

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В ЗАЗОРАХ ДЕТЕКТОРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ СЛОЯ ^{10}B И ГАЗОВОЙ КАМЕРЫ

© 2023 г. С. И. Поташев^{1)*}

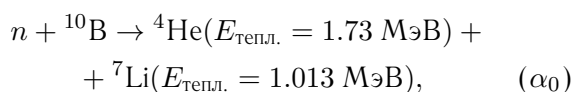
Поступила в редакцию 02.03.2023 г.; после доработки 20.04.2023 г.; принята к публикации 20.04.2023 г.

Выполнено моделирование ионизационных потерь в нескольких последовательных зазорах нейтронного детектора. Он основан на конвертере из твердого слоя бора-10 и газовой камере. Показано, что распределение ионизационных потерь в газовых зазорах существенно меняется в зависимости от энергии падающих нейтронов. Этот факт можно использовать для контроля энергии потока нейтронов с помощью этого детектора.

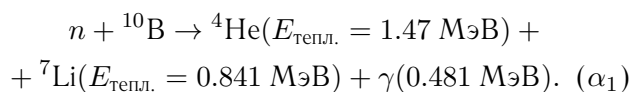
DOI: 10.31857/S0044002723050355, EDN: IFDUYA

1. ВВЕДЕНИЕ

Позиционно-чувствительный нейтронный детектор (ПЧНД), основанный на ^{10}B или $^{10}\text{B}_4\text{C}$ слоях, совмещенных с газовой камерой, недавно были построены в Германии [1], Италии [2], Китае [3] и в нашей Лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН [4, 5]. Наш детектор, в отличие от детекторов всех других лабораторий и предназначенных прежде всего для регистрации тепловых и медленных нейтронов, также подходит для детектирования быстрых нейтронов с энергиями свыше 1 МэВ [6]. Он работает благодаря ядерным реакциям:



и



Ионизационные потери вторичного ядра прямо зависят от угла вылета и энергии (в МэВ-ном диапазоне) вылетающего ядра. Поэтому по этим значениям можно определить энергию нейтрона [7]. Заряженная частица, например ядро ^4He или ^7Li , может быть идентифицирована и определена ее энергия по ионизационным потерям в последовательных газовых промежутках детектора [8]. Чрезвычайно важной особенностью нашего детектора является также возможность определять вклады различных каналов реакций, например, α_0 и α_1 ,

которая недавно нами использовалась в эксперименте с помощью прототипа детектора [9]. Новый детектор позволит расширить возможности для исследования взаимодействия нейтронов с легкими ядрами, такими как ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B и другими, с определением величины начальной энергии нейтрона.

2. РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ ПО ИОНИЗАЦИОННЫМ ПОТЕРЯМ В ЗАЗОРАХ

Детектор имеет следующую структуру. Изотоп бор-10 толщиной 0.003 мм осаждается на стеклянной или кремниевой пластине во внутренней части детектора. Анодами служат сетки из проволоки из вольфрам-рениевого сплава диаметром $d_A = 0.02$ мм, покрытых золотом и натянутых на прямоугольные каркасы, а катодами — сетки из таких же проволок диаметром $d_C = 0.05$ мм. Сборка из чередующихся плоскопараллельных анодных и катодных сеток с одинаковыми газовыми зазорами образует пропорциональную камеру.

С проволочек этих сеток регистрируются зарядовые сигналы. Детектор заполнен газовой смесью $\text{Ar} + 25\%\text{CO}_2$ при атмосферном давлении.

Каждый из четырех газовых зазоров имеет величину 2.5 мм, оптимальную для регистрации нейтронов в диапазоне энергий от 1.8 до 4 МэВ. Ядра ^4He и ^7Li из вышеупомянутых ядерных реакций могут быть зарегистрированы в проволочной пропорциональной камере. Зарегистрированные амплитуды импульсов от четырех проволочных сеток пропорциональны потерям на ионизацию в газовых промежутках.

