

УДК 539.173 + 539.173.8+539.1.6

PACS 24.75.+1, 25.85.-w, 25.85. Ec, 25.85. Ca

DOI 10.24144/2415-8038.2017.42.169-177

І.В. Пилипчинець, О.О. Парлаг, Є.В. Олейников

Інститут електронної фізики НАН України, 88017, м. Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: igor.profi@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОДІВ ПРОДУКТІВ ФОТОПОДІЛУ ЯДЕР АКТИНІДІВ, ІНДУКОВАНИХ ГАЛЬМІВНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ

Запропоновано підхід, який дозволив адаптувати GEF- код для моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів. Проведена симуляція спектру гальмівного випромінювання мікротрона М-30 при енергіях електронів $8.5 \div 20$ MeV; виконані розрахунки енергії збудження для подільних ядер ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am та моделювання виходів їх продуктів при фотоподілі з застосуванням GEF- коду.

Ключові слова: ядра актиніди, фотоподіл, гальмівне випромінювання, виходи продуктів.

Вступ

Для експериментальних досліджень виходів продуктів фотоядерних реакцій в області енергій гігантського дипольного резонансу, а саме реакцій фотоподілу (γ, f)- ядер актинідів (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am) широко застосовують пучки гальмівного випромінювання електронних прискорювачів [1]. Зокрема, інформація про виходи продуктів фотоподілу ядер актинідів необхідна для розробки неруйнівних методів їх ізотопного аналізу [2] та трансмутації відпрацьованого ядерного палива [3], яке у великих кількостях містить продукти (n, f)- і (γ, f)- реакцій [4]. Однак, на теперішній час існуючі експериментальні дані для виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів доволі обмежені, як по колу досліджених продуктів-уламків, так і по області енергій стимуляції (γ, f)- реакцій [5]. Існуючі сучасні розрахункові коди, такі як Empire [6], Talys [7], Geant [8], MCNP [8] були розроблені та використовуються переважно для описання характеристик нейтронного поділу ядер актинідів. Є приклади застосування кодів Empire та Talys для

моделювання виходів продуктів фотоядерних реакцій [9-11], але ці коди не дозволяють моделювати з високою точністю виходи продуктів фотоподілу ядер актинідів та мають ряд обмежень при їх застосуванні [12]. Один з найбільш сучасних та вживаних розрахункових кодів є GEF- код [13,14], розроблений з метою надання спеціалізованих ядерних даних для їх застосування в області ядерних технологій і техніки, який дозволяє описувати виходи продуктів (s, f)-, (n, f)- та (n, p)- реакцій для широкого кола важких ядер. Ці обставини стримують розробку нових перспективних ядерних технологій з використанням (γ, f)- реакцій. Тому надзвичайно актуальними є подальші експериментальні дослідження виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів та розробка методів для їх симуляції.

В роботах [15,16] продемонстровано підхід для моделювання виходів продуктів фотоподілу ^{234}U на основі існуючих даних поділу ядра ^{233}U нейтронами. Згідно [15,16], енергії збудження при поділі фотонами відповідають енергіям збудження, для «еквівалентних» реакцій,

індукованих нейтронами, для області енергій при яких відбувається беземісійний поділ, тобто коли утворюється тільки перше складове ядро.

В даній роботі запропоновано підхід, який дозволяє адаптувати GEF- код [13] для моделювання виходів продуктів фотоподілу широкого кола ядер актинідів, індукованих гальмівним випромінюванням електронного прискорювача – мікротрона М-30.

Моделювання виходів продуктів фотоядерних реакцій

Згідно [15,16], для того щоб використовувати дані реакції поділу нейтронами (n, f) для описання реакції фотоподілу (γ, f), необхідно застосовувати дані (n, f) для ізотопу $^{(A-1)}X$, в якому на один нейтрон менше: $^AX(\gamma, f)^AX^* \leftrightarrow ^{(A-1)}X(n, f)^AX^*$.

Енергія нейтрона E_n , що викликає реакцію поділу буде еквівалентна середній енергії збудження (E^*) подільного ядра, утвореного під дією фотонів мінус енергія сепарації нейтрону S_n для даного подільного ядра $^AX : E_n \leftrightarrow E^* - E_s$.

При використанні гальмівного випромінювання від електронних прискорювачів для симуляції реакцій фотоподілу необхідно проводити розрахунки середньої енергії збудження (E^*) подільних ядер з врахуванням реального спектру гальмівних фотонів.

