

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОГО
НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА НА КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

©2026 г. С. М. Ахмад^{a,b}, В. А. Басков^{a,*}, А. И. Львов^a

^a *Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*

^b *Московский педагогический государственный университет
Россия, 119435, Москва, Малая Пироговская ул., 1, стр. 1*

**e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru*

Поступила в редакцию 25.11.2025 г.

После доработки 29.12.2025 г.

Принята к публикации 19.01.2026 г.

С помощью космического излучения проведена калибровка детектора со сцинтилляционным блоком толщиной 40 см и диаметром 40 см, который предназначен для регистрации нейтронов в готовящемся эксперименте на ускорителе С-25Р “Пахра” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по изучению нейтрон-нейтронного рассеяния в реакции на дейтроне $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$. Определено, что при среднем энерговыделении космическими мюонами 80 МэВ в блоке энергетическое разрешение составило $\delta = 7\%$, а временное разрешение изменялось от 4 до 8 нс при расстояниях между триггерными счетчиками и сцинтилляционным блоком в диапазоне от 11 до 74 см.

На пучке тормозных фотонов с максимальной энергией 500 МэВ электронного ускорителя С-25Р “Пахра” Физического института им. П. Н. Лебедева РАН в Троицке готовится эксперимент по изучению нейтрон-нейтронного рассеяния. Ввиду отсутствия в распоряжении экспериментаторов чистой плотной нейтронной мишени для изучения nn -рассеяния предполагается использовать дейтериевую мишень (фактически, дейтерированный полиэтилен) и с помощью фотонов с энергиями, достаточной для возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса, получать вылетающие вперед быстрые нейтроны с энергией десятки МэВ в реакции резонансного фоторождения $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$. В этой кинематике заряженный пион π^+ летит назад, а быстрые нейтроны за счет столкновений с нейтронами-спектаторами в тех же дейтронах d будут упруго рассеиваться, порождая пары энергичных нейтронов nn , разлетающихся из мишени по разные стороны от γ -пучка. Регистрация таких nn -пар на

совпадение с заряженным пионом, вылетающим назад, а также измерение угловых и энергетических распределений дифференциального сечения позволит судить об амплитуде nn -рассеяния, тем самым получая труднодоступную, но очень ценную информацию об этом канале NN -взаимодействия. Сходные идеи использования реакции $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ для измерения длин nn -рассеяния теоретически обсуждались в работе [1], рассматривающей динамику процесса в околопороговой области энергий в рамках киральной теории возмущений. Отметим, что теоретический аппарат для анализа каналов реакции $\gamma d \rightarrow \pi NN$ в резонансной области развит в работе [2] и некоторых других.

Работа сооружаемой экспериментальной установки основана на времяпролетном методе. Триггером для запуска установки, или сигналом *Start*, будет регистрация π^+ , рожденного на первом этапе фотореакции. Сигналом *Stop* будет регистрация двух провзаимодействовавших нейтронов с поперечными импульсами порядка сотни МэВ/с, разлетающихся по разные стороны от мишени. Регистрацию нейтронов предполагается осуществлять двумя нейтронными детекторами, конструкция которых предполагает наличие амплитудной и временной частей.

Для регистрации одного из нейтронов создан амплитудно-временной детектор (АВНД), представляющий из себя сцинтилляционный блок (полистирол) диаметром 40 см и толщиной 40 см (рис. 1). Блок просматривается тремя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-49 и четырьмя ФЭУ-85. Сумма сигналов с ФЭУ-49 определяет амплитудный сигнал, сумма сигналов с ФЭУ-85 определяет временной сигнал.

Предварительная калибровка детектора осуществлена на космическом излучении (рис. 1) [3–5]. Целью калибровки являлось определение энергетических и временных характеристик нейтронного детектора на одиночных минимально-ионизирующих частицах. Калибровка осуществлена по методу “напролет”, когда детектор располагался между триггерными сцинтилляционными счетчиками, расположенными над (S_1 и S_2) и под (S_3) детектором (рис. 1а) [6]. Триггерные счетчики S_1 и S_2 без промежутка были расположены друг за другом по оси симметрии OO' , проходящей через центры счетчиков, АВНД и счетчика S_3 , и формировали сигнал *Start*. Сигнал с S_3 в триггер не входил и служил отметкой о прохождении заряженной частицы через счетчик или сигнал *Stop1*. Для выделения жесткой компоненты космического излучения между триггерными счетчиками, расположенными над детектором и детектором, помещался свинцовый фильтр толщиной 7 см. Энергия космических мюонов составляла $E \geq 4$ ГэВ [3–5].

