

Э. М. Газеева, Г. Н. Княжева, Э. М. Козулин

## Измерение эффективности нейтронных детекторов с использованием источника спонтанного деления $^{252}\text{Cf}$

Рассматриваются два метода определения эффективности нейтронных детекторов с использованием источника нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$ . С помощью одного из методов измерена эффективность нейтронного спектрометра DEMON.

Ключевые слова: эффективность регистрации, нейтронные детекторы, нейтроны, DEMON, спонтанное деление  $^{252}\text{Cf}$ .

### Об авторах

Газеева Эльвира Михайловна — студент 5-го курса кафедры ядерной физики Государственного университета «Дубна».

Княжева Галина Николаевна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник сектора № 5 лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ.

Козулин Эдуард Михайлович — кандидат физико-математических наук, начальник сектора № 5 лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ.

Для изучения характеристик эмиссии нейтронов, образованных в реакциях с тяжелыми ионами, необходимо знать эффективность регистрации нейтронных детекторов с целью получения абсолютных значений сечения образования нейтронов в этих реакциях, т.е. число нейтронов, приходящихся на единицу энергетического интервала, попавших в данный телесный угол на один осколок. Полная эффективность регистрации складывается из геометрической эффективности (отношение числа нейтронов, попавших в детектор, к числу нейтронов, испущенных источником) и внутренней эффективности (вероятности, что нейтрон зарегистрируется самим детектором).

В данной работе для измерения спектров нейтронов использовалась установка DEMON (*DEtecteur MODulaire de Neutrons*), которая состоит из отдельных модулей-детекторов, сделанных на основе жидкого органического сцинтиллятора NE213 [2].

Конструкция отдельного модуля DEMON показана на рис. 1.

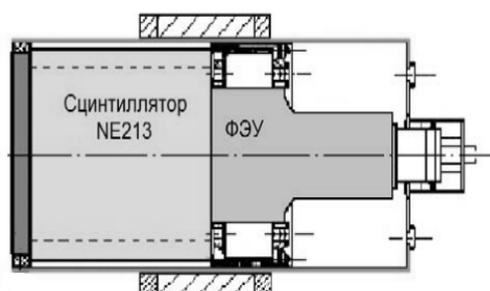


Рис. 1. Геометрия отдельного модуля DEMON

На рис. 2 показана схема расположения детекторов спектрометра DEMON в экспериментах по изучению эмиссии нейтронов, сопутствующих бинарному каналу ядерной реакции. Для этой установки проведены измерения эффективности регистрации нейтронных детекторов.

