

## ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕРІЗІВ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ (n, x) НА ІЗОТОПАХ ГЕРМАНІЮ

Н. Р. Дзисюк<sup>1</sup>, І. М. Каденко<sup>1</sup>, В. К. Майданюк<sup>1</sup>, Г. І. Применко<sup>1</sup>, А. М. Берлізов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

<sup>2</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Представлено результати експериментального визначення перерізів ядерних реакцій  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$  при енергії нейтронів 14,53 MeV та перерізу реакції  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$  при енергіях нейтронів 13,32, 13,69, 14,35 та 14,74 MeV. Вимірювання проведено нейтронно-активаційним методом. Зразки з природного германію опромінювалися ДТ-нейтронами. Апаратурні спектри гамма-випромінювання продуктів активації вимірювались на двох спектрометрах з HPGe детекторами. При обробці експериментальних даних ураховано нестационарність нейтронного потоку, реальну геометрію експерименту, ефекти каскадного додавання при вимірюваннях апаратурних гамма-спектрів, ефекти поглинання гамма-квантів у зразку. Середню за зразком енергію нейтронів визначалась експериментально Zr/Nb методом.

### 1. Вступ

Експериментальне вимірювання перерізів реакцій (n, x) посідає особливе місце в сучасній ядерній фізиці, оскільки дає змогу отримувати важливу інформацію про структуру ядер та перебіг відповідних ядерних реакцій. Незважаючи на наявність великої кількості експериментальних даних по взаємодії нейтронів з ядрами, мають місце прогалини у величинах перерізів при деяких енергіях нейтронів та суттєві розходження між результатами різних експериментальних груп, що сягають інколи 60 % [1].

Вибір германію предметом дослідження пов'язано, у першу чергу, з наявністю запитів на визначення перерізів ядерних реакцій [2, 3] з метою подальших прикладних застосувань у геофізиці, радіаційній медицині, ядерній спектроскопії, при реалізації трансмутації довгоіснуючих елементів, інтерполяції оцінених ядерних даних тощо. Надійне визначення перерізів ядерних реакцій (n, x) є також важливим для оцінки радіаційної стійкості детекторів гамма-випромінювання на основі германію, що часто використовуються при вимірюваннях в умовах змішаних нейтронних та гамма-полів.

### 2. Методика експерименту

Вимірювання перерізів проводилися нейтронно-активаційним методом [4], джерелом нейтронів був нейтронний генератор НГ-300 з максимальним виходом D-T нейтронів  $5 \cdot 10^{11}$  нейтрон/с [5]. Зразки, що опромінювалися, виготовлені з природного германію і мають форму дисків з розмірами  $\varnothing 10 \times 0,7$  мм та  $\varnothing 20 \times 2$  мм.

Гамма-спектри ядер-продуктів активації вимірювались на двох спектрометрах з коаксіальним HPGe детектором (об'єм  $110 \text{ см}^3$ ) та планарним германієвим детектором з тонким бериліє-

вим вікном ( $\varnothing 10 \times 7$  мм, товщина берилію 127 мкм). Енергетична роздільна здатність спектрометрів становила 2,1 кеВ для  $\gamma 1332$  кеВ  $^{60}\text{Co}$  та 184 еВ для  $L_{\alpha}$ -лінії Ва 4.46 кеВ із розпаду  $^{137}\text{Cs}$  відповідно.

Для зменшення розкиду енергій нейтронів, що опромінюють зразок, в іонопровід на відстані 28 см від мішені було встановлено діафрагму з ексцентрично розташованим отвором діаметром 8 мм. Така модифікація нейтронного генератора дала змогу зменшити діаметр пучка дейтронів на мішень до 10 мм, а також реалізувати можливість використання різних ділянок мішені, обертаючи її навколо своєї осі після кожної серії опромінювань. Положення осі пучка дейтронів знаходили з розподілу густини потоку нейтронів на мішені методом активації тонких алюмінієвих фольг. Середню за зразком енергію нейтронів визначали експериментально Zr/Nb методом [6].

Для зменшення впливу фону термалізованих нейтронів зразки германію обгорталися індієвими та кадмієвими фольгами.

Опромінювання зразків германію проводилися під кутами 0, 120, 150, 45, 75 град до осі пучка дейтронів на відстані 75 мм від Ti-T шару мішені. Такій геометрії відповідають середні енергії нейтронів 13,32, 13,69, 14,35, 14,74 та 14,53 MeV. Величина густини потоку нейтронів підтримувалась постійною з похибкою  $\leq 5$  %. З метою ідентифікації ядер-продуктів активації варіювалися часи опромінення ( $5 \div 140$  хв) та вимірювання апаратурних гамма-спектрів ( $5 \div 120$  хв). Час витримки опромінених зразків було мінімізовано для забезпечення максимальної інтенсивності гамма-ліній, що використовувалися для визначення перерізів відповідних реакцій. Величини перерізів ядерних реакцій визначалися відносним методом [3], при цьому опорною ядерною реакцією було обрано  $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ .

Особлива увага приділялася визначенню величини перерізу ядерної реакції  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$ . На даний час інформація про цей переріз у літературі взагалі відсутня, а продуктом реакції є ядро германію  $^{71}\text{Ge}$ , що розпадається шляхом К-захоплення (рис. 1) на ядро  $^{71}\text{Ga}$ .

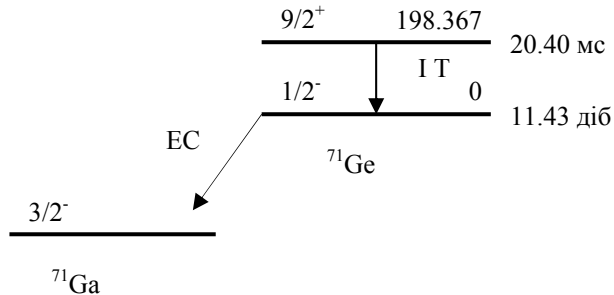


Рис. 1. Схема розпаду ядра  $^{71}\text{Ge}$  [7].

Для визначення повного перерізу утворення ядра  $^{71}\text{Ge}$  вимірювалися спектри характеристичного випромінювання атома галію  $^{71}\text{Ga}$ . З цією метою використано планарний детектор, енергетична роздільна здатність якого дала можливість виміряти апаратний спектр характеристичного випромінювання з розділенням піків, що відповідають  $K_{\alpha}$ - і  $K_{\beta}$ -серіям  $^{71}\text{Ga}$  (9,252 та 10,2 кеВ відповідно). Обробку спектрів виконано програмою WinSpectrum-2.2 [8]. При визначенні перерізу використано суму енергетичних ліній ( $k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2}$ ).

Для визначення перерізів розраховувалася абсолютна ефективність реєстрації фотонів детектором. З цією метою використано два програмних коди MCNP4C [9] та Geant4 [10]. Основою для теоретичного розрахунку ефективності були моделі детекторів, задіяні в експерименті, при цьому валідація моделей проводилася на підставі експериментально отриманих значень абсолютних ефективностей. Для розрахунків останніх використано стандартний набір точкових калібрувальних джерел ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{33}\text{Ba}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , при цьому для  $^{60}\text{Co}$  при визначенні ефективності реєстрації гамма-квантів робилася поправка на каскадне додавання гамма-квантів). Вимірювання проведено в умовах двох геометрій, коли джерела розміщувалися на відстанях 3,2 та 11 см над поверхнею кришки криостату детектора.

При визначенні величин перерізів урахували ряд ефектів, що потенційно можуть бути джерелом систематичних похибок результатів вимірювань. У першу чергу це стосується ефектів каскадного додавання гамма-квантів, що мають місце внаслідок особливостей схем розпадів ядер-продуктів активації ( $^{71}\text{Zn}$ ,  $^{70}\text{Ga}$ ,  $^{69}\text{Ge}$ ,  $^{75}\text{Ge}$ ) в

умовах близької геометрії „джерело - детектор”. Як прояв цього ефекту, на апаратних спектрах спостерігалися піки сум. Розрахунок поправки здійснювався з використанням програми NuclideMaster+ [11], що дає змогу розраховувати поправки на каскадне додавання для заданої геометрії вимірювань на основі методу Монте Карло на основі бібліотеки оцінених ядерних даних ENSDF. Остання містить дані про структуру атомних ядер. Крім гамма-гамма-каскадів у розрахунках урахували кореляцію при випромінюванні гамма-квантів з анігіляційними квантами при  $\beta^+$ -розпаді, додавання імпульсів від гамма-квантів і рентгенівських характеристичних квантів К- і L-серій при внутрішній конверсії та К-захопленні, а також анізотропію кутових кореляцій каскадних гамма-променів.

Поправочні коефіцієнти на самопоглинання в зразках було розраховано також за методом Монте-Карло з використанням програми MCNP4C та залученням детальної геометрії вимірювань.

