

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.07

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ  
ОТ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ ОТ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА  
ОСНОВЕ ЛИТИЕВОГО СТЕКЛА

©2023 г. Е. С. Кузьмин<sup>a,\*</sup>, Г. Д. Бокучава<sup>b</sup>, И. Ю. Зимин<sup>a</sup>, А. А. Круглов<sup>b</sup>,  
Н. А. Кучинский<sup>a</sup>, В. Л. Малышев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова  
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

<sup>b</sup>Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка  
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

\*e-mail: e\_kuzmin@jinr.ru, e\_kuzmin@mail.ru

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принята к публикации 05.08.2023 г.

Проводилось исследование характеристик сцинтилляционных детекторов нейтронов, построенных на монолитных и гетерогенных сцинтилляторах, содержащих <sup>6</sup>Li. Испытания детекторов проходили на пучке тепловых нейтронов и на стенде с источником  $\gamma$ -квантов <sup>60</sup>Co. Для обработки сигналов, полученных от детектора с монолитным сцинтиллятором, применялись три различных алгоритма разделения  $\gamma$ -излучения: регистрация импульсов на постоянном пороге и селекция по форме импульса с помощью двух цифровых методов разделения сигналов – интегрированием заряда и измерением длительности импульсов. Исследование показало, что для гомогенного сцинтиллятора эффективность методов селекции по форме импульса примерно одинакова при разделении тепловых нейтронов и  $\gamma$ -квантов и значительно уступает методу регистрации на постоянном пороге. При этом качество п/ $\gamma$ -разделения хуже результата, полученного с гетерогенным сцинтиллятором при регистрации на постоянном пороге. Цель работы – сравнение результатов применения цифровых методов разделения гамма-квантов с результатами, полученными при использовании гетерогенных сцинтилляторов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы нейтронов на базе литиевых стекол используются в различных областях науки и техники. Для таких детекторов точность измерения потоков нейтронов в значительной степени зависит от качества селекции сигналов,

соответствующих нейтронам, от сигналов порожденных  $\gamma$ -квантами. Применяются различные способы понижения чувствительности детекторов к  $\gamma$ -квантам: вариации геометрии сцинтилляторов, а именно, уменьшение толщины стекла [1] либо использование гетерогенных структур [2–4], а также электронные методы обработки сигналов – аналоговые [5] либо цифровые [6].

## 2. ЭЛЕКТРОННАЯ СЕЛЕКЦИЯ

Простейшим способом электронной селекции является разделение сигналов на постоянном пороге. Если определить  $\gamma$ -чувствительность как отношение числа зарегистрированных событий к числу  $\gamma$ -квантов, пересекающих рабочий объем детектора, то, например, для монолитного сцинтиллятора этот показатель, определенный в работе [7], составил  $k = 1.42 \times 10^{-4}$ .

При использовании специализированных сцинтилляторов, таких как NE 912 или его аналогов, становится возможным разделение сигналов по форме импульса. Анализ формы импульса позволяет определить, было ли событие вызвано нейтроном или  $\gamma$ -квантом. Обычно используются два общих подхода для считывания формы импульса:

- интегрирование аналогового заряда в двух различных окнах, соответствующих максимальным различиям между формами импульсов;
- полная оцифровка импульсов быстродействующим цифровым преобразователем (дигитайзером) с последующей обработкой с помощью программного обеспечения.

В этой работе использована полная оцифровка импульсов детектора и применялись следующие методы программного разделения:

- цифровая селекция на постоянном пороге,
- измерение времени превышения амплитуды над порогом,
- интегрирование заряда.

Характеристики детектора с монолитным стеклом, полученные в результате цифровой обработки сигналов, сравнивались с характеристиками детектора, построенного на гетерогенном сцинтилляторе [7].