Симуляція спектру гальмівного випромінювання електронного прискорювача

Моделювання спектра гальмівного випромінювання електронного прискорювача мікротрона М-30 для прискорених електронів, тобто, розрахунок перерізу утворення гальмівного гамма-кванта з енергією від E_γ до $E_\gamma + dE_\gamma$ електроном з енергією U_0 на 1 ядро мішені з порядковим номером Z проводилося за допомогою формули Шіффа (1) [17]:

$$\sigma(E_\gamma) dE_\gamma = 2 \frac{Z^2 r_0^2}{137} \frac{dE_\gamma}{E_\gamma} \times$$

$$\times \left\{ \left[1 + \left(\frac{U_0 - E_\gamma}{U_0} \right)^2 - \frac{2 \times (U_0 - E_\gamma)}{3U_0} \right] \right\} \quad (1),$$

$$\times \left[\ln M(0) + 1 - \frac{2}{B} \cdot \arctg B \right] + \frac{U_0 - E_\gamma}{U_0} C(B) \left\}$$

де

$$B = \frac{2U_0(U_0 - E_\gamma)Z^{\frac{1}{2}}}{111mc^2 E_\gamma} \quad (2),$$

U_0 – повна енергія налітаючого електрону, mc^2 – енергія спокою електрона, $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-11}$ см – класичний радіус електрона, Z і A – зарядове та масове число ядер гальмівної мішені.

$$C(B) = \frac{2}{B^2} \times \ln(1+B^2) + \frac{4(2-B^2)}{3B^3} \times$$

$$\times \arctg B - \frac{8}{3B^2} + \frac{2}{9}$$

$$\frac{1}{M(0)} = \left(\frac{mc^2 E_\gamma}{2U_0(U_0 - E_\gamma)} \right)^2 + \left(\frac{Z^{\frac{1}{3}}}{111} \right)^2 \quad (4),$$

Число гальмівних гамма-квантів, яких генерує потік електронів зі струмом $i = 1$ мкА розраховувалося за формулою (5):

$$\Delta N_\gamma = i(\text{мкА}) \frac{\rho x \cdot 6.02 \cdot 10^{23}}{1.6 \cdot 10^{-13} \text{ А}} \cdot \sigma(E_\gamma) dE_\gamma \quad (5),$$

де ρ і A – густина і масове число ядер гальмівної мішені, x – товщина гальмівної мішені.

Для проведення розрахунків, було розроблено програмний продукт з використанням платформи Java, що являє собою набір засобів для розробки клієнтських додатків і серверного програмного забезпечення.

Результати розрахунків спектрів гальмівного випромінювання, які генеруються електронами (з енергіями 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 17,5 та 20 МеВ) на танталовій мішені товщиною 1 мм представлені на Рис. 1. Тут же приведені розрахунки, виконані з застосуванням розрахункового коду MCNP5 (танталовий конвертор, енергія електронів – 20 МеВ) [18].

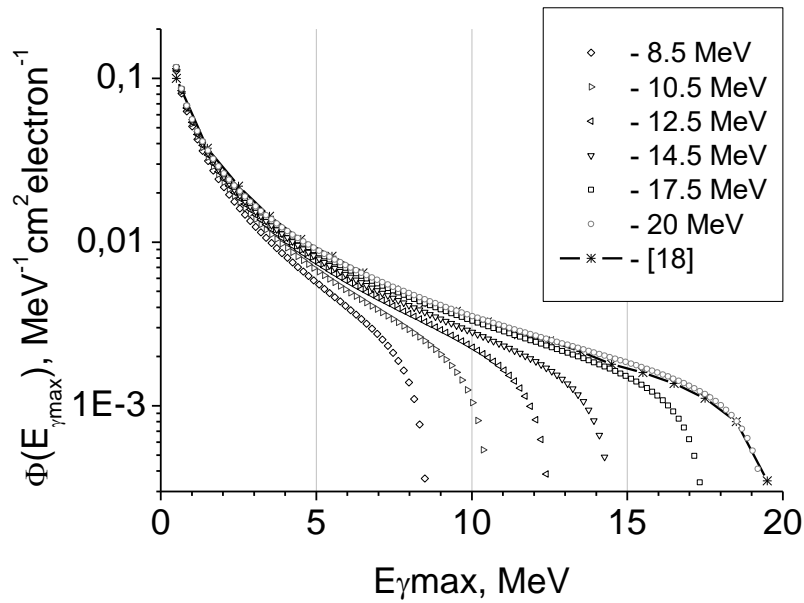


Рис.1. Залежність густини потоку гамма-квантів $\Phi(E, E_m)$ від енергії електронів для гальмівної мішені з танталу товщиною 1 мм.

