

**ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 53.082.79 + 539.1.074.3 + 539.1.075

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ
ДЕТЕКТОРОВ**

© 2024 г. И. С. Александров ^{a,b}, А. В. Лукьяшин ^{a,b},
А. В. Хромов ^a, А. В. Шакиров ^{a,*}

^a *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

^b *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30*

^c *МИРЭА – Российский технологический университет
Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78*

* e-mail: shalexeu91@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2024 г.

После доработки 29.06.2024 г.

Принята к публикации 27.07.2024 г.

Описана лабораторная экспериментальная установка на основе сцинтилляционных детекторов, которая используется в учебном процессе в НИЯУ МИФИ. Установка предназначена для изучения методов исследования характеристик сцинтилляторов, а также работы кремниевого фотоэлектронного умножителя. Показаны результаты измерения спектров от образцовых источников гамма-излучения с использованием различных сцинтилляторов, проведена калибровка и дана оценка энергетического разрешения детекторов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время благодаря прогрессу в области создания новых материалов и фотосенсоров сцинтилляционный метод остается одним из самых доступных для детектирования и спектроскопии широкого спектра излучений. Сцинтилляционные детекторы применяются в современных экспериментах в физике элементарных частиц, астрофизике и

космофизике. Кроме фундаментальных исследований, детекторы данного класса широко востребованы для решения актуальных прикладных задач в промышленности, геологии, медицине и т.д.

Принцип работы сцинтилляционного детектора состоит в следующем: прохождение заряженной частицы через вещество приводит к появлению возбужденных атомов и молекул. При переходе из возбужденного состояния в основное атомы (молекулы) испускают фотоны с длиной волны в диапазоне видимого, ультрафиолетового или инфракрасного излучения. Этот механизм называется сцинтилляцией. Фотоны, в свою очередь, регистрируются при помощи светочувствительных устройств: вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), полупроводниковых фотодиодов или микроканальных пластин (МКП). Нейтральные же частицы (гамма-кванты, нейтроны и нейтрино) регистрируются по вторичным заряженным частицам (электронам, позитронам, протонам и ядрам отдачи, осколкам деления), образующимся при взаимодействии нейтральных частиц с атомами сцинтиллятора.

Ниже перечислены основные характеристики, используемые для выбора сцинтилляторов.

1. Удельный световой выход – количество испускаемых фотонов на единицу поглощенной энергии. Чем больше световой выход – тем выше эффективность регистрации детектора.

2. Время высвечивания – это время, в течение которого интенсивность сцинтилляции падает в e раз. Чем меньше время высвечивания – тем выше быстродействие детектора.

3. Длина волны в максимуме излучения. Чем сильнее спектр излучения перекрывается со спектральной чувствительностью используемого фотоприемника – тем выше эффективность регистрации.

4. Показатель преломления. Чем ближе показатель преломления сцинтиллятора к показателю преломления входного окна фотоприемника, тем выше эффективность регистрации.

5. Плотность. Чем выше плотность сцинтиллятора, тем больше энергии теряется частицей в результате взаимодействия, что приводит к большему полному числу регистрируемых фотонов и повышению эффективности регистрации.

6. Гигроскопичность. Гигроскопичный сцинтиллятор приходится заключать в герметичную оболочку, что повышает порог регистрации.

Сцинтилляторы делятся на неорганические и органические. Неорганические сцинтилляторы, как правило, имеют высокий световой выход, но относительно большое время высвечивания. Органические сцинтилляторы обычно быстрее (время высвечивания $\tau \sim 10^{-9}$ с), но обладают меньшим световым выходом.

Выбор сцинтиллятора определяется конкретной решаемой задачей. Например, высокий атомный номер и высокая плотность неорганических сцинтилляторов делает их востребованными для гамма-спектроскопии, тогда как органические сцинтилляторы часто предпочтительнее использовать для проведения временных измерений, бета-спектроскопии и обнаружения быстрых нейтронов (из-за содержания в них водорода).

