

УДК 539.1.074.823

## РАЗЛИЧИЕ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ИЗ ВЫВОДНОГО КАНАЛА ФОТОНЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА

© 2024 г. С. И. Поташев<sup>1,2,\*</sup>, Ю. М. Бурмистров<sup>1</sup>, А. И. Драчев<sup>1</sup>, А. А. Каспаров<sup>1</sup>, В. Н. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

\* e-mail: potashev@inr.ru

Поступила в редакцию 15.03.2024

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Измерены распределения промежуточных и медленных нейтронов из выводного коллимированного канала фотонейтронного источника. Обнаружено существенное различие в форме распределения двух групп нейтронов с энергией выше и ниже кадмиевой границы. Если распределение промежуточных нейтронов имеет симметричную гауссову форму, то форма распределения медленных нейтронов носит сложный характер. Обсуждаются возможные причины различия этих форм.

**Ключевые слова:** источник фотонейтронов, поток нейтронов, медленный нейтрон, промежуточные нейтроны, распределение

**DOI:** 10.31857/S0367676524080049, **EDN:** ORPSTG

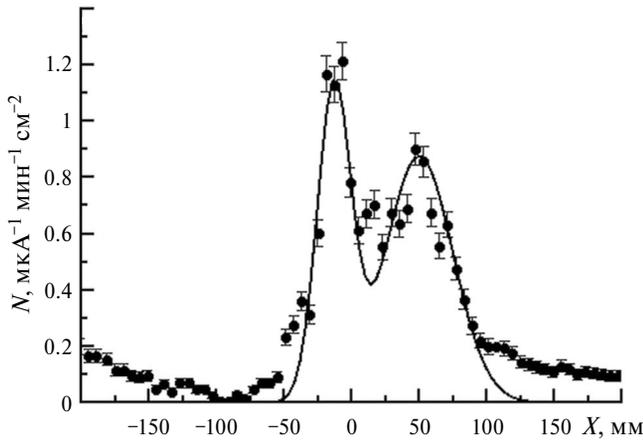
### ВВЕДЕНИЕ

Для проведения экспериментов на фотонейтронном источнике ИЯИ РАН [1] в его замедлителе был создан выводной канал с коллиматором нейтронов длиной около 50 см и диаметром 3 см. Распределение медленных нейтронов в потоке, в частности, в тепловой области энергий в экспериментальном зале исследовалось различными методами [2, 3]. Однако многие эксперименты должны выполняться при промежуточных энергиях, например, в области нейтронных резонансов на ядрах. Примером может служить пространственное исследование вкраплений золота в геологических образцах, используя хорошо известный резонанс на ядре  $^{197}\text{Au}$  с энергией около 5 эВ. Ранее мы обнаружили, что детектор нейтронов на основе слоя твердого изотопа  $^{10}\text{B}$  и проволочной пропорциональной камеры хорошо подходит для исследования пространственного распределения нейтронов как в тепловой, так и в промежуточной области энергий нейтронов [4]. Важным преимуществом этого детектора является то, что он обладает избирательной чувствительностью к направлению движения нейтронов [5]. Для того чтобы выделить нейтроны промежуточных энергий используется кадмиевый фильтр, который поглощает нейтроны

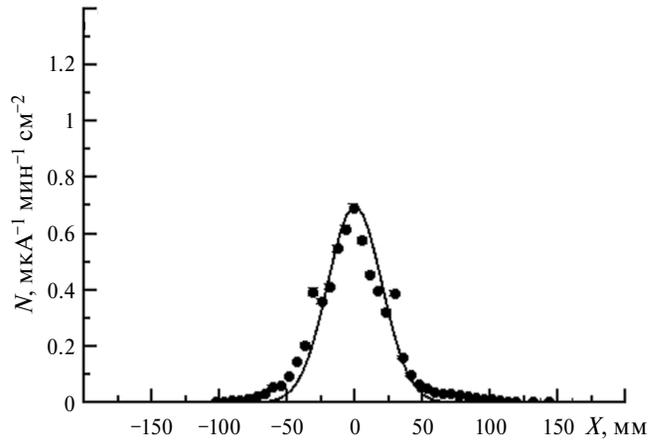
с энергией ниже 0.55 эВ. Мы можем пренебречь влиянием быстрых нейтронов, выбирая достаточно большое расстояние от центра нейтронообразующей мишени  $\sim 200$  см и учитывая, что сечение взаимодействия нейтронов с тонким слоем  $^{10}\text{B}$  мало. Для контроля общего потока нейтронов в экспериментальном зале использовался стандартный  $^3\text{He}$ -счетчик.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения были выполнены на фотонейтронном источнике ИЯИ РАН на базе ускорителя электронов ЛУЭ-8. Пучок электронов генерирует тормозное излучение в вольфрамовой мишени. Поток нейтронов создается в  $^9\text{Be}$ -мишени, которая установлена в центре замедлителя из полиэтилена в виде куба с линейным размером 1 м. Поток нейтронов выходит из коллиматора диаметром 3 см и длиной  $\sim 50$  см и падает на позиционно-чувствительный детектор нейтронов (ПЧДН), состоящий из твердого слоя  $^{10}\text{B}$  и проволочной камеры [6, 7]. Для контроля общего потока нейтронов использовался стандартный счетчик на основе  $^3\text{He}$ , который располагался непосредственно за ПЧДН. Детектор ПЧДН рассеивает и поглощает только малую долю нейтронов.