## 3. ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения с тепловыми нейтронами проводились на канале № 13 реактора ИБР-2 [1]. Наборы данных осуществлялись с помощью дигитайзера “DT5751” фирмы “CAEN”, подключенного непосредственно к аноду фотоумножителя XP 2262B (Photonis) с

делителем напряжения S563/L (Philips). Параметры дигитайзера: входное сопротивление  $R = 50$  Ом, максимальная амплитуда сигнала  $A = 1$  В, амплитудное разрешение 10 бит, частота дискретизации 1 ГГц. Высоковольтное питание обеспечивалось блоком NDT 1470 CAEN. Измерение  $\gamma$ -чувствительности детектора проводилось на стенде с источником  $^{60}\text{Co}$ . Стеклоанный сцинтиллятор NE 912 использовался для изготовления монолитного и гетерогенного образцов в форме диска размерами  $\varnothing 40 \times 2$  мм<sup>2</sup>.

#### 4. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

При расчете заряда сигнала осуществлялось интегрирование в окне, которое начиналось за 30 нс от триггера и имело длительность 420 нс. Такая длительность соответствует 5-кратному времени высвечивания медленной компоненты импульса при возбуждении сцинтиллятора  $\gamma$ - квантами [8].

Отсеивались импульсы, базовая линия которых содержала шумы на уровне, превышающем 0.3% от среднего значения. Сигналы, ширина которых по основанию была менее 50 нс, также исключались из обработки. По результатам интегрирования были построены зарядовые спектры для тепловых нейтронов и  $\gamma$ -квантов источника  $^{60}\text{Co}$ .

Рис. 1

Полученные спектры событий представлены на рис. 1. На графике можно видеть хорошо выраженный пик, соответствующий полной энергии, выделенной при захвате нейтрона ядром  $^6\text{Li}$ . Энергетическое разрешение в нейтронном пике составляет  $\Delta E/E = 15\%$ . Зарядовый спектр импульсов от источника  $^{60}\text{Co}$  зарегистрирован при меньшей скорости счета. В спектре тепловых нейтронов плоская низкоэнергетическая часть слева от канала  $N_{\text{ch}} = 500$  обусловлена частичным выделением энергии заряженными продуктами реакции захвата нейтрона (1) за пределами сцинтиллятора, когда пробег заряженных частиц не укладывается полностью в стекле [7]



Поэтому события в области 200–500 каналов также соответствуют захвату нейтронов. Поскольку пробеги  $\alpha$ -частиц и тритонов в стекле чрезвычайно малы ( $R_\alpha=6$  мкм и  $R_t=36$  мкм), то доля таких событий от полного числа захватов нейтронов в гомогенном сцинтилляторе не превышает  $\varepsilon \leq 5 \times 10^{-5}$ . Для гетерогенных структур, где площадь поверхности раздела сцинтиллятора и нейтрального материала значительно больше, чем в гомогенном сцинтилляторе, доля таких событий возрастает [7].

#### 5. СЕЛЕКЦИЯ НА ПОСТОЯННОМ ПОРОГЕ

Простейший способ подавления сигналов от  $\gamma$ -квантов при измерении потоков нейтронов – это разделение событий на постоянном пороге по заряду импульса. Эффективность подавления зависит от энергетических спектров частиц в конкретном эксперименте и значения установленного порога регистрации. В работе сравнение проводилось для тепловых нейтронов и  $\gamma$ -квантов от источника  $^{60}\text{Co}$ . Электронная эффективность детектора к нейтронам и его  $\gamma$ -чувствительность измерялись для единого порога регистрации. Величина порога определялась как среднее значение минус два стандартных отклонения нормального распределения, описывающего нейтронный пик (электронная эффективность  $\eta \approx 98\%$ , рис. 1). Полная эффективность детектора к нейтронам представляет собой произведение электронной эффективности регистрации на долю в процентах нейтронов, захваченных изотопом  $^6\text{Li}$  в материале сцинтиллятора.