Рис. 1. Амплитудно-временной нейтронный детектор.

Блок-схема калибровки АВНД представлена на рис. 2. Сигналы с триггерных счетчиков S_1 и S_2 размерами $15 \times 15 \times 1 \text{ см}^3$ и $17 \times 17 \times 1 \text{ см}^3$ соответственно через формирователи Φ_1 , Φ_2 и задержки Z_1 , Z_2 подавались на входы схемы совпадений (СС). Длительность сигналов составляла 10 нс. Сигнал со схемы совпадений СС длительностью 350 нс являлся триггерным сигналом *Start* для запуска блоков зарядно-цифрового преобразователя (ЗЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). На первый вход *Stop1* блока ВЦП через формирователь Φ_3 и задержку Z_3 подавался сигнал от триггерного счетчика S_3 размером $20 \times 20 \times 1 \text{ см}^3$. На второй вход *Stop2* блока ВЦП подавался сигнал с линейного сумматора ЛС, с помощью которого сформированные формирователями Φ_4 – Φ_7 и блоками задержек Z_4 – Z_7 , суммировались сигналы с временных ФЭУ-85 АВНД. На входы ЗЦП через блоки задержек Z_8 – Z_{10} подавались сигналы от трех ФЭУ-49 амплитудной системы АВНД. Сигнал *Start* являлся также сигналом, с помощью которого через крейт-контролер (КК) системы САМАС проводилась запись сигналов в память компьютера ПК.

Рис. 2. Блок-схема калибровки сцинтилляционного амплитудно-временного нейтронного детектора.

Калибровка АВНД на космическом излучении проходила в два этапа. На первом этапе последовательно были выравнены амплитуды сигналов всех ФЭУ-49 таким образом, чтобы амплитудный спектр с каждого ФЭУ был расположен в рабочей области ЗЦП. Выравнивание амплитуд сигналов происходило изменением величин напряжения на делителях напряжения всех ФЭУ-49. Временные спектры с ФЭУ-85 с помощью изменения величин задержек блоков Φ_3 – Φ_7 были также помещены в рабочие диапазоны каналов ЗЦП.

На втором этапе происходила основная калибровка АВНД, заключающаяся в определении амплитудных и временных характеристик в зависимости от расстояния L между блоком триггерных счетчиков S_1 и S_2 и счетчиком S_3 (рис. 1а).

Среднее энерговыделение, которое оставлял космический мюон в объеме АВНД, составляло около $E \approx l dE/dx \approx 40 \cdot 2 = 80 \text{ МэВ}$, где $l = 40 \text{ см}$ – толщина АВНД, $dE/dx \approx 2 \text{ МэВ/см}$ – средняя величина ионизационных потерь электронов на единицу пути в сцинтилляторе [6].

С учетом того, что средняя суммарная амплитуда АВНД в амплитудном спектре составила $\langle A \rangle = 1817$ [канал] и соответствовала среднему энерговыделению $E_{\text{АВНД}} \approx 80 \text{ МэВ}$, то коэффициент пропорциональности $\alpha = E_{\text{АВНД}} / \langle A \rangle = 80 / 1817 = 0.044 \text{ МэВ/канал}$.

На рис. 3 представлен спектр среднего энерговыделения космических мюонов в объеме АВНД, из которого видно, что энергетическое разрешение составляет $\delta = 7\%$.

Временная калибровка нейтронного детектора заключалась в определении зависимости положения среднего канала $\langle t \rangle$ временного спектра, полученного временной

частью АВНД, от расстояния $x = L$ между блоком счетчиков S_1 , S_2 и S_3 , а также временного разрешения σ_t временной части детектора.

Рис. 3. Спектр среднего энерговыделения космических мюонов в амплитудно-временном нейтронном детекторе.

Зависимости изменения среднего канала временного спектра и временного разрешения временной части детектора от расстояния между блоком триггерных счетчиков и нейтронным детектором показаны на рис. 4.

