

Определение характеристик пластиковых сцинтилляционных детекторов

П. Г. Филончик^{1,2,*}, Д. Н. Грозданов^{2,3}, Ю. Н. Копач², П. С. Прусаченко², Н. А. Федоров², И. Н. Русков^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

²Объединённый институт ядерных исследований
, Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, Жолио-Кюри, д. 6

³Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук
Болгария, 1784, София

(Поступила в редакцию 26.06.2025; подписана в печать 16.10.2025)

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Лаборатории нейтронной физики им. Франка (ЛНФ) в группе TANGRA проводится эксперимент по исследованию угловых корреляций в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах углерода. Для регистрации нейтронов использовались 10 длинных (1 м) пластиковых сцинтилляционных детекторов производства компании EPIC CRYSTAL. Их особенностью является наличие двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), благодаря чему они обладают позиционной чувствительностью. В настоящей работе были выполнены измерения характеристик этих детекторов — пространственное разрешение и коэффициент затухания — путем совместного анализа накопленных зарядов и разницы времен прихода сигналов с обоих ФЭУ.

PACS: 29.40.Мс, 29.30.Нс, 29.30.Кv УДК: 539.1.

Ключевые слова: сцинтилляционные детекторы, позиционное разрешение, калибровка, пластиковые сцинтилляторы.

ВВЕДЕНИЕ

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в Лаборатории нейтронной физики им. Франка (ЛНФ) в группе TANGRA проводится эксперимент по исследованию угловых корреляций в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода [1] (Filonchik et al. 2024). В нём использовались 12 длинных (5х10х100см) пластиковых сцинтилляционных детекторов. Их особенностью является наличие двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), благодаря чему данные детекторы обладают позиционной чувствительностью. Впервые такого типа детекторы были исследованы в работе [2]. Было показано, что разница времен прихода сигналов на каждый ФЭУ линейно зависит от положения взаимодействия частицы с детектором.

Ранее нами были исследованы характеристики двух детекторов (один — EPIC CRYSTAL (ФЭУ CR105), второй — ELJEN TECHNOLOGY (ФЭУ ETEL 9266KEB)) в работе [3]. В настоящей работе измерено пространственное разрешение и коэффициент затухания 10 пластиковых сцинтилляционных (материал EPS100 [4]) детекторов с двумя ФЭУ (CR173-01) производством компании ERIC CRYSTAL. Мы добились улучшения пространственного разрешения с помощью совместного анализа накопленных зарядов и разницы времен прихода сигналов с обоих ФЭУ.

1. КАЛИБРОВочный эксперимент

Методика эксперимента аналогична использованной в работе [3]. Экспериментальная установка приведена на рис. 1.

Рядом с каждым детектором был выложен двойной слой из свинцовых пластин со щелями размером около 0.5–0.7 см на расстоянии –30, 0, 30 см от центра. Между свинцовыми пластинами напротив щелей был расположен источник гамма-квантов ⁶⁰Со. В данном подходе можно исследовать два детектора одновременно. Для учёта фоновых событий (космические лучи, естественная радиоактивность) были измерены также спектры без источника, которые вычитались из основных спектров. Длительность одного измерения составляла 3 минуты.

В качестве оцифровщика сигналов использовался ЦРС-8 (8-канальный цифровой регистратор сигналов), который разработан в ЛНФ ОИЯИ. Он позволяет преобразовывать входные сигналы в цифровой формат и передавать их на компьютер в режиме реального времени. Передача данных происходит по каналу USB-3, максимальная скорость передачи ~390 МБ/сек, частота оцифровки 100 МГц, разрядность АЦП 16 бит (рис. 2).

В эксперименте использовался способ накопления данных, при котором записывались все импульсы, превышающие заданную пороговую амплитуду. В дальнейшем при анализе накопленных данных выбирались пары импульсов, для которых разность временных отметок не превышала заданную ширину окна совпадений. Амплитудный диапазон сигналов составил 2–30 мВ. Частота загрузки оцифровщика составила менее 1 кГц на канал.

