

P13-2019-43

А. В. Шахов, И. М. Газизов \*, С. М. Лукьянов, Т. Исатаев,  
К. Мендибаев, Ю. Э. Пенионжкевич, А. А. Смирнов \*,  
С. С. Стукалов, Ю. Г. Соболев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ  $\text{CdZnTe}$  И  $\text{CeBr}_3$   
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИИ

---

\* Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия

Шахов А. В. и др.

P13-2019-43

Использование кристаллов CdZnTe и CeBr<sub>3</sub> для измерений фотонного излучения в широком диапазоне энергии

Опробованы относительно новые полупроводниковые детекторы на основе кристаллов CdZnTe и сцинтиллятора CeBr<sub>3</sub>. Собрана спектрометрическая установка для проверочных измерений, состоящая из детекторов CdZnTe, CeBr<sub>3</sub>, Si для  $\alpha$ - $\gamma$  измерений. Исследованы и определены их основные характеристики, такие как энергетическое разрешение  $\text{FWHM}/E\gamma$  (кэВ), эффективность регистрации  $\varepsilon(\%)$ . Проверена возможность регистрации в широком диапазоне энергии. Проведены измерения  $\gamma$ - $\gamma$  и  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений с использованием данных детекторов. Результаты подобных измерений показывают, что эти детекторы могут использоваться для исследования механизмов ядерных реакций и свойств продуктов реакций.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2019

Shakhov A. V. et al.

P13-2019-43

Possibilities of Using CdZnTe and CeBr<sub>3</sub> Crystals for Measuring Photon Radiation in a Wide Range of Energy

The new semiconductor detectors, which, based on CdZnTe crystals and CeBr<sub>3</sub> scintillator, are presented in this work. The spectroscopic setup for testing measurements was created, which consists of CdZnTe, CeBr<sub>3</sub>, and Si (measuring  $\alpha$  and  $\gamma$ ) detectors. The main characteristics of these detectors including energy resolution  $\text{FWHM}/E\gamma$  (keV) and efficiency  $\varepsilon(\%)$  were investigated and determined. Moreover, we have checked the possibility of registration in a wide range of energy. The  $\alpha$ - $\gamma$  and  $\gamma$ - $\gamma$  coincidence measurements were carried out using these detectors. The results could be used to study the mechanisms of nuclear reactions and the properties of reaction products.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время технология изготовления детекторов и материалов, используемых для регистрации ядерных излучений, получила широкое развитие. В настоящее время выращиваются кристаллы различных форм и размеров с самым разнообразным составом. Это позволяет создавать на их основе уникальные детекторы с различными спектрометрическими характеристиками для любого физического эксперимента. Такие детекторы имеют высокую эффективность регистрации и относительно хорошее энергетическое разрешение даже при использовании при комнатных температурах.

Целью данной работы является исследование характеристик новых полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe и сцинтилляторов ( $\text{CeBr}_3$ ) для регистрации рентгеновского и гамма-излучений в широком диапазоне энергий, в частности при энергии до нескольких десятков МэВ, и применение этих детекторов в корреляционных экспериментах с использованием методов  $\gamma$ - $\gamma$  и  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений. Также исследовались возможности детекторов для экспериментальных установок по изучению ядерных реакций.

### **ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА КАДМИЙ-ЦИНК-ТЕЛЛУР (CdZnTe)**

В течение последних 40 лет для измерения ядерных излучений использовались полупроводниковые детекторы на базе кремния и германия. Основным недостатком таких детекторов является низкотемпературный режим работы. В результате прогресса при изготовлении полупроводников из сложных материалов все больше возникает интерес, связанный с возможностью использования полупроводниковых соединений на основе кристаллов CdZnTe в качестве детекторов ионизирующего излучения (рис. 1).

Блок регистрации включает в себя ПСД (полусферический детектор) и плату ПУ (предусилителя), предназначенного для предварительного линейного усиления сигналов детектора. ПСД располагается вблизи передней панели корпуса (рис. 2).



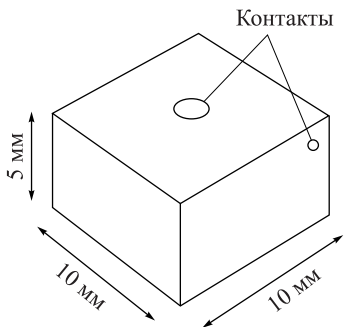


Рис. 3. Полусферический детектор (ПСД) с размерами кристалла  $5 \times 10 \times 10$  мм

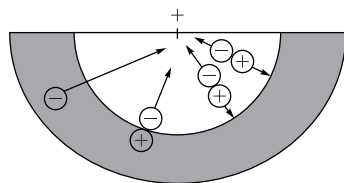


Рис. 4. Схема сбора носителей заряда на детекторе

ных измерениях в рабочих диапазонах температур — в интервале от  $-5$  до  $+40$  °С. Спектрометры  $\gamma$ -излучения на основе CdZnTe обладают энергетическим разрешением порядка нескольких процентов. Эти свойства обусловлены наличием широкой запрещенной зоны (1,5–2,2 эВ), обеспечивающей высокое объемное сопротивление и низкую концентрацию носителей заряда в объеме детектора при комнатной температуре. Детектор на основе CdZnTe подходит для измерений рентгеновского излучения от 30 кэВ. Энергетический диапазон регистрируемого гамма-излучения лежит в интервале от 50 до 2000 кэВ.

### ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА $\text{CeBr}_3$

Выбор сцинтилляторов в первую очередь обуславливается эффективностью регистрации. Вероятность регистрации гамма-излучения пропорциональна эффективному атомному номеру  $Z_{\text{эфф}}$  и плотности вещества.

По этой причине было решено использовать сцинтиллятор  $\text{CeBr}_3$  (рис. 5). Кристаллы  $\text{CeBr}_3$  имеют высокую гигроскопичность, поэтому их необходимо хранить и эксплуатировать в герметичном контейнере. В данном детекторе



Рис. 5. Сцинтилляционный детектор  $\text{CeBr}_3$

и сцинтиллятор, и ФЭУ помещены в один контейнер, при этом ФЭУ находится в оптическом контакте непосредственно со сцинтиллятором. Главным преимуществом этого детектора является обладание значительно более низким внутренним фоном, чем его изученный аналог  $\text{LaBr}_3$ .  $\text{CeBr}_3$ , как бромид лантана, имеет практически такие же  $Z_{\text{эфф}}$  и высокую плотность, подходит для измерений при комнатной температуре.

Однако в ходе выполнения работы было установлено, что данный тип детектора имеет определенные недостатки, основным из которых является наличие собственной радиоактивности.

Проведен анализ внутренней активности радионуклидов, испускающих гамма-излучение, в кристалле  $\text{CeBr}_3$  размером  $51 \times 51 \times 51$  мм.

Собственная активность измерялась как фоновый спектр. Детектор помещался в свинцовую защиту толщиной 1 см, для уменьшения вклада фоновых распределений из окружающей среды. Измерения длились в течение  $\sim 20$  ч. Фон сцинтилляционного кристалла  $\text{CeBr}_3$  с пиками собственной (внутренней) радиоактивности показан на рис. 6.

Сами элементы Ce и Br не содержат естественного радиоактивного изотопа, а внутренняя активность  $\text{CeBr}_3$  в основном обусловлена радиоактивными примесями, присутствующими в сырье или в технологическом процессе выращивания самого кристалла. Как видно из рис. 6,  $\text{CeBr}_3$  показывает в области энергий 1,2–2,2 МэВ собственную активность. Установлено, что это обусловлено примесями от  $\alpha$ -распада. Подобное  $\alpha$ -загрязнение всегда наблюдается в кристаллах  $\text{LaBr}_3$  и приписывается  $^{227}\text{Ac}$  и дочерним элементам. Присутствие  $^{227}\text{Ac}$  может быть обусловлено тем фактом, что Ac, La и Ce являются химически гомологичными элементами, и их чрезвычайно трудно

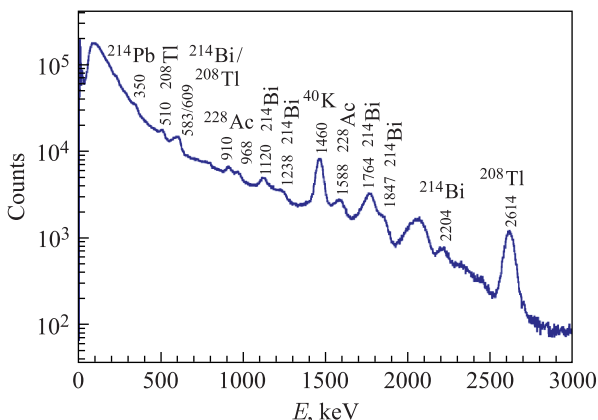


Рис. 6. Фон сцинтилляционного кристалла  $\text{CeBr}_3$  с пиками собственной (внутренней) радиоактивности

отделить друг от друга. Вероятнее,  $^{227}\text{Ac}$ -загрязнение может даже возникать из-за присутствия в руде  $\text{U}$  и, в частности,  $^{227}\text{Ac}$ -родительского ядра  $^{235}\text{U}$ , недостаточно очищенного при обработке сырья.

Спектры внутренней (собственной) активности  $\text{CeBr}_3$  показывают, что фотопики  $\gamma$ -излучения связаны с серией  $^{238}\text{U}$  (например, 352 кэВ из  $^{214}\text{Pb}$ , 609 и 1765 кэВ из  $^{214}\text{Bi}$ ) и серией  $^{232}\text{Th}$  (например, 910 кэВ, 1588 кэВ из  $^{228}\text{Ac}$ , 510 кэВ и 2618 кэВ из  $^{208}\text{Tl}$ ). Пик 1467 кэВ принадлежит к природному изотопу  $^{40}\text{K}$ .

Несмотря на то, что  $\text{CeBr}_3$  обладает собственным свечением, данный тип детекторов имеет явное преимущество перед другими сцинтилляторами высокого разрешения, в которых присутствует внутренняя активность.

### УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТОВЫХ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

С использованием указанных детекторов на основе  $\text{Ge}(\text{Li})$ ,  $\text{CdZnTe}$  и  $\text{CeBr}_3$  проведены инклюзивные измерения фотонных спектров от стандартных источников ОСГИ [<http://www.isotop.ru/files/treecontent/nodes/attaches/700/704/osai.pdf>], а также корреляционные  $\alpha$ - $\gamma$  измерения для источников  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$ .

Для проведения измерений была собрана спектрометрическая измерительная установка, внешний вид которой представлен на рис. 7.