Розрахунок середньої енергії збудження фотоподілу ядер актинідів

Середня енергія збудження розраховувалася за формулою (6) [19]:

$$E^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \sigma(E_i, E_{\gamma max}) \Delta E \sigma_f(E_i)}{\sum_{i=1}^n \sigma(E_i, E_{\gamma max}) \Delta E \sigma_f(E_i)} \quad (6),$$

де $\sigma(E_{\gamma}, E_{\gamma max}) dE$ – переріз утворення гальмівного гамма-кванта з енергією в інтервалі від E_{γ} до $E_{\gamma} + dE_{\gamma}$ електроном з енергією $U_0 = E_{\gamma max} + 0,511$ MeV в розрахунку на 1 ядро мішені з порядковим номером Z , який розраховувався за формулою Шіффа [17].

Чисельні значення перерізу $\sigma_f(E_i)$ бралися з бібліотеки ENDF [20].

На панельному Рис. 2 представлені залежності енергії збудження подільних ядер ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am та ^{242}Pu від енергії гальмівного випромінювання утворених по каналу реакції $^A\text{X}(\gamma, f)$.

Результати моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів

Моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am та ^{242}Pu здійснювалося GEF- кодом (Version 2016/1.2) при максимальних енергіях гальмівного випромінювання $9,5 \div 17,5$ MeV.

Чисельні значення вхідних даних (енергії збудження, енергії сепарації та енергії нейтронів), які використовувалися при моделюванні представлені в Таблиці 1.

Результати моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів представлені на панельному Рис. 3. Тут же представлені оцінені експериментальні ядерні дані (бібліотека EXFOR [5]) для ^{232}Th (G4004.002 – 17,5 MeB; G0051.002 – 16 MeB), ^{235}U (L0066.002 – 25 MeB), ^{237}Np (G4003.002 – 17,5 MeB; M0089.004 – 14 MeB), ^{238}U (G0051.002 – 17,4 MeB), ^{239}Pu (M0076.002 – 28 MeB), ^{240}Pu (G0501.007 – 10 MeB) та ^{242}Pu (M0202.002 – 20,07 MeB), досліджених при близьких енергіях збудження. Результати проведених розрахунків узгоджуються з експериментальними даними в межах похибок для подільних ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu та ^{242}Pu .