На рис. 3 показан пример формы импульса (черная

* filonchik.pg@phystech.edu

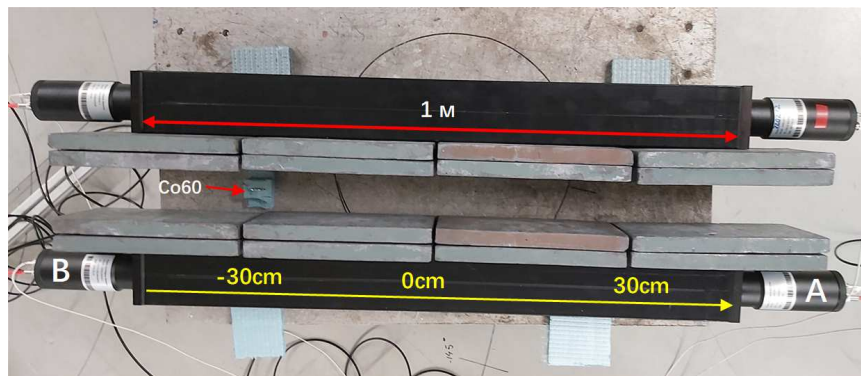


Рис. 1. Фото экспериментальной установки. (Буквами обозначены левый (В) и правый (А) ФЭУ)

кривая) и его производной (синяя кривая). Временная отметка срабатывания детектора формируется с помощью метода анализа положительной части производной, соответствующей фронту импульса. В выбранном диапазоне (красные штриховые линии) определяется центроид пика производной, что позволяет определять временную привязку импульса гораздо точнее, чем период следования тактов оцифровщика.

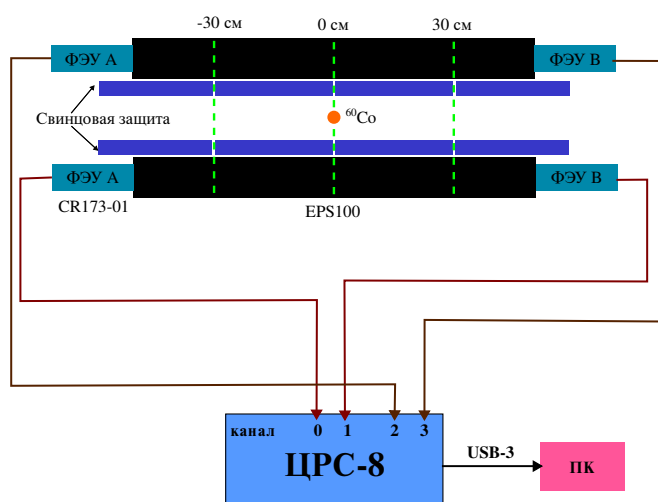


Рис. 2. Схема эксперимента

2. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ

В данной работе представлены три способа калибровки длинных пластиковых детекторов: по разнице времён прихода сигнала, по накопленному заряду (площади сигнала — проинтегрированному по времени сигналу) и комбинации этих двух методов. На экспериментальных гистограммах, представленных ниже, показаны измерения с источником (синяя кривая), измерения без источника — фоновые измерения (черная кривая) и разностный спектр измерения с источни-

ком и без (красная кривая). Предполагалось, что разностные спектры имеют вид нормального распределения, поэтому применялся фит функцией гаусса. Параметр стандартного отклонения σ использовался для расчётов полной ширины на полувысоте по формуле: $FWHM \approx 2.355\sigma$.

2.1. Калибровка по разнице времён

В результате обработки эксперимента были построены гистограммы $(t_A - t_B)$ как разница между измерениями времени ФЭУ «А» и «В» (4, а). В зависимости от положения источника временной пик сдвигается в одну или в другую сторону. Это означает, что сначала сработал ближний к щели ФЭУ, а потом дальний.