¹⁾Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

*E-mail: potashev@inr.ru

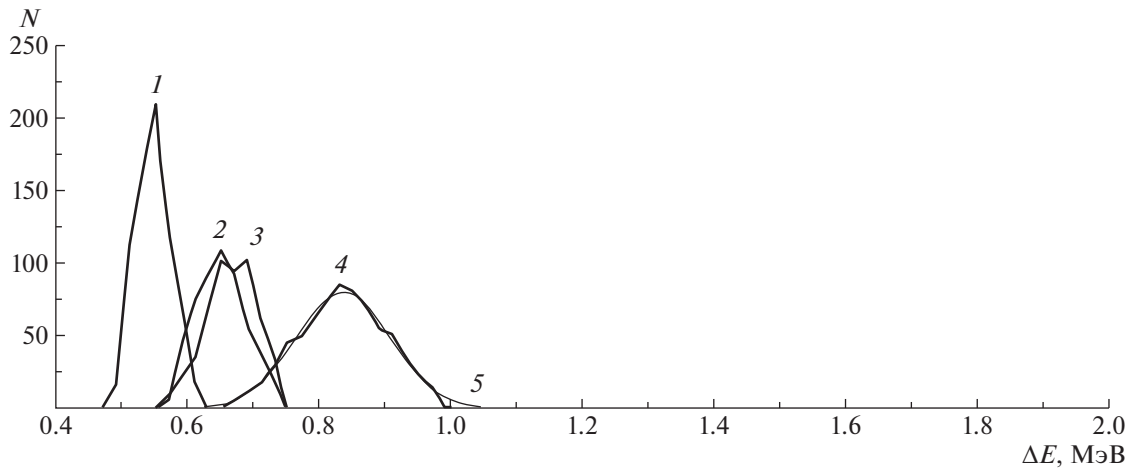


Рис. 1. Спектры ионизационных потерь альфа-частиц от α_0 -реакции при $E_n = 1.8$ МэВ. Кривые: 1 — в нулевом газовом зазоре; 2 и 3 — в первом и втором газовых зазорах детектора, если сигнал третьего газового зазора выше порога 0.1 МэВ; 4 — спектры сигналов суммы потерь на ионизацию от второго и третьего газовых зазоров; 5 — аппроксимация Гаусса.

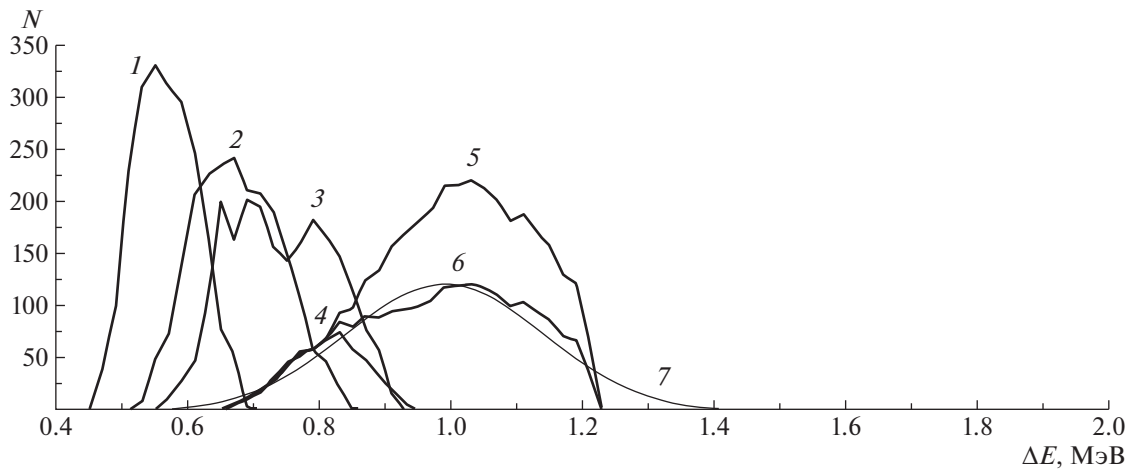


Рис. 2. Спектры ионизационных потерь альфа-частиц от α_0 - и α_1 -реакций при $E_n = 2.5$ МэВ. Кривые: 1 — в нулевом газовом зазоре; 2 и 3 — в первом и втором газовых зазорах детектора, если сигнал третьего газового зазора выше порога 0.1 МэВ; 4 — спектры сигналов ионизационных потерь от суммы второго и третьего газовых зазоров, образованные альфа-частицей отдельно в результате реакции α_0 ; 5 — тоже отдельно в результате реакции α_1 ; 6 — тоже в результате реакций α_0 и α_1 вместе; 7 — аппроксимация Гаусса.

