



## ОЛЕЙНІКОВ

**Євген Володимирович** — доктор філософії, молодший науковий співробітник відділу квантової плазмової електроніки Інституту електронної фізики НАН України

## ВПРОВАДЖЕННЯ СИМУЛЯЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОПОДІЛУ ЯДЕР

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 17 грудня 2025 р.

З використанням симуляційних технологій (ядерні коди Монте-Карло — GEANT4, GEF, TALYS, та власноруч створені комп'ютерні програми) вперше було отримано експериментальні значення відносних та повних виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$  (17 значень),  $^{238}\text{U}$  (14 значень) і  $^{239}\text{Pu}$  (13 значень) за граничної енергії гальмівних фотонів 17,5 МеВ. Одержані результати внесено до Міжнародної бази експериментальних даних з ядерних реакцій EXFOR.

**Ключові слова:** фотоподіл, актиніди, виходи продуктів, мікротрон, гамма-спектрометрія, GEANT4, TALYS, GEF.

Одним із перспективних напрямів вивчення процесу поділу актинідів є проведення експериментальних досліджень із використанням пучків фотонів, згенерованих на електронних прискорювачах. Оскільки характер такої взаємодії добре відомий, це спрощує інтерпретацію отриманих результатів і дозволяє робити однозначні висновки про механізм розпаду утворених подільних ядер [1—3]. Масові розподіли виходів уламків поділу актинідів є одним з основних параметрів, що характеризують механізм розпаду важких ядер, де найбільш чітко проявляються їхні структура і властивості [1] (рис. 1).

Однак слід зазначити, що наявні на сьогодні експериментальні дані щодо виходів продуктів фотоподілу актинідів, які охоплюють широкий діапазон мас — від границі з доактинідами до умовної границі з важкими актинідами — для області енергій першого шансу (поділу без попередньої емісії передподільних нейтронів), не задовольняють потреб, пов'язаних з їх використанням для розвитку модельних уявлень і прикладних застосувань [3].

Тому експериментальні дослідження виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$  та структури їхніх масових розподілів для зазначеної області енергій фотонів є над-

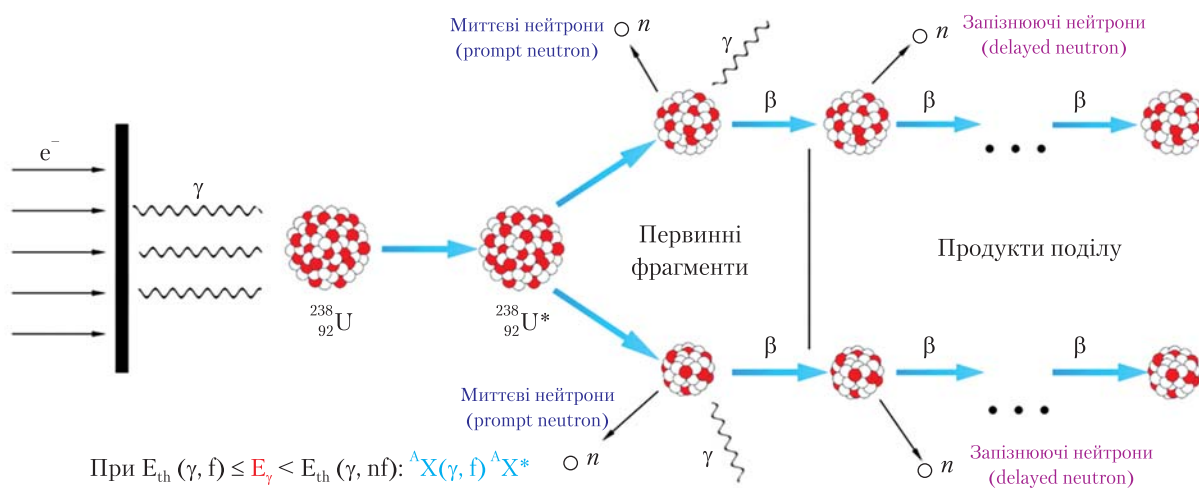


Рис. 1. Схема фотоподілу ядер актинідів

звичайно актуальним завданням, зумовленим значною потребою багатьох розділів сучасної ядерної фізики в нових експериментальних даних як для тестування відомих та нових теоретичних методів і підходів до опису процесу поділу ядерних систем, так і в контексті їх використання для широкого кола прикладних застосувань, таких як створення реакторів нового покоління, трансмутация відпрацьованого ядерного палива, контроль обігу ядерних матеріалів, отримання пучків з надмірною кількістю нейтронів, альтернативне виробництво медичних радіоізотопів тощо [3].

