

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$

**В.С. Бохінюк, О.Г. Окунєв, О.М. Парлаг, М.Т. Саболчій,
О.М. Фрадкін**

Ужгородський національний університет, кафедра теоретичної фізики
вул. Капітульна, 9а, Ужгород, 88000, e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

На гальмівних пучках бетатрона та мікротрона проведено вимірювання абсолютних виходів реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ у інтервалі енергій 7,2–8,4 та 11–25 МеВ. Розраховані виходи реакції та диференціальний переріз. Спостерігається злом у кривій виходу при енергії 7,65 МеВ та два максимуми у перерізі при енергіях 10 та 21 МеВ.

Ключові слова: непружне розсіювання, фотоядерна реакція, ізомер, родій, вихід реакції, переріз, бетатрон, мікротрон, гальмівне випромінювання.

Вступ

В реакціях $(\gamma, \gamma')^m$ досліджена тільки частина ядер зі зручними для вимірювань ізомерними станами. Розширення області таких досліджень, систематизація отриманих в них перерізів і ізомерних відношень будуть, безумовно, сприяти більш глибокому розумінню механізму взаємодії γ -квантів з ядрами та структури ядра.

Інтерес до ядра ^{103}Rh пояснюється наявністю валентних протонів та незаповненістю нейтронної підоболонки 1g на різних підоболонках цього ядра. Згідно оболонкової моделі дане ядро належить до протонної 1f1p1g оболонки з магічним числом $Z=50$ та нейтронної 1g2d3s1h оболонки.

В роботі [1] вказано, що для ядра ^{103}Rh було отримано переріз непружного ядерного розсіювання γ -квантів в області енергій 8-18 МеВ. Переріз має пік в області 12.8 МеВ, величина його 12.5 мбн та півширина піка 2.3 МеВ. Як положення піка, так і його величина, суперечать результатам, що отримали інші автори для перерізів $(\gamma, \gamma')^m$ реакцій на ядрах ^{87}Y , ^{107}Ag , ^{115}In , ^{157}Au . Для цих ядер переріз реакції $(\gamma, \gamma')^m$ має різкий пік в області порогу реакції (γ, n) , що пояснюється конкуренцією радіаційної і нейтронної ширин, висота піка суттєво менша і становить 2-4 мбн. У зв'язку з вищевказаним автори роботи провели виміри на синхро-

троні ФІАН (методом наведеної активності) виходу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ в області енергій 5,5-25,5 МеВ з кроком 1 МеВ. Отриманий з виходу, методом Пенфольда-Лейса, переріз реакції має 2 максимум при енергіях 9,3 і 20 МеВ, величина яких 4,8 і 2,5 мбн, відповідно.

У роботі [2] приведено огляд робіт по вивченню збудження ізомерних станів різних ядер у реакціях непружного розсіювання гамма-квантів. Відмічено, що для ядер ^{87}Y , ^{107}Ag , ^{157}Au , ^{103}Rh після першого максимуму спостерігається другий максимум у області 18–20 МеВ.

У роботі [3] відмічено, що на протязі 1970-1990 років вимірювання виходів реакцій $(\gamma, \gamma')^m$ в області максимальних енергій гальмівного випромінювання 2–7 МеВ проведено з метою пошуку активаційних рівнів, з яких заселяються ізомерні стани ядер. Активаційні рівні проявляються у вигляді зломів на кривих виходів. Такі дані одержані для багатьох ядер-ізомерів як короткоживучих (мілісекунди), так і для довгоживучих (секунди, хвилини, години).

У роботах [4, 5] приведені результати використання реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ у зовсім іншому плані, ніж у більшості попередніх робіт. Вказано, що використовуючи збудження довгоживучих ізомерних станів (більш десятків секунд), можна одержати джерела для спостереження ефекту Мессбаура. Зокрема, використовуючи зразок $^{103\text{m}}\text{Rh}$, можна спостерігати взаємодію гравітаційних хвиль з мультиплетними

радіаційними переходами.

У зв'язку з вище згаданим вважаємо за доцільне проведення вимірів виходу реакції $^{103}\text{Rh} (\gamma, \gamma') ^{103\text{m}}\text{Rh}$ як в області максимальних енергій гальмівного випромінювання 6–9 МеВ, так і при енергіях 10–25 МеВ та розрахунку перерізу в області гігантського резонансу.

Методика експерименту

На гальмівних пучках мікротрона М-10 та бетатрона Б25/30 було проведено вимірювання виходу реакції (γ, γ') на ядрах родію. Використано зразки родію у вигляді фольги розмірами (3*5) см та товщиною 0.05мм. Родій у природі є моноізотопом.

Для ідентифікації ізомерного переходу $7/2^+ \rightarrow 1/2^-$ використано характеристичне рентгенівське випромінювання K_α та K_β атомів родію. Це обумовлено тим, що коефіцієнт внутрішньої конверсії у цьому випадку складає 127, і інтенсивність випромінювання ізомерного переходу 39.55 КеВ на порядок менша, ніж інтенсивність ліній K_α та K_β з енергіями 20-35 КеВ (див. табл. №1).

Зразки опромінювались на відстані 25 см від гальмівної мішені бетатрона (мінімально можливій згідно його конструкції) та на відстані 10 см від гальмівної мішені мікротрона.

Наведена активність вимірювалась з допомогою сцинтиляційного детектора з тонким кристалом CsI(Tl) товщиною 0,3 мм. Такий детектор ефективно реєструє рентгенівське випромінювання починаючи з 20 КеВ. Калібрування детектора проводилось з допомогою стандартного джерела ^{241}Am .

Часи опромінення і вимірювання лежали у межах 20–40 хв., часи охолодження – 5–80 хв. Амплітудні спектри вимірювались кілька разів із різними часами охолодження, щоб виключити можливі похибки за рахунок різного завантаження входу спектрометра та оцінити період напіврозпаду.

Для вимірювання абсолютної дози опромінення використовувалася товсто-

стінна алюмінієва камера. Так як інтенсивність гальмівного випромінювання коливається під час опромінення зразка, то проводилось інтегрування струму (дозы) опромінення з допомогою РС–ланцюжка, параметри якого узгоджені з періодом напіврозпаду ізомерного стану $^{103\text{m}}\text{Rh}$.

Абсолютний вихід реакції розраховується згідно загальноприйнятої методики по формулі:

$$Y(E_m) = \frac{S(E_m) \cdot \lambda}{n \cdot \epsilon \cdot \eta \cdot D \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{оп}}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{\text{ох}}} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{в}}})} \quad (1)$$

де: λ - стала розпаду ядер; $S(E_m)$ - площа під фотопіком в апаратурному спектрі гамма-випромінювання після опромінення зразка при енергії E_m ; ϵ - ефективність реєстрації гамма-випромінювання; η - коефіцієнт, що враховує квантовий вихід лінії; D - доза гальмівного випромінювання в одиницях струму товстостінної іонізаційної камери; $t_{\text{оп}}$ - час опромінення; $t_{\text{ох}}$ - час охолодження зразка; $t_{\text{в}}$ - час вимірювання.

Як видно з табл. 1, продукти всіх можливих реакцій дають рентгенівське випромінювання в області 20 КеВ. Вкладом реакції (γ, n) можна знехтувати за рахунок великого періоду напіврозпаду.

Охолодження зразка протягом 25 хвилин дає можливість виключити вклад реакції (n, γ) . А щоб врахувати вклад реакції $(\gamma, 2n)$, потрібно проводити кількаразове вимірювання активності зразка з різними часами охолодження, щоб сумарну лінію в області 20 КеВ розділити на 2 компоненти: $^{103\text{m}}\text{Rh}$, $^{101\text{m}}\text{Rh}$.

Крім того, ^{101}Rh дає ще й жорстке випромінювання, що створює інтенсивну комптонівську підкладку в області 20-25 КеВ.

Опромінення зразка родію в геометрії „паралельно пучку гамма-випромінювання” показало, що вкладом реакції (n, γ) на бетатроні можна знехтувати.

Аналіз кривої розпаду лінії 20 КеВ показує, що вона однокомпонентна з періодом напіврозпаду 56 ± 3 хв., тобто вклад реакції $(\gamma, 2n)$ відсутній.

Ядерно-фізичні характеристики реакцій $(\gamma,\gamma')^m$, (γ,n) , $(\gamma,2n)$ та (n,γ) на ядрах ^{103}Rh

Реакція	Поріг, MeV	Продукт	$T_{1/2}$	E_γ , KeV	Вихід, %
$(\gamma,\gamma')^m$	-0,04	^{103m}Rh	57 хв.	20,07–23,2 39,55	77 0,59
(γ,n)	-9,32	^{102}Rh	206 дн.	19,3–20,0 511, 556 1104	48 57 30 9,81
$(\gamma,2n)$	-16,9	^{101}Rh	4,3 дн.	20,2–21,8 127–545	2
(n,γ)	Тепл. нейтр.	^{104m}Rh	43 с. 4,4 хв.	555 20,2 51,4 19,2	2 48 57 53

Результати та їх обговорення

На рисунку 1 приведено залежність виходу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103m}\text{Rh}$ від максимальної енергії гальмівного пучка мікротрона. Виміри проведені у інтервалі 7,3–8,4 MeV. Вказано середньоквадратичні похибки для серій із 4 незалежних вимірів.

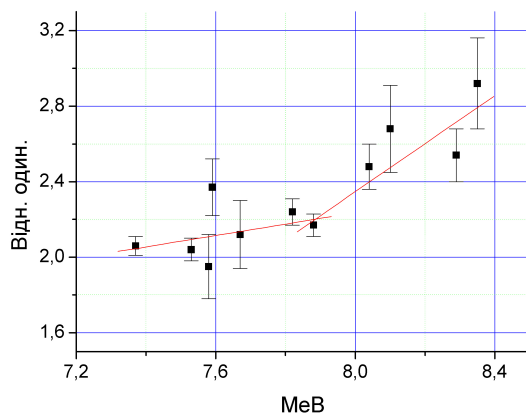


Рис. 1. Залежність виходу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103m}\text{Rh}$ від максимальної енергії мікротрона.

Із аналізу кривої виходу видно, що при енергії $(7,7 \pm 0,2)$ MeV спостерігається злом. Це свідчить про наявність групи активаційних рівнів з великим перерізом заселення ізомерного стану. На схемі енергетичних рівнів для ядра ^{103}Rh , приведеної у [5], показано, що є активаційні рівні з

енергіями 536, 650, 651 KeV, з яких може заселятися ізомерний рівень 39,7 KeV з достатньо високою імовірністю. Опублікована інформація про наявність енергетичних станів при більших енергіях відсутня.

На рис. 2 приведена крива виходу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103m}\text{Rh}$, розрахована згідно даних вимірів, проведених на гальмівному пучку бетатрона. Проводилось 5 незалежних серій вимірів.

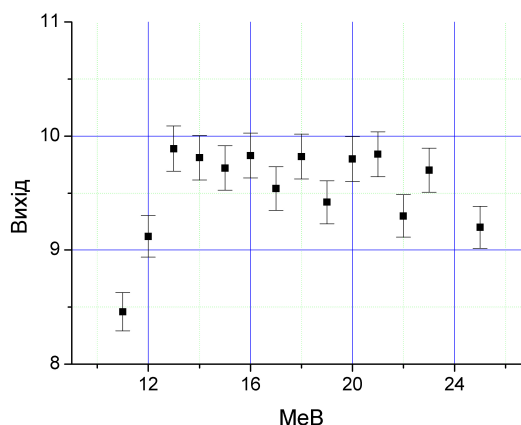


Рис. 2. Залежність виходу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103m}\text{Rh}$ від максимальної енергії бетатрона.

Із отриманої енергетичної залежності виходу розраховано ефективний переріз реакції. Розрахунки проводились по програмі CROSS, котра передбачає екстраполяцію виходу до порогу реакції і подальше згладжування кривої виходу

методом ітерацій. Розрахунок похибок проводився згідно формули (2) приведеної у роботі [7]

$$\delta_{ii} = \left[\sum_{jk} (\mathbf{R}^T \mathbf{W} \mathbf{R} + \alpha \mathbf{E})_{ji}^{-1} \cdot (\mathbf{R}^T \mathbf{W} \mathbf{R})_{jk} \cdot (\mathbf{R}^T \mathbf{W} \mathbf{R} + \alpha \mathbf{E})_{ki}^{-1} \right]^{1/2} \quad (2)$$

де \mathbf{R} та \mathbf{R}^T пряма та транспонована матриці ядра інтегрального рівняння, що пов'язує переріз та вихід реакції; \mathbf{W} – ваги при виміряних значеннях виходу: $W_j = 1/(\Delta Y_j)^2$, де ΔY_j – абсолютна похибка вимірювання j – точки виходу; α – параметр регуляризації; \mathbf{E} – одинична матриця.

На рис. 3 приведено отриману таким чином енергетичну залежність ефективного перерізу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$.

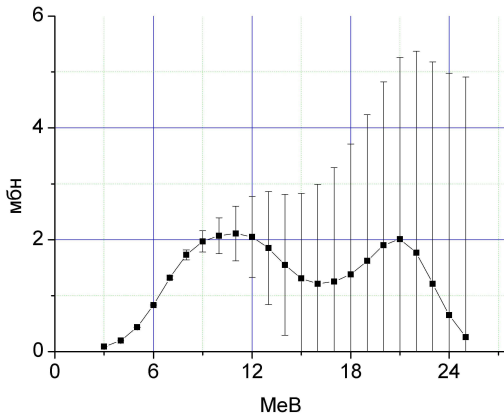


Рис. 3. Залежність диференціального перерізу реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ від енергії.

Як бачимо, в енергетичній залежності є два чітко виділені максимуми при енергіях 10 і 21 MeV. Положення першого максимуму відповідає порогу реакції (γ, n), другий максимум лежить на 3–4 MeV вище енергії, що відповідає максимальному перерізу ядерного поглинання гамма-квантів.

Висновки

У роботі показано, що у випадку реакції $^{103}\text{Rh}(\gamma, \gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ спостерігається група близьких активаційних рівнів при енергіях $7,65 \pm 0,2$ MeV. Вважаємо за доцільне провести виміри виходу реакції у ширшому інтервалі енергій.

Одержана нами залежність перерізу реакції від енергії гамма-квантів узгоджується з опублікованими даними і підтверджує факт існування другого максимуму в перерізі реакції (γ, γ'). Для одержання більш точної величини перерізу реакції в області другого максимуму вважаємо доцільним пошук точніших методів обробки експериментальних даних, одержаних з допомогою гальмінового випромінювання. Можливо, доцільніше розраховувати інтегральні експериментальні перерізи та порівнювати з модельним теоретичними розрахунками.

Література

1. Богданкевич О.В., Лазарева Л.Е., Моисеев А.М. Неупругое рассеяние фотонов на ядрах Rh-103 // ЖЭТФ. – 1960. – Т. 39, вып. 5 (11). – С. 1224-1228.
2. Абрамс И.А., Пелекис Л.Л. Гамма-возбуждение ядерных изомеров // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1968. – Т. 5. – С. 19-27.
3. Lakosi L. Production of long lived isomers by 4 MeV endpoint energy bremsstrahlung // Z. Phys. A – 1966. – Vol. 356 – P. 155-161.
4. Cheng Y., Xia B., Tang C. et all. Generation of long-lived isomeric states via bremsstrahlung irradiation // Hyperfine Interaction. – 2006. – Vol. 167. – P. 833-839.
5. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. – New York: Wiley, 1978. – 1523 p.
6. Penfold A.S., Leiss J.E. // Phys. Rev. – 1959. – Vol. 114. – P. 1332-1337.
7. Кузьменко В.С., Ранюк Ю.Н. Вычисление сечений фотоядерных реакций // Препринт ХФТИ АН УССР. ХФТИ 71–26, Харьков. 1971. С. 15.

STUDY OF THE $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ REACTION

**V.S. Bokhinyuk, O.G. Okunev, O.M. Parlag, M.T. Sabolchiy,
O.M. Fradkin**

Uzhhorod National University, Department of Theoretical Physics
9a, Kapitulna Str., Uzhhorod, 88000, e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

At the bremsstrahlung beam of the betatron and microtrone was measured of the absolute yield of the $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ reactions in the interval of energy 7,2–8,4 and 11–25 MeV. The cross section was calculated. On the yield curve was observation break at the energy 7,65 MeV. Two maximum of cross-section observation at the energies 10 and 21 MeV.

Key words: photonuclear reaction, isomer, rhodium, yield, cross section, betatron, microtrone, bremsstrahlung.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$

**В.С. Бохинюк, А.Г. Окунев, А.М. Парлаг, Н.Т. Саболчий,
А.М. Фрадкин**

Ужгородский национальный университет, кафедра теоретической физики
ул. Капитульная, 9а, Ужгород, 88000, e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

На тормозных пучках бетатрона и микротрона проведены измерения абсолютных выходов реакции $^{103}\text{Rh}(\gamma,\gamma')^{103\text{m}}\text{Rh}$ в интервале энергий 7,2–8,4 и 11–25 МэВ. Рассчитаны выход реакции и дифференциальное сечение. Наблюдается излом в кривой выхода при энергии 7,65 МэВ и два максимума в сечении при энергиях 10 и 21 МэВ.

Ключевые слова: неупругое рассеяние, фотоядерная реакция, изомер, родий, выход реакции, сечение, бетатрон, микротрон, тормозное излучение.