

Олександр ГОРБАЧЕНКО, канд. фіз.-мат. наук

ORCID ID: 0000-0003-0563-2392

e-mail: gorbachenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Володимир ПЛЮЙКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-3668-1306

e-mail: plujko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНАЛІЗ НЕОДНОЗНАЧНОСТЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕРІЗІВ УТВОРЕННЯ РАДІОІЗОТОПІВ ^{99m}Tc , ^{177}Lu

Проведено порівняння експериментальних даних значень перерізів утворення медичних радіоізоотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu у фотоядерних реакціях $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ з оціненими даними та розрахунками, виконаними з урахуванням невизначеностей характеристик збуджених станів атомних ядер. Експериментні дані з бази даних EXFOR наведено з достатньо великими похибками, а сучасні дані з бібліотеки даних TENDL2023, оцінені за багатьох енергій, не узгоджуються з експериментальними даними. Тому для надійного визначення відповідних перерізів фотопоглинання, які визначають виробництво радіоізоотопів, було виконано обчислення відповідних перерізів з урахуванням невизначеностей у характеристиках збуджених станів ядер, а саме, у типі фотонної силової функції, яка визначає ймовірність гамма-розпаду та фотопоглинання ядер, і у виразах для густин збуджених станів атомних ядер. Продемонстровано досить сильну залежність значень перерізів утворення радіоізоотопів від характеристик станів, але ніякою варіацією параметрів не можна узгодити теоретичні розрахунки з експериментальними даними по перерізу утворення радіоізоотопу ^{177}Lu . Наведено розрахунки перерізів фотопоглинання ядер ^{100}Mo , ^{178}Hf із різними деформаціями при використанні систематик для гігантських дипольних резонансів.

Ключові слова: перерізи фотоядерних реакцій, радіоізоотопи ^{99m}Tc , ^{177}Lu , фотонна силова функція, пігмі та гігантський дипольні резонанси.

Вступ

Електромагнітні переходи відіграють значну роль в ядерних процесах, оскільки вони супроводжують будь-яку ядерну реакцію, а властивості ядра можна оцінити, досліджуючи електромагнітні переходи. Усереднені ймовірності фотопоглинання та гамма-розпаду описуються за допомогою фотонних силових функцій (ФСФ) (Capote et al., 2009; Goriely, & Plujko, 2019; Goriely et al., 2019; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018), які використовуються як для фундаментальних досліджень атомних ядер, так і в прикладних застосуваннях. Електричні дипольні (E1) переходи домінують над переходами іншого типу і мультипольностей, коли вони відбуваються одночасно (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011). Основним колективним станом, який визначає E1 фотопоглинання і гамма-розпад

© Горбаченко Олександр, Плюйко Володимир, 2024

атомних ядер за енергій збудження ≤ 50 MeV, є гігантський ізовекторний дипольний резонанс (ГДР). Поряд з ним може збуджуватися і пігмі дипольний резонанс, який може сильно впливати на перерізи фотоядерних реакцій.

Деякі радіоізотопи, зокрема такі, як: ^{99m}Tc , ^{47}Sc , ^{44}Ti , ^{67}Cu , ^{103}Pd , ^{117m}Sn , ^{169}Er , ^{195m}Pt , ^{225}Ac , ^{177}Lu , можуть бути отримані у фотоядерних реакціях під час взаємодії з високо інтенсивними γ -квантами з кращим виходом, ніж у різних класичних методах (Habs, & Koster, 2011; Naik et al., 2013; Nikiforov, & Uvarov, 2010; Gao et al., 2023). Детальні дослідження щодо виробництва таких ізотопів досліджувались у різних роботах (Habs, & Koster, 2011; Naik et al., 2013; Nikiforov, & Uvarov, 2010; Gao et al., 2023). Особливий інтерес представляє виробництво ізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu , які є бета-випромінювачами низької енергії з періодом піврозпаду 6,0 та 6,65 діб, відповідно. Через малу енергію бета-частинок глибина проникнення в м'які тканини мала, тому високі дози можуть бути отримані в малих об'ємах і ці ізотопи є ідеальними кандидатами для ендорадіотерапії. Процес виробництва цих ізотопів може бути налагоджений за допомогою високоенергетичного гамма-випромінювання в ядерних реакціях $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. Для реалізації таких ядерних реакцій необхідно, зокрема, знати точне оцінювання їхніх перерізів.