Стандартні схеми досліджень виходів продуктів фотоподілу актинідів складаються з чотирьох основних етапів:

1) активація зразків актинідів на електронних прискорювачах;

2) спектрометрія затриманого гамма-випромінювання від продуктів їх поділу з подальшою математичною обробкою експериментальних даних;

3) розрахунок відносних і повних виходів уламків;

4) аналіз отриманих даних у рамках сучасних модельних описів процесу поділу.

Для забезпечення надійності результатів експериментальних досліджень виходів продуктів фотоподілу актинідів на електронному

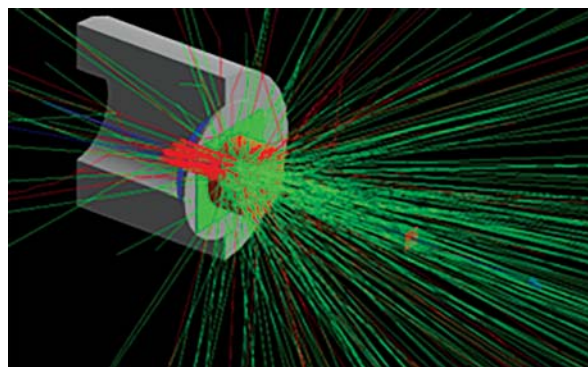


Рис. 2. Візуалізація схеми моделювання з використанням інструментарію GEANT4 з частинками

прискорювачі — мікротроні М-30 та отримання нових достовірних числових даних було застосовано симуляційні технології, а саме: сучасні ядерні коди Монте-Карло GEANT4<sup>1</sup>, GEF<sup>2</sup>, TALYS<sup>3</sup>, а також розроблені нами програмні продукти для проведення чисельних моделювань — NPMA Bremsstrahlung simulator<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> GEANT4 10.7. <https://geant4.web.cern.ch/>

<sup>2</sup> GEF 2023/1.1.

<http://www.khschmidts-nuclear-web.eu/GEF-2023-1-1.html>

<sup>3</sup> TALYS-1.96. <https://nds.iaea.org/talys/>

<sup>4</sup> Авторське свідоцтво № 113402. Олейніков Є.В., Пилпичинець І.В., Парлаг О.О. Комп'ютерна програма «NPMA Bremsstrahlung simulator. Version 1.1.2110». Зареєстровано 21.06.2022.

NPMU Bremsstrahlung flux efficiency<sup>5</sup>, NPMA Reaction Yield<sup>6</sup>, NPMA Detector efficiency<sup>7</sup>, NPMA Prompt neutron yield<sup>8</sup>, NPMA Prompt neutron parametrization<sup>9</sup>.

Для отримання інформації про характеристики пучків гальмівного випромінювання, згенерованих на електронних прискорювачах, з урахуванням їхніх конструктивних особливостей та схем опромінення, що ініціюють реакцію фотоподілу актинідів, було використано комп'ютерне моделювання із застосуванням ядерного коду Монте-Карло GEANT4. Це дає можливість розраховувати спектри гальмівних фотонів та вторинних частинок (залишкових електронів, фотонейтронів) у максимальному наближенні до реальних умов їх формування [4–6].

Візуалізацію схеми моделювання за допомогою інструментарію GEANT4 наведено на рис. 2.

У результаті проведених моделювань з використанням інструментарію GEANT4 і зазначених вище створених нами програм розроблено схему стимуляції фотоподілу актинідів на електронному прискорювачі Інституту електронної фізики НАН України — мікротроні М-30. Схема враховує технічні параметри М-30 [4–6] та ядерно-фізичні характеристики експериментальних зразків актинідів <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U та <sup>239</sup>Pu і

дозволяє мінімізувати внесок виходів супутніх ядерних реакцій (електроядерних та нейтронних) у виходи продуктів фотоподілу цих актинідів. Для оцінки внеску супутніх ядерних реакцій додатково було використано код Talys<sup>10</sup>.