Для накопления экспериментальной информации при измерениях использовалась система дигитайзер типа Faster, разработанная в LPC Saen (Франция) [[faster.in2p3.fr](http://faster.in2p3.fr)].

Faster — это модульная цифровая система сбора данных, предназначенная для проведения экспериментов с несколькими детекторами.

Модуль спектроскопии (чаще всего называемый модулем Faster-ADC) предназначен для обрабатывания импульсов детектора и преобразования элек-



Рис. 7. Внешний вид измерительной установки

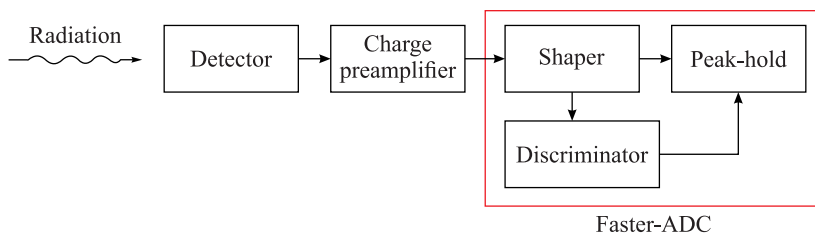


Рис. 8. Схема модуля спектроскопии Faster-ADC

трических сигналов в цифровые. Этот модуль состоит из формирователя сигнала, пикового формировщика и дискриминатора (рис. 8).

Более детальное описание системы дано на web-странице разработчика [faster.in2p3.fr].

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРОВ $\text{CeBr}_3$ И $\text{CdZnTe}$

Кристаллы  $\text{CeBr}_3$  и  $\text{CdZnTe}$  являются относительно новыми материалами, поэтому сравнение характеристик проведено относительно детектора из особо чистого германия (ОЧГ).

Основными характеристиками детектора являются эффективность (вероятность регистрации частицы при попадании в детектор), энергетическое разрешение (разделение двух близких по энергии линий, которые можно идентифицировать как разные). Характерные параметры исследуемых детекторов представлены в табл. 1.

Первичная обработка экспериментальных данных производилась с помощью программно-ориентировочного пакета ROOT, который отвечает всем функциональным возможностям, необходимым для обработки данных, статистического анализа, визуализации и хранения данных. Дальнейшая обработка производилась в пакете OriginPro. Полученные спектры можно видеть на рис. 9, 11.

Таблица 1. Основные параметры детекторов

Детектор	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\langle Z \rangle$	$E_{\text{ion}}$ , эВ	Световыход, фотон/кэВ	Требует охлаждения
Ge(Li)	5,33	32	2,95	—	Да
CdZnTe	5,81	44	4,6	—	Нет
$\text{CeBr}_3$	5,1	46	—	~ 60	Нет

*Примечание.*  $\rho$ , г/см<sup>3</sup> — плотность вещества,  $\langle Z \rangle$  — средний атомный номер,  $E_{\text{ion}}$ , эВ — энергия на ионизацию.



Энергетическое разрешение в спектре определяется шириной пика полного поглощения на полувысоте, отнесенной к положению максимума пика  $E$ . Чем меньше значение  $\text{FWHM}/E\gamma$ , тем лучше разрешены линии аппаратного спектра. Ширина пика  $\text{FW}$  отражает флуктуацию амплитуд сигналов на выходе детектора, обусловленную, главным образом, статистическим разбросом числа носителей заряда ( $n_e$ ). Чем больше образуется носителей заряда, тем меньше (по закону Пуассона) относительное среднеквадратичное отклонение  $\delta = 1/(n_e)^{1/2}$ . Исходя из этого, можно сказать, что чем меньше энергетическое разрешение, тем выше разрешающая способность детектора.

Для сравнения на рис. 9 показаны спектры  $^{152}\text{Eu}$ , полученные с помощью исследуемых детекторов. Из рис. 9 видно, что детекторы на основе ОЧГ имеют наилучшее разрешение около 2 кэВ, для  $\text{CdZnTe}$  и  $\text{CeBr}_3$  разрешение составляет величину 15–30 кэВ.

Результаты определения величины  $\text{FWHM}/E$  для различных детекторов занесены в табл. 2.

Эффективность  $\varepsilon$  зависит от энергии  $\gamma$ -квантов, взаимного расположения источника и детектора, состава и размеров кристалла детектора, толщины измеряемого источника и др.

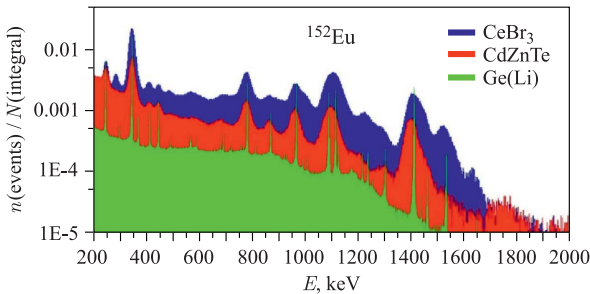


Рис. 9. Спектры  $\gamma$ -излучения  $^{152}\text{Eu}$  источника для детекторов, полученных в одинаковых условиях: синий —  $\text{CeBr}_3$ , красный —  $\text{CdZnTe}$ , зеленый —  $\text{Ge(Li)}$