В данной работе исследуются образцы цилиндрической формы с габаритными размерами $\text{Ø}10 \times 10 \text{ мм}^2$ наиболее современных неорганических сцинтилляторов (LYSO, LaBr₃, GAGG), применяемых в промышленности, медицине и физике элементарных частиц.

1. LYSO (Ce) – ортосиликат лютеция-иттрия, легированный церием (Lu₂SiO₅: Ce). Это относительно новый сцинтилляционный кристалл с высокой плотностью и световыходом, коротким временем затухания и хорошими характеристиками радиационной стойкости. Благодаря своим характеристикам данный сцинтиллятор используется в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), каротаже скважин, гамма-спектрометрии, физике высоких энергий. Отличительной особенностью сцинтиллятора LYSO в сравнении с кристаллами NaI(Tl) и BGO является существенно меньший температурный коэффициент светового выхода (0.28 % на 1⁰C), что важно при использовании в гамма-спектрометрах, работающих в разных условиях окружающей среды. Кроме монокристаллов, современные технологии позволяют производить пиксельные матрицы кристаллов LYSO с размерами пикселя более 0.8 мм. Основным недостатком кристаллов LYSO – высокая собственная радиоактивность, обусловленная наличием бета-активного изотопа Lu-176.

2. LaBr₃(Ce). Галогениды лантана, легированные церием – новая группа сцинтилляционных кристаллов, разработанная в начале 2000-х годов. При световыходе, превышающем световыход сцинтиллятора NaI(Tl), данные кристаллы обладают гораздо более высоким энергетическим разрешением и коротким временем высвечивания, что привлекает к ним большой интерес со стороны производителей гамма-спектрометрического оборудования. Однако трудности, связанные с характерным радиоактивным загрязнением месторождений лантаноидов и сильной анизотропией температурного коэффициента линейного расширения, приводят к технологической сложности и высокой стоимости изготовления данных сцинтилляторов. На базе кристаллов LaBr₃(Ce) производятся сцинтилляционные блоки детектирования, обладающие уникальными свойствами для класса сцинтилляционных детекторов. Основным недостатком кристалла является его гигроскопичность.

3. GAGG(Ce) – монокристаллы $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (галлий-гадолиниево-алюминиевый гранат, легированный церием) – перспективны для использования в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), рентгеновской компьютерной томографии и других визуализационных методах диагностики. Благодаря высокому выходу фотонов (порядка 30000–60000 фотонов/МэВ) и пику высвечивания около 520 нм этот материал хорошо подходит для считывания кремниевыми фотоумножителями. Сцинтилляторы GAGG(Ce) получили широкое распространение благодаря сочетанию таких свойств, как отсутствие гигроскопичности и высокая радиационная стойкость. Кроме этого, производители могут варьировать характеристики данных сцинтилляторов, предлагая образцы с более коротким временем затухания или более высоким световым выходом в зависимости от области применения. Кроме монокристаллов, данные сцинтилляторы могут производиться в виде пиксельных матриц с размерами пикселя более примерно 1 мм.

В табл. 1 приведены основные характеристики используемых в данной работе сцинтилляторов.

Таблица 1. Свойства сцинтилляторов [1–3]

Сцинтиллятор	LY , фотон/кэВ	τ , нс	λ_{\max} , нм	$n(\lambda_{\max})$	ρ , г/см ³	Н
LaBr ₃ (Ce)	63	16	380	1.9	5.08	да
GAGG(Ce)	56	50	520	1.91	6.6	нет
LYSO (Lu ₂ SiO ₅ : Ce)	33	36	420	1.81	7.1	нет

Примечание: LY – световыход, τ – время высвечивания, λ_{\max} – максимум длины волны спектра высвечивания, $n(\lambda_{\max})$ – коэффициент преломления для максимума длины волны, ρ – плотность сцинтиллятора, Н – гигроскопичность.

