения целостности данных измерений.

С целью повышения чувствительности спектрометра применили метод измельчения, что дало возможность повысить массу образца до 1600 гр.

Подготовку образцов проводили на планетарной мономельнице «Pulverisette 6» (производитель FRITSCH) (рис. 1).

Мономельница применима для быстрого сухого или мокрого измельчения неорганических и органических проб для анализа, контроля качества, испытания материалов и механического сплавления. Материал дробится и измельчается в размольном стакане при помощи мелющих шаров. На мелющие шары и материал в размольном стакане действуют центробежные силы, обусловленные вращением размольного стакана вокруг собственной оси и вращающимся опорным диском. Размольный стакан и опорный диск вращаются в противоположных направлениях, так что центробежные силы поочередно действуют в том же и обратном направлениях. При этом происходит процесс перекатывания мелющих шаров по внутренней кромке стакана, т. е. эффект трения, и эффект удара, когда шары ударяются о противоположную стенку размольного стакана. Например: для материала «стекло» количество – 50 г, длина грани – 4 мм, «шары» – диаметр 15 x 20 мм, время размола 15 мин. Материал стакана и шаров – Агат 250 мл, конечная крупность <50 мкм 100 %.



Рис. 1. Планетарная мономельнице «Pulverisette 6»

Анализ проб. Кварцевые и стеклянные фотоумножители были проанализированы на содержание ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Спектрометрические измерения проводились с использованием стакана Маринелли для обеспечения комплексного обнаружения гамма-лучей.

Исходные данные и процедура измерения

Время экспозиции. Время экспозиции для каждого образца было рассчитано на основе ожидаемых уровней активности и чувствительности детектора. В ходе испытаний время экспозиции в случае стекла составило 490 687 с, время экспозиции кварца, 685727 с, что обеспечивает баланс между чувствительностью и практичностью.

Сбор данных. Спектрометр был настроен на регистрацию полного спектра гамма-излучения, от 30 кэВ до 4000 кэВ, испускаемого образцами, с особым акцентом на энергетические диапазоны, соответствующие интересующим изотопам и ^{40}K .

Измерения фона. Измерения фонового излучения проводились до и после каждого измерения образца, чтобы скорректировать любые изменения радиоактивности окружающей среды.

Описание. Код образца: **кварц**, дата измерения: 2023 год, геометрия измерения: маринелли, время экспозиции, 685727 с, масса пробы: 1103 грамм.

Заключения о значениях измеряемой величины приведены в *табл. 1 и 2*.

Таблица 1

Заключение о значении измеряемой величины

Величина, ед. изм.	Заключение о значении *величины $\langle y \rangle \pm 2 * U (\langle y \rangle)$ или менее $y^>$	Границы доверительного интервала	
		$y^<$	$y^>$
^{137}Cs , Бк/кг	менее 1.19	0	1.19
^{226}Ra , Бк/кг	менее 1.01	0	1.01
^{232}Th , Бк/кг	менее 0.9	0	0.9
^{40}K , Бк/кг	менее 9.2	0	9.2

Код образца: **стекло**, дата измерения: 2024, геометрия измерения: маринелли, время экспозиции, 490687 с, масса пробы: 1539 г.

Таблица 2

Заключение о значении измеряемой величины:

Величина, ед.изм.	Заключение о значении *величины $\langle y \rangle \pm 2 * U (\langle y \rangle)$ или менее $y^>$	Границы доверительного интервала	
		$y^<$	$y^>$
^{137}Cs , Бк/кг	менее 0.58	0	0.58
^{226}Ra , Бк/кг	11.9 ± 1.8	10.1	13.7
^{232}Th , Бк/кг	менее 0.67	0	0.67
^{40}K , Бк/кг	119 ± 25	94	144

* Значение активности указанных радионуклидов находится в пределах границ доверительного интервала ($P_{\text{дов}}=0.95$).

При заполнении *табл. 1 и 2* учитывалась информация о неотрицательности значения активности и проводилось округление результатов измерения.

Обозначения, используемые в отчете:

– y – первичный результат измерения (показания СИ);

– $\langle y \rangle$ – средний результат по нескольким измерениям;

– $2 * U (\langle y \rangle)$ – расширенная ($k=2$) неопределенность измерения величин $\langle y \rangle$;

– $y^<$, $y^>$ – левая и правая границы доверительного интервала, в котором с вероятностью 95 % находится истинное значение измеряемой величины.