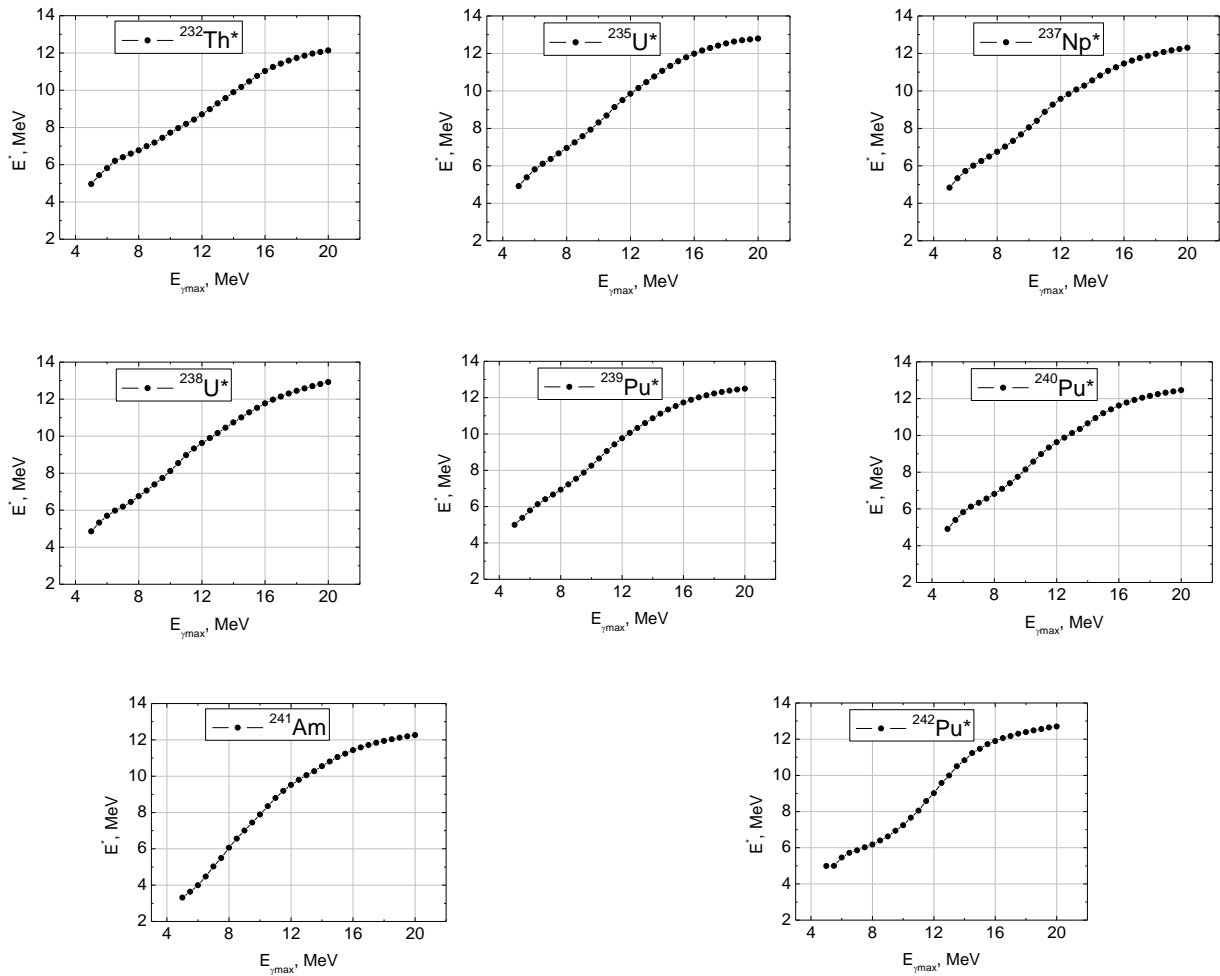
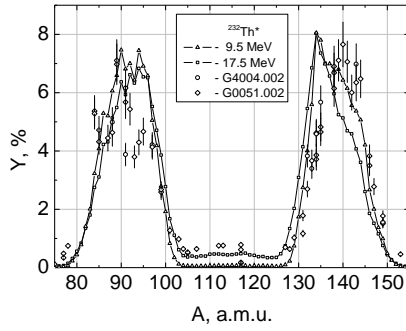


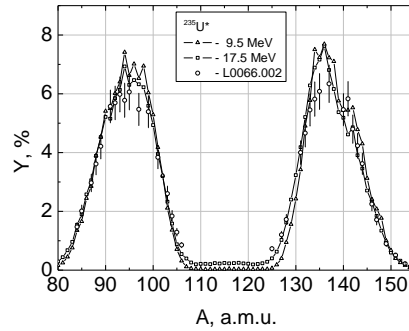
Рис.2. Залежність енергії збудження подільних ядер ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am та ^{242}Pu від енергії гальмівного випромінювання

Таблиця 1. Чисельні значення вхідних даних (енергії збудження, енергії сепарації та енергії нейтронів) для моделювання виходів продуктів поділу GEF- кодом для подільних ядер ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am та ^{242}Pu

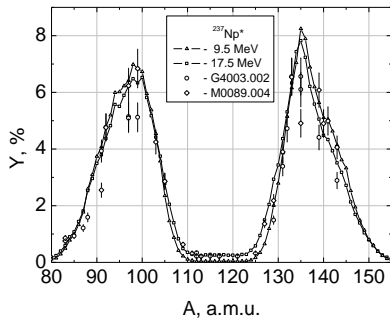
Подільні ядра	Енергії гальмівного випромінювання, MeV	Енергії збудження, MeV	Аналоги нейтронних реакцій	Енергії сепарації, MeV	Енергії нейтронів, MeV
^{232}Th	9,5 ÷ 17,5	7,4449	$^{231}\text{Th}(n,f)^{232}\text{Th}^*$	6,4381	1,0068 ÷ 5,149
^{235}U	9,5 ÷ 17,5	7,9308	$^{234}\text{U}(n,f)^{235}\text{U}^*$	5,29784	2,6330 ÷ 7,12016
^{238}U	9,5 ÷ 17,5	7,7325	$^{237}\text{U}(n,f)^{238}\text{U}^*$	6,152	1,5805 ÷ 5,291
^{237}Np	9,5 ÷ 17,5	7,6738	$^{236}\text{Np}(n,f)^{237}\text{Np}^*$	6,58	1,0938 ÷ 6,1499
^{239}Pu	9,5 ÷ 17,5	7,8719	$^{238}\text{Pu}(n,f)^{239}\text{Pu}^*$	5,6465	2,2254 ÷ 6,482
^{240}Pu	9,5 ÷ 17,5	7,7481	$^{239}\text{Pu}(n,f)^{240}\text{Pu}$	6,5335	1,2146 ÷ 5,51
^{241}Am	9,5 ÷ 17,5	7,4431	$^{240}\text{Am}(n,f)^{241}\text{Am}^*$	6,647	0,7961 ÷ 5,193
^{242}Pu	9,5 ÷ 17,5	6,9421	$^{241}\text{Pu}(n,f)^{242}\text{Pu}$	6,3094	0,6327 ÷ 5,9903