Таблица 2. Энергетическое разрешение

Детектор	FWHM/E, %		
	Ge(Li)	CeBr <sub>3</sub>	CdZnTe
$^{152}\text{Eu}$ (121,7 кэВ)	1,22	15,3	10,14
$^{152}\text{Eu}$ (244,6 кэВ)	0,67	11,38	8,7
$^{152}\text{Eu}$ (344,3 кэВ)	0,47	7,91	5,77
$^{137}\text{Cs}$ (661,2 кэВ)	0,4	4,57	3,44
$^{60}\text{Co}$ (1173,2 кэВ)	0,23	4,07	3,38
$^{60}\text{Co}$ (1332,5 кэВ)	0,20	3,7	2,7

На основе результатов измерений с калибровочным источником  $^{137}\text{Cs}$ , расположенным на расстоянии 5 см от чувствительной поверхности детектора, была определена абсолютная эффективность детекторов:

$$\varepsilon = \frac{S_\gamma}{At_{\text{live}}I_\gamma k_\Omega},$$

где  $S_\gamma$  — количество  $\gamma$ -квантов, зарегистрированных детектором,  $I_\gamma$  — вероятность излучения  $\gamma$ -кванта определенной энергии при распаде,  $A$  — количество распадов в единицу времени (активность источника),  $t_{\text{live}}$  — живое время работы детектора,  $k_\Omega$  — вероятность  $\gamma$ -квантов попасть на детектор.

Результаты измерений приведены в табл. 3.

Для проверки эффективности регистрации гамма-квантов большой энергии использовался нейтронный источник. К  $\alpha$ -источнику  $^{238}\text{Pu}$  ( $\alpha - 5,4$  МэВ) была приставлена пластина  $^9\text{Be}$ . В результате взаимодействия  $\alpha$ -частицы с ядрами  $^9\text{Be}$  происходит ядерная реакция с образованием жестких гамма-квантов:  $^{13}\text{C} \rightarrow n + \gamma$  ( $\gamma - 4,4$  МэВ). Схематическое изображение представлено на рис. 10.

На рис. 11 представлены гамма-спектры, измеренные Pu–Be-источником с помощью детекторов CdZnTe, Ge(Li) и CeBr<sub>3</sub>.

Таблица 3. Эффективность детекторов, полученная с помощью источника  $^{137}\text{Cs}$

Детектор	$V, \text{ см}^3$	$H, \text{ см}$	$\varepsilon_g, \%$	$\varepsilon, \%$
Ge(Li)	98,125	5	5,3	3,12
CdZnTe	0,5	5	1,12	4,7
CeBr <sub>3</sub>	132,651	5	6,57	24,62

*Примечание.*  $H, \text{ см}$  — расстояние от источника до чувствительной поверхности детектора;  $\varepsilon_g$  — геометрическая эффективность (отношение количества гамма-квантов, попавших в детектор, к количеству гамма-квантов, испущенных источником).

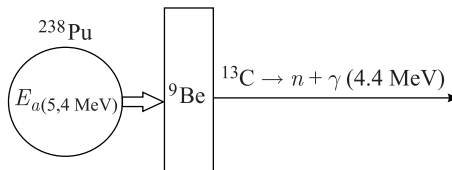


Рис. 10. Схема нейтронного источника Pu–Be. В результате взаимодействия  $\alpha$ -частицы с ядрами  $^9\text{Be}$  происходит ядерная реакция с образованием жестких  $\gamma$ -квантов:  $^{13}\text{C} \rightarrow n + \gamma$  ( $\gamma - 4,4$  МэВ) и нейтронов

Как видно из рис. 11 и 12, полупроводниковые детекторы CdZnTe и Ge(Li) нечувствительны к гамма-квантам больших энергий. В свою очередь, CeBr<sub>3</sub> показывает достаточно высокую эффективность регистрации в диапазоне энергий до нескольких МэВ, несмотря на присутствие в спектрах линий, обусловленных собственным свечением.

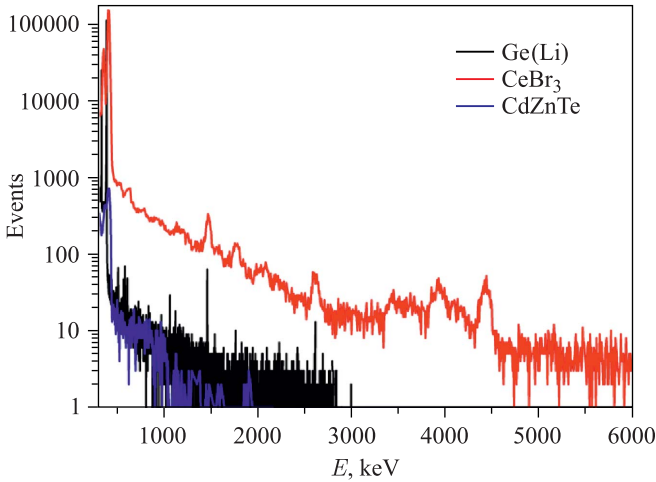


Рис. 11. Спектры нейтронного источника Pu–Be для детекторов CdZnTe, Ge(Li) и CeBr<sub>3</sub>

