

РОЗРАХУНОК ВИХОДІВ НЕЙТРОНІВ З УЛАМКІВ ПОДІЛУ

О.І. Лендел¹, Ю.В. Кібкало², О.О. Парлаг¹, В.Т. Маслюк¹

¹Інститут електронної фізики НАН України
88000, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна

²Інститут ядерних досліджень НАН України
03680, м. Київ, вул. Проспект Науки, 47, Україна

Запропоновано алгоритм розрахунку виходу нейтронів з уламків поділу актинідних ядер на основі експериментальних даних повних виходів, отриманих радіохімічним чи гамма-спектрометричним методом. Ефективність обчислення перевірена на базі існуючих компіляцій експериментальних даних ²⁵²Cf(s.f.).

Вступ

Вивчення характеристик продуктів поділу актинідних ядер, таких як масові і зарядові розподіли, середнє число миттєвих нейтронів та енергії збудження уламків важливі для розуміння базових механізмів процесу поділу. Ці характеристики широко використовуються у багатьох сферах, таких як ядерна енергетика, неруйнівний аналіз, активне і пасивне детектування спеціальних ядерних матеріалів у контексті нерозповсюдження і т.д.

Інформація про первинні уламки поділу тобто до вильоту нейтронів ("Pre-") потрібна для точного теоретичного аналізу експериментальних даних. Безпосереднє вимірювання характеристик первинних уламків до вильоту нейтронів є складною задачею [1].

Кількість випущених нейтронів залежить від масового числа і заряду ядра, повної енергії збудження уламків поділу, перерозподілу повної енергії збудження між легкими і важкими уламками та кутових моментів первинних уламків поділу (до вильоту нейтронів).

У даній роботі запропоновано алгоритм розрахунку виходу нейтронів з уламків поділу для відтворення первинних масових розподілів з використанням лише експериментальних даних повних (кумулятивних) виходів уламків поділу в кінцевому стані після випускання

нейтронів ("Post-"). Ефективність розрахунків перевірена на базі компіляції даних спонтанного поділу ²⁵²Cf.

Алгоритм розрахунку виходу нейтронів з уламків поділу

Для визначення виходу нейтронів з уламків $\nu_f(M)$ методом Террела [2], виходячи з сумарного масового розподілу (тут під сумарним виходом розуміємо суму виходів уламків з масою менше заданої величини M), здійснюється підгонка початкового і кінцевого кумулятивних

виходів. Початковий $\sum_0^{M_0} y(M)$ і кінцевий $\sum_0^{M_0} Y(M)$ сумарні масові розподіли для маси M_0 визначаються відповідно з початкового і кінцевого масового розподілів.

В наших розрахунках обмежимося асиметричним поділом, тому кожний пік масового розподілу нормується на 100%. Випромінення нейтронів з уламків поділу (припускаючи, що це єдине джерело нейтронів), зміщує маси початкових уламків у бік кінцевих мас. Точне співвідношення між сумарними виходами задається формулою [2]:

$$\sum_0^{M_0} Y(M) = \sum_0^{M_0} y(M) + y(M_0 + 1) [P_1(M_0 + 1) + P_2(M_0 + 1) + \dots] +$$

$$+ y(M_0 + 2)[P_2(M_0 + 2) + P_3(M_0 + 2) + \dots] + \dots \quad (1)$$

де $P_v(M)$ – імовірність того, що буде випромінено точно v нейтронів з окремого початкового уламку поділу з масою M . Оскільки усі величини в (1) не негативні, кінцевий сумарний вихід для заданої маси M_0 завжди більше (або дорівнює) від початкового сумарного виходу

$$\sum_0^{M_0} Y(M) \geq \sum_0^{M_0} y(M). \quad (2)$$

Це співвідношення є важливим для перевірки точності даних сумарних виходів: коли будь який кінцевий сумарний вихід менше початкового сумарного виходу, то принаймні один з сумарних виходів неправильний.

Фізичним значенням $v_f(M)$ будуть відповідати співвідношення між сумарними масовими розподілами початкових і кінцевих уламків поділу при цілочисельних значеннях M :

$$\sum_0^{M_0 - v_f(M_0) - 1/2} Y(M) = \sum_0^{M_0 - 1/2} y(M) + \frac{1}{2} \langle dy/dM \rangle / \langle \sigma^2(v_f; M) \rangle + \dots \quad (3)$$

де $y(M)$ - початковий вихід до випромінювання нейтрона з уламка з масовим числом M , σ – дисперсія, $Y(M)$ - кінцевий вихід після випромінювання нейтрона, а $v_f(M_0)$ та dy/dM визначаються при M_0 .

