

УДК 539.173.84

ОЦЕНКА ЧИСЛА МНОЖЕСТВЕННЫХ РЕГИСТРАЦИЙ МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЕЛЕНИЯ МУЛЬТИМОДУЛЬНЫМ НЕЙТРОНЫМ ДЕТЕКТОРОМ НА БАЗЕ ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА ВС-501

© 2024 г. О. В. Сидорова^{1,2,*}, Ш. С. Зейналов¹

¹Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия

²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
Университет «Дубна», Дубна, Россия

* e-mail: sidorova@jinr.ru

Поступила в редакцию 24.11.2023

После доработки 24.03.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Изучена взаимосвязь между вариациями множественности мгновенных нейтронов деления и полной кинетической энергией фрагментов деления с использованием двойной ионизационной камеры и детектора мгновенных нейтронов деления. Выполнена оценка систематической ошибки, вносимой кросс-толками, являющимися следствием мультимодульности детектора нейтронов.

DOI: 10.31857/S0367676524080145, EDN: OQCOEQ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование свойств мгновенных нейтронов деления (МНД) представляет интерес в изучении процесса деления ядер, так как МНД несут информацию о степени возбуждения делящегося ядра [1, 2]. Прогресс в исследованиях свойств МНД, продолжающихся более шести десятилетий, был достигнут благодаря модернизации метода измерений с малой геометрической эффективностью регистрации, предложенного в работе Бутс-Йоргенсена и Книттера [3]. В указанной работе авторы предложили использовать двойную ионизационную камеру с сетками Фриша в комбинации с детектором МНД для исследования свойств коррелированных фрагментов деления (ФД) и МНД. Детектор МНД располагался на расстоянии $\sim 0.5\text{--}0.7$ м от камеры вдоль ее оси симметрии. Используемый метод позволял проводить измерение основных параметров, характеризующих процесс деления: кинетические энергии ФД, суммарную кинетическую энергию ФД, их массы, множественность МНД и скорости МНД по времени пролета заданного расстояния. Исследования процесса деления в резонансной области энергий позволяют изучать зависимости массовых и энергетических характеристик продуктов деления от спинов делящихся ядер. Интерпретация результатов измерений проводится в рамках модели ММ-RNR — мультимодовое деление со случайным разрывом шейки [4]. Эта модель,

предложенная У. Броза и др. [5], рассматривает процесс деления ядер из различных предразрывных конфигураций делящегося ядра при низких энергиях возбуждения. В основном эти конфигурации имеют форму гантели и приводят к различным путям дезинтеграции ядра. Эти пути (или моды деления) связаны с каналами деления О. Бора. В. Фурман и Я. Климан [6] предложили связь между каналами и модами деления, дающую способ оценки вероятностей реализации той или иной моды деления с использованием экспериментальных данных. Указанные моды деления связаны с каналами деления Бора, которые выбираются стохастически.

Целью наших исследований является измерение возможной корреляции между вариациями множественности МНД и полной кинетической энергии фрагментов деления (ФД). Экспериментальная установка для исследования характеристик процесса деления состоит из двойной ионизационной камеры (ИК) с сетками Фриша и мишенью из U-235, установленной на общем катоде камеры. Мгновенные нейтроны регистрируются с помощью сцинтилляционного детектора, расположенного на расстоянии $0.5\text{--}0.7$ м от ИК, как показано схематично на рис. 1. Модуль детектирования МНД изготовлен фирмой SIONICS и обладает способностью выделения МНД на фоне гамма-излучения с использованием анализа формы импульсов.

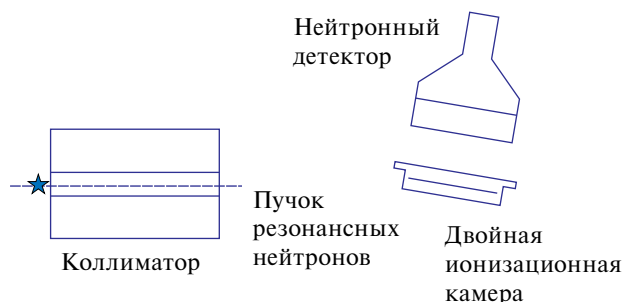


Рис. 1. Схема установки с двойной ионизационной камерой для спектроскопии осколков деления и детектором МНД.