Рис. 4. Зависимости изменения среднего канала временного спектра (**а**) и временного разрешения временной части детектора (**б**) от расстояния между триггерными счетчиками и нейтронным детектором.

Зависимость на рис. 4а, являющейся калибровочной кривой, имеет линейный характер $\langle t \rangle = k x$, где $k = 0.0585$ нс/см.

Зависимость временного разрешения от расстояния между триггерными счетчиками и нейтронным детектором описывается параметризацией $\sigma_t = \sigma_0 + A \exp(B x)$, где $\sigma_0 = -2.41$ нс, $A = 5.97$ нс, $B = 0.0079$ см⁻¹.

В водородосодержащем сцинтилляторе регистрация нейтрона n осуществляется по протону отдачи p , т. е. по результату реакции np -взаимодействия, в которой энергия протона определяется как $E_p = E_n \cos^2\theta$, где E_n – энергия нейтрона, θ – угол рассеяния нейтрона. Световойход $L(E_p)$ сцинтиллятора при взаимодействии с ним протона можно выразить через эквивалентную по величине световыхода энергию электрона (E_e). Для энергии протона $E_p = 0$ –6 МэВ с точностью до 5% энергия электрона оценивается как $E_e = 0.16 \cdot E_p^{1.5}$, для $E_p = 6$ –17 МэВ $E_e = 0.23 E_p^{1.3}$ [7].

Если определить энергию нейтрона как $E_n = 17$ МэВ и принять $\theta = 0$, то максимальная энергия протона отдачи в соответствии с оценкой составит $E_p = 17$ МэВ и соответствующая энергия электрона, эквивалентная световыходу $L(E_p = 17$ МэВ), составит $E_e \approx 9$ МэВ.

Энерговыделение в объеме АВНД, определенное при калибровке, в $80/9 \approx 9$ раз выше величины оценки, отсюда можно предположить, что нейтронный детектор может регистрировать нейтроны с существенно большей энергией ($E_n > 17$ МэВ).

Погрешности амплитудного и координатного разрешений на рис. 3 и 4 определялись аппроксимацией амплитудных и координатных спектров полиномом, полученным в рамках стандартной программы OriginPro 9.0, и составили 15–20% от значений величин, представленных на рисунках.

Предварительная калибровка на космическом излучении амплитудно-временного нейтронного детектора на основе пластического сцинтиллятора показала, что энергетическое

разрешение при среднем энерговыделении космическими мюонами 80 МэВ в блоке составила $\delta = 7\%$, временное разрешение детектора в диапазоне расстояний между триггерными счетчиками и сцинтилляционным блоком от 11 до 74 см изменялось от 4 до 8 нс. Детектор может регистрировать нейтроны как минимум с энергией $E_n \geq 17$ МэВ. Тем не менее ввиду сложной зависимости световыхода от энергии нейтрона необходима прямая калибровка нейтронного детектора на пучках нейтронов как при $E_n \leq 17$ МэВ, так и при $E_n > 17$ МэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность А. Харлашину за значительную помощь в конструировании и создании нейтронного детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lensky V., Baru V., Epelbaum E., Haidenbauer J., Kudryavtsev A., Meißner U.-G.* // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 33. P. 339. <https://doi.org/10.1140/epja/i2007-10461-y>
2. *Levchuk M.I., Logunov A.Yu., Sidorin A.A., Stibunov V.N., Schumacher M.* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 014004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.74.014004>
3. *Петрухин А.А., Богданов А.Г., Кокоулин Р.П.* // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49. № 4. С. 1124 <https://elibrary.ru/item.asp?id=41457464> [*Petrukhin A.A., Bogdanov A.G., Kokoulin R.P.* // Phys. Part. Nuclei. 2018. V. 49. P. 639. <https://doi.org/10.1134/S1063779618040469>]
4. *Земскова С.Г., Старков Н.И.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. № 6. С. 3. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23859038> [<https://doi.org/10.3103/S1068335615060019>].
5. *Александров А.Б., Анохина А.М., Васина С.Г. и др.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. № 12. С.133. <https://doi.org/10.3103/S1068335623120023>
6. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., и др.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2020. № 9. С.12. <https://doi.org/10.3103/S106833562009002X>
7. *Басков В.А., Говорков Б.Б., Полянский В.В.* // ПТЭ. 2019. №3. С. 5. <https://doi.org/10.1134/S0032816219030030>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Амплитудно-временной нейтронный детектор: **а** – схема калибровки детектора на космическом излучении (S_1 , S_2 , S_3 – сцинтилляционные счетчики); **б** – схема расположения ФЭУ на плоскости сцинтилляционного блока нейтронного детектора.
- Рис. 2.** Блок-схема калибровки сцинтилляционного амплитудно-временного нейтронного детектора: S_1 – S_3 – триггерные сцинтилляционные счетчики, Рb-фильтр – свинцовый фильтр; Φ_1 – Φ_7 – блоки формирователей, Z_1 – Z_{10} – блоки задержек, СС – схема совпадений, ЗЦП – зарядно-цифровой преобразователь, ВЦП – время-цифровой преобразователь, *Start* – сигнал запуска блоков ЗЦП и ВЦП, ЛС – линейный сумматор, КК – крейт-контроллер системы САМАС, ПК – персональный компьютер.
- Рис. 3.** Спектр среднего энергосодержания космических мюонов в амплитудно-временном нейтронном детекторе.
- Рис. 4.** Зависимости изменения среднего канала временного спектра (**а**) и временного разрешения временной части детектора (**б**) от расстояния между триггерными счетчиками и нейтронным детектором.