### *5.1 Монолитный сцинтиллятор*

Для использованного в работе сцинтиллятора NE 912 толщиной 2 мм моделированием в среде GEANT4 было установлено, что доля захваченных  $^6\text{Li}$  нейтронов с энергетическим распределением Максвелла–Больцмана при температуре 25 мэВ составляет  $\rho \approx 91\%$  [9]. Таким образом, полная эффективность детектора к нейтронам в этом случае составляет  $\sigma = \rho \times \eta \approx 89\%$ . Гамма-чувствительность рассчитывалась как число событий с зарядом, превышающим порог регистрации, нормированное на 1 млн  $\gamma$ -квантов, пересекающих объем сцинтиллятора, и составила  $k = 1.42 \times 10^{-4}$  [7]. Повышение порога регистрации до уровня среднего значения нейтронного пика (порядка 50% электронной эффективности к нейтронам) позволяет снизить  $\gamma$ -чувствительность только до значения  $k = 2.4 \times 10^{-5}$ .

### *5.2 Гетерогенный сцинтиллятор*

При исследовании гетерогенного сцинтиллятора использовался только метод селекции на постоянном пороге [7]. Здесь электронная эффективность детектора при концентрации стекла 25% также составляла примерно 98%, а полная эффективность по отношению к монолитному стеклу равна 0.53. При этом величина  $\gamma$ -чувствительности оказалась равной  $k = 1.6 \times 10^{-6}$ . Повышение порога регистрации до уровня среднего значения нейтронного пика (порядка 50% электронной эффективности к нейтронам) позволяет снизить  $\gamma$ -чувствительность до значения  $k = 2.7 \times 10^{-7}$ . Потеря полной эффективности к нейтронам в этом случае есть следствие уменьшения в 4 раза объема стекла в сцинтилляторе. Компенсировать такую потерю можно увеличением толщины сцинтиллятора.

## 6. СЕЛЕКЦИЯ ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА

Следующий способ разделения импульсов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов – это предложенный в работе [10] метод, при котором измеряется время превышения амплитуды импульса над постоянным порогом. Измеряемый параметр TOT определяется как интервал времени, в течение которого обнаруженный импульс превышает установленный порог. В работе [11] был предложен вариант развития метода TOT. В этом варианте параметр CF-TOT определяется как интервал времени превышения порога, который составляет фиксированную долю амплитуды импульса. По определению, CF-TOT не зависит от амплитуды, а определяется только формой сигнала. В нашей работе выполнялось определение длительности на пороге, равном половине высоты импульса.

Запись сигналов дигитайзером велась без всякой предварительной аналоговой обработки сигналов. Форма импульса, зарегистрированная дигитайзером, определяется характером высвечивания сцинтиллятора и представляет собой набор отдельных пиков, соответствующих вспышкам отдельных чувствительных центров (рис. 2). Для сигнала такой формы определение длительности не может быть выполнено с хорошей точностью. Поэтому предварительно проводилась процедура сглаживания импульса перед обработкой. Для сглаживания использовался алгоритм 30-точечного скользящего среднего. Число точек для усреднения определялось из требования монотонности заднего фронта в средней части импульса.

Рис. 2

В этом методе коэффициент качества разделения сигналов,  $f = (t_\gamma - t_n) / (\delta_\gamma + \delta_n) = 0.18$  (см. определение обозначений на рис. 3). В соответствии с рисунком селекция нейтронов в этом случае возможна при регистрации импульсов ниже установленного порога. При высоком пороге регистрации, когда электронная эффективность к нейтронам составляет примерно 98%,  $\gamma$ -чувствительность высока и составляет  $k = 0.9$ . Если снизить порог до уровня регистрации нейтронов 50%,  $\gamma$ -чувствительность падает до уровня  $k = 0.18$ . Очевидно, что эффективное  $n/\gamma$ -разделение сигналов таким методом в нашем случае невозможно.

Рис. 3

## 7. РАЗДЕЛЕНИЕ МЕТОДОМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ЗАРЯДА

Разделение по форме импульсов также может проводиться методом интегрирования заряда. Аналоговые электронные системы  $n/\gamma$ -разделения сигналов, использованные на протяжении нескольких десятилетий, имеют ограничение по скорости счета до  $f \leq 200$  кГц [12]. Они могут считать только количество событий, классифицированных как нейтроны или  $\gamma$ -кванты “на лету”. После окончания измерений

постобработка сигналов невозможна. Здесь мы используем технологию цифровой обработки импульсов, зарегистрированных с помощью дигитайзера.

