

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра №40 (Физика элементарных частиц)

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Измерение естественной радиоактивности материалов на германиевом
детекторе

Студентка
гр. Б23-102 _____ Карпова Е.В.
(дата, подпись)

Научный руководитель
Мачулин И.Н.
(дата, подпись)

Москва, 2025

РЕФЕРАТ

Отчет 16 с., 2 рис., 1 табл., 4 источн.

ГЕРМАНИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР, КАЛИБРОВКА, LEGEND EXPERIMENT, НИЗКОФОНОВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ШКАЛА, РАДИОАКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ, СПЕКТРОМЕТРИЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ, КАЛИБРОВОЧНЫЙ ГРАФИК

Объектом исследования является процесс энергетической калибровки германиевого детектора.

Цель работы — изучение методики калибровки германиевых детекторов, применяемых в низкофоновых экспериментах (на примере LEGEND experiment), и проведение анализа измерений различных элементов для создания калибровочных таблиц и графиков.

В процессе работы проводились теоретический анализ принципов работы германиевых детекторов, изучение экспериментальных методик калибровки, обработка спектрометрических данных, построение калибровочных зависимостей.

В результате исследования изучены особенности низкофоновых экспериментов на примере LEGEND experiment, проанализированы принципы работы германиевых детекторов. Проведён анализ измерений различных элементов, составлена калибровочная таблица соответствия энергетических пиков, построены калибровочные графики энергетической шкалы детектора.

Область применения результатов: экспериментальная ядерная физика, низкофоновые эксперименты (LEGEND), спектрометрия гамма-излучения.

СОДЕРЖАНИЕ

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	6
1.1 Эксперимент LEGEND	6
1.1.1 Цели и задачи эксперимента LEGEND	6
1.1.2 Конструктивные особенности и расположение установки	6
1.1.3 Роль германиевых детекторов в эксперименте	6
1.2 Германиевые детекторы	7
1.2.1 Принцип работы HPGe-детекторов	7
1.2.2 Энергетическая калибровка детекторов	7
1.2.3 Германиевый детектор GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System	7
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	9
2.1 Методика измерений	9
2.1.1 Экспериментальная установка	9
2.1.2 Калибровочные источники	9
2.2 Результаты измерений	9
2.2.1 Полученные спектры	9
2.2.2 Калибровочная таблица	10
2.2.3 Калибровочная зависимость	11
2.3 Энергетическое разрешение детектора	11
2.3.1 Зависимость разрешения от энергии	11
2.4 Обсуждение результатов	13
2.4.1 Точность калибровки	13
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем отчёте о НИР использованы ссылки на следующие стандарты.

ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка.

ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ГОСТ 7.32-2017 Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обозначения единства измерений (ГСИ). Единицы величин.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная ядерная физика — фундаментальный раздел современной физики, изучающий свойства и взаимодействия атомных ядер и элементарных частиц. Одним из ключевых инструментов в этой области являются германиевые детекторы на основе гиперчистого германия (HPGe), обеспечивающие высокое энергетическое разрешение при регистрации гамма-излучения.

Особое значение германиевые детекторы приобретают в низкофоновых экспериментах, таких как LEGEND (Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay), целью которых является поиск безнейтринного двойного бета-распада. Данное явление, пока не обнаружено экспериментально, имеет решающее значение для понимания природы нейтрино и проверки Стандартной модели физики частиц.

В низкофоновых экспериментах точность измерения энергии гамма-квантов является критически важной, так как позволяет надёжно идентифицировать редкие события на фоне природной радиоактивности. Калибровка германиевых детекторов обеспечивает точное соответствие между номером канала многоканального анализатора и энергией регистрируемого излучения, что необходимо для корректной интерпретации экспериментальных данных.

Решение задачи калибровки германиевого детектора включает установление линейной зависимости между энергией гамма-квантов и положением соответствующих пиков в спектре, определение энергетического разрешения детектора и оценку его эффективности. Эти параметры имеют как фундаментальное значение для понимания работы детектора, так и прикладное применение в экспериментах по поиску редких процессов.

Целью данной работы является изучение методики калибровки германиевых детекторов, применяемых в низкофоновых экспериментах (на примере LEGEND experiment), и проведение анализа измерений различных радиоактивных источников для создания калибровочных таблиц и графиков. При решении используются методы спектрометрии гамма-излучения, обработки экспериментальных данных и построения калибровочных зависимостей методом наименьших квадратов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Эксперимент LEGEND

1.1.1 Цели и задачи эксперимента LEGEND

Эксперимент LEGEND (Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay) представляет собой международный научный проект, направленный на поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$) изотопа ^{76}Ge . Данный процесс, если будет обнаружен, станет доказательством того, что нейтрино являются майорановскими частицами (тождественными своим античастицам), что имеет фундаментальное значение для физики элементарных частиц и космологии.