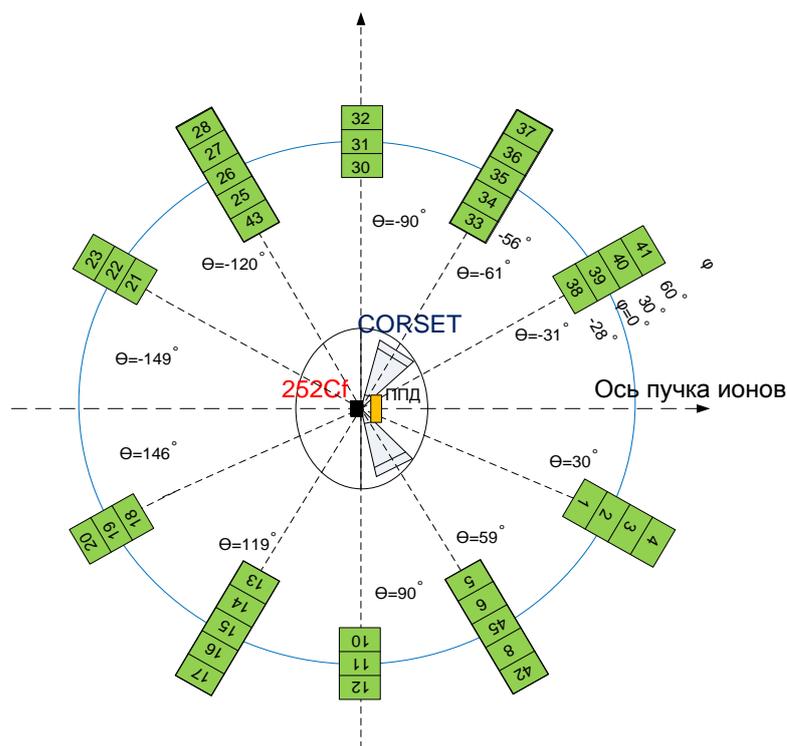


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для измерения нейтронов в совпадении с осколками деления. Детекторы *DEMON* обозначены пронумерованными прямоугольниками. Угол  $\theta$  указывает положение нейтронных детекторов относительно оси пучка ионов в плоскости реакции, угол  $\varphi$  — положение относительно плоскости реакции. Детекторам, которые находятся в плоскости реакции (соединены сплошной линией), соответствует угол  $\varphi = 0^\circ$ . В реакционную камеру помещен источник спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$ . На расстоянии 2 мм от источника находится полупроводниковый детектор (ППД)

На сегодняшний день спектры нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$  хорошо изучены [3], поэтому мы используем данный источник для калибровки и измерения эффективности нейтронных детекторов. Экспериментально показано [5; 6], что спектры нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$  хорошо описываются распределением Максвелла:

$$\frac{d^2 M_n}{dE_n dV_n} = \frac{2M_n \sqrt{E_n}}{\sqrt{\rho T}^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{E_n}{T}}, \quad (1)$$

где  $E_n$  — энергия нейтрона в системе отсчета источника, испускающего нейтроны,  $T$  — температура источника,  $M_n$  — множественность нейтронов. Температура и множественности нейтронов для  $^{252}\text{Cf}$  были измерены с хорошей точностью:  $M_n = 3.76$  и  $T = 1.41$  МэВ [5; 6].

Из ряда существующих методов выбраны два наиболее подходящих для наших экспериментальных условий, которые позволяют получить эффективность детекторов. В первом методе для регистрации осколков деления используется установка *CORSET* [1], которая состоит из двух времяпролетных плеч, расположенных под углом  $180^\circ$  относительно друг друга. Осколки деления регистрируются в диапазоне углов  $\pm 10^\circ$ . Нейтронные спектры, измеряемые в этом случае, имеют ярко выраженное угловое распределение с максимумом в направлении вылета осколков.

Во втором методе для регистрации осколков деления используется полупроводниковый кремниевый детектор (ППД), который помещается на максимально близком расстоянии (2 мм) от источника  $^{252}\text{Cf}$ . В данном методе нет выделенного угла регистрации осколков, что приводит почти к изотропному испусканию нейтронов. Этот спо-

соб позволяет измерять спектры нейтронов, близкие к распределению Максвелла (1).

Эффективность детекторов *DEMON* была получена с помощью второго метода.

Спектры нейтронов, испущенных при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ , измерены методом времени пролета в диапазоне энергий  $E = 0.9 - 5$  МэВ.

На рис. 3 приведен измеренный дважды дифференциальный спектр нейтронов в диапазоне энергий  $E = 0.9 - 5$  МэВ для детектора под номерами № 41, стоящего под углом  $\theta = -31^\circ$  относительно оси пучка

ионов и под углом  $\varphi = 60^\circ$ . Экспериментальные точки соединены линиями для обозначения тенденции поведения спектра. Сплошной линией приведен расчетный спектр, соответствующий формуле (1), и полученный методом Монте-Карло с применением программы моделирования эмиссии нейтронов из осколков деления для расчета вероятности эмиссии нейтронов детектором в данный телесный угол. Поведение кривых, соответствующих детекторам № 38, 39, 40 аналогично показанному на рис. 3.

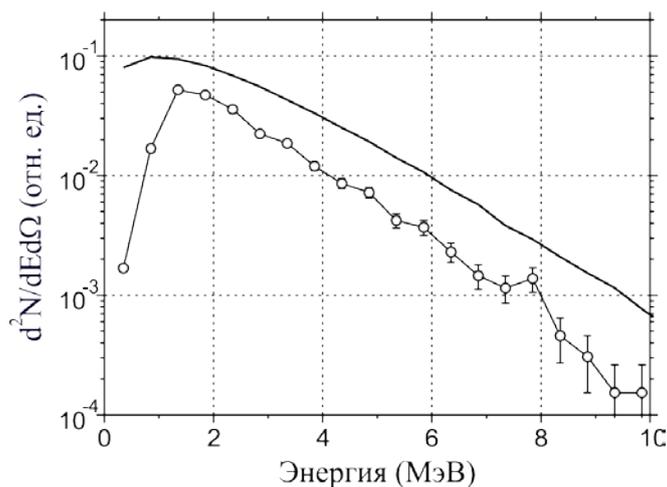


Рис. 3. Экспериментальный и теоретический дважды дифференциальные спектры нейтронов для детектора под № 41

Для получения экспериментальной эффективности регистрации нейтронов, необходимо сравнить измеренные спектры

нейтронов с расчетными. На рис. 4. приведена экспериментальная эффективность регистрации нейтронов для детектора № 41.