Чтобы установить характер различия формы сигналов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов, предварительно были построены средние импульсы событий. Для этого для каждого случаев суммировались по 500 тыс. оцифрованных импульсов. Полученные средние импульсы нормировались на 1 в точке максимума сигнала. Результат показан на рис. 4.

Мы проводили  $n/\gamma$ -разделение сигналов, используя метод сравнения заряда [13]. В этом методе в качестве параметра, характеризующего форму импульса, используется отношение, обозначенное как  $PSP = (Q_T - Q_L) / Q_T$ . Здесь  $Q_T$  представляет собой интегрированный полный заряд сигнала в области  $(t_0, t_2)$  а  $Q_L$  – интегрированный заряд с определенной начальной точки до конца сигнала в области  $(t_1, t_2)$  (см. рис. 4). Координаты точек начала интегрирования и конца сигнала  $(t_1, t_2)$  выбирались так, чтобы обеспечить максимальное значение параметра формы импульса (PSP).

Рис. 4

Полученные распределения количества импульсов по значению параметра PSP представлены на рис. 5. Для этого метода коэффициент качества разделения сигналов

Рис. 5

$$f = (m_n - m_\gamma) / (\Delta_\gamma + \Delta_n) = 0.22$$

(см. рис. 5). Здесь при регистрации нейтронов учитываются импульсы, превышающие установленный порог. Если порог регистрации, установлен так, чтобы электронная эффективность к нейтронам была равна примерно 98%, величина  $\gamma$ -чувствительности составит  $k = 0.94$ . При электронной эффективности к нейтронам на уровне 50% получаем  $k = 0.3$ . Почти полное перекрытие распределений на рис. 5 для наших условий не дает возможности осуществить подавление сигналов от  $\gamma$ -квантов без значительного снижения эффективности детектора к нейтронам.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено сравнительное исследование качества разделения сигналов, соответствующих нейтронам и  $\gamma$ -квантам от детекторов, построенных на монолитном и гетерогенном сцинтилляторах. Детекторы были построены на одном специализированном стеклянном сцинтилляторе для регистрации нейтронов (NE 912). Проводилось сравнение уровней  $\gamma$ -чувствительности, которые могут быть достигнуты с помощью различных методов селекции сигналов. Значения  $\gamma$ -чувствительности детектора для различных методов селекции при двух значениях эффективности к нейтронам приведены в табл. 1 и 2.

Таким образом, можно заключить, что при разработке специализированных детекторов нейтронов на гетерогенном сцинтилляторе можно добиться качества  $n/\gamma$ -

разделения сигналов выше, чем с монолитным стеклом. При этом можно снизить требования к детекторной электронике, что может быть важно для экспериментов, где присутствует большое количество каналов регистрации нейтронов. Кроме того, для изготовления такого детектора нет необходимости использовать стеклянный сцинтиллятор, обладающий специальными свойствами  $n/\gamma$ -разделения по форме импульса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокучава Г.Д., Круглов А.А., Папушкин И.В., Журавлев В.В., Петухова Т.Б., Мурашкевич С.М., Трунтова Л.А., Зернин Н.Д. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 5. С. 3. DOI:10.31857/S1028096022050077
2. Ianakiev K.D., Hehlen M.P., Swinhoe M.T., Favalli A., Iliev M.L., Lin T.C., Bennett B.L., Barker M.T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 784. P. 189. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.10.073>
3. Rich G.C., Kazkaz K., Martinez H.P., Gushue T. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2015. V. 794. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.05.004>
4. Mayer M.F., Nattress J., Trivelpiece C., Jovanovic I. // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A. 2015. V. 784. P. 168. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.023>
5. Cerny, J., Dolezal, Z., Ivanov, M.P., Kuzmin, E.S., Svejda, J., Wilhelm, I.// Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2004. V. 527 P. 512. DOI:10.1016/j.nima.2004.03.179
6. Wang C.L., Riedel R.A. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. P. 013301. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939821>
7. Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А. // ПТЭ. 2022. № 4. С. 51. DOI: 10.31857/S0032816222040231
8. Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А., Мальшев В.Л. // ПТЭ. 2021. № 2. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816221010316>
9. Geant4. A Simulation Toolkit. <https://geant4.web.cern.ch/support/download>
10. Kipnis I., Collins T., Dewitt J. et al. // IEEE Trans. Nucl. Scie. 1997.V. 44. № 3. P. 289. <https://doi.org/10.1109/23.603658>.
11. Roy A., Vartsky D., Mor I., Cohen E. O., Yehuda-Zada Y., Beck A., Arazl L. // J. Instrumentation. 2022. V. 17. P. 05028. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/05/P05028>
12. Kaschuck Y, Esposito B. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2005. V. 551. P. 420. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.05.071>
13. Adams J.M., White G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1978. V. 156. P. 459. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(78\)90746-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90746-2)