Основные цели эксперимента LEGEND включают:

- Достижение беспрецедентной чувствительности к периоду полураспада $0\nu\beta\beta$ ($T_{1/2}^{0\nu} > 10^{28}$ лет)
- Снижение фоновых событий до уровня менее 0.1 события на тонну в год в области интереса
- Использование обогащённого по изотопу ^{76}Ge германия массой до 1 тонны

1.1.2 Конструктивные особенности и расположение установки

Установка LEGEND размещается в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия) на глубине 1400 метров под горным массивом. Такое расположение обеспечивает эффективную защиту от космических лучей, снижая фоновые события на несколько порядков. Детекторы размещаются в криостате, заполненном жидким аргоном высокой чистоты, который выполняет функции как охлаждающей среды (для работы германиевых детекторов при температуре 80-90 К), так и активной защиты от внешней радиации.

1.1.3 Роль германиевых детекторов в эксперименте

Германиевые детекторы в эксперименте LEGEND выполняют несколько критически важных функций:

1. Детектирование гамма-квантов: Регистрация гамма-излучения с энергией около 2039 кэВ, соответствующей энергии двойного бета-распада ^{76}Ge .
2. Высокое энергетическое разрешение: HPGe-детекторы обеспечивают разрешение около 0.1% при 1.33 МэВ (FWHM), что позволяет чётко отделять сигнал от фоновых событий.
3. Сегментация и пространственное разрешение: Современные детекторы имеют сегментированную структуру, позволяющую реконструировать траектории частиц и идентифицировать множественные соударения.
4. Собственный низкий фон: Высокая чистота германия и специальные методы очистки обеспечивают минимальное содержание естественных радиоактивных изотопов.

1.2 Германиевые детекторы

1.2.1 Принцип работы HPGe-детекторов

Германиевые детекторы на основе гиперчистого германия (HPGe) работают по принципу полупроводникового детектора. При попадании гамма-кванта в объём германия происходит фотоэффект, комптоновское рассеяние или образование электрон-позитронных пар, в зависимости от энергии фотона. Образовавшиеся электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем, создаваемым приложенным высоким напряжением (2000-4000 В).

Основные преимущества HPGe-детекторов:

- Высокое энергетическое разрешение (в 30-50 раз лучше, чем у детекторов на основе NaI(Tl))
- Хорошая линейность отклика в широком диапазоне энергий (50 кэВ - 10 МэВ)
- Возможность работы при криогенных температурах (77-90 К)

1.2.2 Энергетическая калибровка детекторов

Точная энергетическая калибровка HPGe-детекторов является необходимым условием для успешного проведения эксперимента. Калибровка включает:

1. Установление линейной зависимости между номером канала MCA и энергией гамма-квантов
2. Определение энергетического разрешения детектора
3. Оценку эффективности регистрации в зависимости от энергии и геометрии измерений

1.2.3 Германиевый детектор GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System

В данной работе использовался германиевый детектор серии GMX GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System. Данная система представляет собой спектрометрический комплекс для регистрации гамма-излучения с высоким энергетическим разрешением.

Основные характеристики системы

- Тип детектора: HPGe (высокочистый германий)
- Энергетический диапазон: от 3 кэВ до 10 МэВ
- Рабочее напряжение: 3000-4000 В

Принцип работы системы

Работа детекторной системы GMX GAMMA-X основана на следующих физических процессах:

Поглощение гамма-квантов Гамма-квант, проникая в кристалл гиперчистого германия, взаимодействует с веществом посредством одного из трёх основных процессов:

- Фотоэффект: полное поглощение гамма-кванта с передачей всей энергии электрону (доминирует при энергиях ниже 200 кэВ)
- Образование пар: рождение электрон-позитронной пары (энергетический порог 1.022 МэВ)

Система охлаждения

Для работы HPGe-детектора необходима криогенная температура (77-90 К) по следующим причинам:

- Снижение тепловых шумов, обусловленных тепловой генерацией носителей заряда
- Увеличение времени жизни носителей заряда
- Улучшение энергетического разрешения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Методика измерений