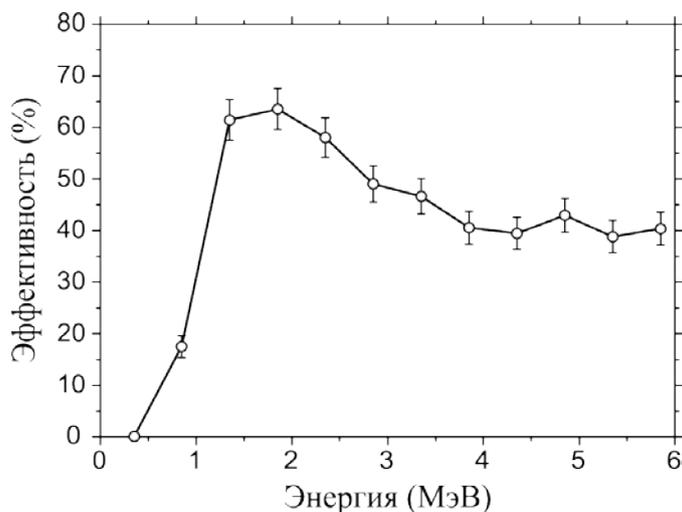


Рис. 4. Экспериментальная эффективность регистрации нейтронов для детектора № 41

Спектр нейтронов источника спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  имеет максимум при  $E \approx 0.8$  МэВ и экспоненциально уменьшается с увеличением энергии. Эффективность измеряется в диапазоне энергии нейтронов от 0.9 до 5 МэВ. Для получения эффективности в широком диапазоне энергий ( $E = 0.9 - 20$  МэВ) используется теоретическая расчетная эффективность (рассчитан-

ная с помощью программы *MENATE* [5], рис. 5), которая нормируется на экспериментальные эффективности, измеренные с помощью  $^{252}\text{Cf}$ . На рис. 6 представлена экспериментальная эффективность, полученная в результате настройки и калибровки нейтронных детекторов и дополненная на основании теоретических расчетов.

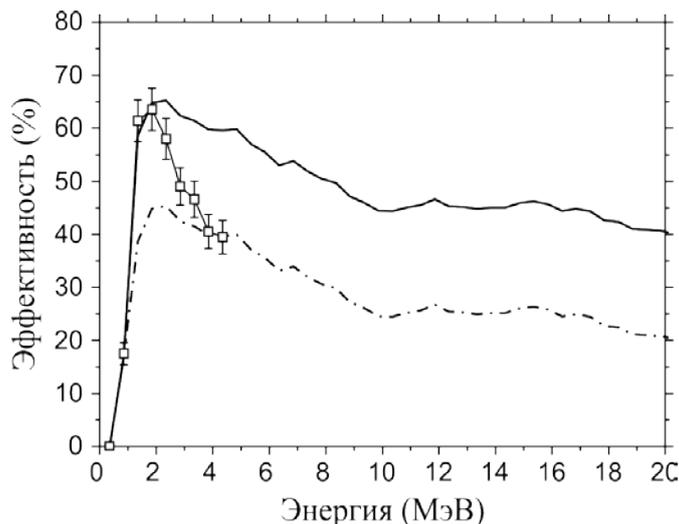


Рис. 5. Экспериментальная эффективность для детектора № 41 (точки, соединенные линиями) и теоретическая (сплошная кривая), полученная с использованием программы *MENATE*. Расчетная эффективность нормируется на экспериментальную эффективность в диапазоне энергий  $E = 4 - 4.5$  МэВ. Штрихпунктирной линией показана поправленная расчетная эффективность