Сцинтилляционный гамма-спектрометр представляет собой сборку из сцинтиллятора, соединенного через оптический контакт с фотоприемником. В данной работе в качестве фотоприемника используется кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM) серии MicroFJ-60035-TSV размером 6×6 мм² производства компании SensL/onsemi [4]. SiPM являются полупроводниковыми аналогами традиционных ФЭУ и по многим критериям их превосходят (компактность, низкое напряжение питания, нечувствительность к магнитным полям, механическая прочность). Кремниевый фотоэлектронный умножитель представляет собой

фотоприемник на основе матрицы р–п-переходов, выполненных на общей кремниевой подложке. Характерный размер одной ячейки (пикселя) составляет 10–100 мкм. При этом напряжение смещения на несколько вольт превышает напряжение пробоя р–п-перехода, что обеспечивает работу в гейгеровском режиме. При попадании кванта света в активную область ячейки в ней развивается самогасящийся гейгеровский разряд, при этом выходной сигнал является суммой сигналов с каждой ячейки SiPM, которые суммируются на общей нагрузке. Таким образом, сцинтилляционный сигнал от гамма-кванта конвертируется в электрический импульс с амплитудой сигнала, пропорциональной его энергии, для определения которой строится амплитудный спектр.

На рис. 1 в качестве примера показан реальный амплитудный спектр (взят из работы [5]), получаемый в сцинтилляционном детекторе при регистрации моноэнергетических гамма-квантов. Пик в области I , который обычно называют пиком полного поглощения, соответствует энергии гамма-кванта E_γ . Область непрерывного спектра, лежащая левее пика полного поглощения, связана с эффектом комптоновского рассеяния гамма-квантов в объеме сцинтиллятора. Вид распределения амплитудного спектра существенно зависит от типа сцинтиллятора, его геометрических размеров, а также энергии гамма-кванта. Например, в кристалле больших размеров за счет многократного комптоновского рассеяния происходит значительное подавление непрерывного спектра комптоновских электронов и соответствующее увеличение пика, отвечающего полному поглощению энергии гамма-кванта.

Рис. 1. Пример экспериментального спектра от моноэнергетического гамма-источника.

Относительное энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора считается по формуле

$$\delta = \frac{\Delta E}{E},$$

где E – энергия частицы, поглощенная в сцинтилляторе, ΔE – абсолютное энергетическое разрешение детектора, равное ширине на половине высоты амплитудного распределения, полученного при регистрации моноэнергетических частиц и выраженное в единицах энергии. Соответственно, чем меньше по величине энергетическое разрешение, тем выше разрешающая способность сцинтиллятора.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка состоит из следующих блоков (см. рис. 2).

1. Персональный компьютер (ПК).
2. Интерфейсный модуль для питания SiPM и оцифровки сигналов (спектрометр).
3. Набор из трех сцинтилляционных детекторов, выполненных в виде алюминиевых коробок, в каждой из которых находится SiPM, один из трех сцинтилляторов (LYSO, LaBr₃ либо GAGG(Ce)) и электронная плата.

Рис. 2. Схема лабораторной установки.

В установке используется SiPM фирмы SensL/onsemi с чувствительной областью 6×6 мм². Фотоумножитель соединяется со спектрометром двумя коаксиальными кабелями, по одному из которых на SiPM подается напряжение смещения, а по другому с фотоумножителя считывается сигнал.

Разработанный интерфейсный модуль (спектрометр) представляет собой устройство на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) MAX10, имеющей встроенный 10-битный АЦП, с помощью которого и происходит оцифровка сигнала с детектора. Отдельная схема усиливает сигнал с детектора, а также дает команду АЦП на считывание амплитуды. На плате спектрометра также реализована схема питания SiPM, выдающая необходимое напряжение смещения – порядка 28 В. Питание самого спектрометра осуществляется по шине USB.

На ПК установлена программа для набора спектров SPEC 3.5, которая периодически опрашивает спектрометр и отображает полученный спектр.

3. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Лабораторная работа состоит из двух последовательных этапов. На первом этапе набираются спектры для каждого из исследуемых сцинтилляторов от различных источников ионизирующего излучения. Затем полученные спектры анализируются, строится калибровочная прямая и рассчитывается энергетическое разрешение детекторов.