Як показано в [2], члени вищого порядку вносять малий вклад. Навіть перший порядок наближення в (3) дає невеликий внесок при визначенні $v_f(M)$ і змінює значення v_f менше ніж на 0,1.

Враховуючи неперервну інтерполяцію між дискретними величинами сумарних масових розподілів (3) приймає вигляд:

$$\int_0^{M_i - v(M_i)} Y(M) dM = \int_0^{M_i} y(M) dM + \frac{1}{2} \frac{dy}{dM} \langle \sigma^2(v_f; M) \rangle + \dots \quad (4)$$

З експериментально виміряних кумулятивних (в звичайному розумінні) виходів можна обчислити ліву частину формули (4). Результати обчислення приведені на рис. 1.

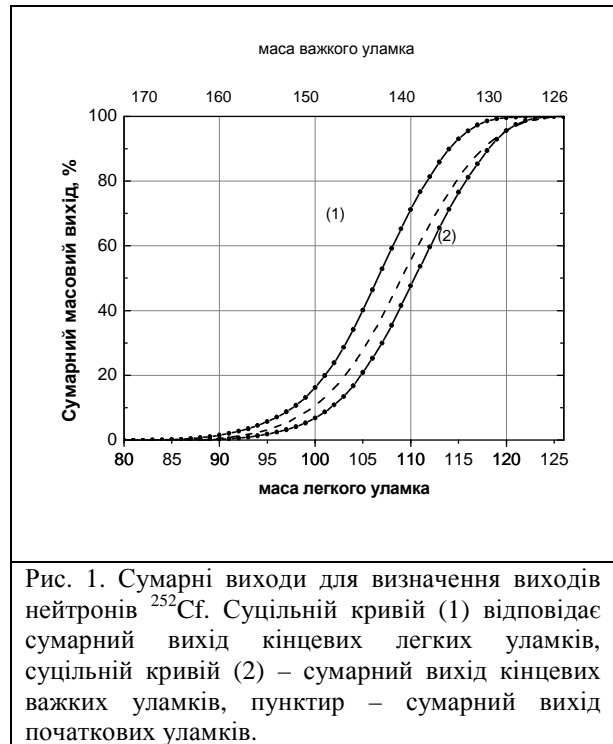


Рис. 1. Сумарні виходи для визначення виходів нейтронів ^{252}Cf . Суцільній кривій (1) відповідає сумарний вихід кінцевих легких уламків, суцільній кривій (2) – сумарний вихід кінцевих важких уламків, пунктир – сумарний вихід початкових уламків.

Для визначення числа випромінених нейтронів необхідно підігнати сумарні виходи початкових мас з точністю до другого доданка в правій частині рівності (4) до інтерпольованого кінцевого сумарного виходу для кожного початкового масового числа M .

Справді, диференціюючи рівняння (4) по M_i , при умові, що другий доданок наближення, що містить σ^2 , малий і не залежить від M_i , одержимо [3]

$$Y[M_i - v(M_i)] \left[1 - \frac{dv(M_i)}{dM_i} \right] = y(M_i) \quad (5)$$

На рис. 1 горизонтальна відстань між кривими кінцевих сумарних виходів дає величину сумарного виходу нейтронів спряжених пар легкого і важкого уламка

$$v_f(M) = v_L(M) + v_H(M) \quad (6)$$

Середню криву, що буде відповідати сумарним початковим виходам, отримаємо підгонкою так, що сумарний вихід нейтронів буде поділений на виходи нейтронів легкого і важкого спряжених

уламків (6). У результаті одержимо криву розподілу нейтронів легких і важких уламків, що графічно наближена уздовж феноменологічної прямої розподілу уламків, визначеної Волом [4]:

$$\begin{aligned} v_H &= 0.531v + 0.062(A_H - 143), \\ v_L &= 0.531v + 0.062(A_L + 143 - A_f), \end{aligned} \quad (7)$$

де v_L , v_H - число нейтронів, випущених відповідним фрагментом легких L та важких H масових продуктів поділу, v – середнє число нейтронів, яке випромінюється протягом поділу.

Для знаходження $v_f(M)$ нами розроблена програма, алгоритм якої полягає в ітеративному розв'язуванні системи (і) інтегральних рівнянь (4), з точністю до другого доданку, з урахуванням (6). Аналогічний підхід використано в [5,6]. Для розв'язку системи інтегральних рівнянь використано пристосований для цього метод найменших квадратів [7]. Як початкові (затравочні) значення виходів нейтронів уламків використовувалась формула Вола (7).