Мишень представляет собой тонкую органическую пленку толщиной 1 мкм с нанесенным вакуумным напылением на одну из ее сторон слоя золота толщиной ~ 50 мкг/см² и ²³⁵U толщиной 70 мкг/см². Диаметр мишени составляет 70 мм. Мишень установлена в центре отверстия на общем катоде двойной ионизационной камеры. При захвате нейтрона ядром урана осколки деления регистрируются в двух отдельных ионизационных камерах, составляющих двойную ионизационную камеру, заполненную газовой смесью P10, протекающей со скоростью 20 мл/мин через камеру, работающую в нормальных условиях. Камера может измерять кинетические энергии осколков деления и углы между направлением движения осколков деления и нормалью к поверхности мишени [7]. Специальное программное обеспечение (ПО) было создано для исследования свойств МНД, регистрируемых с использованием новой системы, состоящей из детекторов быстрых нейтронов, электронной аппаратуры и ПО сбора и анализа данных. В результате деления ядра исследуемого препарата, нанесенного на поверхность мишени, пара фрагментов деления (ФД) тормозятся в соответствующих камерах двойной ионизационной камеры. При этом измеряется следующая информация: временная метка события, углы испускания ФД относительно нормали к поверхности мишени, величины кинетической энергии ФД и информация о форме импульсов МНД. Благодаря информации об углах вылета из мишени ФД производилась коррекция на потери кинетической энергии ФД в материале мишени и ее подложке. Для этого производилось измерение зависимости потерь кинетической энергии ФД от угла вылета из мишени относительно нормали к плоскости мишени в пределах от 0 до 60 градусов, где эта зависимость является линейной. Таким образом, события с углами за пределами указанного диапазона не использовались для анализа массово-энергетических распределений ФД. Необходимо отметить, что ФД являются частицами со сложным характером энергетических потерь, зависящих не только от величины их кинетической энергии, но от массы. Методика поправок, зависящих от масс и кинетических энергий ФД, разработанная

в работе Бутс-Йоргенсена и Книттера [3], использовалась при определении массово-энергетических распределений ФД в исследуемых реакциях деления ядер. В настоящее время для детального изучения массово-энергетических распределений (МЭР) фрагментов деления и процессов эмиссии МНД при делении ядер ²³⁵U, ²³⁷Np и ²³⁹Pu, вызванного резонансными нейтронами, и спонтанном делении ²⁵²Cf, был изготовлен и расположен на втором канале (расстояние от источника — 9.2 м) источника резонансных нейтронов ИРЕН (ОИЯИ, Дубна) мультимодульный нейтронный детектор (ММНД), состоящий из двух плеч с 16 модулями детектирования МНД в каждом (рис. 2). Модули детектирования фирмы SIONICS расположены на четырех сечениях виртуальной сферической поверхности с радиусом 50 см: 12 модулей расположены на двух сечениях с диаметром $D = 300$ мм, а остальные 20 модулей — на двух сечениях с диаметром $D = 450$ мм. Совокупный телесный угол, покрываемый модулями детектирования МНД, составляет 5.12% от полного телесного угла. Мультимодульная структура детектора МНД имеет преимущество вследствие более высокой эффективности регистрации МНД. Однако в таком детекторе один нейтрон может быть зарегистрирован одновременно в нескольких модулях детектирования. Такая ситуация называется кросс-толком. Кросс-толки вносят систематическую ошибку в множественность зарегистрированных МНД и нуждаются в оценке [8]. В данной работе производится оценка систематической ошибки, вносимой кросс-толками.

МОДУЛЬ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МНД

Модуль детектирования МНД состоит из алюминиевого цилиндра диаметром 80 мм и высотой 50 мм (рис. 2). Модуль заполнен сцинтилляционной жидкостью BC-501. Трубка фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) приклеена к прозрачной стороне цилиндра и используется для усиления сигналов (световых вспышек), генерируемых при столкновении МНД с молекулами BC-501. Импульсы, вызванные МНД, усиливаются с помощью ФЭУ и анализируются с помощью программного обеспечения сбора и анализа данных для выделения МНД от гамма-излучения с использованием метода анализа формы импульса. Импульсы, вызванные нейтронами, воспринимаются системой сбора данных, если их амплитуда превышает пороговый уровень 0.15 МэВ в энергетической шкале. Для анализа траектории движения МНД внутри НД от точки эмиссии до поглощения или ухода из НД была создана программа отслеживания истории МНД по методу Монте-Карло [9, 10] от момента рождения до захвата в детекторе или вылета МНД из системы.