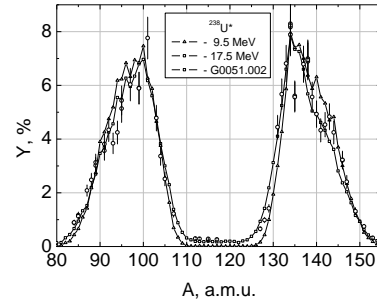
а)



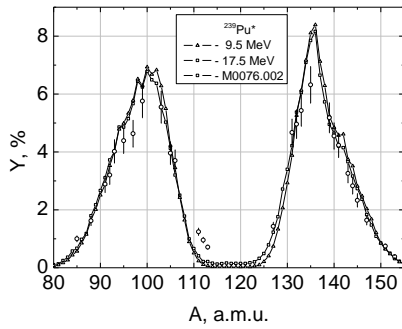
б)



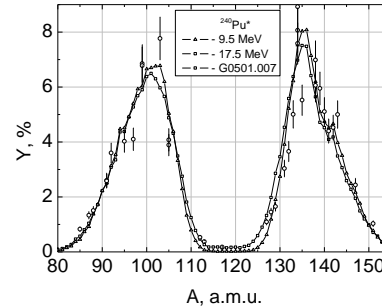
в)



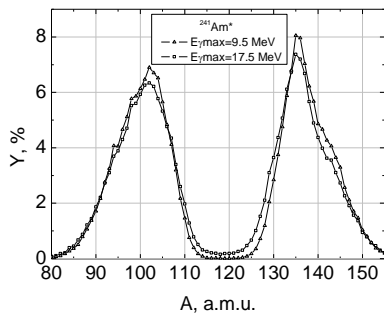
г)



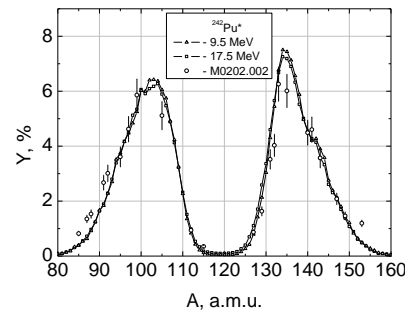
д)



е)



є)



ж)

Рис.3 – Виходи продуктів фотоподілу ядер актинідів ^{232}Th – а), ^{235}U – б), ^{237}Np – в), ^{238}U – г), ^{239}Pu – д), ^{240}Pu – е), ^{242}Pu – є), ^{241}Am – ж) при максимальних енергіях гальмівного випромінювання 9,5 (трикутники) та 17,5 МеВ (квадрати). Кружки, ромби – оцінені дані з бібліотеки ядерних даних EXFOR [5]

Висновки

Запропонований підхід, де енергії збудження при поділі гальмівним випромінюванням відповідають енергії збудження, що отримані в «еквівалентних» реакціях, що дозволяє адаптувати GEF-код для моделювання виходів продуктів фотоподілу ядер актинідів.

Розраховані виходи продуктів фотоподілу ядер актинідів співпадають з

оціненими експериментальними даними в межах похибок для області енергій беземісійного поділу [23].

Автори висловлюють подяку Ленделу О.І. за плідні дискусії та поради.