Для експериментального визначення виходів продуктів фотоподілу актинідів ми скористалися гамма-спектрометричним методом на базі напівпровідникових детекторів високої роздільної здатності, оскільки він забезпечує високу точність диференціації уламків поділу за зарядом і масою. Точність та достовірність отриманих результатів залежать від якості калібрування детекторів за енергетичною ефективністю, що враховує їхні технічні характеристики та поправки, пов'язані з геометрією вимірювань. Тому для підвищення точності експериментального визначення виходів продуктів на основі експериментальних даних було розроблено параметричні описи залежності ефективності напівпровідникових детекторів від енергії за фіксованих відстаней до джерел гамма-квантів — центрів їхньої поверхні [7].

На цій основі ми створили комп'ютерну програму для проведення рутинних розрахунків — NPMU Detector efficiency version 1.0.2303. Отримані результати дали змогу вдосконалити методику вимірювання гамма-спектрів від несепарованої суміші продуктів фотоподілу актинідів, спростити процес калібрування та підвищити точність і надійність результатів вимірювань завдяки коректному врахуванню поправок, які залежать від геометричних розмірів детекторів і досліджуваних зразків, а також від самопоглинання гамма-квантів у зразках.

Для розрахунків повних виходів продуктів поділу актинідів було визначено виходи окремих масових ланцюжків уламків згідно з напівемпіричною формулою Вола для розподілу середніх зарядів уламків із заданим масовим числом [8]. Для проведення розрахунків використано середні значення повних виходів миттєвих нейтронів і залежності значень виходів

<sup>5</sup> Авторське свідоцтво № 129095. Пилипчинець І.В., Олейніков Є.В., Парлаг О.О. Комп'ютерна програма «Bremsstrahlung flux efficiency 1.0.2406». Зареєстровано 19.08.2024.

<sup>6</sup> Авторське свідоцтво № 121291. Олейніков Є.В., Пилипчинець І.В., Парлаг О.О. Комп'ютерна програма «NPMA Reaction Yield Version 1.1.2304». Зареєстровано 15.08.2023.

<sup>7</sup> Авторське свідоцтво № 120791. Пилипчинець І.В., Олейніков Є.В., Парлаг О.О., Лендел О.І. Комп'ютерна програма «NPMU Detector efficiency version 1.0.2303». Зареєстровано 26.07.2023.

<sup>8</sup> Авторське свідоцтво № 120663. Олейніков Є.В., Лендел О.І., Парлаг О.О., Пилипчинець І.В. Комп'ютерна програма «NPMA Prompt neutron yield version 1.0.2301». Зареєстровано 20.07.2023.

<sup>9</sup> Авторське свідоцтво № 120664. Олейніков Є.В., Лендел О.І., Парлаг О.О., Пилипчинець І.В. Комп'ютерна програма «NPMU Prompt neutron parametrization version 1.0.2302». Зареєстровано 20.07.2023.

<sup>10</sup> TALYS-1.96. <https://nds.iaea.org/talys/>

від маси уламків, промодельовані кодами GEF і TALYS та розробленими нами комп'ютерними програмами NPMA Prompt neutron yield та NPMU Prompt neutron parametrization. Ці програми створено на основі розроблених параметричних описів середніх значень повних виходів миттєвих нейтронів та залежності значень виходів від маси уламків для широкого кола актинідів [9]. Використання створеного параметричного опису повних виходів миттєвих нейтронів та їх залежностей від маси уламків забезпечило достовірність отриманих результатів.

Застосування симуляційних технологій дало змогу оптимізувати процес експериментального визначення виходів продуктів фотоподілу актинідів  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$ , а саме:

- отримати оптимальні схеми стимуляції реакції фотоподілу на електронному прискорювачі — мікротроні М-30 шляхом моделювання процесу опромінення;

- підвищити точність гамма-спектрометричних вимірювань завдяки коректному визначенню залежності ефективності використаних детекторів від енергії;

- забезпечити точність розрахунків числових значень повних виходів продуктів фотоподілу актинідів з використанням уточнених даних щодо виходів миттєвих нейтронів та їх залежності від маси уламків.

Завдяки цьому вперше було отримано числові значення відносних та повних виходів продуктів фотоподілу ядер  $^{232}\text{Th}$  (17 значень) [8],  $^{238}\text{U}$  (14 значень) [10] і  $^{239}\text{Pu}$  (13 значень) [11] за граничної енергії гальмівних фотонів 17,5 МеВ. Ці значення внесено до Міжнародної бази експериментальних даних з ядерних реакцій EXFOR<sup>11</sup>, що свідчить про їхню високу точність та достовірність.