Предполагались следующие входные условия: МНД вылетает из равномерно распределенной точки мишени с равномерно распределенным начальным углом наклона к плоскости мишени. Случайная

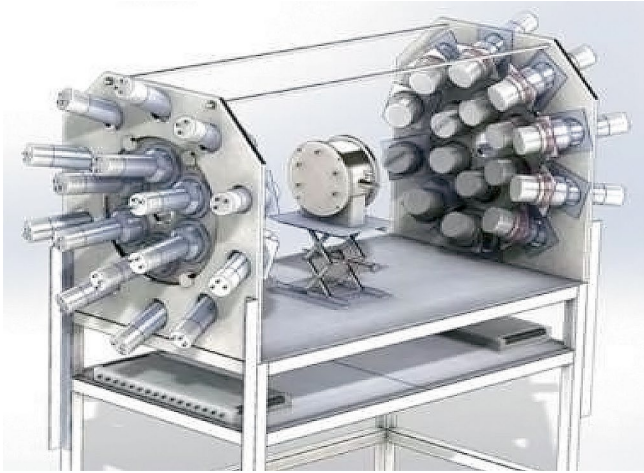


Рис. 2. Многомодульный детектор МНД с двойной ионизационной камерой для спектроскопии осколков деления.

величина E_0 – кинетическая энергия нейтрона при вылете из мишени, предполагается имеющей распределение Максвелла согласно формуле (1):

$$F(E_0) = \frac{2\pi}{\sqrt{(\pi kT)^3}} \cdot \sqrt{E_0} \cdot e^{-\frac{E_0}{kT}}, \quad (1)$$

где параметр $kT = 1.0$ МэВ, k – постоянная Больцмана, а T – температура мишени. Траектория и кинетическая энергия нейтрона отслеживаются от эмиссии из мишени до момента, когда нейтрон покинул пределы системы или был поглощен в сцинтиляторе, или же при снижении его кинетической энергии до теплового уровня 10^{-5} МэВ.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МНД С ВЕЩЕСТВОМ СЦИНТИЛЯТОРА

Сцинтиляционная жидкость ВС-501 имеет химическую формулу CH_2O . Предполагаются возможными два типа реакций МНД с молекулой сцинтилятора: упругое рассеяние или захват МНД одним из атомов молекулы сцинтилятора. Далее были использованы следующие обозначения:

– $\sigma_C^{\text{elastic}}(E)$, $\sigma_H^{\text{elastic}}(E)$, $\sigma_O^{\text{elastic}}(E)$ и $\sigma_{\text{CH}_2\text{O}}^{\text{elastic}}(E)$ – сечения упругого рассеяния МНД с кинетической энергией E на атоме С, Н, О, молекуле CH_2O соответственно;

– $\sigma_C^{\text{capture}}(E)$, $\sigma_H^{\text{capture}}(E)$, $\sigma_O^{\text{capture}}(E)$ и $\sigma_{\text{CH}_2\text{O}}^{\text{capture}}(E)$ – сечения захвата МНД с кинетической энергией E атомом С, Н, О, молекулой CH_2O соответственно;

– $\sigma_C^{\text{total}}(E)$, $\sigma_H^{\text{total}}(E)$, $\sigma_O^{\text{total}}(E)$ и $\sigma_{\text{CH}_2\text{O}}^{\text{total}}(E)$ – полные сечения взаимодействия МНД с кинетической энергией E с атомом С, Н, О, молекулой CH_2O соответственно.