Мета роботи проаналізувати можливість використання фотореакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ для виходу ізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu та оцінити вплив невизначеностей перерізів відповідних ядерних реакцій від модельних передбачень.

Розглянемо генерацію радіоізотопів ^{99m}Tc , ^{177}Lu за допомогою гамма-квантів з ядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. Зазвичай як ефективність генерації радіоізотопів використовують відношення активності згенерованих радіоізотопів A до загальної маси мішені m при опроміненні гамма-квантами однієї енергії з густиною потоку Φ (Habs, & Koster, 2011), прирівнюючи максимальні кількості ізотопів, які можна згенерувати:

$$\frac{A}{m} = \frac{N_A}{M} \cdot (1 - \exp(-t_{irr} \cdot \ln 2 / T_{1/2})) \cdot \sigma \cdot \Phi, \text{ і враховуючи те, що вони розпадаються}$$

$$\text{під час максимального виходу згенерованих ізотопів} \quad \left(\frac{A}{m} \right)_{\max} = \frac{N_A \cdot \ln 2}{M \cdot T_{1/2}},$$

де M – молярна маса ізотопів мішені (г/моль), N_A – число Авогадро, t_{irr} – час опромінення, $T_{1/2}$ період піврозпаду напрацьованого радіоізоотопу, за достатньо довгих часів опромінення, прирівнюючи швидкість виробництва і розпаду ізотопів за максимальної активності, отримуємо зв'язок перерізу реакції і густини потоку $\sigma \cdot \Phi \approx \ln 2 / T_{1/2}$. Оскільки періоди $T_{1/2}$ для наших радіоізотопів становлять приблизно 6 діб, то потоки, потрібні для генерації даних ізотопів, будуть визначатись перерізами реакцій

$$\Phi [\text{cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}] \approx \ln 2 / (\sigma \cdot T_{1/2}) \approx (1.2 \div 1.3) \cdot 10^{18} / \sigma [\text{barn}].$$

У роботі (Habs, & Koster, 2011) представлено оцінювання виходу ізотопу ^{99m}Tc за енергії 14 MeV і показано, що ефективність виробництва цього ізотопу в реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ краща, ніж у реакції з нейтронами. Оскільки на реакторі отримуються більш високі потоки нейтронів, то технологія виробництва ^{99m}Tc на реакторі більш прийнятна, але у зв'язку з виходом із експлуатації реакторів поділу потрібно шукати інші незалежні варіанти виробництва медичних ізотопів. Зазвичай у випадку гальмівних гамма-квантів ми маємо спектр із різних енергій

гамма-квантів і добуток $\sigma \cdot \Phi$ замінюється на інтеграл $\int_{E_{\gamma, \min}}^{E_{\gamma, \max}} \sigma(E_{\gamma}) \cdot \Phi_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}$, де

Φ_{γ} густина потоку за певної енергії гамма-квантів. Цей інтеграл буде залежати від поведінки перерізу та енергії гамма-квантів.

На рис. 1 представлено залежності перерізів фотоядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ від енергії гамма-квантів, розраховані за кодами TALYS 2.0 (<https://nds.iaea.org/talys/>), EMPIRE 3.2 (<https://www-nds.iaea.org/empire/>), оцінені дані за бібліотекою TENDL2023 (https://tendl.web.psi.ch/tendl_2023/tendl2023.html) та експериментальні дані з EXFOR (<https://www-nds.iaea.org/exfor/>), які можуть бути використані для виробництва ізотопів ^{99m}Tc (після бета-розпаду $^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc}$), ^{177}Lu .

