

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.089.62+539.1.06

КАЛИБРОВКА ДВУХФАЗНОГО ДЕТЕКТОРА  
В АРГОНЕ С ПОМОЩЬЮ ИСТОЧНИКА  $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ  $^{109}\text{Cd}$

© 2019 г. А. Е. Бондарь<sup>a,b</sup>, А. Ф. Бузулуцков<sup>a,b</sup>, А. Д. Долгов<sup>b</sup>, А. А. Легкодымов<sup>a</sup>,  
В. В. Носов<sup>a,b</sup>, В. П. Олейников<sup>a,b,\*</sup>, В. В. Поросев<sup>a,b</sup>, А. В. Соколов<sup>a,b</sup>, Е. О. Шемякина<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>b</sup> Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

\*e-mail: V.P.Oleynikov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 27.03.2019 г.

После доработки 27.03.2019 г.

Принята к публикации 05.04.2019 г.

В настоящее время в нашей лаборатории разрабатывается двухфазный детектор для поиска темной материи и экспериментов по регистрации низкоэнергетических нейтрино. Для калибровки энергетической шкалы детектора использовался источник  $\gamma$ -излучения  $^{109}\text{Cd}$ . В данной работе был подробно измерен спектр  $\gamma$ -излучения источника  $^{109}\text{Cd}$  при помощи сцинтилляционного детектора на основе  $\text{YAP:Ce}$  и германиевого детектора высокой чистоты. Было показано, что источник  $^{109}\text{Cd}$ , снабженный вольфрамовой подложкой и медным фильтром, обеспечивает набор  $\gamma$ -линий в диапазоне от 8 до 90 кэВ для энергетической калибровки двухфазного детектора. Эти измерения позволили нам успешно описать форму амплитудного спектра, наблюдаемую при облучении двухфазного детектора источником  $^{109}\text{Cd}$ .

DOI: 10.1134/S0032816219050173

ВВЕДЕНИЕ

Основная цель этой работы заключается в измерении спектра  $\gamma$ -излучения источника  $^{109}\text{Cd}$ . Этот радиоактивный источник используется для калибровки энергетической шкалы двухфазного детектора на основе аргона, который разрабатывается в нашей лаборатории для поиска темной материи и экспериментов по регистрации низкоэнергетических нейтрино [1–7]. Данное исследование было мотивировано недавними измерениями в двухфазном детекторе [5]: помимо ожидае-

мых  $\gamma$ -линий от источника  $^{109}\text{Cd}$ , 22–25 и 88 кэВ [8–12], была обнаружена дополнительная линия с энергией около 60 кэВ. В данной работе мы тщательно измерили спектр излучения источника  $^{109}\text{Cd}$ , используя сцинтилляционный детектор на основе  $\text{YAP:Ce}$  и полупроводниковый детектор  $\text{HPGe}$ . Это позволило нам впервые успешно описать спектр излучения  $^{109}\text{Cd}$ , измеренный в двухфазном детекторе на основе аргона.