Пусть случайная величина X – длина свободного пробега МНД с начальной кинетической энергией E внутри жидкости сцинтилятора. При моделировании предполагалось, что X имеет показательное распределение со плотностью вероятности (2):

$$p(X = x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, \quad (2)$$

где

$$\lambda = N \cdot \sigma_{\text{CH}_2\text{O}}^{\text{total}}(E),$$

$$\sigma_{\text{CH}_2\text{O}}^{\text{total}}(E) = \sigma_C^{\text{total}}(E) + 2 \cdot \sigma_H^{\text{total}}(E) + \sigma_O^{\text{total}}(E),$$

N – плотность молекул в единице объема 1 cm^3 сцинтилятора. Сцинтиляционная жидкость CH_2O имеет плотность $\rho = 0.815 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Пренебрегая энергией связи, атомный вес CH_2O считаем равным 30.02109. Следовательно,

$$N = \frac{6.0221408 \cdot 10^{23} \cdot 10^3 \cdot 815}{30.022109} = 163.4866 \cdot 10^{20} \text{ молекул.}$$

Вероятности реакции МНД с атомами сцинтилятора $\rho_C^{\text{total}}(E)$, $\rho_H^{\text{total}}(E)$ и $\rho_O^{\text{total}}(E)$ пропорциональны соответствующим сечениям с учетом кратности атома в молекуле сцинтилятора:

$$\begin{aligned} \rho_C^{\text{total}}(E) / \rho_H^{\text{total}}(E) / \rho_O^{\text{total}}(E) &= \\ &= \sigma_C^{\text{total}}(E) / 2 \cdot \sigma_H^{\text{total}}(E) / \sigma_O^{\text{total}}(E). \end{aligned} \quad (3)$$

Вероятности типа взаимодействия нейтрона с атомом молекулы сцинтилятора пропорциональны соответствующим сечениям:

$$\rho_{\text{atom}}^{\text{capture}}(E) / \rho_{\text{atom}}^{\text{elastic}}(E) = \sigma_{\text{atom}}^{\text{capture}}(E) / \sigma_{\text{atom}}^{\text{elastic}}(E) \quad (4)$$

где $\text{atom} = \text{C, H, O}$.

Взаимодействие МНД с определенным атомом ведет к потере части или всей кинетической энергии частицы. Совокупная энергия E_{modul} , поглощенная материалом сцинтилятора при торможении нейтрона, рассчитывалась как сумма энергий, выделенных при упругих столкновениях нейтрона с атомами водорода и при захвате нейтрона любым атомом материала сцинтилятора. ФЭУ модуля порождает вспышку в случае превышения величины порогового значения совокупной энергии E_{modul} , выделенной нейтроном в данном модуле при взаимодействии с атомами сцинтилятора,

$$E_{\text{modul}} > 0.15 \text{ МэВ.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью данной работы была оценка доли многократных рассеяний (2–5) исследуемой частицы

на атомах среды с помощью используемой измерительной аппаратуры. Многократные рассеяния частиц в нейтронном детекторе могли имитировать ложную множественность частиц. В этой связи возникла необходимость определения доли таких событий многократного рассеяния с использованием компьютерного моделирования процесса регистрации частиц в детекторе. Для этого мы создали компьютерный код, который генерировал 20 сценариев эмиссии МНД, вызывающих сигналы в заданном детекторе. Каждый сценарий состоял из 500 000 событий эмиссии нейтрона. Результаты моделирования представлены в табл. 1, где использованы следующие обозначения: R — порядковый номер сценария; N_R^i — число нейтронов, зарегистрированных в сценарии R i модулями; $N_R^{\geq 5}$ — число нейтронов, зарегистрированных в сценарии R пятью и более модулями; N_R^{real} — реальное число нейтронов, зарегистрированных системой в сценарии R , находится в соответствии с формулой (5):

$$N_R^{\text{real}} = \sum_{i=1}^{\infty} N_R^i, \quad (5)$$

N_R^{visible} — число вспышек, зарегистрированных нейтронным детектором в сценарии R , находится по формуле (6):

$$N_R^{\text{visible}} = \sum_{i=1}^{\infty} N_R^i \cdot i, \quad (6)$$

ϵ_R — систематическая относительная ошибка в измерении числа нейтронов в сценарии R вычисляется в соответствии с (7):

$$\epsilon_R = \frac{N_R^{\text{visible}} - N_R^{\text{real}}}{N_R^{\text{visible}}}. \quad (7)$$