Далее проводилась пространственная калибровка детекторов в предположении линейной зависимости от разницы между временем срабатывания двух ФЭУ 4, б:

$$x(t) = b(\Delta t - t_0), \quad (1)$$

где x — расстояние от точки взаимодействия до центра детектора, $\Delta t = t_A - t_B$ — разница между временем срабатывания двух ФЭУ, t_0 — отвечает за смещение временного пика в центре детектора в ноль, b — перевод из временной шкалы в пространственную. В результате такой калибровки среднее по детекторам значение полной ширины на полувысоте (FWHM) составляет 23.3 ± 0.2 см.

2.2. Калибровка по накопленному заряду

Интегральная площадь сигнала, полученной с ФЭУ, пропорциональна световыходу — накопленному заряду. Предполагается, что количество световых фотонов, зарегистрированных ФЭУ, будет зависеть от расстояния до точки взаимодействия частицы с детектором по экспоненциальному закону. Согласно следующему уравнению:

$$Q_i(x) = Q^0 \varepsilon_i e^{-\lambda x} = Q_i^0 e^{-\lambda x}, \quad (2)$$

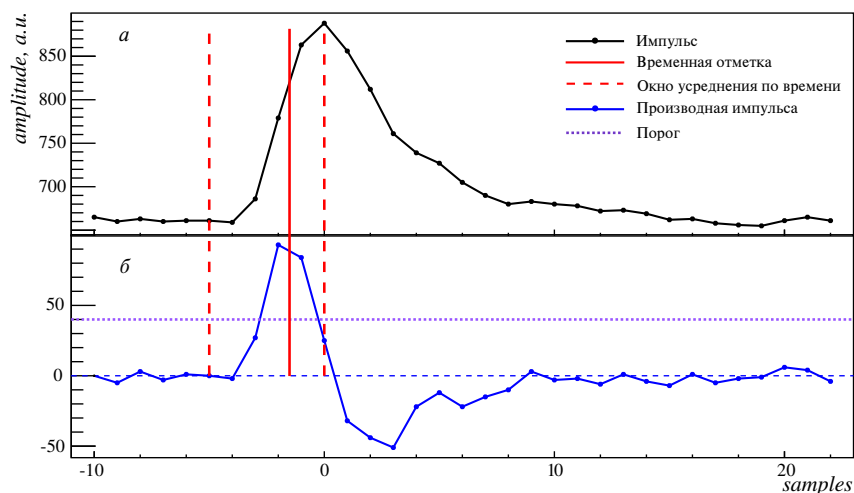


Рис. 3. *a* — Пример импульса. *б* — Производная импульса, иллюстрация алгоритма определения временной отметки

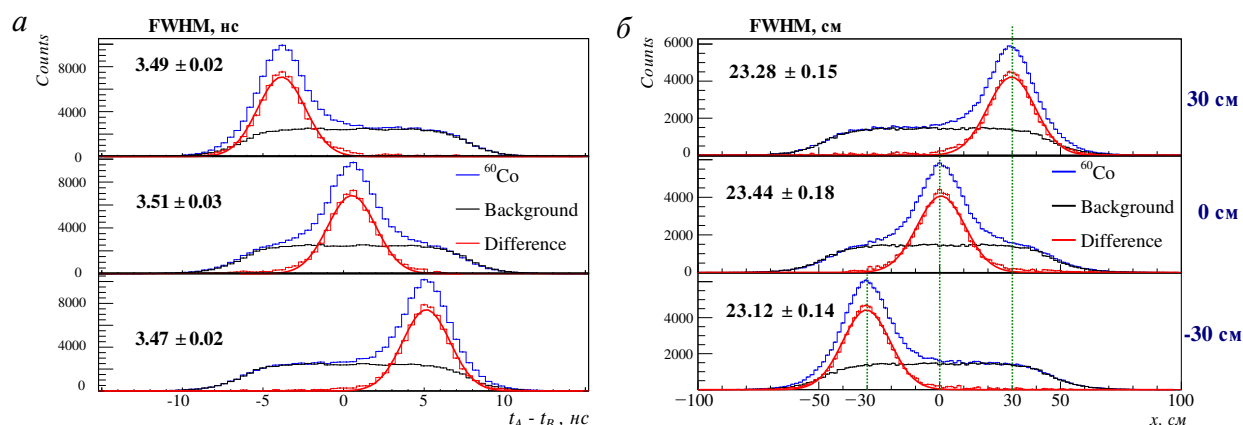


Рис. 4. Калибровка по разнице времён для одного из детекторов: *a* — Разница времени срабатывания двух ФЭУ в зависимости от местоположения источника; *б* — пространственная калибровка детекторов. (Зеленым пунктиром показаны положения источников)