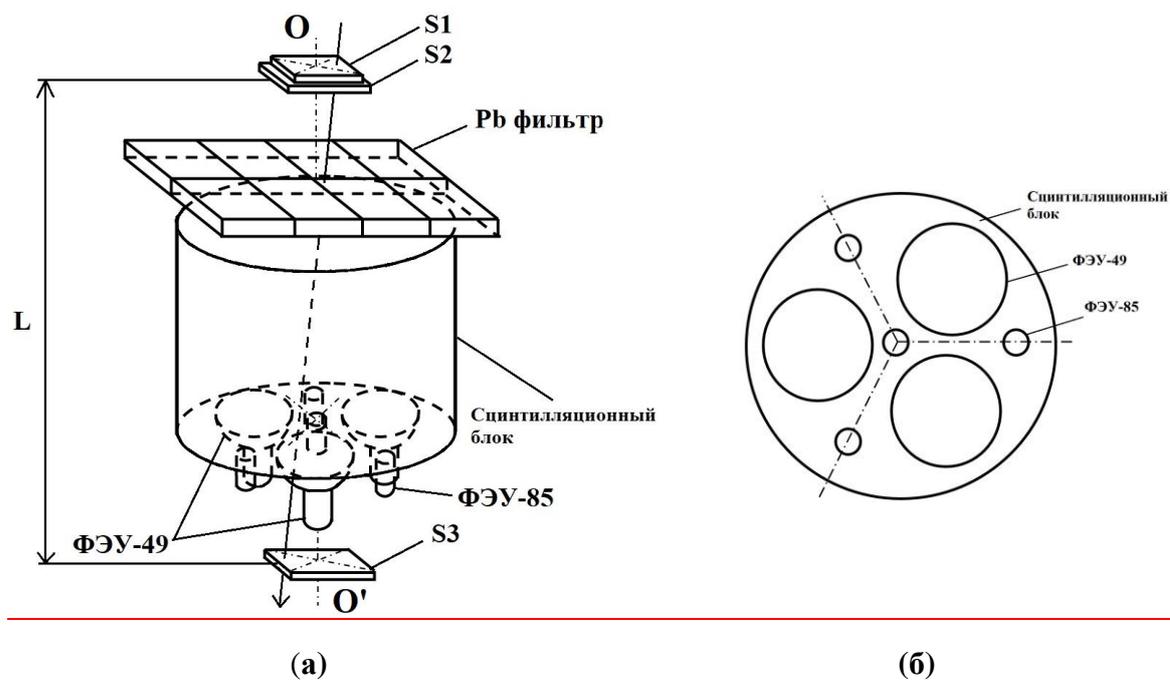


Рис. 1.