Поскольку $N_R^{\geq 5} = 0$ для всех R , то формулы (5) и (6) приобретают вид (8) и (9):

$$N_R^{\text{real}} = \sum_{i=1}^4 N_R^i, \quad (8)$$

$$N_R^{\text{visible}} = \sum_{i=1}^4 N_R^i \cdot i. \quad (9)$$

Среднее значение систематической относительной ошибки (7) в измерении числа нейтронов было оценено в результате вычислений по всем сценариям:

$$E(\mu_R) \approx 0.0538.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было проведено моделирование процесса регистрации МНД системой из 32 детекторов нейтронов на базе сцинтиллятора ВС501. В результате проведенного моделирования процесса транспорта МНД в исследуемом детекторе МНД, состоящем из 32 модулей с диаметром 80 мм и высотой

Таблица 1. Результаты моделирования

R	N_R^1	N_R^2	N_R^3	N_R^4	$N_R^{\geq 5}$	N_R^{real}	N_R^{visible}	ϵ_R
1	19169	1055	25	0	0	20249	21354	0.052
2	19281	1108	25	0	0	20414	21572	0.054
3	19290	1071	34	0	0	20395	21534	0.053
4	19032	1058	29	1	0	20120	21239	0.053
5	19102	1120	33	0	0	20255	21441	0.055
6	19288	1069	31	0	0	20388	21519	0.053
7	19087	1114	27	0	0	20228	21396	0.055
8	19215	1102	23	0	0	20340	21488	0.053
9	19092	1149	28	0	0	20269	21474	0.056
10	19161	1089	32	0	0	20282	21435	0.054
11	19396	1081	19	0	0	20496	21615	0.052
12	19180	1140	29	1	0	20350	21551	0.056
13	19106	1104	16	1	0	20227	21366	0.053
14	19152	1072	33	1	0	20258	21399	0.053
15	19173	1105	31	0	0	20309	21476	0.054
16	19256	1078	20	0	0	20354	21472	0.052
17	19171	1145	22	0	0	20338	21527	0.055
18	19049	1125	31	2	0	20207	21400	0.056
19	18938	1110	26	0	0	20074	21236	0.055
20	19096	1110	28	0	0	20234	21400	0.054

50 мм сцинтилляционных детекторов, которые позволяли выделение МНД на фоне гамма-излучения по форме импульса было установлено, что оценка систематической погрешности из-за многократного рассеяния в наших исследованиях МНД не превышает 5%:

$$N_R^{\text{real}} \approx 0.95 \cdot N_R^{\text{visible}}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nifenecker H., Ribrag M., Frehaut J., Gauriau J.* // Nucl. Phys. 1969. V. 131. No. 2. P. 261.
2. *Bowman H.R., Thompson S.G., Milton J.C.D., Swiatecki W.J.* // Phys. Rev. 1962. V. 126. No. 6. P. 2120.
3. *Budtz-Jorgensen C., Knitter H.-H.* // Nucl. Phys. A. 1988. V. 490. P. 307.
4. *Галкина Е.И., Козулин Е.М., Княжева Г.Н. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т 85. № 10. С. 1405;
5. *Brosa U., Grossmann S., Müller A.* // Phys. Reports. 1990. V. 197. No. 4. P. 167.
6. *Furman W.I., Kliman J.* // Proc. XVIIth Int. Symp. Nucl. Phys. (Rossendorf, 1987). P. 86.
7. *Zeynalov Sh., Sedyshev P., Shvetsov V., Sidorova O.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 211. Art. No. 04003.
8. *Соболев Ю.Г., Пенионжкевич Ю.Э., Самарин В.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 8. С. 1152; *Sobolev Y.G., Penionzhkevich Y.E., Samarin V.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 8. P. 948.
9. *Downey A.* Physical modeling in MATLAB. Needham: Green Tea Press, 2009. 136 p.
10. *Sobol I.N.* Monte Carlo method (Popular lectures in mathematics). Chicago: University of Chicago Press, 1975. 76 p.

Estimation of the number of multiple registrations of prompt fission neutrons with a multi-modular neutron detector based on a liquid scintillator BC-501

O. Sidorova^{1,2,*}, Sh. Zeynalov¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

²Dubna State University, Dubna, 141980, Russia

*e-mail: sidorova@jinr.ru

Investigation of correlation between the multiplicity variations of prompt fission neutrons and the total kinetic energy of fission fragments, using the double ionization chamber in combination with prompt fission neutron detector. This study assesses the systematic errors caused by cross-talks, due to the multi-modular structure of the neutron detector.

Keywords: double ionization chamber, nuclear fission, fission fragments, total kinetic energy, mass distribution