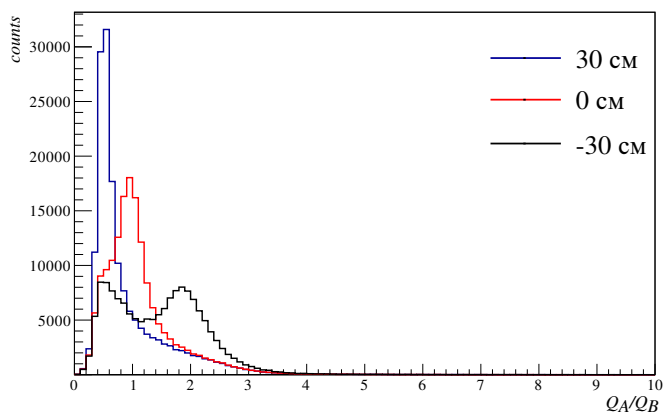


Рис. 5. Пример отношения накопленных зарядов с двух ФЭУ для разных положений источника

где x — расстояние от точки взаимодействия до ФЭУ, i — номер ФЭУ («А» или «В»), Q_i — количество све-

та, зарегистрированного ФЭУ, пропорциональное накопленному заряду сигнала, Q^0 — полное количество света, образовавшегося в детекторе, ε_i — коэффициент, учитывающий особенности ФЭУ (квантовую эффективность, коэффициент усиления), λ — коэффициент затухания света в сцинтиляторе.

Сравнивая между собой значения зарядов от двух ФЭУ, соответствующих одному детектору, мы можем определить положение точки взаимодействия частицы с детектором. В работах [5, 6] используется логарифм отношения зарядов от двух ФЭУ в качестве опорной точки для определения положения попадания частицы. Но такое распределение несимметрично, его сложно аппроксимировать правильной кривой (рис. 5).

В данной работе для определения положения точки взаимодействия согласно формуле (2) использовалось распределение разности накопленных зарядов с каждого ФЭУ, поделённой на средний заряд в детекторе $\langle Q \rangle = \sqrt{Q_A \cdot Q_B}$:

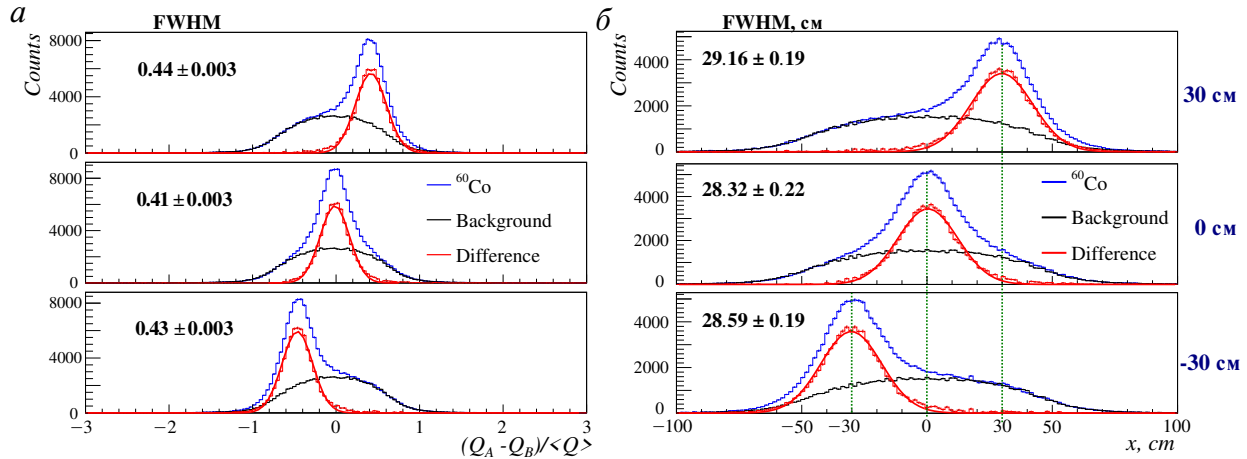


Рис. 6. Калибровка по накопленному заряду для одного из детекторов: *a* — Разница накопленных зарядов с двух ФЭУ, делённая на средний заряд сигнала в детекторе, в зависимости от местоположения источника, *б* — пространственная калибровка детекторов. (Зеленым пунктиром показаны положения источников)

$$p(x') = \frac{Q_A - Q_B}{\sqrt{Q_A \cdot Q_B}} = \frac{Q_A^0 e^{-\lambda x'} - Q_B^0 e^{-\lambda(l-x')}}{\sqrt{Q_A^0 Q_B^0} e^{-\lambda l}} = \sqrt{\frac{Q_A^0}{Q_B^0}} e^{-\lambda(x' - \frac{1}{2}l)} - \sqrt{\frac{Q_B^0}{Q_A^0}} e^{\lambda(x' - \frac{1}{2}l)} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_B}} e^{-\lambda(x' - \frac{1}{2}l)} - \sqrt{\frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_A}} e^{\lambda(x' - \frac{1}{2}l)}, \quad (3)$$

где x' — расстояние от точки взаимодействия до ФЭУ «А», l — длина детектора, равная 100 см, Q_A, Q_B — заряд с ФЭУ «А» и «В» соответственно, Q_A^0, Q_B^0 — полное количество света Q^0 , выделившееся в детекторе, умноженное на коэффициенты ε_A и ε_B , учитывающие особенности ФЭУ «А» и «В», соответственно.

Распределение переменной $p(x)$, пример которого приведён на рис. 6, симметричное, центр тяжести пика по оси абсцисс принимает значения от -1 до 1 . При расположении источника по центру детектора можно определить отношение коэффициентов ε для обоих ФЭУ, так как количество света, достигшее ФЭУ, должно быть одинаковым.

При использовании данного способа пространственное разрешение получается хуже, чем для метода по разнице времен (рис. 6, б). Среднее по детекторам значение FWHM равно 28.4 ± 0.2 см.

2.3. Комбинация двух методов

Для улучшения пространственного разрешения было взято среднее значение положения по двум калибровкам: $\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2}{2}$, где x_1 — положение взаимодействия γ -кванта с детектором, определённое по разнице времён, x_2 — по накопленному заряду сигнала. Также для минимизации эффектов, связанных с конечными размерами свинцовой щели в эксперименте, с помощью Geant4 было смоделировано распределение падения частиц на детектор (рис. 7, а). Экспериментально

измеренное (калиброванное) распределение положения взаимодействия частиц с детектором — свёртка двух функций (позиционное разрешение детектора и распределения, связанного с конечными размерами щели (0.5 см)):

$$f(x) = \sum_i Gaus(x, z_i, \sigma) \cdot g(z_i) = \sum_i A \cdot e^{\frac{(x-z_i)^2}{2\sigma^2}} \cdot g(z_i), \quad (4)$$

где i — номер бина в гистограмме, z_i — положение центра i -го бина гистограммы, $g(x)$ — распределение γ -квантов по x без учёта разрешения детектора, связанное с конечными размерами щели, $Gaus(x, z_i, \sigma)$ — гауссово распределение, отвечающее за позиционное разрешение детектора, A — высота пика гауссовой кривой. Спектры среднего значения положения аппроксимировались функцией (4) (зеленая кривая на рис. 7, б). Параметр гаусса σ использовался для определения позиционного разрешения. В результате усреднения значений по двум калибровкам разрешение детекторов значительно улучшилось. Среднее значение FWHM по всем детекторам составило 18.2 ± 0.16 см.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 8 представлены результаты длины затухания и позиционного разрешения для 10 детекторов (nD — номер детектора). Можно заметить, что есть корреляция между позиционным разрешением и длиной затухания.