3.1. Получение спектров

Для каждого сцинтиллятора (LYSO, LaBr₃, GAGG) набираются спектры, с использованием различных источников ионизирующего излучения (Ba-133 и Am-241, оба активностью около 10 кБк). При этом время набора выбирается таким образом, чтобы количество событий, набранных в каналах, соответствующих максимумам пиков полного

поглощения гамма-квантов, соответствовало относительной статистической ошибке не более 3%. Спектры сохраняются на жесткий диск компьютера для дальнейшей обработки.

Примеры спектров приведены на рис. 3.

Рис. 3. Примеры полученных спектров.

3.2. Калибровка детекторов и определение энергетического разрешения

Энергетическая калибровка детекторов получается при помощи аппроксимации пиков функцией гаусса на соответствующих спектрах. На рис. 4 приведен пример определения положения пиков для сцинтиллятора LaBr₃. Для удобства восприятия оба графика приведены в полулогарифмическом масштабе.

Рис. 4. Пример определения положения пиков для сцинтиллятора LaBr₃.

По полученным параметрам функций гаусса строится калибровочная прямая, а также зависимость энергетического разрешения детектора от энергии гамма-квантов. Примеры подобных графиков приведены на рис. 5. Погрешности всех измеряемых величин на графиках лежат в пределах экспериментальных точек.

Рис. 5. а – калибровочная прямая для сцинтиллятора LaBr₃, **б** – зависимость энергетического разрешения от энергии для того же сцинтиллятора.

Из калибровочной прямой можно найти цену канала АЦП: она получается равной 476 ± 4 эВ. Зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-квантов можно аппроксимировать зависимостью [6]

$$\frac{\text{FWHM}}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{b}{E}\right)^2 + c^2},$$

где a – параметр, характеризующий вклад статистических процессов, b – параметр, характеризующий вклад электронных шумов, c – параметр, характеризующий вклад от прочих эффектов.

Ниже приведены значения параметров, полученных при аппроксимации зависимости, приведенной на рис.5б:

$$a = (1.18 \pm 0.10) \sqrt{\text{кэВ}},$$

$$b = (4.7 \pm 0.8) \text{кэВ},$$

$$c = (0.061 \pm 0.010).$$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЯУ МИФИ разработана установка для исследования характеристик сцинтилляторов, использующая кремниевые фотоэлектронные умножители в качестве фотодетекторов. В настоящее время установка используется в НИЯУ МИФИ для проведения лабораторных работ в сопровождение магистерских курсов по направлению “Ядерные физика и технологии”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству лаборатории экспериментальной ядерной физики и институту ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работы выполнены при поддержке Российского научного фондв в рамках соглашения №22-72-00085 по созданию установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knoll G. F.* Radiation Detection and Measurement. Wiley, 2010.
2. <https://luxiumsolutions.com>
3. <https://www.epic-crystal.com>
4. <https://www.onsemi.com>
5. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/experiment/detectors/gammadet/>
6. *Workman R.L. et al. (Particle Data Group)* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2022. № 8. P. 083C01.
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Пример экспериментального спектра от моноэнергетического гамма-источника. Цифрами обозначены: 1 – пик полного поглощения, 2 – пик обратного рассеяния, 3 – комптоновское распределение. Перерисовано из работы [5].
- Рис. 2.** Схема лабораторной установки: ПК – персональный компьютер, USB – кабель стандарта Universal Serial Bus, р/а источник – радиоактивный источник.
- Рис. 3.** Примеры полученных спектров.
- Рис. 4.** Пример определения положения пиков для сцинтиллятора LaBr₃. Цифрами обозначены пики, соответствующие гамма-квантам с энергиями: 1 – 59.5 кэВ, 2 – 31 кэВ, 3 – 81 кэВ, 4 – 356 кэВ.
- Рис. 5.** а – Калибровочная прямая для сцинтиллятора LaBr₃, б – зависимость энергетического разрешения от энергии для того же сцинтиллятора.