Видно, що функції збудження таких реакцій дуже сильно залежать від енергії гамма-квантів. Функція збудження для реакції $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ краще узгоджується з експериментальними даними, ніж для реакції $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$. За малих енергій у діапазоні енергій гамма-квантів, близько до енергії відділення нейтрона (6–9 MeV) (рис. 1a), проявляються пігмі дипольні резонанси і відповідно переріз ядерних реакцій може відрізнятися в декілька разів. Також може впливати на переріз деформація ядер. Переріз реакції $\sigma(\gamma, \chi)$ ($\chi = n, p$) буде визначатись такими параметрами ядра, як фотонна силова функція (ФСФ) (параметр strength і gstrfn у TALYS і EMPIRE кодах, відповідно) та густина ядерних рівнів (ГЯР) (параметри ldmodel і levden у TALYS і EMPIRE кодах, відповідно). Були використані такі моделі для ГЯР у коді TALYS: ldmodel = 1 – модель Гілберта–Камерона з постійною температурою; ldmodel = 2 – модель фермі-газу зі зворотним зсувом; ldmodel = 3 – узагальнена надплинна модель; ldmodel = 4 – метод Хартрі–Фока–Боголюбова із силами Скірма. Як моделі для ФСФ були використані: strength = 1 – модель Копецького та Ула; strength = 2 – модель стандартного лоренціана (SLO); strength = 9 – модель модифікованого лоренціана (SMLO). Для ГЯР у коді EMPIRE були використані такі моделі: levden = 0 – специфічна для EMPIRE густина ядерних рівнів, узгоджена з RIPL-3 експериментальними відстанями між нейтронними резонансами D_{obs} та кумулятивною кількістю дискретних рівнів N_{cum} (EGSM модель за замовчуванням); levden = 1 – узагальнена надплинна модель Generalized Superuid Model (GSM), підігнана за RIPL D_{obs} ; levden = 2 – модель Гілберта–Камерона (Gilbert–Cameron) із RIPL D_{obs} та N_{cum} ; levden = 3 – RIPL-3 Хартрі–

Фок–Боголюбов (Hartree–Fock–Bogolyubov (HFB)) густина ядерних рівнів. А як моделі для ФСФ були використані: gstrfn = 0 – модель підсиленого узагальненого лоренціана (EGLO); gstrfn = 6 – модель стандартного лоренціана (SLO), gstrfn = 1 – модель модифікованого лоренціана (MLO).

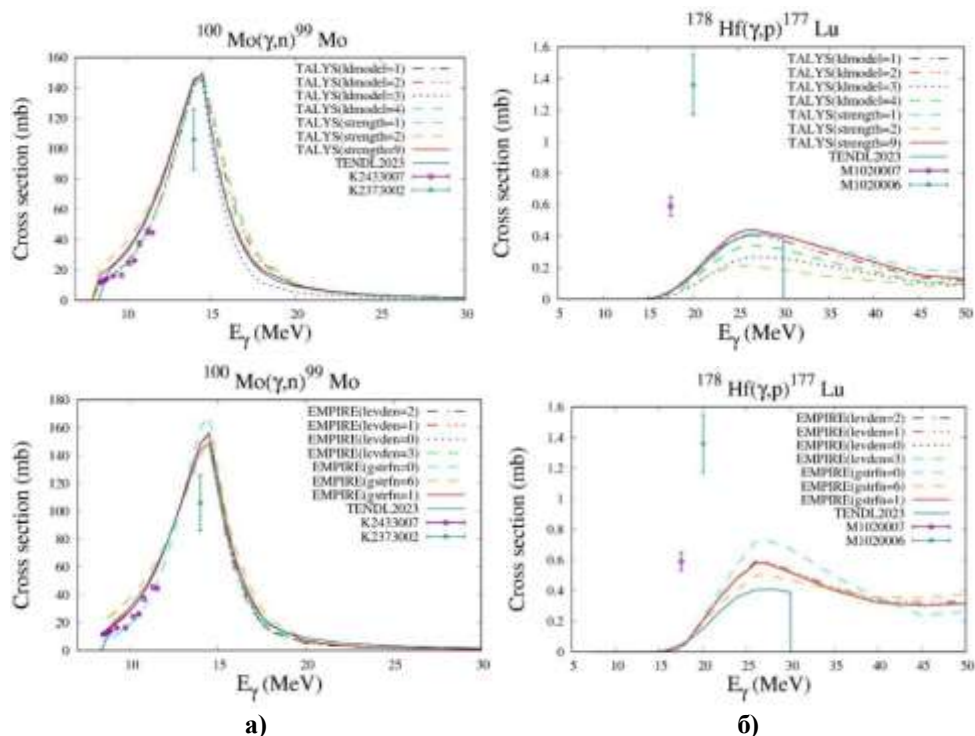


Рис. 1. Залежність перерізів ядерних реакцій

$^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ від енергії гамма-квантів.