Робота виконана у рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» (Договір № К-5-39/2016).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nieto M.M. Resource note on photofission of nuclei for ^{235}U and ^{239}Pu detection // Nucl. Sci. - 2004. – Vol. 148, N 3. – P. 458-461.
2. Hollas C.L., Close D.A., Moss C.E. Analysis of fissionable material using delayed gamma rays from photofission // Nucl. Instrum. Meth. B. – 1987. – Vol. 24/25. – P. 503-505.
3. Dikiy N.P., Dovbnya A.N., Lyashko Yu.V., Uvarov V.L. Research of transmutation of products of nuclear cycle at the electron accelerator // Problems of atomic science and technology. – 2004. № 1. (42). – P. 203-205.
4. Беденко С.В., Золотовский А.В., Лызко В.А. и др. Оценка действующего значения потока гамма-излучения в ядерных реакторах с графитовым замедлителем // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316. № 2. – С. 72-75.
5. Experimental nuclear reaction data (EXFOR). Database Version 2017-11-10. // <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>
6. Herman M., Obložinský P., Capote R. Sin M., Trkov A., Ventura A., Zerkin V. Recent developments of the nuclear reaction model code EMPIRE // AIP Conference Proceedings – 2005. – V. 769. – P. 1184-1187.
7. Koning A.J., Rochman D. Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system // Nuclear Data Sheets – 2012. – V. 113, Is. 12. – P. 2841-2934.
8. Hecht A.A., Blakeley R.E., Martin W.J., Leonard E. Comparison of Geant4 and MCNP6 for use in delayed fission radiation simulation // Annals of Nuclear Energy – 2014. – V. 69. – P. 134-138.
9. Bezshyyko O.A., Golinka-Bezshyyko L.O., Kadenko I.M., Lymanets A.O. Analysis of characteristics of the photonuclear reactions with charged particles in output channel using Empire II and Talys codes // Problems of atomic science and technology, Series: Nuclear Physics Investigations. – 2007. – V. 48, N5. – P. 18-21.
10. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskii V.O., Savrasov A.M., Rovenskykh E.P., Plujko V.A., Davydovska O.I., Gorbachenko O.M. Isomer yield ratios of ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photofission of ^{235}U with 17 MeV bremsstrahlung // Nuclear Physics and Atomic Energy – 2014. – V. 15, № 2. – P. 111-118.
11. Makwana R., Mukherjee S., Wang Jian-Song, Chen Jian-Song New empirical formula for (γ, n) reaction cross section near GDR peak for elements with $Z > 60$ // Chinese Physics C – 2017. - V. 41, No. 4. 044105-(1-14).
12. Sabri M., Haddad M. Calculation of fission product yields for some nuclei with TALYS code // EPJ Web of Conferences – 2010. – V. 2. 14003-(1-4).
13. Schmidt K.-H., Jurado B., Schmitt C. General description of fission observables: The GEF code // EPJ Web of Conferences – 2017. – V.146.04001-(1-7).
14. Pomp S., Al-Adili A., Alhassan E., Gustavsson C., Helgesson P., Hellesen C., Koning A.J., Lantz M., Österlund M., Rochman D., Simutkin V., Sjöstrand H., Solders A. Experiments and theoretical data for studying the impact of fission yield uncertainties on the nuclear fuel cycle with

- TALYS/GEF and the Total Monte Carlo method // Nuclear Data Sheets. – 2015. – V. 123. – P. 220-224.
15. Schmidt K.-H., Steinhäuser S., Böckstiegel C., Grewe A., Heinz A., Junghans A.R., Benlliure J., Clerc H.-G., de Jong M., Müller J., Pfützner M., Voss B. Relativistic radioactive beams: A new access to nuclear-fission studies // Nuclear Physics A. – 2000. – V. 665, Is. 3-4. – P. 221-267.
 16. Tudora A. Prompt fission neutron data calculation using experimental fission fragment charge distributions in the frame of the Point by Point treatment // Annals of Nuclear Energy – 2010. – V. 37. – P. 43-51.
 17. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Phys. Rev. – 1951. – V. 83, No 2. – P. 252-253.
 18. Hai-Bo Xu, Xian-Ke Peng and Chao-Bin Chen Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy x-ray radiography // Chin. Phys. B – 2010. – V. 19, No. 6. 062901.
 19. Naik H., Carrel F., Kim G.N. et al Mass yield distributions of fission products from photo-fission of ^{238}U induced by 11.5–17.3MeV bremsstrahlung // Eur. Phys. J. A - 2013. – V. 49: 94.
 20. Evaluated Nuclear Data File (ENDF). Database Version of 2017-10-27 // <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
 21. Verbeke J.M., Hagmann C., Wright D. Simulation of Neutron and Gamma Ray Emission from Fission and Photofission. LLNL Fission Library 2.0.2. // UCRL-AR-228518-REV-1. Lawrence Livermore National Laboratory. October 24, 2016.
 22. Casperson R.J., Burke J.T., Scielzo N.D., Escher J.E., McCleskey E., McCleskey M., Saastamoinen A., Spiridon A., Ratkiewicz A., Blanc A. et al. Measurement of the Am240(n,f) cross section using the surrogate-ratio method // Phys Rev C, - 2014. – V. 90. 034601- (1-9).
 23. Verboven M., Jacobs E., De Frenne D. Emission of light charged particles in photon induced fission // Phys Rev C – 1994. – V. 49. – P. 991-1000.