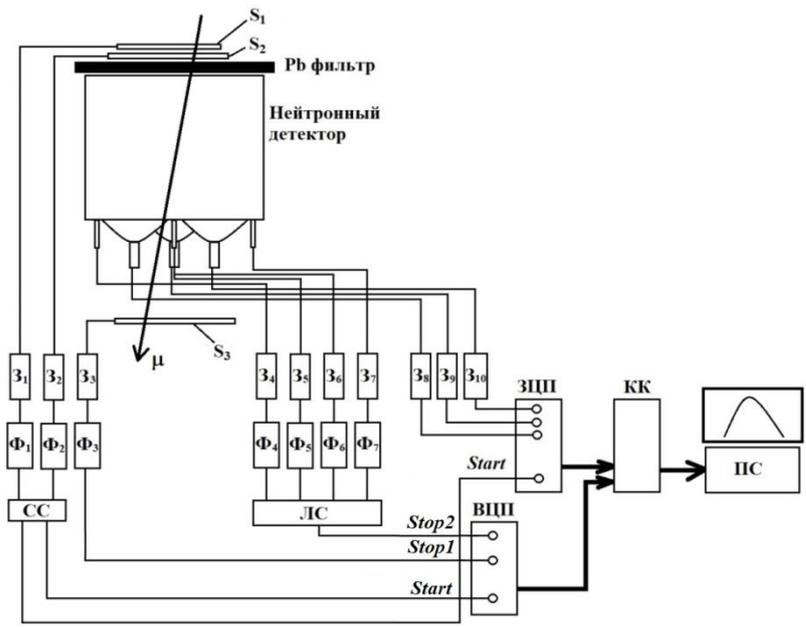


Рис. 2.

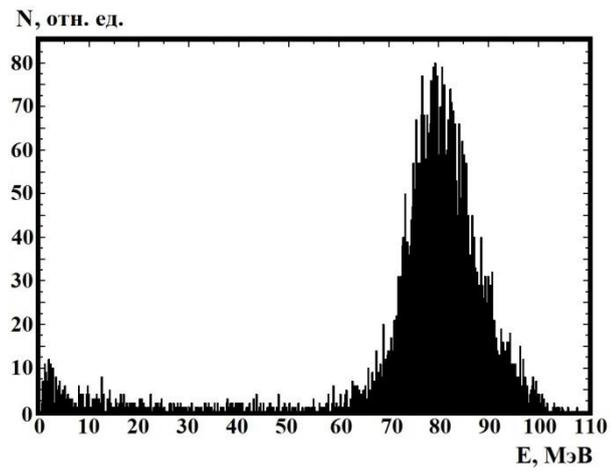
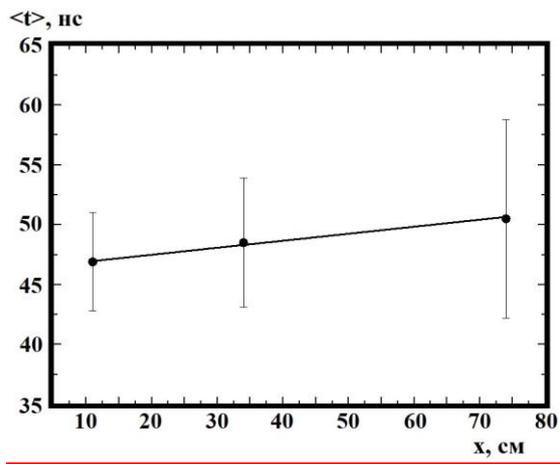
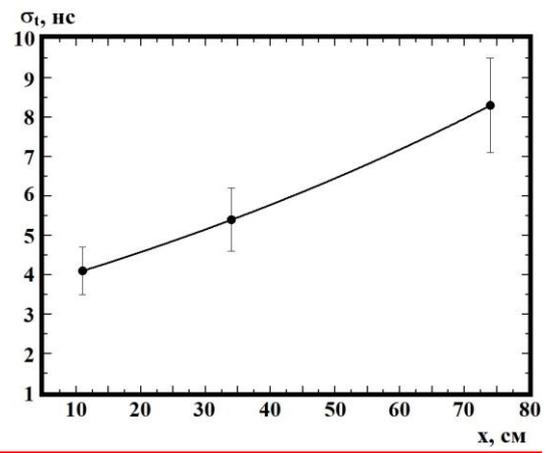


Рис. 3.



(a)



(б)

Рис. 4.