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Зарядовые спектры нейтронов и  $\gamma$ -квантов, полученные в результате первичной обработки.

**Рис. 2.** Исходный и сглаженный по 30 точкам сигналы от  $\gamma$ -квантов.

**Рис. 3.** Распределение сигналов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов по ширине на половине высоты импульса.

**Рис. 4.** Усредненные сигналы для нейтронов и  $\gamma$ -квантов. При усреднении использовалось по 500 тысяч импульсов в каждом случае. Сигналы нормированы и совмещены по оси абсцисс в точках максимальной амплитуды.

**Рис. 5.** Распределения импульсов по значению параметра PSP для нейтронов и  $\gamma$ -квантов.

**Таблица 1.** Гамма–чувствительность детектора при различных значениях электронной эффективности к нейтронам. Гомогенный сцинтиллятор

Электронная эффективность к нейтронам	97.7%	~50%
Регистрация на постоянном пороге	$1.4 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-5}$
Селекция по длительности	0.9	0.18
Селекция по форме импульса	0.94	0.3

**Таблица 2.** Гамма-чувствительность детектора при различных значениях электронной эффективности к нейтронам. Гетерогенный сцинтиллятор

Электронная эффективность к нейтронам	97.7%	~50%
Регистрация на постоянном пороге	$1.6 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-7}$