(Експериментальні дані взяті з бази даних EXFOR

із відповідними subent-номерами: K2433007; K2373002; M1020007; M1020006)

Обчислення інтеграла $\int_{E_{\gamma, \min}}^{E_{\gamma, \max}} \sigma(E_{\gamma}) \cdot \Phi_{\gamma}(E_{\gamma}) dE_{\gamma}$ для Φ_{γ} густини потоку

гальмівного випромінювання з енергією електронів 11 MeV із різними виразами для густин ядерних рівнів та ФСФ, що представлені на рис. 1, показують розходження між собою в два рази. Якщо переріз ядерної реакції йде через складене ядро, то можна очікувати, що парціальний переріз $\sigma(\gamma, x)$ буде пропорційний повному перерізу фотопоглинання $\sigma(\gamma, abs)$:

$$\sigma_{abs}(E_{\gamma}) = \sigma_{E1, GDR}(E_{\gamma}) + \sigma_{qd}(E_{\gamma}),$$

де $\sigma_{E1, GDR}$ – компонента перерізу фотопоглинання пов'язана зі збудженням ГДР;

$\sigma_{qd}(E_{\gamma})$ – квазідейтронний внесок у переріз фотопоглинання, який взято

згідно з (Chadwick et al., 1991). Повний переріз фотопоглинання можна обчислити, користуючись фотонними силовими функціями (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018) для електричних дипольних (E1) переходів з урахуванням гігантського та пігмі дипольними резонансами, а також деформаціями атомних ядер. Наприклад, компонент перерізу фотопоглинання, що пов'язаний зі збудженням стану ГДР $\sigma_{E1,GDR}$ розраховується з використанням різних аналітичних моделей E1 ФСФ фото збудження $\tilde{f}_{E1}^{\alpha}(\epsilon_{\gamma})$, де індексом α позначено модель ФСФ ($\alpha = \text{SLO, SMLO}$):

$$\sigma_{E1}^{\alpha}(E_{\gamma}) = \sigma_{E1,GDR}^{\alpha}(E_{\gamma}) = 3(\pi\hbar c)^2 E_{\gamma} \tilde{f}_{E1}^{\alpha}(E_{\gamma}).$$

Параметри ГДР, а також параметри квадрупольної деформації ядер β , були знайдені з підгонки експериментальних даних за фотопоглинанням з використанням моделей ФСФ стандартного SLO і модифікованого SMLO (Plujko et al., 2018; Goriely, & Plujko, 2019) лоренціанів у наближенні аксіально деформованих ядер (Capote et al., 2009; Plujko, Capote, & Gorbachenko, 2011; Plujko et al., 2018; Goriely, & Plujko, 2019).

Таблиці значень параметрів ГДР з оцінками їх невизначеності (стандартне відхилення на одну сигму) у наближенні аксіальної деформації ядер з параметром деформації β були отримані в роботі (Plujko et al., 2018), яка виконувалась в рамках проекту МАГATE "Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions 2016–2019" (<https://www-nds.iaea.org/CRP-photonuclear/>). Параметри деформацій β визначались із характеристик ГДР відповідно до формули Даноса (Danos, 1958), як: $\beta = \sqrt{4\pi/5}(1 - E_a/E_b) / (0.867 \cdot E_a/E_b + 1/2)$, де E_a і E_b енергії мод ГДР резонансів уздовж та поперек відносних півосей еліпсоїда обертання, відповідно. Значення E_a , E_b визначались за енергіями ГДР першого та другого резонансів $E_{r,1}$, $E_{r,2}$ (Plujko et al., 2018) згідно зі значенням сил S_1 , S_2 : якщо $S_1 < S_2$, тоді $E_a = E_{r,1}$, $E_b = E_{r,2}$ – ядро витягнуте ($\beta > 0$); якщо $S_1 > S_2$, тоді $E_b = E_{r,1}$, $E_a = E_{r,2}$ – ядро сплюснуте ($\beta < 0$). Відповідно деформації та їхні похибки в дужках, отримані методом перенесення похибок, представлено в табл. 1 для параметрів ГДР, розрахованих за допомогою моделей SMLO, SLO. Параметри квадрупольних деформацій для ядер ^{100}Mo , ^{178}Hf , отримані в різних підходах, представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри квадрупольної деформації визначені SLO, SMLO і різних бібліотек