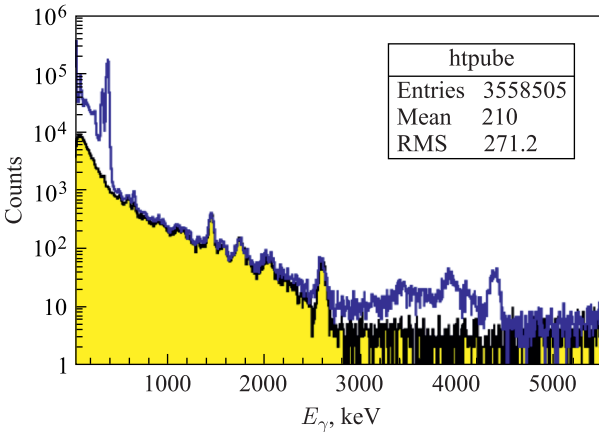


Рис. 12. Спектр гамма-излучения, полученный с помощью Pu–Be-источника (синяя гистограмма), измеренного детектором CeBr<sub>3</sub> (желтый цвет — фон, полученный без Be)

## **КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ( $\gamma$ - $\gamma$ СОВПАДЕНИЯ И $\alpha$ - $\gamma$ СОВПАДЕНИЯ)**

Гамма-спектрометрия представляет собой надежный метод идентификации продуктов ядерных реакций, а также определения их количественного и качественного состава инклюзивным методом. Идентификация различных неизвестных радионуклидов имеет ряд сложностей. Например,  $\gamma$ -спектры содержат большой, разнообразный спектр продуктов деления, усложняющий идентификацию пиков, и дают достаточно интенсивный вклад комптоновского рассеяния.

Для более надежной идентификации необходимо проведение корреляционных измерений (эксклюзивных). Для такой системы важен в первую очередь выбор детекторов (т. е. сцинтилляторы или полупроводники) с наибольшей эффективностью. Экспериментальная работа направлена на применение сцинтилляционного  $\text{CeBr}_3$  и полупроводникового  $\text{CdZnTe}$  детекторов в корреляционных методах  $\gamma$ - $\gamma$  совпадения и  $\alpha$ - $\gamma$  совпадения.

Система совпадений с несколькими детекторами позволяет более точно определять характеристики сложных спектров.  $\gamma$ - $\gamma$  совпадения имеют преимущество, так как практически исключают все фоновые пики, что является важным для детекторов с внутренней радиоактивностью.

### **$\gamma$ - $\gamma$ СОВПАДЕНИЯ**

Спектроскопия  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений включает в себя систему из двух детекторов  $\gamma$ -излучения, расположенных в определенной геометрии относительно друг друга, с временной логикой для реализации многомерного спектра. В результате получается спектр совпадений. Сетка содержит в себе события, которым соответствуют две энергии, одновременно зарегистрированные в каждом детекторе.

Для системы  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений один из наиболее важных параметров — окно временных совпадений. Это продолжительность времени, в течение которого любые происходящие события можно считать одновременными. Окно совпадений, как правило, составляет от 1 нс до сотен микросекунд. Синхронизация размера окна совпадений также сильно зависит от типа используемого детектора. Следует учесть возможность временного смещения между двумя детекторами в результате различных длин кабелей, размеров кристаллов или моделей электроники.

Для проведения эксперимента использовалась подготовленная установка, включающая в себя вакуумный объем, в котором размещается источник излучения и установлены детекторы гамма-излучения. К полупроводниковому детектору был подключен высоковольтный источник питания и дополнитель-

ный предусилитель. Сигналы с детекторов идут на систему сбора данных Faster, которая также является модулем совпадений.

На рис. 13 показана блок-схема экспериментальной установки для измерений  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений между детекторами: CdZnTe и CeBr<sub>3</sub>.

Рассмотрим на нескольких примерах, что собой представляют  $\gamma$ - $\gamma$  совпадения на матрице. Измерения проводились на каскадном источнике <sup>60</sup>Co.

После  $\beta$ -распада <sup>60</sup>Co дочернее ядро <sup>60</sup>Ni оказывается в возбужденном состоянии. При переходе в основное состояние возбужденное ядро последовательно испускает два  $\gamma$ -кванта с вероятностью 98,8 %.

На рис. 14 представлена двумерная корреляционная диаграмма, измеренная в совпадении гамма-лучей с источником <sup>60</sup>Co, зарегистрированных с помощью детекторов CeBr<sub>3</sub> и CdZnTe во временном окне 5 мкс. Приведенная диаграмма (рис. 14) соответствует известной схеме распада.

Одной характерной особенностью этого спектра являются зоны А и В, расположенные в координатах энергии (1173,2, 1332,5) и (1332,5, 1173,2). Эти зоны соответствуют совпадениям между двумя гамма-квантами, испускаемыми <sup>60</sup>Co с теми же энергиями (рис. 14).

Основная доля событий регистрировалась, когда первый гамма-квант фиксированной энергии 1332,5 кэВ попадал в первый детектор, второй фотон 1173,2 кэВ регистрировался во втором детекторе. По матрице действительно наблюдается каскадная структура распада.

Корреляция  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений измерялась также с помощью источника <sup>22</sup>Na, который является источником аннигиляционных  $\gamma$ -квантов с энергией 511 кэВ. Спектр гамма-квантов от <sup>22</sup>Na, измеренных в совпадении, представлен на рис. 15.