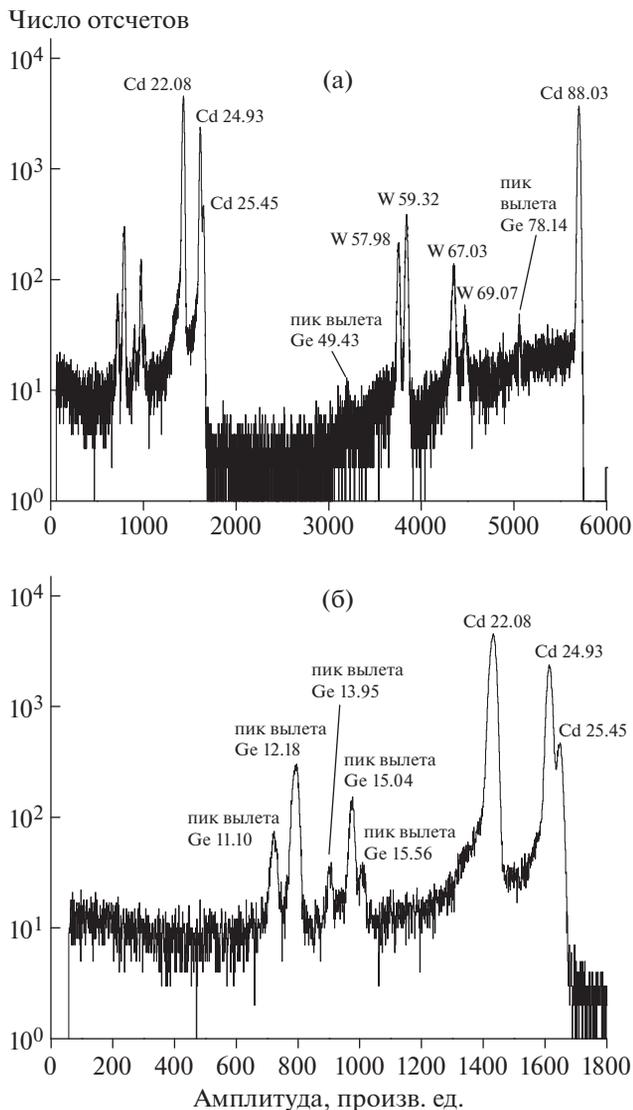
ОПИСАНИЕ РАДИОАКТИВНОГО  
ИСТОЧНИКА  $^{109}\text{Cd}$

Изотоп  $^{109}\text{Cd}$  распадается в  $^{109}\text{Ag}$  с периодом полураспада 461 день, испуская множество  $\gamma$ -линий в энергетическом диапазоне 20–90 кэВ [8–12]. Схематическое изображение источника, используемого в наших измерениях, показано на рис. 1.

Источник был произведен компанией Циклотрон и имел активность  $2.5 \cdot 10^8$  Бк в апреле 2014 г. [13]. Радионуклид  $^{109}\text{Cd}$  был осажден на серебряную фольгу посредством гальванизации. Фольга с радионуклидом была герметично запечатана в титановой капсуле. Герметизация капсулы обеспечивалась лазерной сваркой. С одной стороны ра-



Рис. 1. Схема устройства источника  $^{109}\text{Cd}$  диаметром и высотой 3 мм.



**Рис. 2.** Спектр излучения источника  $^{109}\text{Cd}$  после прохождения через алюминиевый и акриловый фильтры (каждый толщиной 3 мм), измеренный при помощи HPGe-детектора: весь спектр (а) и низкоэнергетическая часть (б). Энергия линий указана в килоэлектронвольтах (кэВ). Линии в области 60–70 кэВ вызваны характеристическим излучением вольфрамовой подложки, расположенной внутри источника  $^{109}\text{Cd}$ . На рисунке также отмечены пики вылета германия.

дионуклида была установлена вольфрамовая защита (подложка) для поглощения излучения, а с другой находилось тонкое бериллиевое окно.

### ИЗМЕРЕНИЯ С HPGe-ДЕТЕКТОРОМ

Наиболее точный спектр излучения источника  $^{109}\text{Cd}$  был измерен при помощи HPGe-детектора GUL/EGX 10-05 Canberra [14, 15]. Между источником  $^{109}\text{Cd}$  и детектором были расположены

пластины из алюминия и акрила, каждая толщиной 3 мм, чтобы воссоздать условия по рассеянию и поглощению излучения, приближенные к условиям при измерениях с двухфазным детектором [5]. Рис. 2 демонстрирует полученный амплитудный спектр.

В табл. 1 представлены характеристики полученного спектра, а именно: энергия  $E$ , источник линии, относительная интенсивность линии, полученная путем нормирования на площадь пика с энергией 88.03 кэВ, и энергетическое разрешение  $\sigma/E$  найденных пиков (за исключением пиков вылета). Площадь и энергетическое разрешение линий были вычислены путем аппроксимации пиков распределением Гаусса и вычитания подложки от непрерывной части спектра.

Пики с энергиями 88.03, 25.45, 24.93 и 22.08 кэВ связаны с переходами в  $^{109}\text{Cd} \rightarrow ^{109}\text{Ag}$  и  $k\beta_2$ ,  $k\beta_1 + k\beta_3$  и  $k\alpha_1 + k\alpha_2$  в серебре [11]. В диапазоне 60–70 кэВ были идентифицированы характеристические линии вольфрама с энергиями 69.07, 67.03, 59.32 и 57.98 кэВ. Все другие обнаруженные пики были вызваны вылетом рентгеновского излучения из HPGe-детектора с энергиями 9.87 кэВ ( $\text{Ge } k\alpha_1 + \text{Ge } k\alpha_2$ ) и 10.98 кэВ ( $\text{Ge } k\beta_1 + \text{Ge } k\beta_3$ ), т.е. являлись пиками вылета. Например, пик с энергией 11.10 кэВ является пиком вылета, вызванным поглощением первичного  $\gamma$ -кванта с энергией 22.08 кэВ и вылетом из детектора вторичного  $\gamma$ -кванта с энергией 10.98 кэВ.

Помимо пиков в спектре имеются две непрерывные области. Первая область, в диапазоне 25–88 кэВ, вызвана комптоновским рассеянием  $\gamma$ -квантов на нечувствительных окружающих материалах и частичной потерей энергии перед попаданием в детектор. Вторая область, в диапазоне 0–22 кэВ, появляется из-за того, что  $\gamma$ -кванты испытывают комптоновское рассеяние в веществе детектора, а затем покидают его, унося часть энергии.

### ИЗМЕРЕНИЯ С ДЕТЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ YAP:Ce

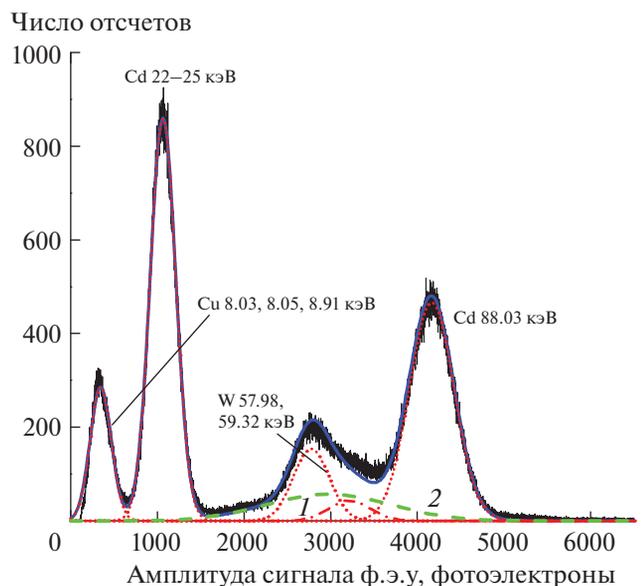
Помимо измерений с HPGe-детектором спектр излучения  $^{109}\text{Cd}$  был измерен при помощи сцинтиллятора YAP:Ce ( $\text{YAlO}_3$ , легированный церием), соединенного с фотоэлектронным умножителем (ф.э.у.) Hamamatsu R10233. Для согласования спектра излучения сцинтиллятора со спектром квантовой эффективности ф.э.у. кристалл был покрыт сместителем спектра РОРОР [17]. Источник  $^{109}\text{Cd}$  был отделен от сцинтиллятора поглощающим фильтром из медной фольги (толщиной 0.17 мм) для уменьшения загрузки ф.э.у. и правильного подсчета числа фотоэлектронов. Измерения с детектором на основе YAP:Ce были необходимы для проверки качества аппроксимации

итогового спектра в случае перекрывающихся пиков. Рис. 3 демонстрирует измеренный амплитудный спектр.

С одной стороны, данный спектр похож на спектр, полученный при помощи HPGe-детектора:  $\gamma$ -линии  $^{109}\text{Cd}$  и рентгеновские характеристические линии вольфрама хорошо различимы. С другой стороны, появились характеристические линии меди с энергиями 8–9 кэВ, в то время как пики вылета, связанные с германием, исчезли. Помимо этого наблюдались пики вылета, связанные с иттрием, и непрерывный спектр, вызванный рассеянным излучением: их полный вклад показан кривой 2. Поскольку энергетическое разрешение детектора на основе YAP:Ce хуже, чем для HPGe-детектора, линии в диапазоне энергий 22–25 кэВ сливаются в единый пик; аналогичный эффект наблюдается и для линий вольфрама.

### ИЗМЕРЕНИЯ С ДВУХФАЗНЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Рис. 4 демонстрирует спектр излучения источника  $^{109}\text{Cd}$ , измеренный при помощи двухфазного детектора, подробно описанного в [5, 6].

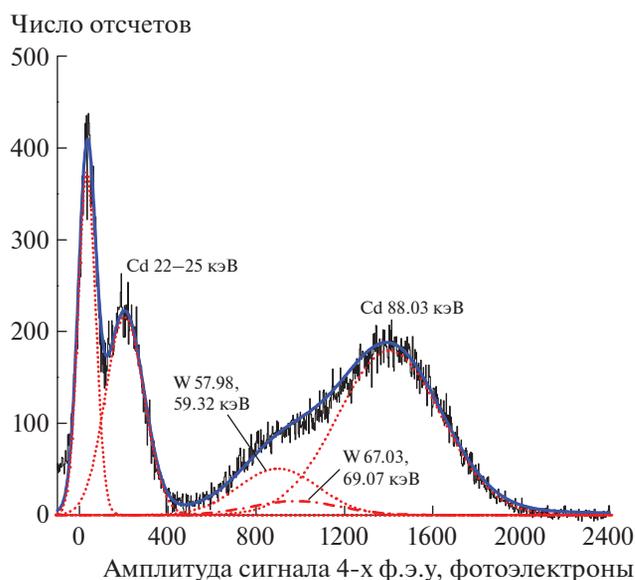


**Рис. 3.** Спектр излучения  $^{109}\text{Cd}$ , измеренный при помощи сцинтиллятора YAP:Ce, соединенного с ф.э.у. Источник  $^{109}\text{Cd}$  был снабжен поглощающим фильтром из меди. Вклад от различных линий показан кривыми: пунктирными, 1 и 2. Кривая 1 соответствует линиям вольфрама с энергией 67.03 и 69.07 кэВ, 2 – пикам вылета иттрия и рассеянию  $\gamma$ -излучения на неактивном веществе детектора; сплошная кривая – аппроксимация всего спектра. Энергетическое разрешение составило 6% и 14% при энергии соответственно 88 и 22–25 кэВ.

**Таблица 1.** Пики, найденные в спектре излучения  $^{109}\text{Cd}$  (за исключением пиков вылета), измеренного HPGe-детектором. Энергии линий были взяты из [11, 16]

$E$ , кэВ	Источник линии	Интенсивность линии	$\sigma/E$ , $10^{-3}$
88.03	$^{109}\text{Cd} \rightarrow ^{109}\text{Ag}$	1	2.2
69.07	W $k\beta_2$	0.01	2.8
67.03	W $k\beta_1 + k\beta_3$	0.037	3.6
59.32	W $k\alpha_1$	0.092	2.9
57.98	W $k\alpha_2$	0.049	2.9
25.45	Ag $k\beta_2$	0.09	5.1
24.93	Ag $k\beta_1 + k\beta_3$	0.44	5.3
22.08	Ag $k\alpha_1 + k\alpha_2$	0.97	7.0

Энергетическое разрешение двухфазного детектора было несколько хуже, чем разрешение детектора на основе сцинтиллятора YAP:Ce. Соответственно форма спектра, измеренного при помощи двухфазного детектора, была в общем похожа на форму спектра, полученного с YAP:Ce-детектором, несмотря на худшее разделение линий вольфрама и кадмия. Весь спектр хорошо описывается моделью, включающей линии кадмия с энергиями 22–25 кэВ и 88 кэВ и характеристические линии вольфрама с энергиями 58–60 кэВ и



**Рис. 4.** Спектр излучения  $^{109}\text{Cd}$ , измеренный при помощи двухфазного детектора на основе аргона при дрейфовом поле 0.62 кВ/см и поле 7.3 кВ/см в электролюминесцентном зазоре. Вклад от различных линий показан пунктирными кривыми и штрихпунктирной; сплошная кривая – аппроксимация всего спектра. Энергетическое разрешение составило 17% и 41% при энергии соответственно 88 и 22–25 кэВ.