Елемент	SLO	SMLO	"deflib.dat" (Capote et al., 2009)	(Yushkov, 1993)
^{100}Mo	0	0	0.249	0.0806
^{178}Hf	-0.26 (3)	-0.24 (3)	0.259	0.262

Різниця в значеннях і знаках деформацій призводить до невизначеностей у поведінці розрахованих повних перерізів фотопоглинання, що продемонстровано на рис. 2 для реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, \text{abs})$. Тут продемонстровано розрахунок повних перерізів фотопоглинання з різними значеннями квадрупольних деформацій, визначеними з різних бібліотек (Pritychenko et al., 2016; Raman, Nestor, & Tikkanen, 2001; Yushkov, 1993) та розрахованих за параметрами ГДР. Параметри ГДР визначались за систематиками. Із рис. 2 видно, що для коректного опису експериментальних даних у діапазоні енергії відділення нейтрона треба враховувати внесок пігми дипольного резонансу, оскільки моделі SLO, SMLO не дуже гарно описують експериментальні дані в цьому діапазоні.

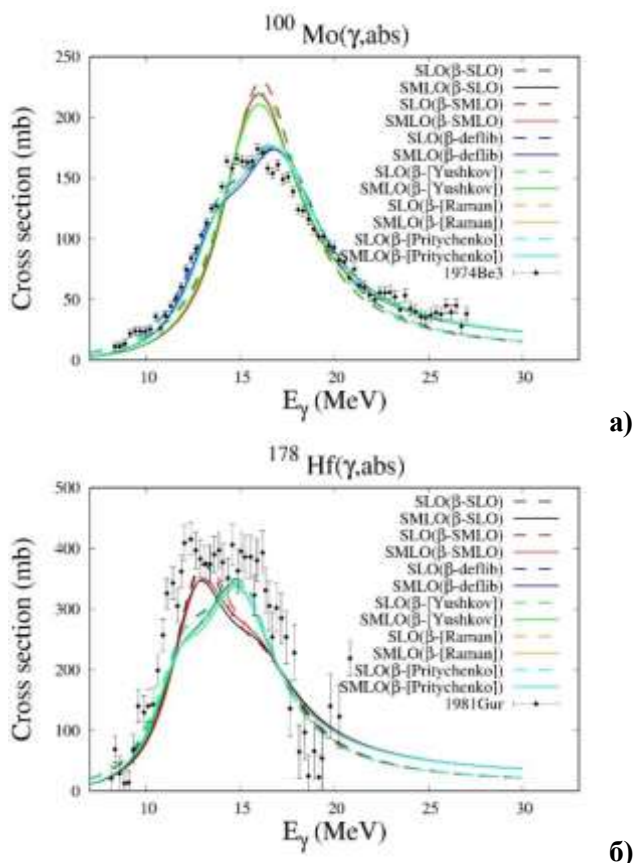


Рис. 2. Залежність перерізів ядерних реакцій $^{100}\text{Mo}(\gamma, \text{abs})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, \text{abs})$ від енергії гамма-квантів.

(Експериментальні дані взято з (Plujko et al., 2018) і представлено на <https://www-nds.iaea.org/PSFdatabase/>)

Висновки

Показано, що при виробництві таких радіоізотопів, як ^{99m}Tc , ^{177}Lu , у реакціях фотопоглинання $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ існує сильна неузгодженість із розрахованими, оціненими та експериментальними даними, особливо для реакції виробництва ^{177}Lu . Причиною неузгодженостей може бути наявність пігми дипольного резонансу та неузгодженості у використанні модельних значень параметрів деформації, що відповідають наближенню аксіально деформованого ядра. На сьогодні розробляються рекомендації щодо опису фотонних силових функцій для радіоізотопів з урахуванням деформацій, що відповідають опису фотопоглинання та впливу пігми дипольного резонансу.