3. НЕЙТРОННОЕ СЕЧЕНИЕ И АППРОКСИМАЦИЯ

Сечение тепловых нейтронов вплоть до $E_n = 0.1$ МэВ можно описать формулой:

$$\sigma_{th} = 10^{(-0.196 - 0.497 \cdot \lg(E))}. \quad (1)$$

Однако нейтронное сечение имеет сложное поведение в диапазоне нескольких МэВ. Мы получили формулу аппроксимации нейтронного сечения для E_n от 0.25 до 7 МэВ, используя данные справочника [10] и данные из библиотек ENDF и JENDL:

$$\sigma = \sum A_i \exp(-0.5((E - E_{ci})/w_i)^2), \quad (2)$$

i — от 1 до 6.

Здесь:

$$\begin{aligned} A_1 &= 0.93; & E_{c1} &= 0.32; & w_1 &= 0.40; \\ A_2 &= 0.54; & E_{c2} &= 0.30; & w_2 &= 1.80; \\ A_3 &= 0.36; & E_{c3} &= 0.30; & w_3 &= 2.75; \\ A_4 &= 0.30; & E_{c4} &= 0.45; & w_4 &= 3.70; \\ A_5 &= 0.11; & E_{c5} &= 1.60; & w_5 &= 6.10; \\ A_6 &= 0.049; & E_{c6} &= 6.0; & w_6 &= 15.0. \end{aligned}$$

Использовались значения соотношения вкладов α_0 - и α_1 -реакций из работы [11]. Для моделирования ионизационных потерь заряженных частиц в зазорах детектора была создана программа на языке g++ в ОС Linux. Алгоритм программы

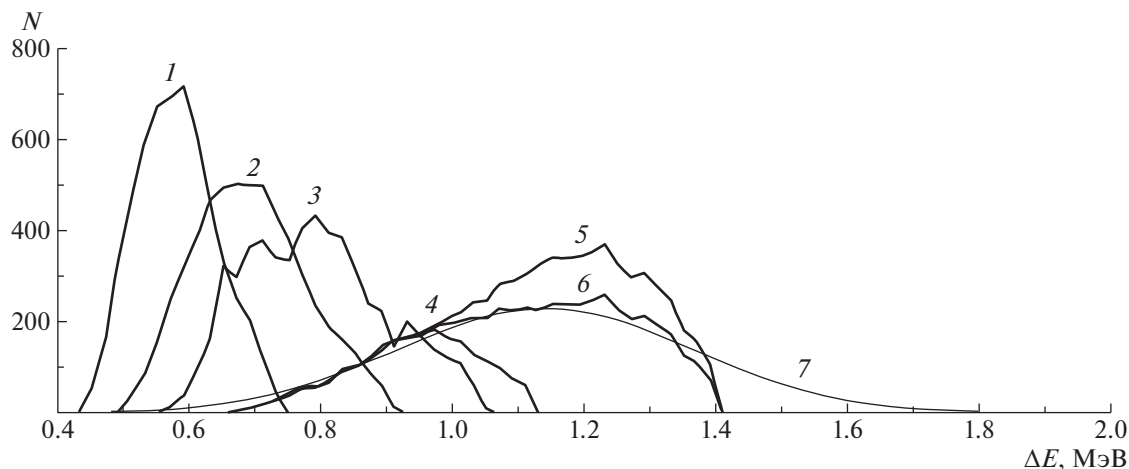


Рис. 3. Спектры ионизационных потерь альфа-частиц от α_0 - и α_1 -реакций при $E_n = 3$ МэВ. Кривые: 1 — в нулевом газовом зазоре; 2 и 3 — в первом и втором газовых зазорах детектора, если сигнал третьего газового зазора выше порога 0.1 МэВ; 4 — спектры сигналов ионизационных потерь от суммы второго и третьего газовых зазоров, образованные альфа-частицей отдельно в результате реакции α_0 ; 5 — тоже отдельно в результате реакции α_1 ; 6 — тоже в результате реакций α_0 и α_1 вместе; 7 — аппроксимация Гаусса.