На рис. 3 наведено виходи продуктів фотоподілу зазначених вище ядер.

Отже, в результаті проведеного аналізу повних виходів продуктів фотоподілу ядер  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$  в межах мультимодальної моделі підтверджено наявність структури в масових

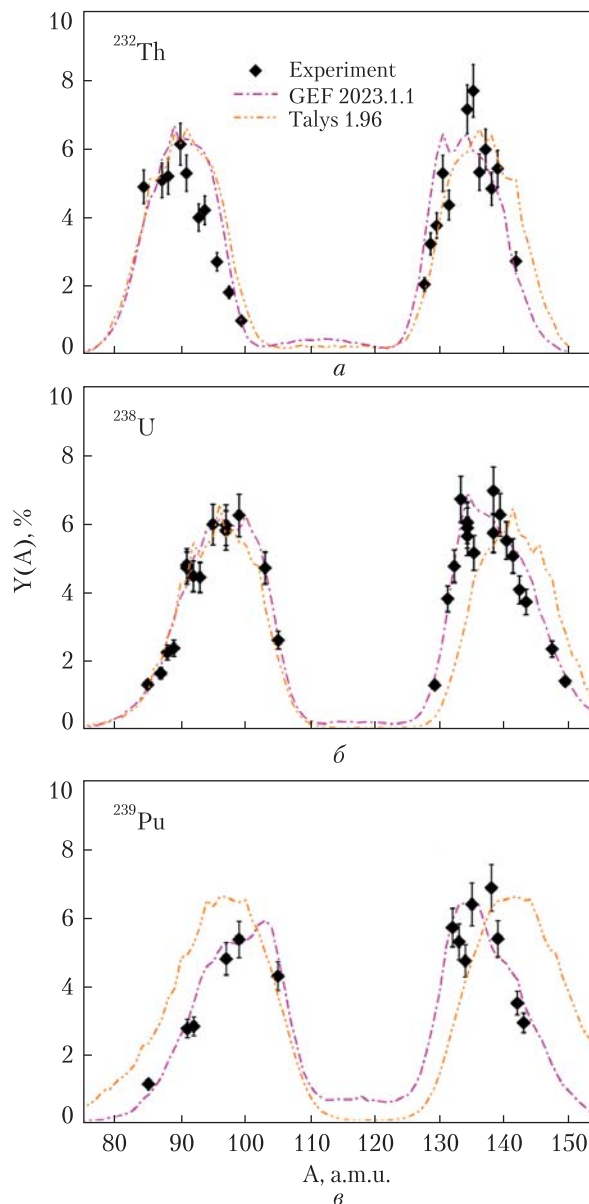


Рис. 3. Виходи уламків фотоподілу ядер: а —  $^{232}\text{Th}$  [8]; б —  $^{238}\text{U}$  [10]; в —  $^{239}\text{Pu}$  [11]. Максимальна енергія гальмівних фотонів 17,5 МеВ

розподілах виходів продуктів, яка пов'язана з впливом ядерних оболонок на процес формування уламків [2]. Встановлено, що теоретичні розрахунки якісно узгоджуються між собою і відображають лише форму масових розподілів, характерну для отриманих експериментальних даних.

<sup>11</sup> Experimental Nuclear Reaction Data.

<https://www-nds.iaea.org/exfor/>

Одержані результати можна використовувати для тестування наявних теоретичних моделей та параметричних описів залежності виходів продуктів фотоподілу актинідів від їхніх мас за фіксованих значень енергії збудження. Крім того, їх можна застосовувати для поліпшення феноменологічних підходів до опису структури масових розподілів виходів продуктів фотоподілу актинідів, а також для дослідження впливу ядерних оболонок на процес формування уламків фотоподілу в розпаді складених ядерних систем.

Слід зазначити, що розроблені програмні продукти впроваджено в навчально-науковому процесі відділення фізики ядра та елементарних частинок при кафедрі теоретичної фізики фізичного факультету Ужгородського національного університету. Викладачі кафедри використовують ці програми як допоміжний ресурс у процесі викладання курсів «Спектрометрія іонізуючого випромінювання», «Фізичний практикум», «Ядерна фізика», а також під час проведення практичних і лабораторних робіт.