Внесок авторів: Олександр Горбаченко – проведення розрахунків, аналіз розрахунків, підготовка чернетки рукопису; Володимир Плюйко – аналіз розрахунків та консультування щодо розрахунків, редагування рукопису.

Подяки, джерела фінансування. Робота виконана в рамках бюджетної теми "Комплексні дослідження властивостей і механізмів взаємодії частинок з атомними ядрами для фундаментальних і прикладних застосувань" № ДР 0122U001955 та за часткової підтримки гранта НФД України 2023.05/0024.

Список використаних джерел

- Capote, R., Herman, M., Oblozinsky, P., Young, P.G., Goriely, S., Belgia, T., Ignatyuk, A.V. et al. (2009). RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nucl. Data Sheets*, 110, 3107. <https://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>
- Chadwick, M.B., Oblozinsky, P., Hodgson, P.E. & Reffo, G. (1991). Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption, *Phys. Rev. C.*, 44, 814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.44.814>
- Danos, M. (1958). On the long-range correlation model of the photonuclear effect. *Nuclear Physics*, 5, 23. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(58\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0029-5582(58)90005-1)
- Gao, X., Zhang, P., Li, J. et al. (2023). Production of ^{99}Mo via photoneutron reaction using a 50 MeV electron linear accelerator. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 332, 3037–3045. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-023-09003-2>
- Goriely, S., & Plujko, V. (2019). Simple empirical E1 and M1 strength functions for practical applications. *Phys. Rev. C.*, 99(1), 014303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014303>
- Goriely, S., Dimitriou, P., Wiedeking, M. et al. (2019). Reference database for photon strength functions. *Eur. Phys. J. A.*, 55, 172. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12840-1>
- Habs, D., & Koster, U. (2011). Production of medical radioisotopes with high specific activity in photonuclear reactions with γ -beams of high intensity and large brilliance. *Applied Physics B*, 103, 501–519.
- Naik, H., Suryanarayana, S., Jagadeesan, K., Thakare, S., Joshi, P., Nimje, V., Mittal, K., Goswami, A., Venugopal, V., & Kailas, S. (2013). An alternative route for the preparation of the medical isotope ^{99}Mo from the $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ and $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ reactions. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 807–816.
- Nikiforov, V.I., & Uvarov, V.L. (2010). Estimation of the photonuclear yield of isotopes in production targets. *Radiochemistry*, 52(3), 315–321. <https://doi.org/10.1134/s1066362210030161>
- Plujko, V.A., Capote, R., & Gorbachenko, O.M. (2011). Giant Dipole Resonance Parameters with Uncertainties from Photonuclear Cross Sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 97, 567–589. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2011.04.001>

Plujko, V.A., Gorbachenko, O.M., Capote, R., & Dimitriou, P. (2018). Giant dipole resonance parameters of ground-state photoabsorption: Experimental values with uncertainties. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 123-124. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2018.03.002>

Pritychenko, B., Birch, M., Singh, B., & Horoi, M. (2016). Tables of E2 transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 107, 1. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.001>

Raman, S., Nestor, C.W., & Tikkanen, P. (2001). Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 1, 1. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0858>

Yushkov, A.V. (1993). Surface of $\beta(Z, N)$ Deformation for Nuclei with Z from 2 to 102. *Phys. Elem. Part. At. Nucl. (PEPAN)*, 24, 348–408.

References

Capote, R., Herman, M., Oblozinsky, P., Young, P.G., Goriely, S., Belgia, T., Ignatyuk, A.V. et al. (2009). RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations. *Nucl. Data Sheets*, 110, 3107. <https://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>

Chadwick, M.B., Oblozinsky, P., Hodgson, P.E. & Reffo, G. (1991). Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption. *Phys. Rev. C*, 44, 814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.44.814>

Danos, M. (1958). On the long-range correlation model of the photonuclear effect. *Nuclear Physics*, 5, 23. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(58\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0029-5582(58)90005-1)

Gao, X., Zhang, P., Li, J. et al. (2023). Production of ^{99}Mo via photoneutron reaction using a 50 MeV electron linear accelerator. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 332, 3037–3045. <http://dx.doi.org/10.1007/s10967-023-09003-2>

Goriely, S., & Plujko, V. (2019). Simple empirical E1 and M1 strength functions for practical applications. *Phys. Rev. C*, 99(1), 014303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.014303>

Goriely, S., Dimitriou, P., Wiedeking, M. et al. (2019). Reference database for photon strength functions. *Eur. Phys. J. A*, 55, 172. <https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12840-1>

Habs, D., & Koster, U. (2011). Production of medical radioisotopes with high specific activity in photonuclear reactions with γ -beams of high intensity and large brilliance. *Applied Physics B*, 103, 501–519.