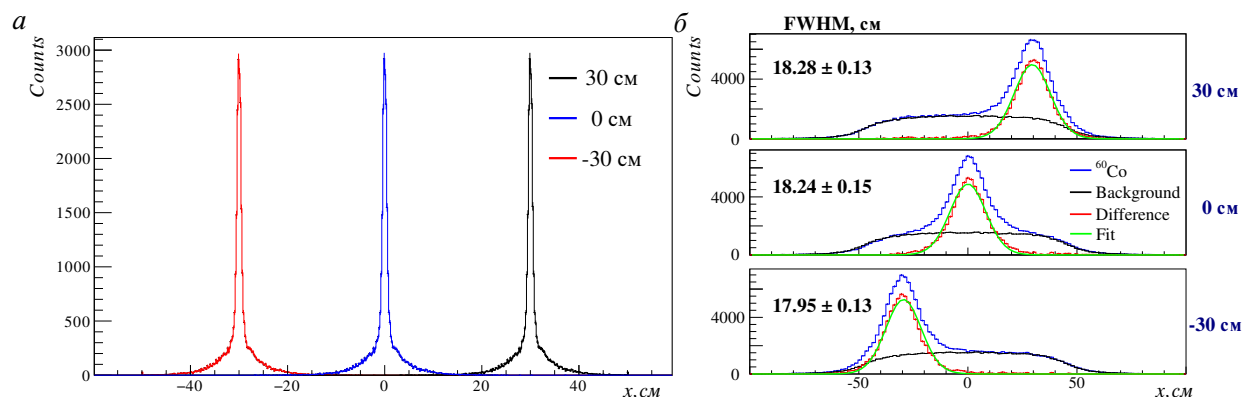


Рис. 7. *а* — Моделирование в Geant4 распределения γ -квантов, попавших на детектор; *б* — усреднённое значение положения попадания частицы по результатам двух калибровок

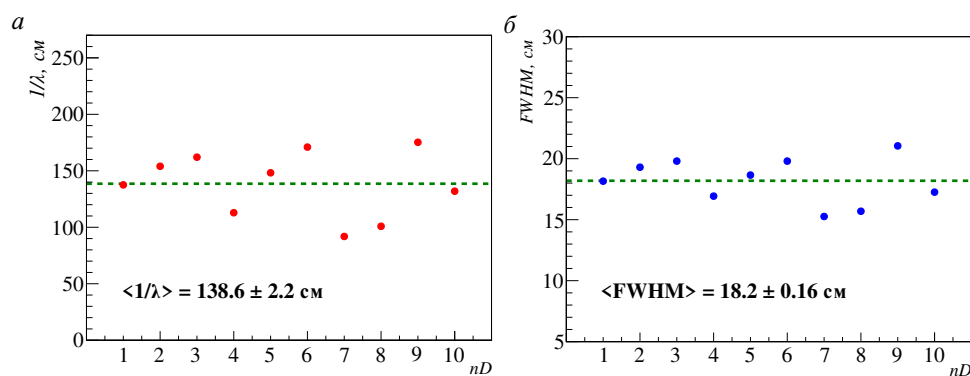


Рис. 8. *а* — Длина затухания света в сцинтилляторе для всех детекторов; *б* — позиционное разрешение детекторов (FWHM). (Зелёным пунктиром показано среднее значение величин)

хания света в сцинтилляторе. Для детекторов, у которых длина затухания больше, разрешение хуже.