### 3. Результати вимірювань

На рис. 2 для реакції  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$  представлено результати порівняння експериментальних даних різних авторів [1] із теоретичними розрахунками програмним кодом Talys-0,64 [12], а також наведено величину вимірюваного нами перерізу даної реакції при енергії нейтронів 14,53 МеВ. Необхідно зазначити, що при енергіях, вищих за 8 МеВ, важливо враховувати передрівноважні процеси в перебігу ядерних реакцій. З цією метою при розрахунках перерізів було використано двокомпонентну екситонну модель. В області енергій 8 - 12 МеВ спостерігається суттєве розходження між розрахованими кривими, що можна пояснити тим, що теоретичний розрахунок відповідних функцій збудження зроблено на основі єдиної екситонної моделі, однак базова модель Фермі-газу для розрахунку густини ядерних рівнів була використана з деякими відмінностями: у другому випадку враховано колективні процеси (Ldmodel 2 [12]). Експериментальні значення перерізів добре узгоджуються з розрахунком, де враховано колективні процеси.

У результаті проведеної роботи отримано чотири нових значення перерізів для реакції  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$ , які занесено до таблиці та наведено на рис. 3. Точки, що відповідають експериментальним даним, досить добре збігаються з оціненими даними з бібліотек Jendl-3.3 Jeff-3.1/A, однак функція збудження даної реакції у діапазоні енергій 11÷16 МеВ, що розрахована за допомогою програми Talys-0,64, є дещо завищеною.

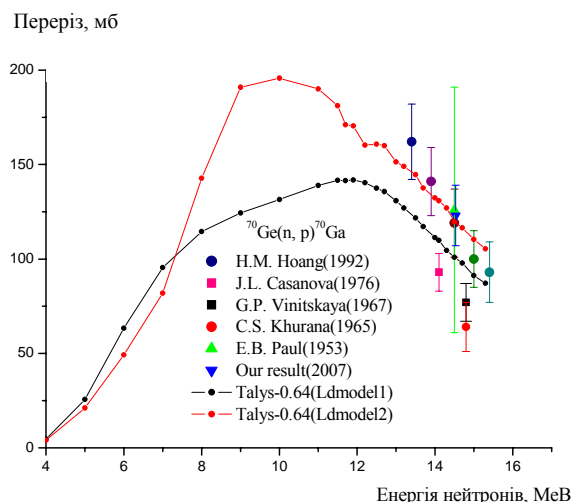


Рис. 2. Експериментальні дані та результати розрахунків для реакції  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$  пакетом Talys-0.64

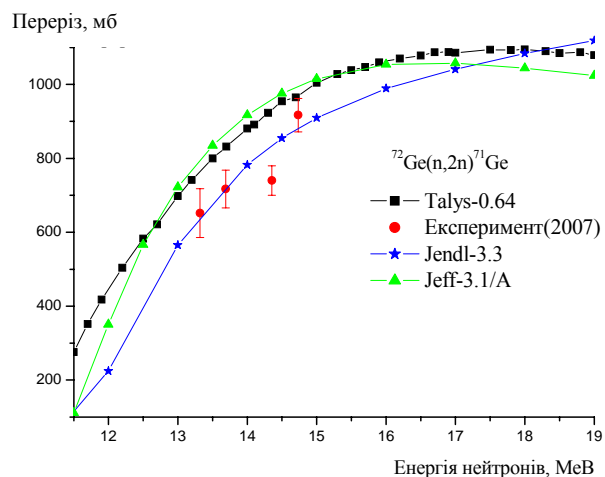


Рис. 3. Експериментальні дані з оціненими та результати розрахунків для реакції  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$  пакетом Talys-0.64.

### Результати вимірювань перерізів реакцій (n, x) на Ge

Ядерна реакція	Переріз, мб	Енергія, МеВ	EXFOR [1]
$^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$	123(12)	14,53	119(8)
$^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$	3,4(0,6)	14,53	3,4(0,4)
$^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$	653(66)	13,36	—
$^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$	717(51)	13,69	—
$^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$	740(45)	14,36	—
$^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$	917(77)	14,74	—
$^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75(\text{m}+\text{g})}\text{Ge}$	914(73)	14,53	1160(130)
$^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$	700(50)	14,53	800(56)
$^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$	470(80)	14,53	490(80)

### 4. Висновки

У роботі експериментально визначено перерізи ядерних реакцій  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$  при енергії нейтронів 14,53 МеВ. Узгодження наших результатів із результатами інших авторів є свідченням коректності нашої методики нейтронно-активаційних вимірювань.

Для реакції  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$  вперше виміряно чотири нових значення перерізів при енергіях нейтронів 13,32, 13,69, 14,35 та 14,74 МеВ.