Анализ данных

Спектральный анализ. Собранные спектры анализировались с помощью специального программного обеспечения, которое идентифицирует пики, соответствующие конкретным радионуклидам, и рассчитывает их активность в образце.

Расчет активности. Активность радионуклидов рассчитывалась путем сравнения измеренных спектров с калиброванными и фоновыми спектрами. Удельная активность ^{40}K -составила 119 ± 25 Бк/кг, ^{226}Ra - Бк/кг 11.9 ± 1.8 для стекла и не обнаружимую на данном спектрометре для кварца.

Гарантия качества. Каждое измерение подвергалось проверке качества, включая тесты на повторяемость и перекрестную проверку с историческими данными для обеспечения надежности.

Обсуждение результатов

Измеренный модельный спектр кварца (рис. 2) отличается от спектра стекла (рис. 3). Значимое отличие наблюдается даже в области энергии 2000 до 4000 кэВ. Интегральная скорость счета для стекла в этом диапазоне 0.361 1/с (Счет 177243 имп 490687 с). в тоже время для кварца 0.33 1/с (Счет 232310 имп за 685727 с).

Таким образом даже в этом диапазоне больших энергий наблюдается существенная разница при этом скорость счета собственного фона установки 0.36 1/с (Счет 163802 имп за время 445076 с). Данное отличие может быть следствием экранировки кварцем кристалла NaI(Tl).

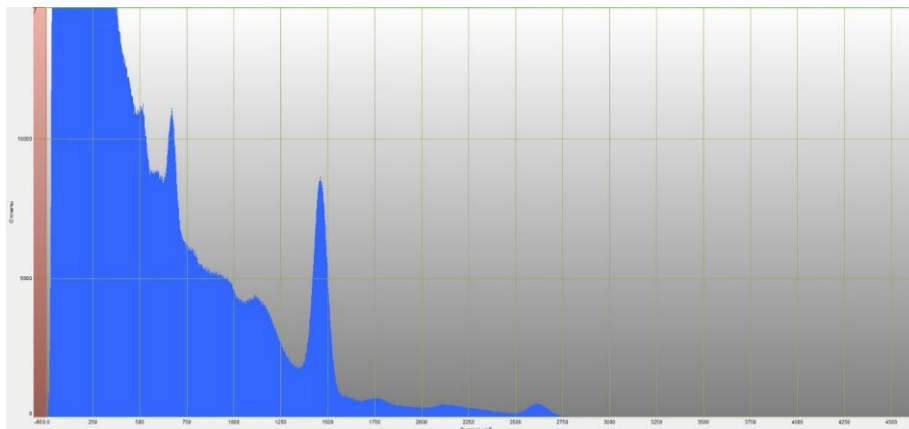


Рис. 2. Измеренный амплитудный спектр детектора NaI(Tl) с образцом кварц

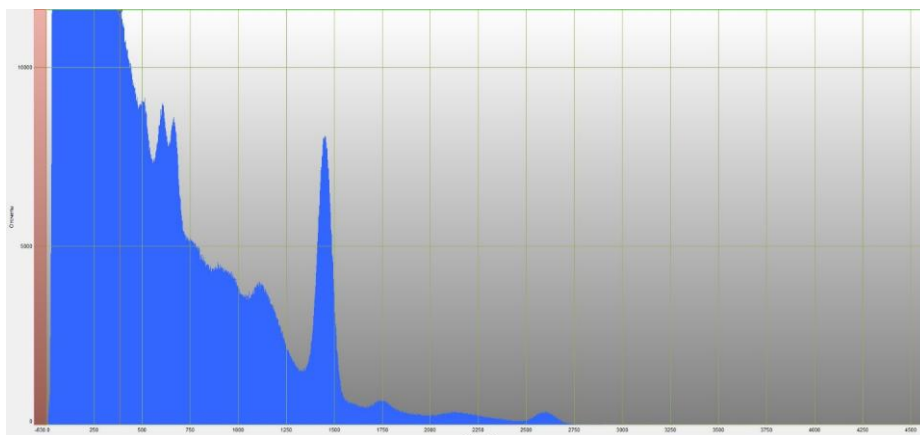


Рис. 3. Измеренный амплитудный спектр детектора NaI(Tl) с образцом стекло

Наличие радиоактивных изотопов, таких как ^{40}K и ^{226}Ra , в стеклянных фотоумножителях представляет собой потенциальный источник фоновых сигналов, которые могут существенно осложнять обнаружение интересующих событий в экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Эти фоны способны маскировать редкие сигналы или создавать ложные срабатывания, что снижает чувствительность экспериментов. В отличие от стеклянных ФЭУ, кварцевые фотоумножители

лишены подобных радиоактивных загрязнений, что делает их более подходящими для задач, требующих предельно низкого уровня фонового шума.