Розрахунок виходу нейтронів з уламків та відтворення первинного масового розподілу уламків поділу $^{252}\text{Cf}(s.f)$

Для перевірки працездатності запропонованого метода ми вибрали достатньо повні компіляції даних масового розподілу уламків поділу ^{252}Cf практично для всіх цілочисленних значень мас асиметричного поділу легких і важких уламків [8-10]. У процесі ітеративного розв'язування системи інтегральних рівнянь сумарних виходів початкові криві сумарних кумулятивних виходів уламків

поділу $\sum_0^{M_0} Y(M)$, обчислених з

експериментальних даних, поступово наближаються одна до одної (див. рис. (1)) у горизонтальному напрямку вздовж вісі мас, зміщуючись відповідно на величину $v_l(M)$ і $v_h(M)$ у кожній точці, утворюючи єдину криву, що відповідає сумарному виходу початкового масового розподілу

уламків поділу $\sum_0^{M_0} y(M)$ при умові (6).

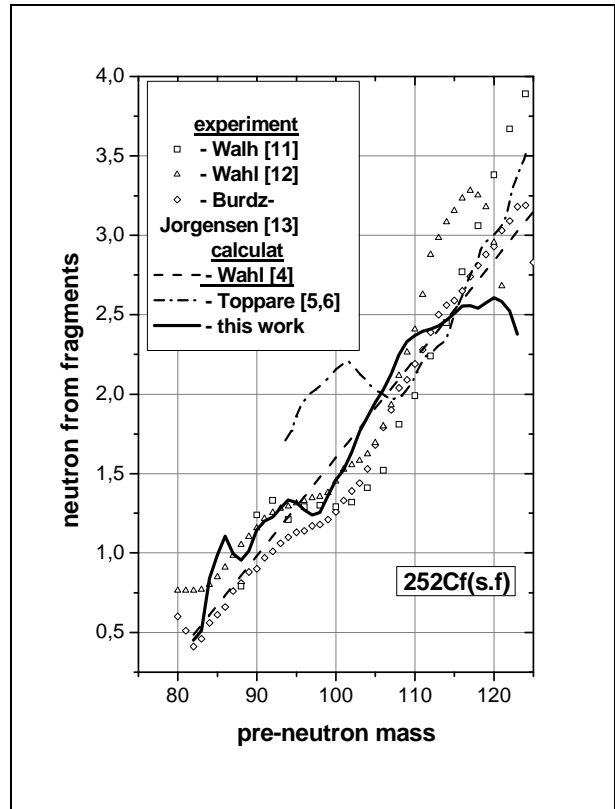


Рис.2. Залежність $v_f(M)$ від маси первинних уламків спонтанного поділу ^{252}Cf . Квадрати, трикутники, ромби – експериментальні дані [11-13]. Лінії – результати розрахунків [4-6] та наші дані.

Оскільки точки початкового сумарного виходу повинні завжди лежати між двома точками кінцевих сумарних виходів спряжених мас (2), число випромінених нейтронів $v_f(M)$ можна одержати з достатньою точністю, виходячи лише з даних кінцевого масового розподілу уламків поділу.

Приведені на рис. 1 криві сумарних виходів є сумісними, тобто не перетинають одна одну крім початкової і кінцевої точок.

Отримані цим методом виходи нейтронів $v_f(M)$ з уламків легкої групи спонтанного поділу ^{252}Cf (суцільна крива) приведені на рис. 2. Тут приведені і дані розрахунків [4,5,6] та експериментальні значення [11,12,18].

Значення $v_f(M)$ на кінцях масового розподілу уламків поділу менш надійні через невизначеність повних виходів.