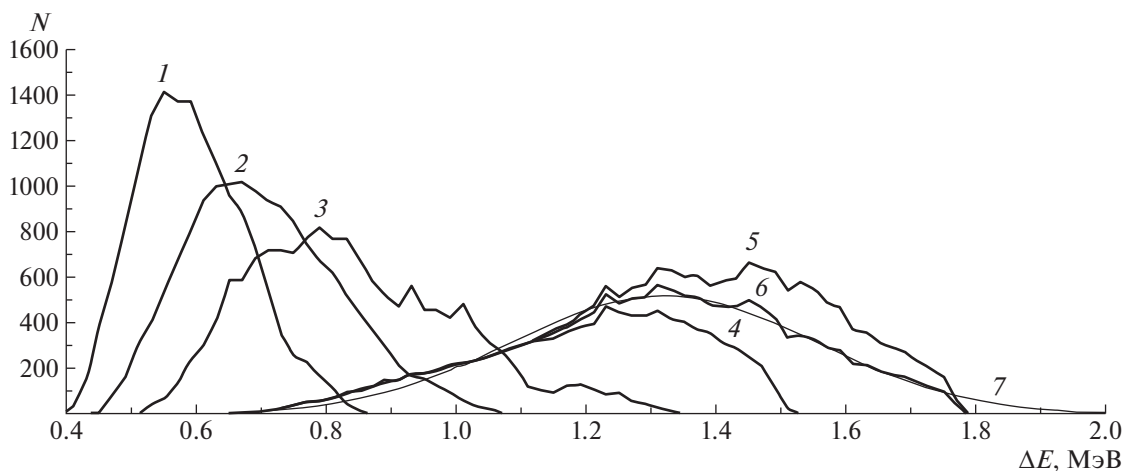


Рис. 4. Спектры ионизационных потерь альфа-частиц от α_0 - и α_1 -реакций при $E_n = 4$ МэВ. Кривые: 1 — в нулевом газовом зазоре; 2 и 3 — в первом и втором газовых зазорах детектора, если сигнал третьего газового зазора выше порога 0.1 МэВ; 4 — спектры сигналов ионизационных потерь от суммы второго и третьего газовых зазоров, образованные альфа-частицей отдельно в результате реакции α_0 ; 5 — тоже отдельно в результате реакции α_1 ; 6 — тоже в результате реакций α_0 и α_1 вместе; 7 — аппроксимация Гаусса.

следующий: произведено равномерное распределение случайного числа в диапазоне от -1 до $+1$ для косинуса угла вылета ядер в системе центра масс $\cos \theta_{\text{с.м.}}$, что обеспечивает равные телесные углы. В программе используется формула аппроксимации нейтронного сечения, таблица удельных ионизационных потерь и релятивистские законы сохранения импульса и энергии.

3.1. Моделирование ионизационных потерь при 1.8 МэВ

α_0 -Реакция реализуется только с испусканием ^4He и ^7Li ядер без γ -кванта. Энергии ядер ^4He и ^7Li

из α_1 -реакции с испусканием ^4He , ^7Li и γ -кванта при энергии 1.8 МэВ недостаточно, чтобы вызвать событие. Нумерация газовых зазоров ведется от нуля до трех.

Предположим, что триггер срабатывает при получении сигнала от последнего третьего зазора. В этом случае принимаются во внимание энергетические потери только ядра ^4He из-за того, что сигнал от ядра ^7Li отсутствует. Порог 0.1 МэВ в третьем промежутке установлен для подавления фона. Смоделированные спектры потерь на ионизацию альфа-частиц от α_0 -реакции в нулевом, первом и втором газовых промежутках детектора