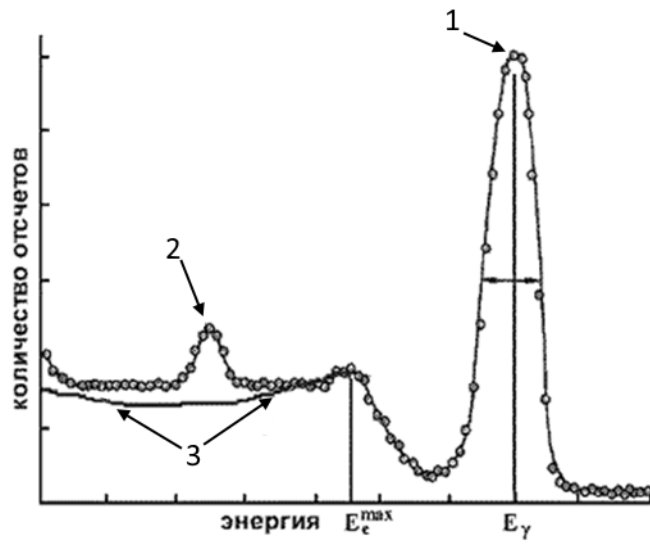


Рис. 1.

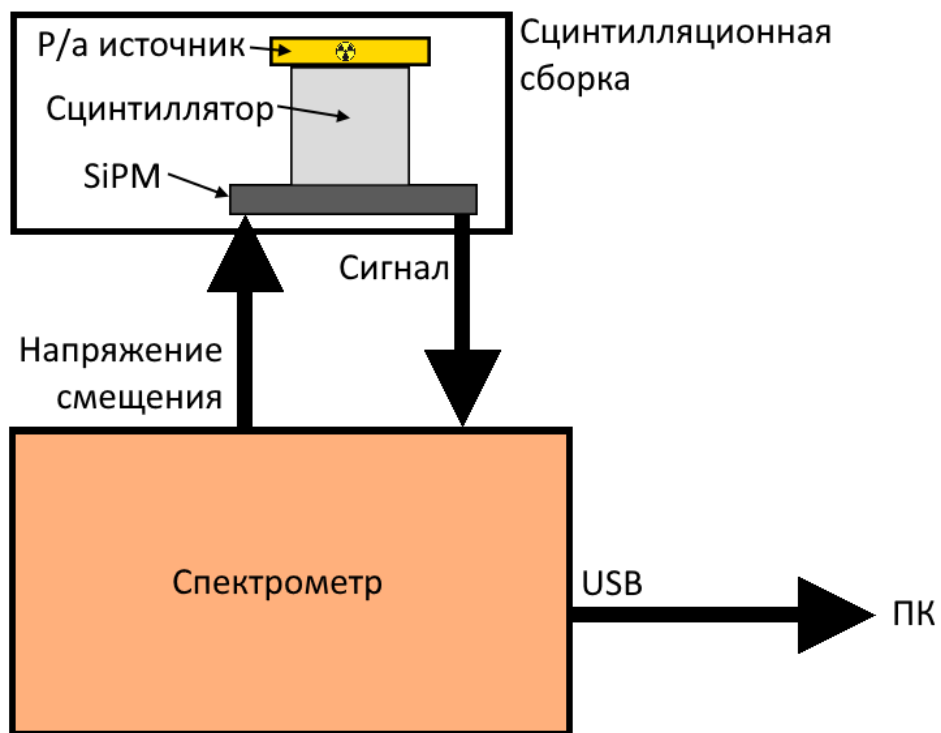
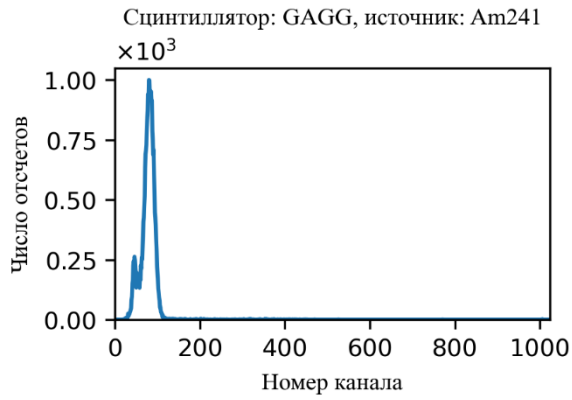
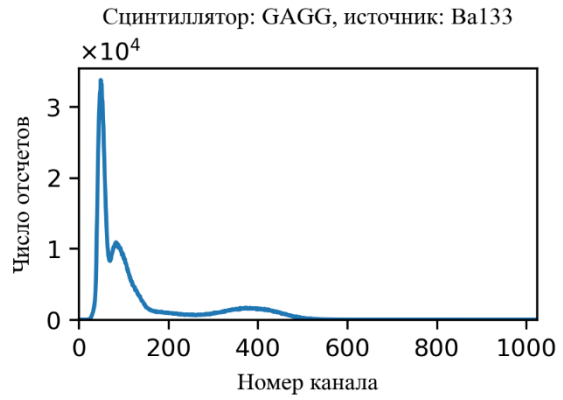