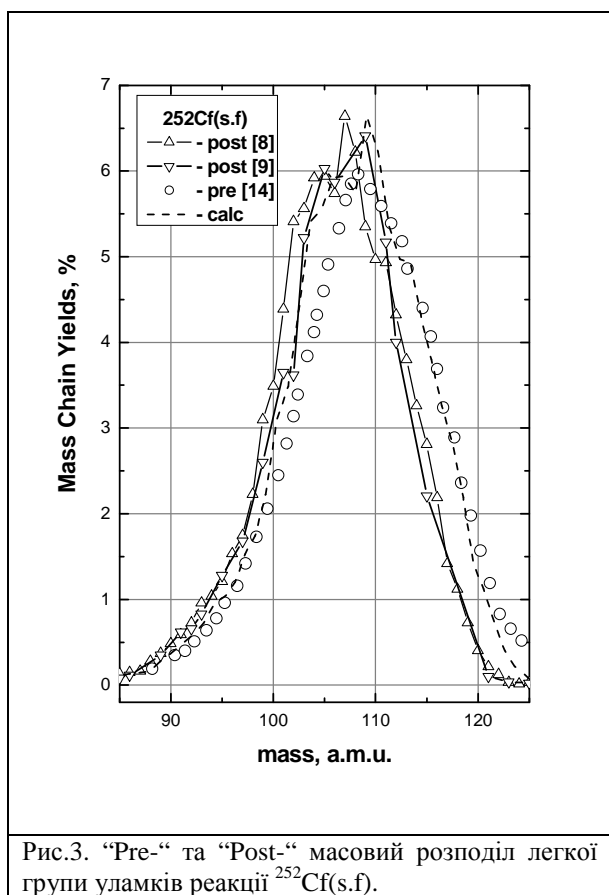


Рис.3. “Pre-“ та “Post-“ масовий розподіл легкої групи уламків реакції $^{252}\text{Cf}(s.f)$.

Зпівставляючи криву виходу нейтронів на рис. 2 з розрахованим початковим (“Pre-“) масовим розподілом уламків поділу (рис. 3) можна помітити певну кореляцію між масовим розподілом уламків поділу та виходом нейтронів, а саме, що пік масового розподілу уламків поділу збігається з перегином кривої виходів нейтронів, тобто масовий розподіл уламків поділу надзвичайно чутливий до зміни $\nu_f(M)$.

Основним джерелом похибок у визначенні $\nu_f(M)$ з (4) є похибки експериментальних значень масових розподілів уламків поділу радіохімічними і гамма-спектрометричними методами. Похибки в середньому відповідають значенням, приведеним Терелом на рисунках 7-10 у [2].

Це приводить до похибок у визначенні $\nu_f \pm 0,1 - 0,14$, що порівняно з похибкою, яка вноситься нехтуванням другим доданком використаним для обчислення рівняння (4).

На основі отриманих розрахунків ми побудували імовірний масовий розподіл уламків поділу до випромінювання нейтронів. На рис. 3 представлено “Pre-“ [8,9] та “Post-“ [14] масові розподіли легкої групи уламків спонтанного поділу ^{252}Cf . Пунктир - результати розрахунків.

Висновки

Як зазначено вище, детальне вивчення виходів нейтронів ділення є важливою умовою одержання таких характеристик поділу, як, наприклад, масові розподіли уламків поділу до вильоту нейтронів у випадку, коли експериментальне вивчення цих характеристик викликає труднощі. Знання цих розподілів, у свою чергу, є основою перевірки різних теоретичних моделей (як наприклад, моделі Броси та її модифікацій) [15-17].

Складено алгоритм розрахунку виходів нейтронів поділу для відтворення первинних масових розподілів, використовуючи лише повні виходи уламків поділу, на базі ітеративного розв'язку системи інтегральних рівнянь. Похибки визначення виходів нейтронів ділення фактично визначаються похибками виходів уламків поділу.

Як видно з рисунків 2 та 3 одержані виходи нейтронів з уламків поділу та первинні масові розподіли якісно узгоджуються з існуючими експериментальними даними [11- 16] і не гірші за результати теоретичних розрахунків інших авторів [4 – 6,17 – 23].

Література

1. Tovesson F., Hamsch F.-J., Obersted S., Bax H. Fission fragment Properties and the problem of the pulse height defect // J. Nucl. Sci & Tech. – 2002. – Supplement 2. – P. 673 - 676.
2. Terrell J. Neutron Yields from Individual Fission Fragments // Phys. Rev. – 1962. – V. 127, № 3. – P. 880 – 904.
3. Anderson C.A. Fission Product Yields from Fast (-1MeV) Neutron Fission of Pu-239 // Los Alamos scientific laboratory of the University of California.