Стаття надійшла до редакції 3.12.2017.

И.В. Пилипчинець, О.А. Парлаг, Е.В. Олейников

Институт электронной физики НАН Украины, г. Ужгород

e-mail: igor.profi@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДОВ ПРОДУКТОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ ЯДЕР АКТИНИДОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОРМОЗНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ.

Предложен подход, который позволил адаптировать GEF- код для моделирования выходов продуктов фотоделения ядер актиноидов. Проведена симуляция спектра тормозного излучения микротрона М-30 при энергиях электронов $8.5 \div 20$ МэВ; выполнены расчеты энергии возбуждения для делящихся ядер ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am и моделирование выходов их продуктов при фотоделении с помощью GEF- кода.

Ключевые слова: ядра актиноиды, фотоделение, тормозное излучение, выходы продуктов.

PACS 24.75.+1, 25.85.-w, 25.85. Ec, 25.85. Ca

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.169-177

Pylypchynets, I.V., Parlag, O.O., Oleynikov, E.V.

Istitute of Elecron Physics, Nat. Acad. Sci. of Ukraine, Uzhgorod

e-mail: igor.profi@gmail.com

SIMULATION THE YIELDS OF ACTINIDE NUCLEI PHOTOFISSION PRODUCTS INDUCED BY BREMSSTRAHLUNG OF ELECTRON ACCELERATORS

Introduction: The bremsstrahlung of electron accelerators is widely used to study properties of the (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am) actinides nuclei photofission products.

Purpose: An approach that allows to adapt the GEF- code to simulate the yields of the products of the photofission of actinide nuclei is proposed.

Results: A simulation of the bremsstrahlung spectrum of the microtron M-30 at electron energies of $8,5 \div 20$ MeV was carried out. The calculations of the excitation energy have been made for the fissioning nuclei ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am . The modeling of photofission product yields of nuclei ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am with the use of GEF-code was carried out.

Conclusion: Calculated outputs of photo-division of nuclear actinides coincide with estimated experimental data within the bounds of errors for the energy domain semen section

Keywords: actinide nuclei, photofission, bremsstrahlung, product yields.

PACS NUMBER: 24.75.+1, 25.85.-w, 25.85. Ec, 25.85.

REFERENCES

1. Nieto M.M. Resource note on photofission of nuclei for ^{235}U and ^{239}Pu detection // Nucl. Sci. - 2004. – Vol. 148, N 3. – P. 458-461.
2. Hollas C.L., Close D.A., Moss C.E. Analysis of fissionable material using delayed gamma rays from photofission // Nucl. Instrum. Meth. B. – 1987. – Vol. 24/25. – P. 503-505.
3. Dikiy N.P., Dovbnya A.N., Lyashko Yu.V., Uvarov V.L. Research of transmutation of products of nuclear cycle at the electron accelerator // Problems of atomic science and technology. – 2004. № 1. (42). – P. 203-205.
4. Bedenko S.V., Zolotovskiy A.V., Lyzko V.A. et al. Estimation of the Effective Gamma Radiation Flow in Nuclear Reactors with a Graphite Moderator [Otsenka deystvuyushchego znacheniya potoka gamma izlucheniya v yadernykh reaktorakh s grafitovym zamedlitelem] // Publishing house Tomsk Polytechnic un. - 2010. - T. 316. № 2. - P. 72-75.
5. Experimental nuclear reaction data (EXFOR). Database Version 2017-11-10. // <https://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>
6. Herman M., Obložinský P., Capote R. Sin M., Trkov A., Ventura A., Zerkin V. Recent developments of the nuclear reaction model code EMPIRE // AIP Conference Proceedings – 2005. – V. 769. – P. 1184-1187.
7. Koning A.J., Rochman D. Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system // Nuclear Data Sheets – 2012. – V. 113, Is. 12. – P. 2841-2934.
8. Hecht A.A., Blakeley R.E., Martin W.J., Leonard E. Comparison of Geant4 and