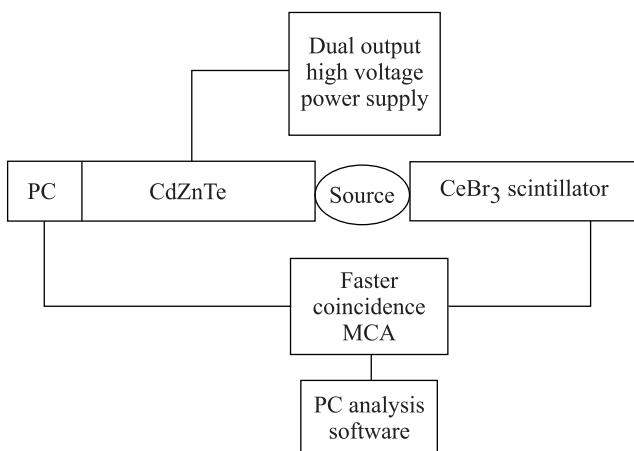


Рис. 13. Схема установки для измерений  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений

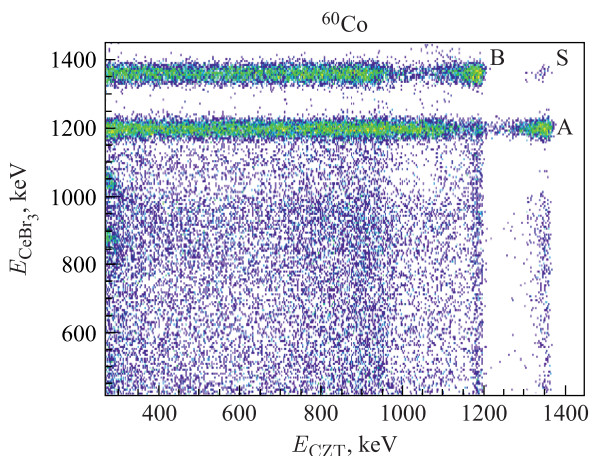


Рис. 14. Пики А и В соответствуют истинным совпадениям полной энергии. S — случайное совпадение одинаковой энергии

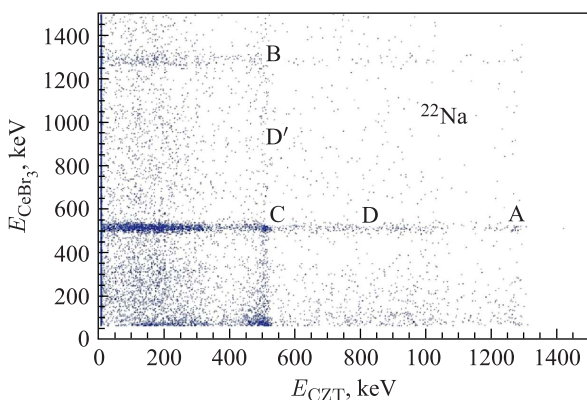


Рис. 15. Пример  $\gamma$ - $\gamma$  совпадения от источника  $^{22}\text{Na}$ . А и В — два истинных совпадения полной энергии; D и D' — истинное совпадение одной энергии и одного комптоновского рассеяния; С — аннигиляционный пик

Этот пик не имеет горизонтальных и вертикальных линий, указанных выше. Это аннигиляционный пик (511 кэВ, вызванный позитроном и электроном, которые в результате соударения исчезают и образуют два фотона с энергией 511 кэВ, движущихся в противоположных направлениях:  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma \dots$  Аннигиляционные события происходят, когда электрон-позитронные пары имеют почти нулевую кинетическую энергию. При такой низкой энергии комптоновское рассеяние маловероятно, следовательно, нет

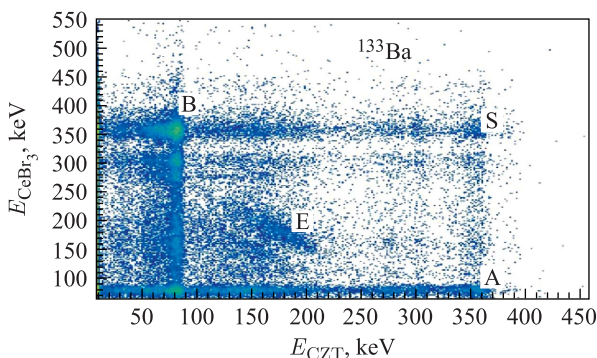


Рис. 16. Матрица гамма-совпадений источника  $^{133}\text{Ba}$ . А и В — истинные совпадения; S — ложные совпадения. E —  $180^\circ$  комптоновского рассеяния, попадающего в оба детектора

никаких горизонтальных и диагональных полос, вытекающих из этой точки совпадения.

Измерения проводились с источником  $^{133}\text{Ba}$ . Полученный спектр представлен на рис. 16.

Следует отметить характерную особенность, которая появляется практически во всех спектрах совпадений. Это диагональные полосы, которые появляются на матрице (рис. 16). Они представляют собой комптоновское рассеяние на  $180^\circ$ , когда часть энергии гамма-излучения попадает в один детектор, рассеивается на  $180^\circ$ , и оставшаяся часть энергии попадает в противоположный.

Работа проделана для проверки методики и демонстрации возможностей  $\gamma-\gamma$  совпадений, устранения несовпадающих событий для полученного спектра  $\gamma$ -излучения, а также для проверки схем распадов.

### $\alpha-\gamma$ СОВПАДЕНИЯ

Измерения  $\alpha-\gamma$  совпадений важны для проверки схем распада и изучения возможных угловых корреляций  $\alpha$ -частиц с последующим излучением  $\gamma$ -квантов возбужденных состояний дочернего ядра.

Измерения образцов ядерного материала методом  $\alpha-\gamma$  спектрометрии включают определение основных и второстепенных актиноидов, таких как U, Np, Am, Pu.

Измерение совпадений предназначено для уменьшения фоновой составляющей спектра. Временное совпадение используется для обнаружения  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -квантов в течение определенного временного интервала (временное

окно — gate).  $\alpha$ - $\gamma$  совпадения представляют собой регистрацию  $\alpha$ -излучения и последующего  $\gamma$ -кванта при переходе дочернего ядра из возбужденного состояния в основное.

Данный метод был проверен с помощью радиоактивного источника, содержащего в себе три различных изотопа ( $^{233}\text{U}$  и  $^{238,239}\text{Pu}$ ), испытывающих  $\alpha$ -распад.

Измеряемый радиоактивный источник был установлен внутри камеры с Si-детектором (см. рис. 17). Расстояние от источника до детектора  $\alpha$ -излучения было установлено на 10 мм. Между источником и детектором  $\gamma$ -излучений присутствует стенка толщиной 5 мм.

На рис. 17 показана схема экспериментальной установки, используемой для измерений совпадений. Два детектора были подключены к соответствующей электронике, состоящей из предусилителя, усилителя и модулей АЦП.

При такой конфигурации были получены три одновременных спектра в каждом измерении: спектр  $\alpha$ -частиц, спектр  $\gamma$ -излучения и спектр  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений с двумя параметрами.

Важной переменной является время совпадения ( $\tau$ ). Оптимальное время  $\tau$  должно быть достаточным, чтобы разрешить регистрацию всех истинных совпадений и уменьшить число случайных совпадений. Чтобы выбрать это время совпадения, проводилось несколько тестовых измерений с источником  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$ .

При установленном временном окне совпадений 5 мкс производилось измерение  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений с источником  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$ . Спектр  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений от источника  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$  представлен на рис. 18.

На рис. 20  $\gamma$ -пики, полученные в результате совпадений с  $\alpha$ -частицами дочерних ядер исследуемого образца  $^{221}\text{Fr}$  (6,3 МэВ), совпадают с энергией

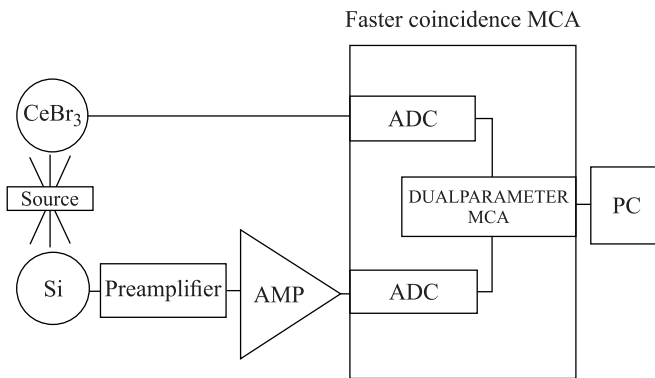


Рис. 17. Схема экспериментальной установки для регистрации  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений



возбужденного уровня  $^{217}\text{At}$  (218 кэВ) своего дочернего ядра, присутствуют также случайные совпадения:  $^{213}\text{Po}$  (8,3 МэВ)  $\rightarrow$   $^{213}\text{Bi}$  (440 кэВ),  $^{212}\text{Po}$  (8,7 МэВ)  $\rightarrow$   $^{212}\text{Bi}$  (727 кэВ).

Из рис. 18 и 19 видно, что в данном источнике присутствуют пики не только прямо испускаемых изотопов урана и плутония, но и последующих распадов возбужденных состояний дочерних ядер. Для идентификации был

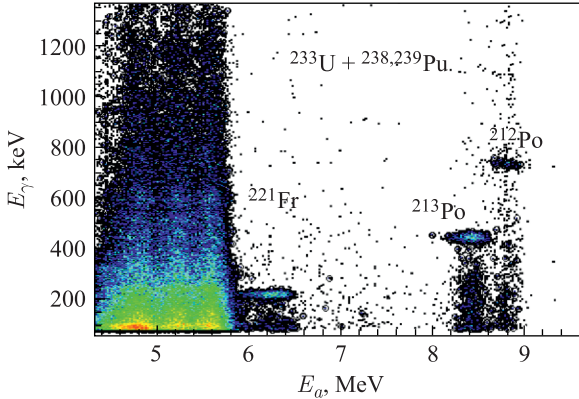


Рис. 18. Спектр  $\alpha$ - $\gamma$ -совпадений от источника  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$

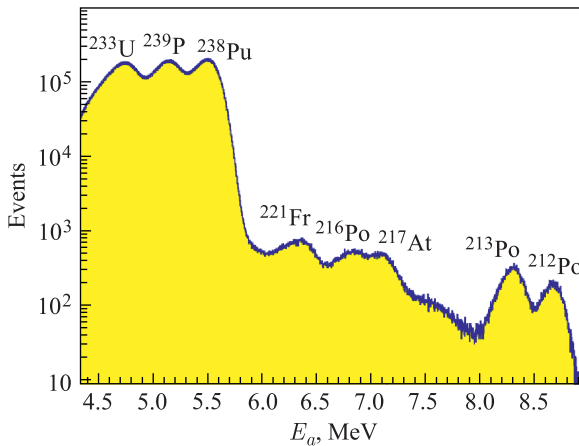


Рис. 19. Энергетические спектры  $\alpha$ -частиц, полученные с помощью стандартного  $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$   $\alpha$ -источника с энергиями 4,824, 5,1 и 5,4 МэВ соответственно. Видны также  $\alpha$ -частицы от дочерних ядер распада  $^{221}\text{Fr}$ ,  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{217}\text{At}$  и  $^{212,213}\text{Po}$  при энергиях больше 6 МэВ

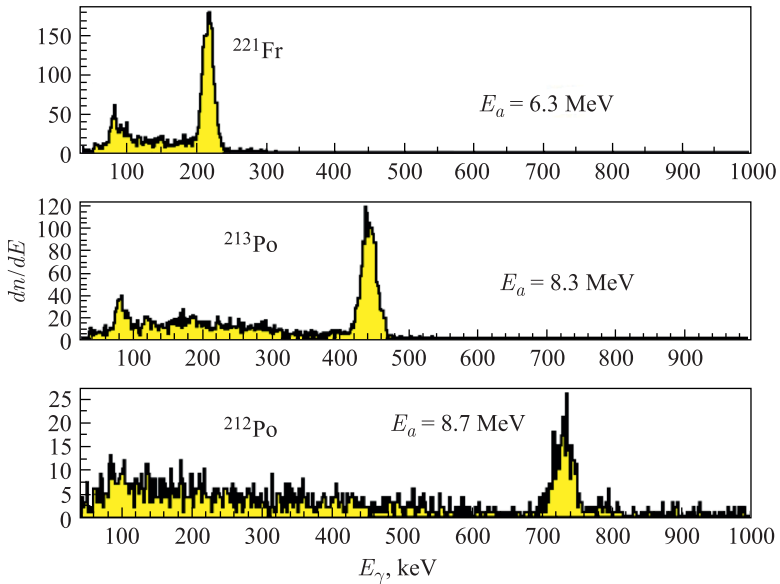


Рис. 20.  $\gamma$ -спектры совпадений

проведен анализ схем распада изотопов, присутствующих в источнике. Было установлено, что пики дочерних ядер приходятся на цепочку распада  $^{233}\text{U}$ .

Также обнаружены пики как  $\alpha$ -, так и  $\gamma$ -излучения, не относящиеся ни к одному изотопу источника ( $^{233}\text{U} + ^{238,239}\text{Pu}$ ). Данные пики имеют совпадение, источником которого является  $^{216}\text{Po}$  и  $^{212}\text{Po}$ , и определены как дочерние элементы из ряда  $^{232}\text{Th}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены основные характеристики детекторов CdZnTe, CeBr<sub>3</sub>, Ge(Li) гамма-излучений в широком диапазоне энергии до 5 МэВ. Подготовлена и опробована методика  $\gamma$ - $\gamma$  и  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений. Собранная спектрометрическая установка, совместно с методикой  $\gamma$ - $\gamma$  и  $\alpha$ - $\gamma$  совпадений, будет использована для исследования механизма ядерных реакций и свойств тяжелых продуктов реакций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бруданин В. Б., Гуров Ю. Б., Розов С. В., Сандуковский В. Г., Якушев Е. А. Характеристики детекторов на основе кристаллов кадмий-цинк-теллур // ПТЭ. 2018. № 1. С. 13–16.

2. Пенионжкевич Ю. Э., Вахтель В. М., Григорьев В. А. Современные детекторы ядерных излучений. Учебное пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2019. 181 с.
3. James R. B., Schlesinger T. E., Lund J., Schieber M. Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te Spectrometers for Gamma and x-Ray Applications; (Schlesinger T. E., James R. B., Eds.) San Diego, Academic Press: California, USA, 1995; V. 43. P. 335–381.
4. Milbrath B. D., Runkle R. C., Hossbach T. W., Kaye W. R., Lepel E. A., McDonald B. S., Smith L. E. Characterization of Alpha Contamination in Lanthanumtrichloride Scintillators Using Coincidence Measurements // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2005. V. 547. P. 504–510.
5. Quarati F. G. A., Dorenbos P., van der Biezen J., Owens A., Selle M., Parthier L., Schotanus P. Scintillation and Detection Characteristics of High-Sensitivity CeBr<sub>3</sub> Gamma-Ray Spectrometers // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2013. V. 729. P. 596–604.
6. Barton J. C., Michaelis E. G. Multiple Geiger Counter Coincidences due to Gamma Radiation. 1960.
7. Britton R., Jackson M. J., Davies A. V. Quantifying Radionuclide Signatures from a Gamma-Gamma Coincidence System // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. V. 149. P. 158–163.
8. Konki J., Greenlees P. T., Jakobsson U., Jones P., Julin R., Juutinen S., . . . Uusitalo J. Comparison of Gamma-Ray Coincidence and Low-Background Gamma-Ray Singles Spectrometry // Applied Radiation and Isotopes. 2012. V. 70(2). P. 392–396.
9. Breitenecker K., Donohue D., Eisenwagner H., Maddison A. P., Siegmund H. Configuration of an Alpha–Gamma Coincidence Spectrometer for Utilization of Safeguards Measurements // Applied Radiation and Isotopes. 2009. V. 67. P. 2088–2091.

Получено 19 августа 2019 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 07.10.2019.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,50. Уч.-изд. л. 1,56. Тираж 215 экз. Заказ № 59775.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)