Отримані результати можуть зіграти важливу роль при побудові енергетичних залежностей оцінених даних та дозволити зняти неоднозначність стосовно до величин перерізів цих ядерних реакцій при енергії нейтронів  $\sim 14,5$  МеВ. Гарне узгодження теоретичних розрахунків із експериментально виміряними величинами перерізу підтверджують важливість урахування колективних процесів при розгляді прямих ядерних реакцій при відповідних енергіях.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cross section information storage and retrieval system (EXFOR) // National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory, USA. - <http://www.nndc.bnl.gov/index.jsp> (online).
2. Forrest R.A. Data requirements for neutron activation Part II: Decay data // Fusion Engineering and Design 81(2006) 2157-2174
3. Forrest R.A. Data requirements for neutron activation Part I: Cross section // Fusion Engineering and Design. - 2006. - Vol. 81. - P. 2143 - 2156.
4. Маслов І.А., Лукницький В.А. Справочник по нейтронному активаційному аналізу. - Л.: Наука, Ленінгр. отд., 1971. - 312 с.
5. Применко Г.И., Майданюк В.К., Неплюев В.М., и др. Генератор 14 МэВ нейтронов с потоком  $5 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1}$  // Приборы и техника эксперимента. - 1989. - № 6. - С. 39 - 41.
6. Agrawal H.M., Pepelnik R. Determination of the mean neutron energy using the Zr/Nb and the Ni method //

- Nuclear Instrum. and Meth. in Physics Research. - 1995. - Vol. A366. - P. 349 - 353.
7. *Table of isotopes CD-ROM*. Eight edition. Ver. 1.0, March 1996 // Firestone R.B., Shirley V.S., Chu S.Y.F., et al. - LBNL, Berkeley (USA) and University of California (USA): Wiley-Interscience, 1996.
  8. *Желтоножский В.А., Стрільчук Н.В., Хоменков В.П.* Изучение эффектов проникновения в l-запрещенном M1-переходе  $^{147}\text{Pm}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 2003. - Т. 67, № 5. - С. 683 - 685.
  9. *Briesmeister J.F.* MCNP - a general Monte Carlo N-particle transport code. Los Alamos National Laboratory Report, 1997, LA-12625-M.
  10. <http://geant4.web.cern.ch/geant4/> (online).
  11. *Берлизов А.Н., Даниленко В.Н., Казимиров А.С., Соловьева С.Л.* Расчет поправок на истинное суммирование каскадных гамма-квантов на основе статистического моделирования с использованием оцененных ядерных данных // Атомна енергія. 2006. - Т. 100, вип. 5. - С. 382.
  12. *Koning A.J., Duijvestijn M.C.* New nuclear data evaluations for Ge isotopes // Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research. - 2006. - Vol. B248. - P. 197 - 224.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ (n, x) НА ИЗОТОПАХ ГЕРМАНИЯ

**Н. Р. Дзисюк, І. М. Каденко, В. К. Майданюк, Г. І. Применко, А. М. Берлизов**

Представлены результаты экспериментального определения сечений ядерных реакций  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$  при энергии нейтронов 14,53 МэВ и сечение реакции  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$  при энергиях нейтронов 13,32, 13,69, 14,35 и 14,74 МэВ. Измерения были выполнены нейтронно-активационным методом. Образцы в виде фольг из природного германия облучались DT-нейтронами. Аппаратурные гамма-спектры ядер продуктов активации измерялись на двух спектрометрах с HPGe детектором. Учтены нестационарность нейтронного потока во времени, реальная геометрия проведения эксперимента, эффекты каскадного суммирования гамма-квантов при измерениях спектров ядер продуктов активации, эффекты поглощения гамма-квантов в образце. Средняя по образцу энергия нейтронов определялась экспериментально Zr/Nb методом.

### DETERMINATION OF CROSS SECTIONS FOR NUCLEAR REACTIONS (n,x) AT GERMANIUM ISOTOPES

**N. R. Dzysiuk, I. M. Kadenko, V. K. Maydanyuk, G. I. Primenko, A. M. Berlizov**

The cross section values for nuclear reactions  $^{74}\text{Ge}(n, \alpha)^{71\text{m}}\text{Zn}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, p)^{70}\text{Ga}$ ,  $^{76}\text{Ge}(n, 2n)^{75\text{m}}\text{Ge}$ ,  $^{70}\text{Ge}(n, 2n)^{69}\text{Ge}$  have been measured for neutron energy 14,53 MeV, and of reaction  $^{72}\text{Ge}(n, 2n)^{71}\text{Ge}$  for energies 13,32, 13,69, 14,35, 14,74 MeV as well. Measurements have been carried out with neutron activation method. The samples in the form of disks of natural germanium have been irradiated with DT-neutrons. Instrumental gamma-spectra of activation products have been measured with two HPGe spectrometers. The corrections for neutron flux instability, real geometry of the experiment, the effect of gamma-ray true coincidence summing during activation product spectra measurements, and the effect of self-absorption of gamma-rays in the sample were calculated. Average neutron energy in the samples has been determined experimentally with Zr/Nb method.

Надійшла до редакції 13.11.07,  
після доопрацювання – 20.12.07.