Naik, H., Suryanarayana, S., Jagadeesan, K., Thakare, S., Joshi, P., Nimje, V., Mittal, K., Goswami, A., Venugopal, V., & Kailas, S. (2013). An alternative route for the preparation of the medical isotope ^{99}Mo from the $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ and $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)$ reactions. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 295, 807–816.

Nikiforov, V.I., & Uvarov, V.L. (2010). Estimation of the photonuclear yield of isotopes in production targets. *Radiochemistry*, 52(3), 315–321. <https://doi.org/10.1134/s1066362210030161>

Plujko, V.A., Capote, R., & Gorbachenko, O.M. (2011). Giant Dipole Resonance Parameters with Uncertainties from Photonuclear Cross Sections. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 97, 567–589. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2011.04.001>

Plujko, V.A., Gorbachenko, O.M., Capote, R., & Dimitriou, P. (2018). Giant dipole resonance parameters of ground-state photoabsorption: Experimental values with uncertainties. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 123-124. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2018.03.002>

Pritychenko, B., Birch, M., Singh, B., & Horoi, M. (2016). Tables of E2 transition probabilities from the first 2^+ states in even-even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 107, 1. <https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.001>

Raman, S., Nestor, C.W., & Tikkanen, P. (2001). Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78, 1, 1. <https://doi.org/10.1006/adnd.2001.0858>

Yushkov, A.V. (1993). Surface of $\beta(Z, N)$ Deformation for Nuclei with Z from 2 to 102. *Phys. Elem. Part. At. Nucl. (PEPAN)*, 24, 348–408.

Отримано редакцією збірника / Received: 02.07.24

Прорецензовано / Revised: 05.08.24

Схвалено до друку / Accepted: 01.10.24

Oleksandr GORBACHENKO, PhD (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0003-0563-2392

e-mail: gorbachenko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Volodymyr PLUJKO, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-3668-1306

e-mail: plujko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF AMBIGUITIES IN THE DETERMINATION OF CROSS SECTIONS OF THE RADIOISOTOPES ^{99m}Tc , ^{177}Lu FORMATION

Experimental data on cross-section values of the formation of medical radioisotopes ^{99m}Tc , ^{177}Lu in photonuclear reactions $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo} (^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta} ^{99m}\text{Tc})$, $^{178}\text{Hf}(\gamma, p)^{177}\text{Lu}$ are compared with evaluated data and calculations made taking into account uncertainties in the characteristics of excited states of atomic nuclei. The experimental data from the EXFOR database are given with sufficiently large uncertainties, and modern evaluated data from the TENDL2023 data library at many energies do not agree with the experimental data. Therefore, in order to reliably determine the corresponding photoabsorption cross-sections that determine the production of radioisotopes, in this work calculations of the corresponding cross-sections were performed taking into account the uncertainties in the characteristics of excited states of nuclei, namely in the form of photon strength function that determines the probability of gamma decay and photoabsorption of nuclei, and in expressions for the densities of excited states of atomic nuclei. A rather strong dependence of the values of the radioisotope formation cross sections on the characteristics of the states has been demonstrated, but no variation of the parameters can agree the theoretical calculations with the experimental cross section data for the formation of ^{177}Lu radioisotope. Calculations of photoabsorption cross sections of ^{100}Mo , ^{178}Hf nuclei with different deformations utilizing systematics for giant dipole resonances are shown.

Key words: *photonuclear reaction cross sections, radioisotopes ^{99m}Tc , ^{177}Lu , photon strength function, pygmy and giant dipole resonances.*

Автори О. Горбаченко та В. Плужко заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors O. Gorbachenko and V. Plujko declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.