- Los Alamos, New Mexico USA. LA-3383. – 1965. – P. 1 – 26.
4. Wahl A.C., Ferguson R.L., Netha-way D.R. Nuclear-Charge distribution in low-energy fission // *Phys. Rev.* – 1962. – V. 126, Iss. 3. – P. 1112 – 1127.
 5. Toppare L., Erten H.N., Aras N.K. Yields of products in the spontaneous fission of ^{252}Cf by direct gamma ray spectroscopy // *Technical Journal (Germany)* – 1980. – V.7, Iss. 1. – P. 8 - 14.
 6. Toppare L., Erten H.N., Aras N.K. Yields of products in the spontaneous fission of ^{252}Cf by direct γ -ray spectroscopy // *Can. J. Chem* – 1983. – V. 61, Iss. 4. – P. 649 – 651.
 7. James F., Ross M. Function minimization and error analysis. MINUIT D506. CEREN Computer Centre Program library. – 1967. – P. 1–47.
 8. Гангрский Ю.П., Далхсурэн Б., Марков Б.Н. Осколки деления ядер // – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
 9. Flynn K.F., Gindler J.E, Glendenin L.E. The mass distribution for spontaneous fission of ^{252}Cf // *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* 1975. - V.37, Iss. - P. 881 - 885.
 10. England T.R. and Rider B.F. Evaluation and Compilation of Fission Product Yields 1993 // LA-UR-94-3106, ENDF-349. 1994. – P. 20 – 22.
 11. Walh R.L., Boldeman J.W. Fine structure in the neutron emission $\nu(A)$ from ^{252}Cf spontaneous fission fragments // *Nucl. Phys. A.* – 1977. – V. 276, Iss. – P. 189 – 200.
 12. Wahl A.C. Nuclear-charge distribution and delayed-neutron yields for thermal-neutron-induced fission of ^{235}U , ^{233}U , and ^{239}Pu and for spontaneous fission of ^{252}Cf // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* – 1988. – V. 39, N 1. – P. 1–156.
 13. Budtz-Jørgensen C. and H. -H. Knitter. Simultaneous Investigation of fission fragments and neutrons in $^{252}\text{Cf}(sf)$ // *Nucl. Phys A* - 1988. - V. 490, Iss. 2. – P. 307 – 328.
 14. Schmitt H.W., Neiler J.H., Walter F.J. Fragment Energy Correlation Measurements for ^{252}Cf Spontaneous Fission and ^{235}U Thermal-Neutron Fission // *Phys. Rev.* – 1966. – V. 141, Iss. 3. – P. 1146 – 1160.
 15. Замятин Ю.С., Басова Б.Г., Рязанов Д.К. и др. Нейтроны, испущенные осколками спонтанного деления ^{252}Cf и деления ^{239}Pu тепловыми нейтронами // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы.* – 1978. – Вып. 4 (31). – С. 7 – 12.
 16. Bertin A., Bruno M., Massa I. et. al. Fine structures in the mass yield of ^{252}Cf fission fragments from a double-energy measurement // *Nuovo Cimento A* - 1974. - V. 23, N 2. - P. 185 – 199.
 17. Brosa U. Sawtooth curve of neutron multiplicity // *Phys. Rev. C* – 1985. – V. 32, № 4. – P. 1438 – 1441.
 18. Marten H., Ruben A. Seeliger Fission neutron Multiplicity calculations // *Proceedings of a consultants meeting “Nuclear data for neutron emission in the fission process”.* 22 – 24 October 1990. – Vienna, Austria. – P. 115-133.
 19. Ahmadov H., Gonul B., Yilmaz M. Prompt neutron spectrum and average neutron multiplicity in spontaneous fission of ^{252}Cf // *Phys. Rev. C.* – 2001. – V. 63 024603-1 – 024603-9.
 20. Wahl A.C. Models for neutron emission. in: *Systematics of fission-product yields* // LA-13928. Los Alamos National Laboratory. US. – 2002. – P. 38 – 42.
 21. Kornilov N.V., Hamsch F.-J., Vorobyev A.S. Neutron emission in fission // *Nucl. Phys A.* - 2007. - V. 789, Iss. 1. – P. 55 – 72.
 22. Кибкало Ю.В. Особенности деления ^{238}U нейтронами с энергиями до 200 МэВ // *Материалы международной конференции “Актуальные вопросы ядерной физики и атомной энергетики”.* 29 мая – 3 июня, 2006 Киев, Украина, 2007. – Часть II. – С. 560–568.
 23. Kibkalo Yu.V. Phenomenological model for fragment mass and charge distribution in actinide nuclei fission // In: *Fission product yield data for the transmutation of minor actinide nuclear waste.* IAEA.Vienna. – 2008. – P. 157 – 182. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1286_web.

CALCULATIONS OF THE YIELD OF PROMPT NEUTRONS FROM FISSION FRAGMENTS

O.I. Lengyel¹, Yu.V. Kibkalo², O.O. Parlag¹, V.T. Maslyuk¹

¹Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod

²Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

E-mail: parlag@mail.uzhgorod.ua

The algorithm of calculations of the yield of prompt neutrons from fission fragments based on total yields experimental data obtained by radiochemical and gamma-spectrometry methods has been proposed. Effectivity of calculations was checked with compilations of ²⁵²Cf(s.f) experimental data.