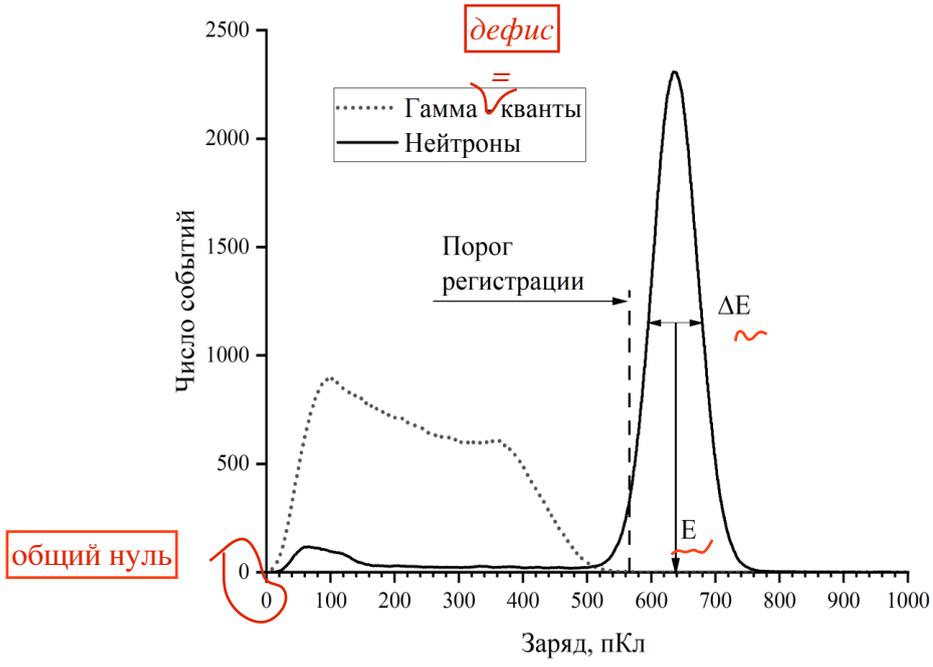
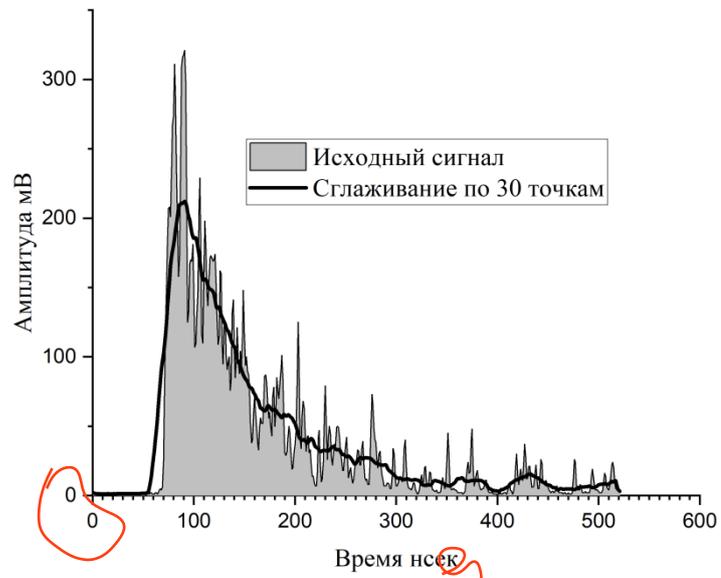
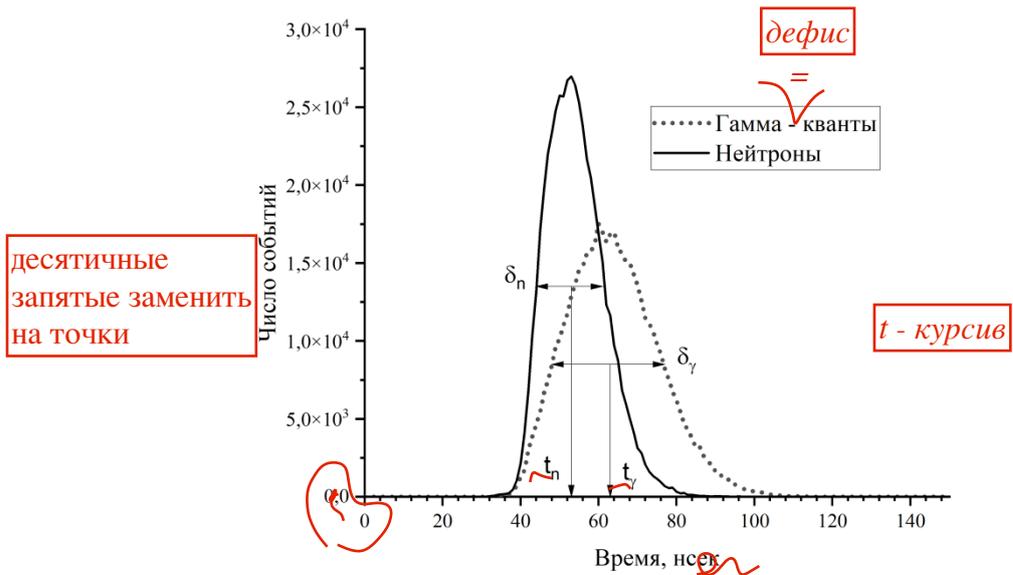