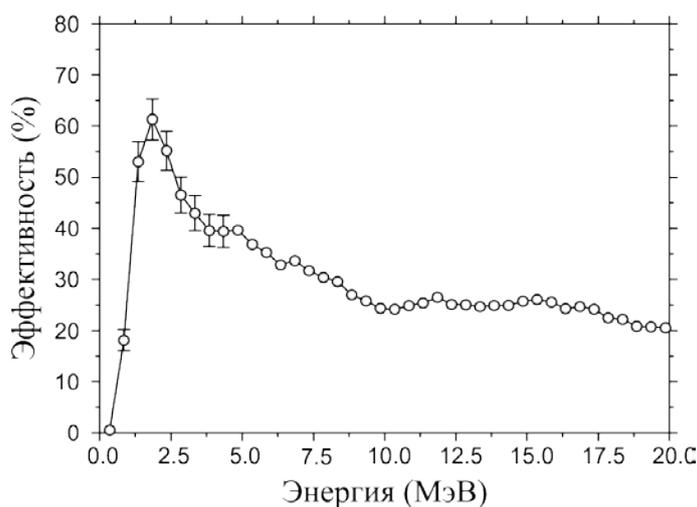


Рис. 6. Экспериментальная эффективность, полученная в результате настройки и калибровки нейтронных детекторов и дополненная на основании теоретических расчетов

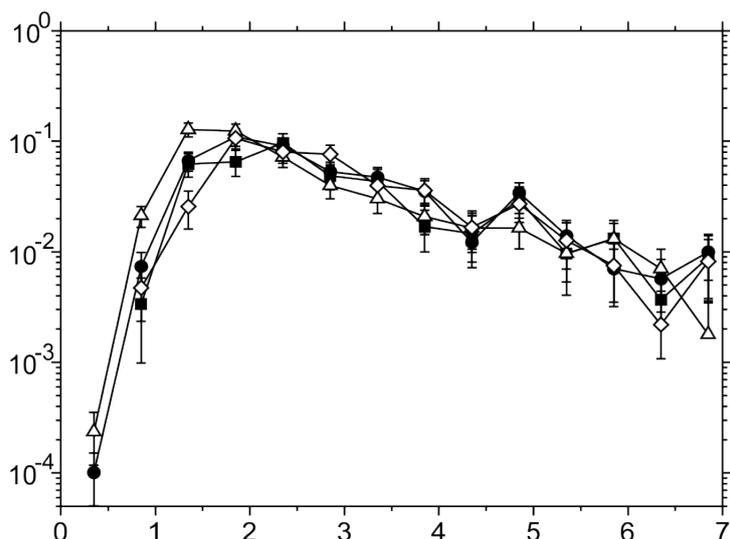


Рис. 7. Дважды дифференциальные сечения выхода нейтронов, образованных в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$  и зарегистрированных детекторами № 38, 39, 40, 41

Для примера на рис. 7 представлены дважды дифференциальные сечения выхода нейтронов, образованных в реакции  $^{48}\text{Ca} + ^{232}\text{Th}$ . Спектры нейтронов получены с использованием метода, рассмотренного в данной работе.

Таким образом, были измерены эффективности нейтронных детекторов, позволяющие получать абсолютные значения сечений образования нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами. Полученные результаты крайне важны для проведения экспериментов по изучению характеристик эмиссии нейтронов в реакциях квазиделения и слияния-деления тяжелых атомных ядер.

### Библиографический список

1. Козулин Э.М. Времяпролетный спектрометр CORSET для измерения бинарных продуктов ядерных реакций / Э.М. Козулин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2008. — Т. 51, В.1. — С. 44—58.
2. Bizard, G. The French-Belgian neutron multidetector facility: the DEMON project / G. Bizard [et al.] // Nucl. Phys. News. — 1991. — V. 1. — P. 15—16.
3. Bowman, H. R. Further Studies of the Prompt Neutrons from the Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$  / H.R. Bowman [et al.] // Phys. Review. — 1963.
4. Desesquelles, P. [et al.] // Nucl. Instrum. Methods. — 1991. — A307. — P. 336.
5. Holub, E. [et al.] // Phys. Rev. — 1983. — C28. — P. 252.
6. Zang, W. P. [et al.] // Phys. Rev. — 1986. — C33. — P. 519.

Поступила в редакцию  
22.12.15