Учитывая критическую важность использования материалов с минимальной радиоактивностью в экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада, результаты измерений однозначно указывают на преимущества кварцевых фотоумножителей. Отсутствие значимых концентраций ^{40}K и ^{226}Ra в кварцевых ФЭУ способствует значительному снижению фонового уровня, что, в свою очередь, увеличивает вероятность обнаружения крайне редких событий распада.

Исследования, проведенные в подземных лабораториях, подтверждают, что содержание радиоактивных примесей в таких материалах может быть измерено на уровне 10^{-10} – 10^{-11} г/г. [7, 8], однако, их наличие не обнаружено, что подтверждает высокую степень чистоты кварцевых ФЭУ.

Учитывая острую потребность в низкофоновых материалах в экспериментах по безнейтринному двойному бета-распаду, на основе результатов измерений радиоактивного загрязнения рекомендуется использовать кварцевые фотоумножители. Отсутствие загрязнения ^{40}K и ^{226}Ra в кварце обеспечивает более низкий фон, увеличивая вероятность обнаружения редких событий распада.

Заключение

Использование кварцевых фотоумножителей, обладающих существенно более низким уровнем собственного радиоактивного фона, приводит к значительному снижению количества фоновых событий, что существенно улучшает точность и чувствительность экспериментов. Более того, кварцевые ФЭУ демонстрируют высокую спектральную совместимость с органическими сцинтилляторами, чье излучение лежит в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, что обеспечивает высокоэффективную регистрацию сигналов. Это делает кварцевые фотоумножители наиболее предпочтительным выбором для низкофоновых нейтринных экспериментов.

Будущие экспериментальные установки с детекторами массой в несколько тонн, вероятно, должны ориентироваться на использование кварцевых фотоумножителей, что позволит оптимизировать точность и надёжность получаемых данных, а также повысить вероятность регистрации редких физических событий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, мнемокод FZZR-2022-0004.

Библиография

1. Wurm M., Bick, D., Enqvist, T., Hellgartner, D., Kaiser, M., Loo, K., Lorenz, S., Meloni, M., Meyer, M., Möllenberg, R., Oberauer, L., Soiron, M., Smirnov, M., Trzaska, W., & Wonsak, B. Low-energy Neutrino Astronomy in LENA // *Phys. Procedia*. 2015. N. 61. P. 376–383.
2. Барабанов И.Р., Новикова Г.Я., Синев В.В., Янович Е.А., Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН № 1228, Москва. 2009. С. 19.
3. Kai Loo Extending Physics Potential of Large Liquid Scintillator Neutrino Detectors // Department of Physics University of Jyväskylä Research Report. 2016. N 14. P. 1–213.
4. Пшуков А.М., Умеров Ш.И. Жидкий сцинтиллятор на основе синтина. Препринт ИЯИ РАН. № 1442, Москва 2019. С. 14.
5. Ana F.P., Baib J.Z., Balantekin A. B., Bandd H. R., Beavise D., Beriguetee W., Bishaie M. The Detector System of the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment // *Physics*. 2016. P. 1–52.
6. Шагин С.И., Пшуков А.М., Кокоева А.А., Блиева О.З. Изучение радиоактивности вод горных рек Кабардино-Балкарской республики с использованием детектора NaI в низкофоновой защите // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2024. № 2. С. 113–122.
7. Пшуков А.М. О возможности применения низкофонового германиевого полупроводникового гамма-детектора для подбора низкофоновых конструкционных материалов применяемых в современных больших подземных детекторах нейтрино // *Известия КБГУ*. 2022. Т. XII, № 2. С. 23–31.
8. Arpesella C., Back H.O., Balata M., Beau T., Bellini G., Benziger J. Measurements of extremely low radioactivity levels in BOREXINO // *Astroparticle Physics*. 2002. N 18. P. 1–25.