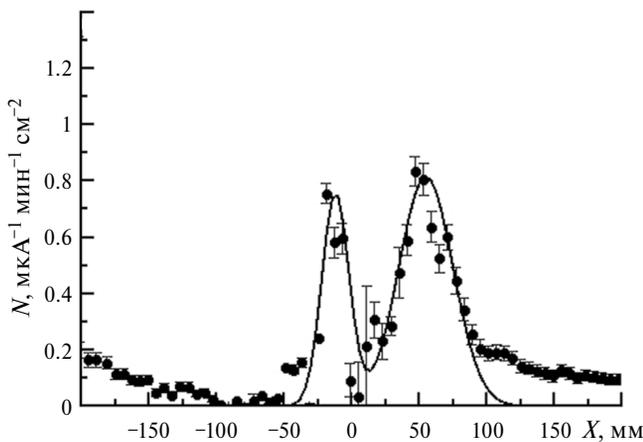
**Рис. 1.** Распределение тепловых и промежуточных нейтронов, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из  ${}^9\text{Be}$  позиционно-чувствительным детектором на основе  ${}^{10}\text{B}$ . Кривая — аппроксимация двумя гауссианами.



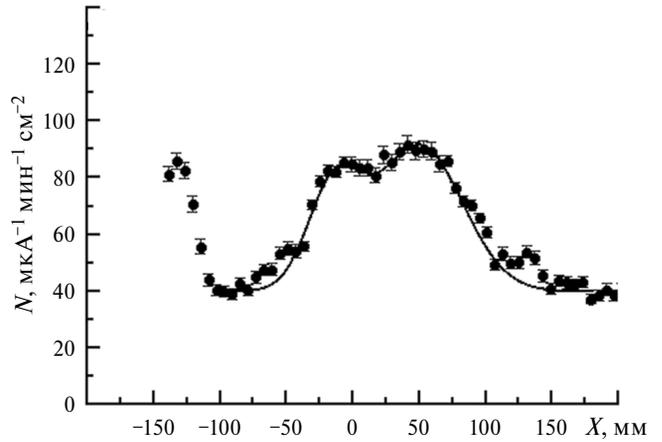
**Рис. 3.** Распределение тепловых нейтронов с  $E_n < 0.55$  эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из  ${}^9\text{Be}$  позиционно-чувствительным детектором на основе  ${}^{10}\text{B}$ . Кривая — аппроксимация двумя гауссианами.

На рис. 1 показано экспериментальное распределение нейтронов вдоль горизонтальной оси, измеренное  ${}^{10}\text{B}$ -детектором в отсутствие кадмиевого фильтра. Он располагался на расстоянии 204 см от центра мишени. На рис. 2 показано экспериментальное распределение нейтронов, измеренное с помощью ПЧДН с кадмиевым фильтром перед ним. Его граничная энергия составляет около 0.55 эВ, то есть он задерживает тепловые нейтроны. На рис. 3 показано измеренное с помощью ПЧДН экспериментальное распределение нейтронов, которое соответствует разности между потоком нейтронов всех энергий и потоком нейтронов только промежуточных энергий. Поэтому это есть распределение только тепловых нейтронов с энергией ниже 0.55 эВ. Одновременно

с измерением распределения нейтронов с помощью ПЧДН распределение нейтронов измерялось и с помощью перемещаемого механически вдоль горизонтальной плоскости  ${}^3\text{He}$ -счетчика. При установленном кадмиевом фильтре  ${}^3\text{He}$ -счетчик, который располагался позади ПЧДН, почти не регистрировал нейтронов. Это связано с тем, что эффективность  ${}^3\text{He}$ -счетчика для промежуточных и быстрых нейтронов очень мала. В эксперименте записывалась осциллограмма сигналов, вместе с которыми записывалось геометрическое положение счетчика. Из осциллограммы принимались в рассмотрение только тепловые нейтроны с энергией менее 0.5 эВ. На рис. 4 показано измеренное с помощью перемещаемого  ${}^3\text{He}$ -счетчика экспериментальное распределение



**Рис. 2.** Распределение промежуточных нейтронов с  $E_n > 0.55$  эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из  ${}^9\text{Be}$  позиционно-чувствительным детектором на основе  ${}^{10}\text{B}$ . Кривая — аппроксимация гауссианом.



**Рис. 4.** Распределение тепловых нейтронов с  $E_n < 0.55$  эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из  ${}^9\text{Be}$  перемещаемым счетчиком на основе  ${}^3\text{He}$ . Кривая — аппроксимация двумя гауссианами и равномерным фоном.