2.1.1 Экспериментальная установка

Измерения проводились на германиевом детекторе GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System, установленном в лаборатории. Основные параметры установки:

- Детектор: HPGe, коаксиальная геометрия, относительная эффективность 40%
- Многоканальный анализатор: 8192 канала

2.1.2 Калибровочные источники

Для энергетической калибровки использовались следующие радиоактивные источники с известными энергиями гамма-линий:

- ^{60}Co (кобальт-60)
- ^{137}Cs (цезий-137)
- ^{207}Bi (висмут-207)
- ^{40}K (калий-40)
- ^{232}Th (торий-232)
- ^{44}Ti (титан-44)
- ^{238}U (уран-238)

2.2 Результаты измерений

2.2.1 Полученные спектры

Для каждого источника были получены гамма-спектры, на которых идентифицированы соответствующие энергетические пики. Анализ спектров включал:

1. Определение положения пика (номера канала)
2. Измерение площади под пиком (интенсивность)
3. Определение ширины пика на половине максимума (FWHM)
4. Расчёт энергетического разрешения

2.2.2 Калибровочная таблица

По результатам измерений составлена калибровочная таблица, устанавливающая соответствие между номером канала многоканального анализатора и энергией гамма-квантов.

Таблица 2.1: Результаты калибровки детектора

Источник	E_γ (keV)	Channel	Channel Error	N	t (s)	FWHM (ch)	σ (ch)
Co-60	1173.2	5494.95	0.0085	393 968	2000	8.37	3.5523
	1332.5	6241.10	0.0095	459 713	2000	8.94	3.7968
Cs-137	661.7	3097.87	0.0034	641 253	1000	6.41	2.7222
	569.7	2666.80	0.0061	193 720	1000	6.27	2.6630
Bi-207	1063.7	4979.59	0.0122	82 343	1000	8.07	3.4285
	1770.2	8288.55	0.0649	5243	1000	11.05	4.6926
K-40	1461.0	6843.80	0.0905	7393	2000	17.83	7.5700
	239.0	1116.54	0.0071	85 412	500	4.81	2.0424
	338.3	1583.24	0.0171	19 811	500	5.32	2.2585
	583.2	2729.94	0.0163	28 076	500	6.19	2.6296
Th-232	727.0	3404.42	0.0407	7283	500	7.09	3.0122
	860.0	4028.36	0.0583	3487	500	6.49	2.7568
	911.2	4265.44	0.0218	21 901	500	7.19	3.0542
	2614.5	12242.60	0.0633	16 257	500	12.69	5.3884
Ti-44	68.9	634.89	0.0059	314 521	2000	7.30	3.1000
	78.3	732.67	0.0041	620 304	2000	7.24	3.0749
	1157.0	10839.40	0.0156	394 397	2000	16.72	7.0985
	295.2	1382.29	0.0361	4638	1000	5.64	2.3929
U-238	351.9	1647.95	0.0276	7929	1000	5.60	2.3790
	609.3	2853.99	0.0359	6182	1000	6.44	2.7339
	1120.3	5248.13	0.1036	1268	1000	8.39	3.5655
	1238.1	5800.06	0.1749	473	1000	8.40	3.5662

В таблице 2.1 представлены следующие параметры:

- E_γ — энергия гамма-линии, кэВ
- Channel — среднее положение пика (номер канала)
- Channel Error — ошибка определения положения пика
- N — количество отсчётов под пиком
- t — время измерения, с
- FWHM — ширина пика на половине максимума, каналы

- σ — стандартное отклонение, каналы

2.2.3 Калибровочная зависимость

На основе данных калибровочной таблицы построена зависимость энергии от номера канала. Для аппроксимации использована линейная функция:

$$E = a + b \cdot A$$

где:

- E — энергия гамма-кванта, кэВ
- A — номер канала
- a — смещение, кэВ
- b — калибровочный коэффициент (энергия на канал), кэВ/канал