Кроме того, результаты по определению длины затухания для разных детекторов варьируются в диапазоне от 90 до 180 см, что согласуется с работой [3] (~ 150 см), но для позиционного разрешения наши результаты, полученные путем анализа времен прихода сигналов, превышают результат, полученный в работе [3]. Вероятно, это связано с разными типами ФЭУ у анализируемых детекторов данного эксперимента и эксперимента 2021 г. Позиционно-чувствительное разрешение данных пластиковых детекторов сравнимо с другими типами пластиковых сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов. В работе [5] использовался в качестве калибровочного источника использовался ^{22}Na (γ -кванты с энергией 511 кэВ) и получено пространственное разрешение ~ 20 см методом разницы времен прихода. В сравнении с детекторами из жидкого сцинтиллятора пластиковые детекторы обладают более низким позиционным разрешением [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была проведена позиционная калибровка 10 длинных пластиковых сцинтилляционных детекторов тремя

способами: по разнице времён, по накопленному заряду и среднего этих двух калибровок. Комбинация калибровок с учётом конечного размера свинцовой щели в эксперименте даёт примерно на 36% лучшее разрешение, чем калибровка по накопленному заряду сигнала и на 22% лучше, чем калибровка по разнице времён. Учёт размера щели даёт улучшение разрешения приблизительно на 5%. Позиционная чувствительность данных детекторов крайне важна для проведения эксперимента по поиску угловых корреляций. Но следует заметить, что в данной работе была проведена калибровка только для одного источника γ -квантов ^{60}Co . Но разрешение детекторов может зависеть также от энергии и типа частиц [7], поэтому следует проводить калибровку для каждого типа частиц и энергии отдельно.

Авторы выражают благодарность лаборанту А.С. Оводову за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 23-12-00239).

- [1] *Filonchik P., Grozdanov D., Kopatch Y.* et al. // IJMPE **271**. 188 (2025).
[2] *Charpak G., Dick L., Feuvrais L.* // Nucl. Instr. and Meth. **15**. 323 (1962).
[3] *Dabylova S.B., Simbirtseva N., Grozdanov D.N.* et al. // ISINN-28 proceedings. 17 (2021).
[4] <https://www.epic-crystal.com/scintillation-crystals/plastic-scintillator.html>
[5] *Rout P.C., Chakrabarty D.R., Datar V.M.* et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. **598**. 526 (2009).
[6] *Bunyatov S. A., Krasnoperov A. V., Nefedov Yu. A.* et al. // PEPAN Letters. **4** 847 (2007).
[7] *Kuznetsov A.V., Vakhtin D.N., Radivojevic Z.* et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A 477**. 372 (2002).

Determination of plastic scintillation detectors characteristics

P. G. Filonchik^{1,2,a}, D. N. Grozdanov^{2,3}, Yu. N. Kopatch², P. S. Prusachenko², N. A. Fedorov², I. N. Ruskov^{2,3}

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudnyi, 141701, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia*

³*Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, 1784, Bulgaria*

E-mail: ^afilonchik.pg@phystech.edu

An experiment on angular correlations in the inelastic scattering of 14.1 MeV neutrons on a carbon nucleus is being conducted in the TANGRA group at the Frank Laboratory of Neutron Physics (FLNP) at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR). Ten long (1 meter) plastic scintillation detectors manufactured by EPIC CRYSTAL were used in this experiment. Their special feature is the presence of two photomultiplier tubes (PMTs), due to which these detectors have spatial sensitivity. In this paper, the characteristics of ten detectors are investigated: spatial resolution and attenuation coefficient.

PACS: 29.40.Mc., 29.30.Hs, 29.30.Kv

Keywords: epic, plastic scintillators, position resolution, detector calibration.

Received 26 June 2025.

Сведения об авторах

1. Филончик Полина Геннадьевна — аспирант МФТИ, стажёр-исследователь ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-27-85, e-mail: filonchik.pg@phystech.edu
2. Грозданов Димитър Николов — канд. физ.-мат. наук, начальник группы ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-27-85, e-mail: dimitar@nf.jinr.ru.
3. Копач Юрий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-24-59, e-mail: kopatch@nf.jinr.ru.
4. Прусаченко Павел Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-27-85, e-mail: prusachenko@jinr.ru.
5. Федоров Никита Александрович — канд. физ.-мат. наук, нач. сектора ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-26-73, e-mail: nfedorov@jinr.ru.
6. Русков Иван Николов — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ЛНФ ОИЯИ; тел.: (495) 216-33-77, e-mail: ruskoiv@jinr.ru.