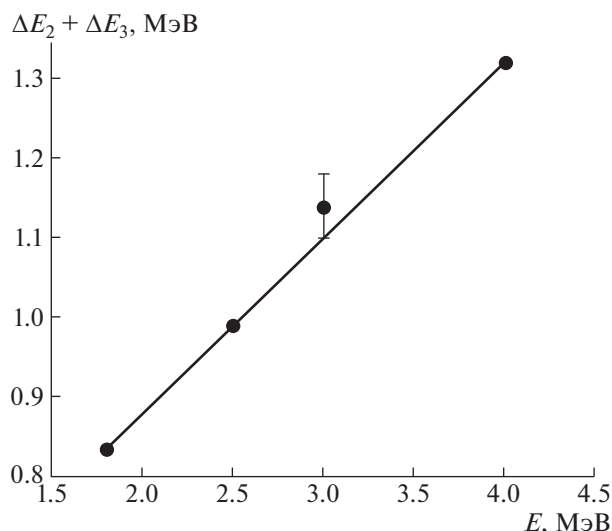


Рис. 5. Положение максимума в распределении аппроксимации Гаусса в спектре суммы сигналов второго и третьего газовых зазоров для α_0 - и α_1 -реакций вместе в зависимости от энергии потока нейтронов. Прямая линия — линейная аппроксимация.

при наличии сигнала третьего газового промежутка при $E_n = 1.8$ МэВ представлены на рис. 1. Потери энергии увеличиваются, а спектр расширяется при увеличении индекса зазора. Для каждого полезного события также суммировались остаточные потери энергии во втором и третьем промежутках. Смоделированные спектры суммарного сигнала ионизационных потерь от второго и третьего газового промежутка, создаваемого альфа-частицами из α_0 -реакции, также показаны на рис. 1. Аппроксимация распределением Гаусса последней упомянутой кривой была выполнена для определения положения его максимума. Индекс зазора, в котором останавливается частица, может указывать на неточную величину энергии нейтрона.

3.2. Моделирование ионизационных потерь при 2.5 МэВ

Реакция α_1 с испусканием ^4He , ^7Li и γ -кванта должна учитываться при $E_n = 2.5$ МэВ и выше. На рис. 2 показаны расчетные спектры ионизационных потерь альфа-частицы из обеих реакций α_0 и α_1 в нулевом, первом и втором газовых зазорах детектора, если в третьем газовом зазоре появляется сигнал при $E_n = 2.5$ МэВ. Можно видеть, что расстояние между максимумами в спектрах для трех номеров газовых зазоров увеличивается и спектры еще более расширяются. На рис. 2 также показаны расчетные спектры суммарного сигнала от второго и третьего газовых зазоров, производимых альфа-частицей из реакции: α_0 , α_1 , а также из обеих этих

реакций вместе. Выполнена математическая подгонка гауссового распределения к последней из вышеупомянутых кривых для того, чтобы определить положение его максимума. Разность между энергетическими потерями реакций α_0 и α_1 возникает за счет энергии 0.481 МэВ, унесенной γ -квантом. Следовательно, энергия ядер ^4He и ^7Li уменьшается, а энергия их потерь — увеличивается. События, принадлежащие только ядерной реакции α_0 , можно отобрать, применяя нижний и верхний пороги в третьем (или/и другом любом зазоре). Затем можно получить вклад реакции α_1 вычитанием вклада реакции α_0 из суммарного спектра.

3.3. Моделирование ионизационных потерь при 3 и 4 МэВ

Расчетные спектры ионизационных потерь ядра ^4He из обеих реакций α_0 и α_1 в нулевом, первом и втором газовых зазорах детектора, если получен сигнал от третьего зазора, показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно при энергии $E_n = 3$ МэВ и $E_n = 4$ МэВ. На рис. 3 и рис. 4 показаны также спектры суммарного сигнала ионизационных потерь от второго и третьего газовых зазоров, индуцированного альфа-частицей из реакций α_0 , α_1 , а также обеими реакциями α_0 и α_1 вместе. Неучтенная остаточная потеря энергии мала и ею можно пренебречь вплоть до $E_n = 4$ МэВ в случае, если альфа-частица прошла все зазоры и покинула детектор. Эта остаточная энергия влияет только на форму спектра, но не на положение максимума, которое используется в дальнейшем анализе энергии.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