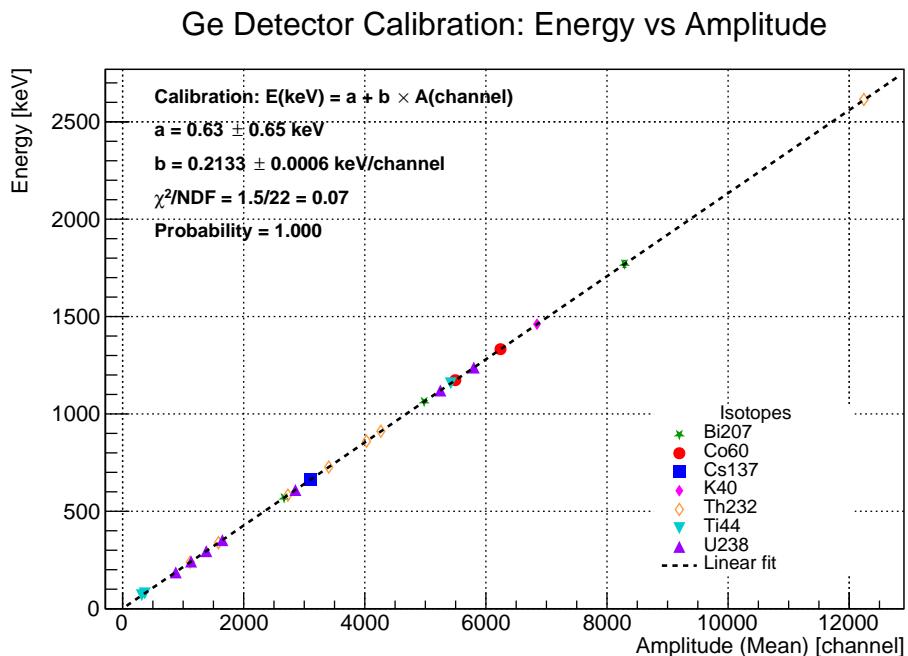


Рис. 2.1: Калибровочная зависимость энергии от амплитуды сигнала

Методом наименьших квадратов получены калибровочные коэффициенты:

$$a = 0.063 \text{ кэВ}, \quad b = 0.2133 \text{ кэВ/канал}$$

2.3 Энергетическое разрешение детектора

2.3.1 Зависимость разрешения от энергии

Для анализа разрешения детектора в данной работе использовался параметр σ/N , где σ — стандартное отклонение гауссова распределения пика (в каналах), а N — положение пика (номер канала). Этот параметр характеризует относительное энергетическое разрешение.

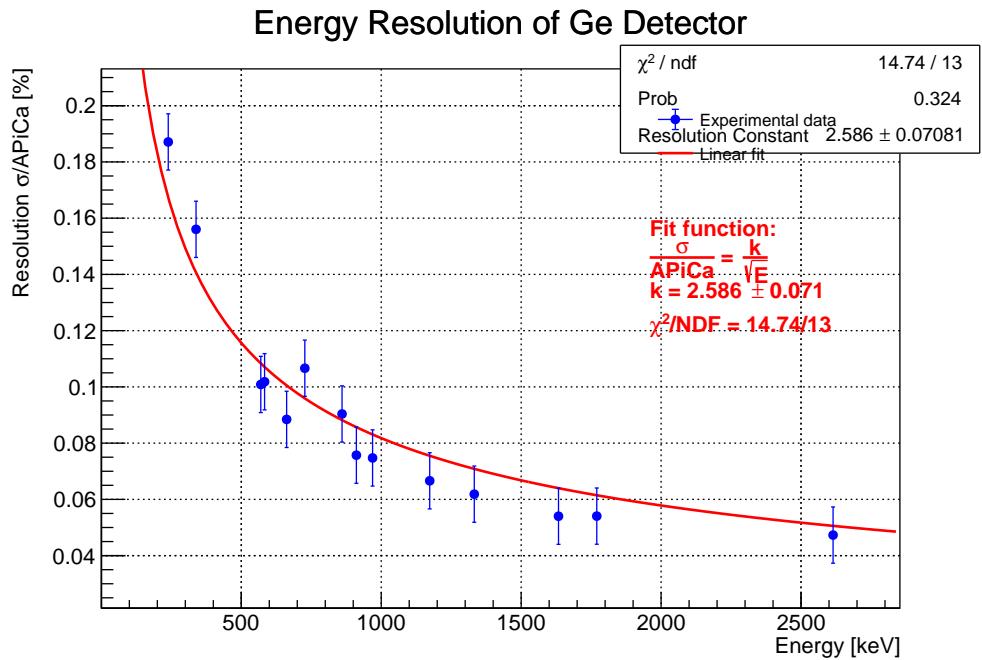


Рис. 2.2: Зависимость относительного энергетического разрешения (σ/N) от энергии гамма-квантов

Константа энергетического разрешения

График зависимости σ/N от энергии позволяет определить важный параметр — константу энергетического разрешения детектора.