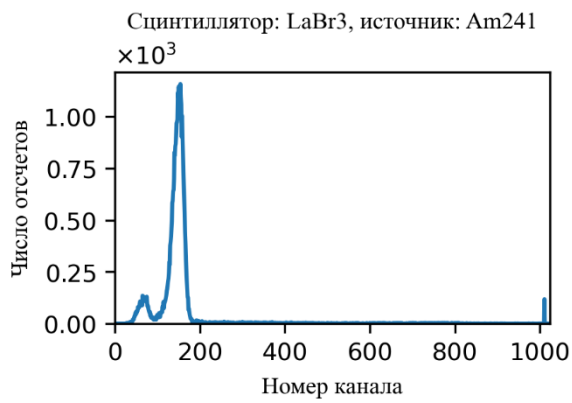
Рис. 2.



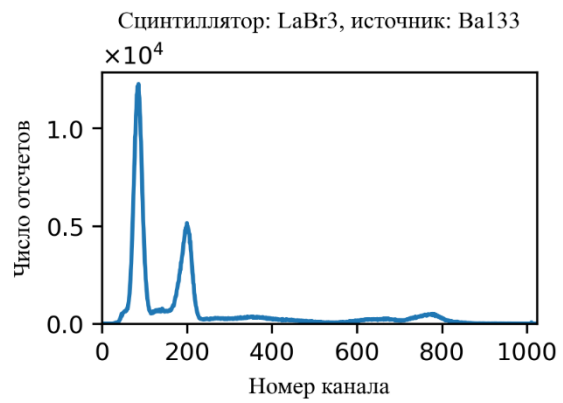
а



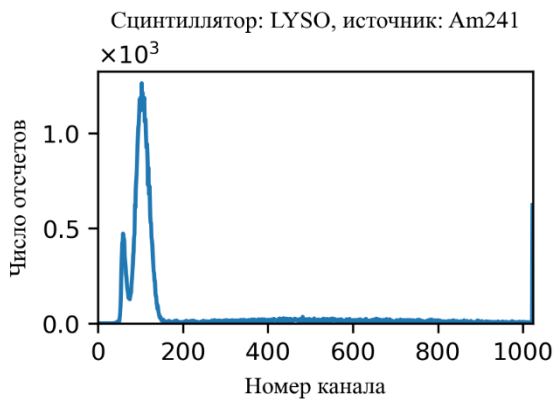
б



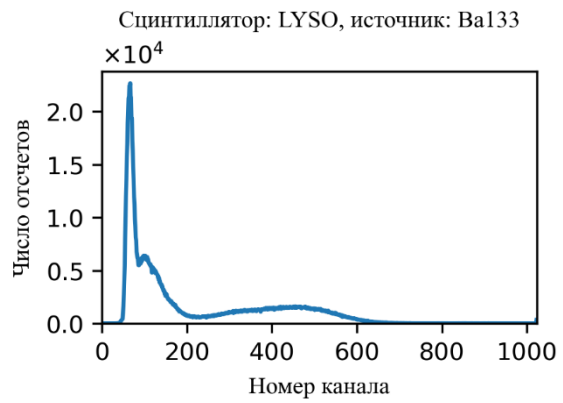
в



г

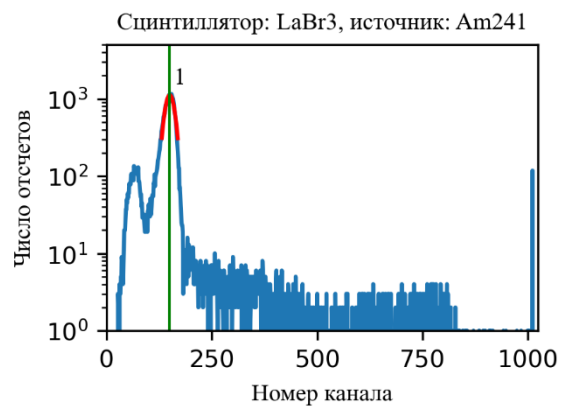


д

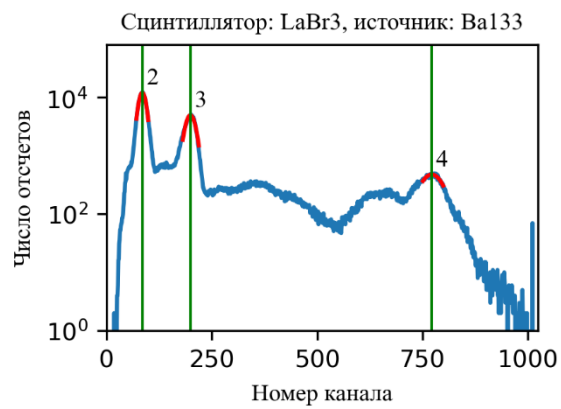


е

Рис. 3.



а



б

Рис. 4.

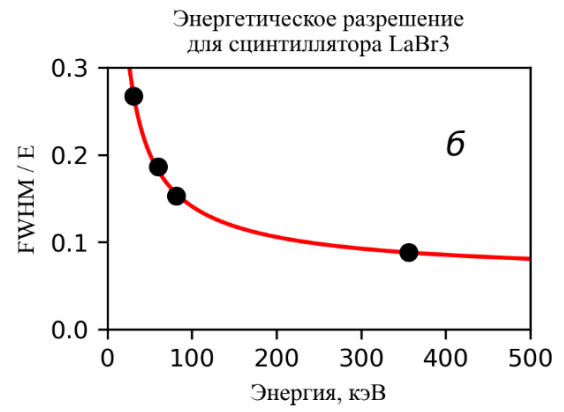
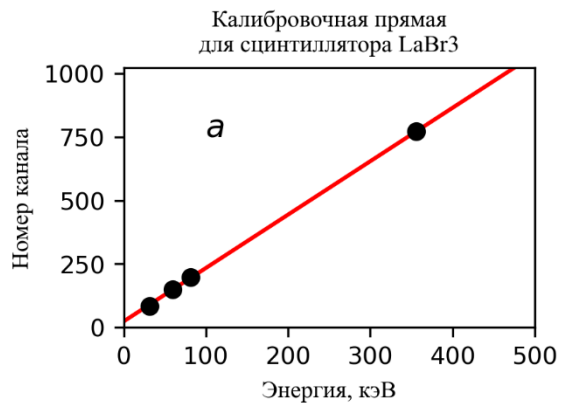


Рис. 5.

Для связи с авторами:

Шакиров Алексей Вячеславович

E-mail: shalexey91@mail.ru

~~A laboratory experimental setup based on scintillation detectors is described, which is used in the educational process at MEPhI. The setup is designed to study methods for investigating the characteristics of scintillators, as well as the operation of a silicon photoelectron multiplier. The results of measuring the spectra from standard gamma radiation sources using various scintillators are shown, calibration is carried out, and an estimation of the energy resolution of the detectors is given.~~