- MCNP6 for use in delayed fission radiation simulation // *Annals of Nuclear Energy* – 2014. – V. 69. – P. 134-138.
9. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskiy V.O., Savrasov A.M., Rovenskykh E.P., Plujko V.A., Davydovska O.I., Gorbachenko O.M. analysis of characteristics of the photonuclear reactions with charged particles in output channel using Empire II and Talys codes // *Problems of atomic science and technology, Series: Nuclear Physics Investigations*. – 2007. – V. 48, N5. – P. 18-21.
 10. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskiy V.O., Savrasov A.M., Rovenskykh E.P., Plujko V.A., Davydovska O.I., Gorbachenko O.M. isomer yield ratios of ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photofission of ^{235}U with 17 MeV bremsstrahlung // *Nuclear Physics and Atomic Energy* – 2014. – V. 15, № 2. – P. 111-118.
 11. Makwana R., Mukherjee S., Wang Jian-Song, Chen Jian-Song New empirical formula for (γ, n) reaction cross section near GDR peak for elements with $Z > 60$ // *Chinese Physics C* – 2017. - V. 41, No. 4. 044105-(1-14).
 12. Sabri M., Haddad M. Calculation of fission product yields for some nuclei with TALYS code // *EPJ Web of Conferences* – 2010. – V. 2. 14003-(1-4).
 13. Schmidt K.-H., Jurado B., Schmitt C. General description of fission observables: The GEF code // *EPJ Web of Conferences* – 2017. – V..04001-(1-7).
 14. Pomp S., Al-Adili A., Alhassan E., Gustavsson C., Helgesson P., Hellesen C., Koning A.J., Lantz M., Österlund M., Rochman D., Simutkin V., Sjöstrand H., Solders A. Experiments and theoretical data for studying the impact of fission yield uncertainties on the nuclear fuel cycle with TALYS/GEF and the Total Monte Carlo method // *Nuclear Data Sheets*. – 2015. – V. 123. – P. 220-224.
 15. Schmidt K.-H., Steinhäuser S., Böckstiegel C., Grewe A., Heinz A., Junghans A.R., Benlliure J., Clerc H.-G., de Jong M., Müller J., Pfützner M., Voss B. Voss Relativistic radioactive beams: A new access to nuclear-fission studies // *Nuclear Physics A*. – 2000. – V. 665, Is. 3-4. – P. 221-267.
 16. Tudora A. Prompt fission neutron data calculation using experimental fission fragment charge distributions in the frame of the Point by Point treatment // *Annals of Nuclear Energy* – 2010. – V. 37. – P. 43-51.
 17. Schiff L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // *Phys. Rev.* – 1951. – V. 83, No 2. – P. 252-253
 18. Hai-Bo Xu, Xian-Ke Peng and Chao-Bin Chen Monte Carlo simulation for bremsstrahlung and photoneutron yields in high-energy x-ray radiography // *Chin. Phys. B* – 2010. – V. 19, No. 6. 062901.
 19. Naik H., Carrel F., Kim G.N. et al Mass yield distributions of fission products from photo-fission of ^{238}U induced by 11.5–17.3MeV bremsstrahlung // *Eur. Phys. J. A* - 2013. – V. 49: 94.
 20. Evaluated Nuclear Data File (ENDF). Database Version of 2017-10-27 // <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
 21. Verbeke J.M., Hagmann C., Wright D. Simulation of Neutron and Gamma Ray Emission from Fission and Photofission. LLNL Fission Library 2.0.2. // UCRL-AR-228518-REV-1. Lawrence Livermore National Laboratory. October 24, 2016.
 22. Casperson R.J., Burke J.T., Scielzo N.D., Escher J.E., McCleskey E., McCleskey M., Saastamoinen A., Spiridon A., Ratkiewicz A., Blanc A. et al. Measurement of the $\text{Am}^{240}(\text{n},\text{f})$ cross section using the surrogate-ratio method // *Phys Rev C*, - 2014. – V. 90. 034601- (1-9).
 23. Verboven M., Jacobs E., De Frenne D. Emission of light charged particles in photon induced fission // *Phys Rev C* – 1994. – V. 49. – P. 991-1000.