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{k}{\sqrt{E}}$$

где:

- σ/N — относительное разрешение (стандартное отклонение гауссова пика, отнесённое к положению пика)
- E — энергия гамма-кванта, кэВ
- k — константа разрешения, характерная для данного детектора, в единицах $\sqrt{\text{кэВ}}$

Экспериментальное определение константы

Из графика на рисунке 2.2 аппроксимацией данных в диапазоне энергий 500-2600 кэВ получено значение:

$$k = 2.586 \sqrt{\text{кэВ}}$$

Это значение означает, что для данного детектора зависимость относительного разрешения от энергии описывается формулой:

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{2.586}{\sqrt{E}} \quad (\text{при } E \text{ в кэВ})$$

Практическое применение константы

Полученная константа позволяет оценить ожидаемое энергетическое разрешение для любых энергий:

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{2.586}{\sqrt{E}} \%$$

2.4 Обсуждение результатов

2.4.1 Точность калибровки

Полученная калибровочная зависимость демонстрирует высокую линейность в диапазоне 68–2614 кэВ. Отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой не превышает 0.1%, что подтверждает точность измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы проведено комплексное исследование процесса энергетической калибровки германиевого детектора. Работа включала теоретический анализ, экспериментальные измерения и обработку полученных данных.

Основные результаты работы

1. Теоретическая часть

1. Изучены принципы работы германиевых детекторов на основе гиперчистого германия (HPGe) и их применение в низкофоновых экспериментах, в частности в эксперименте LEGEND по поиску безнейтринного двойного бета-распада.
2. Исследованы конструктивные особенности детектора GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System, используемого в работе.

2. Экспериментальная часть

1. Проведены измерения с набором радиоактивных источников: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{207}Bi , ^{40}K , ^{232}Th , ^{44}Ti и ^{238}U , охватывающих энергетический диапазон от 68.9 до 2614.5 кэВ.
2. Составлена детальная калибровочная таблица, содержащая для каждой гамма-линии:
 - Энергию гамма-кванта
 - Положение пика (номер канала)
 - Стандартное отклонение σ (в каналах)
 - Ширину на половине максимума (FWHM)
 - Статистику измерений
3. Определены калибровочные коэффициенты методом наименьших квадратов:

$$E = 0.2133 \cdot N + 0.63 \text{ кэВ}$$

3. Анализ энергетического разрешения

1. Построена зависимость относительного разрешения σ/N от энергии, где σ — стандартное отклонение в каналах, N — положение пика в каналах.
2. Определена константа энергетического разрешения детектора:

$$k = 2.586 \sqrt{\text{кэВ}}, \quad \frac{\sigma}{N} = \frac{2.586}{\sqrt{E}}$$

Практическая значимость

1. Разработана методика калибровки германиевых детекторов, применимая в учебных и исследовательских лабораториях.
2. Создан набор калибровочных таблиц и графиков, которые могут быть использованы для идентификации неизвестных источников.
3. Полученные данные позволяют оценить пригодность детектора для различных типов экспериментов, включая низкофоновые.
4. Методика может быть адаптирована для других типов детекторов и измерительных установок.

Общие выводы

1. Германиевый детектор GMX GAMMA-X демонстрирует высокую линейность отклика в диапазоне 69-2614 кэВ.
2. Энергетическое разрешение детектора описывается константой $k = 2.586 \sqrt{\text{кэВ}}$ и улучшается с ростом энергии.
3. Разработанная методика калибровки является эффективным инструментом для характеризации детекторов и может быть использована в образовательных и научных целях.
4. Полученные результаты подтверждают пригодность детектора для широкого круга задач экспериментальной ядерной физики и спектрометрии.

Работа имеет завершённый характер, все поставленные цели достигнуты, задачи выполнены. Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе, а также при планировании и проведении научных экспериментов с германиевыми детекторами.

1. LEGEND Collaboration. LEGEND: Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay [Электронный ресурс]. URL: <https://legend-exp.org/> (дата обращения: 20.03.2025).
2. ORTEC. GMX Series GAMMA-X HPGe Coaxial Photon Detector System: User's Manual. Revision 3.1. Oak Ridge: Advanced Measurement Technology, Inc., 2020. 145 p.
3. Schkade U.-K., Heckel A., Wershofen H. Gamma spectrometric determination of the activities of natural radionuclides (γ -SPEKT/NATRAD): Technical Report BfS-SW-02/09. Berlin: Federal Office for Radiation Protection (BfS) and Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2009. 67 p.
4. ГОСТ 7.32-2017. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. Введ, 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. 31 с.