Значения положения максимума в спектре сигнала суммы ионизационных потерь от второго и третьего газовых зазоров, индуцированных ядром ^4He от обеих реакций α_0 и α_1 вместе, могут быть использованы для восстановления характеристической энергии потока нейтронов, как это показано на рис. 5. Если принять за наиболее вероятное значение центр тяжести распределения суммы потерь и сопоставить его заданной энергии, то получим линейную зависимость от энергии. Здесь ошибки — это неопределенности энергии из-за несоответствия формы спектра и гауссовского распределения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование потерь энергии в зазорах детектора быстрых нейтронов. Потери энергии увеличиваются, а спектр расширяется в зависимости от номера зазора. Величина положения

максимума в спектре сигнала суммы ионизационных потерь от второго и третьего газовых зазоров, индуцированных ^4He от обеих реакций α_0 и α_1 вместе, пропорциональна энергии нейтронов. События, относящиеся только к ядерной реакции α_0 , можно отобрать, применяя нижний и верхний пороги в последнем или/и любом другом зазоре детектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Henske, M. Klein, M. Kohli, P. Lennert, G. Modzel, C. Schmidt, and U. Schmidt, Nucl. Instrum. Methods A **686**, 151 (2012).
2. F. Piscitelli, F. Messi, M. Anastasopoulos, T. Brys, F. Chicken, E. Dian, J. Fuzi, C. Hoglund, G. Kiss, J. Orban, P. Pazmandi, L. Robinson, L. Rosta, S. Schmidt, D. Varga, T. Zsiros, and R. Hall-Wilton, J. Instrum. **12**, 03013 (2017).
3. Jianrong Zhou, Q. Xiu, X. Zhou, Jianjin Zhou, L. Ma, Ch. J. Schmidt, M. Klein, Y. Xia, L. Zhou, C. Huang, G. Sun, B. Hu, Z. Sun, and Y. Chen, Nucl. Instrum. Methods A **953**, 163051 (2020).
4. S. I. Potashev, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev, S. V. Zuyev, S. Kh. Karaevskii, A. A. Kasparov, E. S. Konobeevskii, S. P. Kuznetsov, V. N. Marin, V. N. Ponomarev, and G. V. Solodukhov, J. Surf. Investig. X-ray, Synchrotr. Neutr. Techn. **12**, 627 (2018).
5. S. I. Potashev, A. A. Afonin, Yu. M. Burmistrov, A. I. Drachev, E. S. Konobeevskii, V. N. Marin, I. V. Meshkov, S. Kh. Karaevskii, A. A. Kasparov, V. N. Ponomarev, G. V. Solodukhov, and S. V. Zuyev, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **85**, 1068 (2021).
6. S. I. Potashev, A. I. Drachev, Yu. Burmistrov, S. Karaevsky, A. Kasparov, V. Ponomarev, and G. Solodukhov, EPJ Web Conf. **231**, 05010 (2020).
7. A. A. Каспаров, С. И. Поташев, А. А. Афонин, Ю. М. Бурмистров, А. И. Драчев, Изв. РАН. Сер. физ. **85**, 694 (2021).
8. I. Lehrs, R. Mattheewson, and W. Tejessy, Nucl. Instrum. Methods A **196**, 361 (1982).
9. S. I. Potashev, A. A. Kasparov, and V. N. Ponomarev, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **86**, 1079 (2022).
10. *Tables of Physical Quantities*, Ed. by I. K. Kikoin (Atomizdat, Moscow, 1976).
11. R. Bevilacqua, F.-J. Hambsch, M. Vidali, I. Ruskov, and L. Lamia, EPJ Web of Conf. **146**, 11010 (2017).

IONIZATION LOSS SIMULATION IN GAPS OF FAST NEUTRON DETECTOR BASED ON ^{10}B LAYER AND GASEOUS CHAMBER

S. I. Potashev¹⁾

¹⁾*Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

An ionization loss simulation in several sequent gaps of the neutron detector is performed. It is based on the rigid layer converter so as boron-10 and gaseous chamber. It was shown that the distribution of ionization losses over gas gaps varies significantly depending on the incident neutron energy. The fact can be used to control the energy of the neutron flux using this detector.