## REFERENCES

1. Pietralla N. Photons and nuclear structure. *The European Physical Journal A*. 2024. **60**: 108. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-024-01285-8>
2. Csige L., Filipescu D.M. Photofission Studies: Past and Future. In: Tanihata I., Toki H., Kajino T. (eds) *Handbook of Nuclear Physics*. Springer, Singapore, 2022. P. 1—34. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-8818-1\\_81-1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8818-1_81-1)
3. Zilges A., Balabanski D.L., Isaak J., Pietralla N. Photonuclear reactions — from basic research to applications. *Progress in Particle and Nuclear Physics*. 2022. **122**: 103903. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2021.103903>
4. Oleinikov E., Parlag O., Pylypchynets I. Simulation of the optimal scheme for stimulating actinide photofission on the M-30 microtron at 17.5 MeV bremsstrahlung energy. *Journal of Nuclear and Particle Physics*. 2023. **13**(1): 7—16. <https://doi.org/10.5923/j.jnpp.20231301.02>
5. Oleinikov E., Parlag O., Pylypchynets I. Simulation of the concomitant nuclear reactions contribution to the actinide photofission on the M-30 microtron at 17.5 MeV bremsstrahlung energy. *Journal of Nuclear and Particle Physics*. 2023. **13**(2): 17—23. <https://doi.org/10.5923/j.jnpp.20231302.01>
6. Oleinikov E.V., Pylypchynets I.V., Parlag O.O., Pyskach V.V. Photon and photoneutron outputs simulation from a tantalum converter at the M-30 microtron. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2024. (5): 148—153. <https://doi.org/10.46813/2024-153-148>
7. Pylypchynets I.V., Lengyel O.I., Parlag O.O., Oleynikov E.V. Empirical formula for the dependence of HPGe-detector efficiency on energy and distance for shielded gamma-ray sources. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. (3): 47—51. <https://doi.org/10.46813/2023-145-047>
8. Parlag O.O., Maslyuk V.T., Oleynikov E.V. et al. Structure of mass-yield distributions of  $^{232}\text{Th}$  photofission product by bremsstrahlung at energy 17.5 MeV. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*. 2021. **49**: 54—60. <https://doi.org/10.54919/2415-8038.2021.49.54-60>
9. Oleinikov E.V., Lengyel A.I., Parlag O.O., Maslyuk V.T., Pylypchynets I.V. Parameterization of prompt neutron multiplicity for first-chance actinide photofission. *SCIREA J. Phys.* 2023. **8**(5): 470—487. <https://doi.org/10.54647/physics140574>
10. Oleynikov E.V., Parlag O.O., Pylypchynets I.V., Maslyuk V.T., Lengyel O.I. Structure of mass distributions of photofission product yields of  $^{238}\text{U}$  at 17.5 MeV bremsstrahlung energy. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. (3): 26—32. <https://doi.org/10.46813/2023-145-026>
11. Parlag O.O., Maslyuk V.T., Oleynikov E.V., Pylypchynets I.V., Lengyel A.I. Product yields for the photofission of  $^{239}\text{Pu}$  with bremsstrahlung at 17.5 MeV boundary energy. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021. (6): 8—12. <https://doi.org/10.46813/2021-136-008>

Eugene V. Oleinikov

*Institute of Electron Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0949-5145>

IMPLEMENTATION OF SIMULATION TECHNOLOGIES  
IN EXPERIMENTAL STUDIES OF NUCLEAR PHOTOFISSION

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 17, 2025

Using simulation technologies (nuclear Monte Carlo codes — GEANT4, GEF, TALYS, and self-created computer programs), experimental values of relative and total yields of photofission products of actinides  $^{232}\text{Th}$  (17 values),  $^{238}\text{U}$  (14 values) and  $^{239}\text{Pu}$  (13 values) at the limiting bremsstrahlung photon energy of 17.5 MeV were obtained for the first time. The obtained results were included into the international experimental nuclear reaction data library EXFOR.

**Keywords:** photofission, actinides, product yields, microtron, gamma spectrometry, GEANT4, TALYS, GEF

**Cite this article:** Oleinikov E.V. Implementation of simulation technologies in experimental studies of nuclear photofission (according to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 17, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (2): 78—83. <https://doi.org/10.15407/visn2026.02.078>