нейтронов. Распределение потока нейтронов, измененное с помощью ПЧДН и  $^3\text{He}$ -счетчика, находилось в согласии друг с другом с учетом различного пространственного разрешения.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы аппроксимировали распределение потока промежуточных нейтронов с энергиями  $E_n > 0.55$  эВ гауссианом как это представлено на рис. 2 и получили полную ширину на половине максимума  $w$ , равную 4 см. Эта величина соответствует размеру коллиматора на расстоянии 204 см. Фон рассеянных промежуточных нейтронов существенно подавлен в измерении детектором ПЧДН. На рис. 3 представлено разностное распределение, которое соответствует потоку тепловых нейтронов. Распределение нейтронов имеет форму в виде двух максимумов, один из которых расположен левее оси коллиматора, а другой правее его с минимумом вдоль оси коллиматора. Аппроксимация правого пика, вершина которого расположена при  $X = -1.2$  см для этого распределения дала величину ширины на половине максимума 2 см. Аппроксимация левого пика, вершина которого расположена при  $X = +5.5$  см дала величину ширины на половине максимума 4 см. Аналогичный характер имеет и распределение, измененное с помощью  $^3\text{He}$ -счетчика на рис. 4, где также наблюдаются два максимума с двух сторон от оси коллиматора. В табл. 1 представлены положения пиков гауссианов аппроксимации в распределениях, выраженных в см и в угловых градусах, а также их ширины на половине максимума, площади под пиками и высота постоянного фона. Можно заметить, что пики на рис. 3 и рис. 4 для тепловых нейтронов соответствуют друг другу по относительной величине и положению.

**Таблица 1.** Положения пиков гауссианов аппроксимации в распределениях, их ширины на половине максимума, площади под пиками и высота постоянного фона

$E_n$	$X$ , см	$\Theta$ , град.	$w$ , см	$A$	Фон
$E_n > 0.55$ эВ $^{10}\text{B}$ -дет.	0	0	4	35	0
$E_n < 0.55$ эВ $^{10}\text{B}$ -дет.	-1.2	-0.34	2	19	0
	+5.5	+1.54	4	41	
$E_n < 0.55$ эВ $^3\text{He}$ -счет.	-1.4	-0.39	4	1800	40
	+5	+1.40	6.5	3200	

Мы предположили, что наличие двух максимумов в распределениях для тепловых нейтронов может

быть связано с рассеянием нейтронов на внутренних боковых стенках коллиматора. В то же время распределение промежуточных нейтронов, которые не испытали взаимодействие с материалами коллиматора, хорошо аппроксимируется симметричным гауссианом, направленным вдоль его оси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте с помощью позиционно-чувствительного  $^{10}\text{B}$ -детектора и перемещаемого  $^3\text{He}$ -счетчика было обнаружено существенное различие в форме распределения двух групп нейтронов с энергией выше и ниже кадмиевой границы. Если распределение промежуточных нейтронов имеет симметричную гауссову форму, то форма распределения медленных нейтронов носит сложный характер. Наблюдаемое небольшое угловое расхождение в направлении потоков промежуточных и тепловых нейтронов относительно оси коллиматора можно использовать для одновременного измерения на двух установках как с тепловыми, так и промежуточными энергиями в одном эксперименте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 824; Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 748.
2. Мешков И.В., Поташев С.И., Афонин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 4. № 4. С. 497; Meshkov I.V., Potashev S.I., Afonin A.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 4. P. 382.
3. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 6. С. 814; Afonin A.A., Zuyev S.V., Konobeevski E.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 6. P. 731.
4. Potashev S., Drachev A., Burmistrov Yu. et al. // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. Art. No. 05010.
5. Поташев С.И., Каспаров А.А., Мешков И.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 8. С. 1087; Potashev S.I., Kasparov A.A., Meshkov I.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 8. P. 898.
6. Potashev S., Burmistrov Yu., Drachev A. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. No. 012160.
7. Поташев С.И., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И. и др. // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 10. С. 108; Potashev S.I., Burmistrov Yu.M., Drachev A.I. et al. // J. Surf. Invest. X-ray, Synch. Neutr. Tech. 2018. V. 12. P. 627.

## **Difference between distributions of intermediate and slow neutrons from photoneutron source exit channel**

**S. I. Potashev<sup>1,2\*</sup>, Yu. M. Burmistrov<sup>1</sup>, A. I. Drachev<sup>1</sup>, A. A. Kasparov<sup>1</sup>, V. N. Ponomarev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312, Russia*

<sup>2</sup>*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia*

*\*e-mail: potashev@inr.ru*

Distributions of intermediate and slow neutron flux from the output collimated channel of the photoneutron source are measured. The significant difference is observed in the distribution shape of two neutron groups with energies above and below the cadmium boundary. While the distribution of intermediate neutrons has a symmetrical Gaussian shape, the distribution shape of slow neutrons has complex one. The possible difference of the shapes is discussed.

*Keywords:* photoneutron source, neutron flux, slow neutron, intermediate neutrons, distribution