Рис. 1



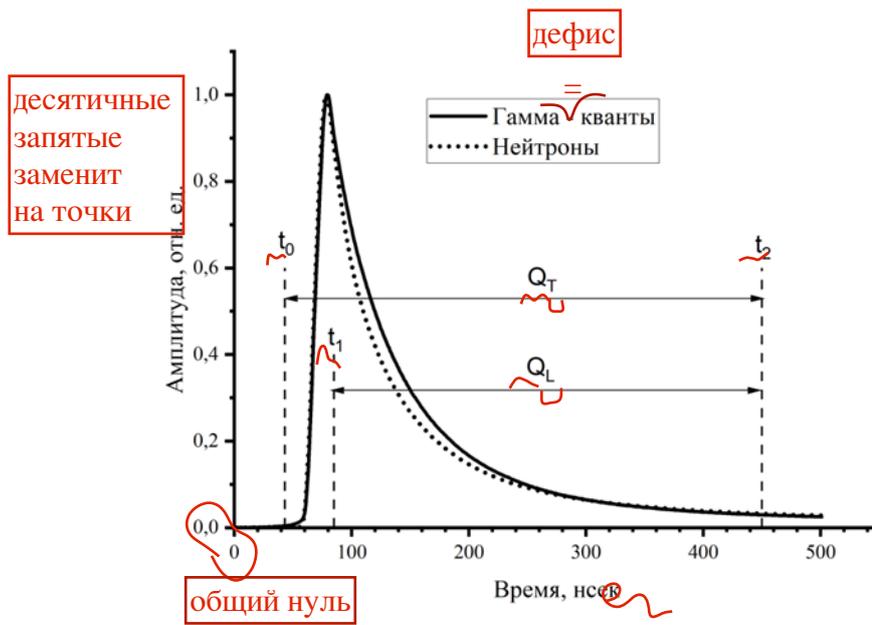
общий нуль

Рис. 2



ОБЩИЙ НУЛЬ

Рис. 3



**Рис. 4**

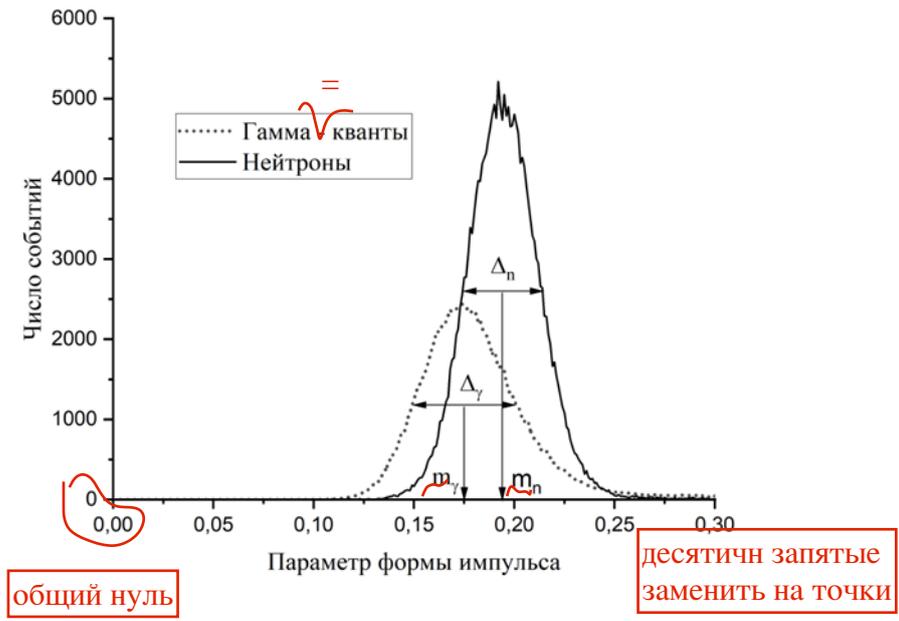


Рис. 5

## Для связи с авторами

Кузьмин Евгений Сергеевич

*E-mail:* [e\\_kuzmin@jinr.ru](mailto:e_kuzmin@jinr.ru)

*E-mail:* [e\\_kuzmin@mail.ru](mailto:e_kuzmin@mail.ru)

**Тел.: 8-916-985-97-89 (моб.)**

Б о к у ч а в а Г и з о Д а з м и р о в и ч

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

Тел.: (496)21-65273

Переводчику:

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE NEUTRON – GAMMA DISCRIMINATION METHODS FOR SCINTILLATORS BASED ON LITHIUM GLASS

©2023 E. S. Kuzmin<sup>1#</sup>, G. D. Bokuchava<sup>2</sup>, I. Yu. Zimin<sup>1</sup>, A. A. Kruglov<sup>2</sup>,  
N. A. Kuchinskiy<sup>1</sup> and V. L. Malyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research (JINR),  
Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