67–69 кэВ. Следует отметить, что в статье [5] в амплитудном спектре двухфазного детектора линии с энергией около 60 кэВ были вызваны характеристическими линиями вольфрама, а не примесью изотопа  $^{241}\text{Am}$ , как было предположено ранее. Таким образом, в данной работе мы исправили ошибочное истолкование предыдущего результата.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был изучен спектр излучения источника  $^{109}\text{Cd}$  при помощи детектора на основе сцинтиллятора YAP:Ce и германиевого детектора высокой чистоты (HPGe). Эти измерения позволили нам успешно описать форму амплитудного спектра, измеренного в двухфазном детекторе на основе аргона при облучении его источником  $^{109}\text{Cd}$ . Наряду с  $\gamma$ -линиями от радионуклида  $^{109}\text{Cd}$  с энергиями 22–25 кэВ и 88 кэВ были обнаружены сопутствующие линии вольфрама (из-за вольфрамовой подложки) с энергиями 60–70 кэВ и линии меди (из-за медного фильтра) с энергиями 8–9 кэВ. Таким образом, источник  $^{109}\text{Cd}$ , снабженный вольфрамовой подложкой и медным фильтром, может обеспечить набор линий  $\gamma$ -излучения в диапазоне от 8 до 90 кэВ для энергетической калибровки двухфазных детекторов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Часть работы, связанная с измерениями спектра излучения источника  $^{109}\text{Cd}$  при помощи HPGe-детектора, была выполнена в “Сибирском центре синхротронного излучения” на базе уникальных научных установок и стендов “Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Buzulutskov A.* // JINST. 2012. V. 7. P. C02025. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/02/C02025>
2. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Shekhtman L., Sokolov A.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2016. V. 816. P. 119. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.010>
3. *Buzulutskov A.* // Europhys. Lett. 2017. V. 117. P. 39002. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/117/39002>
4. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Grishnyaev A., Nosov V., Oleynikov V., Polosatkin S., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* // JINST. 2017. V. 12. P. C05010. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/05/C05010>
5. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Nosov V., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* // Nucl. Instrum. and Methods A. 2017. V. 845. P. 206. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.109>
6. *Bondar A., Buzulutskov A., Dolgov A., Frolov E., Nosov V., Oleynikov V., Shekhtman L., Shemyakina E., Sokolov A.* // JINST. 2017. V. 12. P. C05016. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/05/C05016>
7. *Buzulutskov A., Shemyakina E., Bondar A., Dolgov A., Frolov E., Nosov V., Oleynikov V., Shekhtman L., Sokolov A.* // Astroparticle Physics. 2018. V. 103. P. 29. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.06.00>
8. *Heath R.* Scintillation Spectrometry: Gamma-ray Spectrum Catalogue. 1964.
9. <http://www-personal.umich.edu/~ianrit/gammaspec.pdf>
10. *Patrignani C., Agashe K., Aielli G., Amsler C., Antonelli M., Asner D.M., Baer H., Banerjee Sw., Barnett R.M., Basaglia T., Bauer C.W., Beatty J.J., Belousov V.I., Beringer J., Bethke S. et al.* // Chin. Phys. C. 2016. V. 40. P. 100001. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/10/100001>
11. <https://www.nndc.bnl.gov>
12. <http://nucleardata.nuclear.lu.se>
13. <http://www.cyclotronzao.ru/en/products/sources-of-x-ray-and-gamma-radiation-type-irik-d/>
14. *Knoll G.* Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
15. <http://www.canberra.com>
16. <http://xdb.lbl.gov>
17. *Babichev E.A., Baru S.E., Grigoriev D.N., Oleynikov V.P., Porosev V.V., Savinov G.A., Stephane Callier* // JINST. 2015. V. 10. P. C03002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/03/C03002>