<sup>2</sup> *Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (JINR),  
Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail:* [e\\_kuzmin@jinr.ru](mailto:e_kuzmin@jinr.ru), [e\\_kuzmin@mail.ru](mailto:e_kuzmin@mail.ru)

### Abstract

In this work, we studied the characteristics of neutron scintillation detectors built on monolithic and heterogeneous scintillators containing <sup>6</sup>Li. The detectors were tested on a thermal neutron beam and on a stand with a source of  $\gamma$  - quanta <sup>60</sup>Co. To process the signals received from the detector with a monolithic scintillator, three different  $\gamma$  - radiation discrimination algorithms were used: registration of pulses at a constant threshold, and selection according to the pulse shape using two digital signal separation methods - charge integration and pulse duration measurement. The study showed that for a homogeneous scintillator, pulse shape selection methods work approximately the same when separating thermal neutrons and  $\gamma$  - quanta and are significantly inferior to the method of registration at a constant threshold. In this case, the quality of the n/ $\gamma$  separation is worse than the result obtained with a heterogeneous scintillator when recording at a constant threshold. The purpose of the work is to compare the results of using digital methods for discrimination of gamma - quanta with the results obtained using heterogeneous scintillators.

**Keywords:** Scintillator, lithium glass, thermal neutrons, n/ $\gamma$  discrimination, composite scintillator.

Список специфических терминов

Тепловые нейтроны - Thermal neutrons; Литиевое стекло - Lithium glass; Нейтрон/гамма разделение - n/ $\gamma$  discrimination; Гетерогенный сцинтиллятор - Heterogeneous scintillator;

## REFERENCES

1. *Bokuchava G.D., Kruglov A.A., Papushkin I.V., Zhuravlev V.V., Petukhova T.B., Murashkevich S.M., Truntova L.A., Zernin N.D.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. No. 2. P. 191. <https://doi.org/10.1134/S1027451022030077>
2. *Ianakiev K.D., Hehlen M.P., Swinhoe M.T., Favalli A., Iliev M.L., Lin T.C., Bennett B.L., Barker M.T.* // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. 2015. V. A784. P. 189. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.10.073>
3. *Rich G.C., Kazkaz K., Martinez H.P., Gushue T.* // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. 2015. V. A794. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.05.004>
4. *Mayer M.F., Nattress J., Trivelpiece C., Jovanovic I.* // Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. 2015. V. A784. P. 168. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.09.023>
5. *Cerny J., Dolezal Z., Ivanov M.P., Kuzmin E.S., Svejda J., Wilhelm I.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 2004. V 527. P. 512. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.03.179>
6. *Wang, C. L., Riedel R. A.* // Rev. of Sci. Instrum., 2016. V. 87. P. 013301. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939821>
7. *Kuzmin E. S., Bokuchava G. D., Zimin I. Yu., Kruglov A. A., and Kuchinsky N. A.* // Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. P. 583. <https://doi.org/10.1134/S0020441222040212>
8. *Kuzmin E. S., Bokuchava G. D., Zimin I. Yu., Kruglov A. A., Kuchinskiy N. A., and Malyshev V. L.* //Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. No. 2. P. 195. <https://doi.org/10.1134/S0020441221010279>
9. Geant4. A Simulation Toolkit. <https://geant4.web.cern.ch/support/download>
10. *Kipnis I., Collins T., Dewitt J. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Scie. 1997. V. 44. No. 3. P. 298. <https://doi.org/10.1109/23.603658>
11. *Roy A., Vartsky D., Mor I., Cohen E. O., Yehuda-Zada Y., Beck A. and Arazl L.* // Journal of Instrumentation May 2022 V. 17. No. 05 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/05/P05028>
12. *Kaschuck Y, Esposito B.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2005. A551. P. 420. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.05.071>
13. *Adams, J.M., White, G.,* //Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 1978. V. 156. Is 3. P. 459. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(78\)90746-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90746-2)

Есть папка с англоязычными рисунками:

