

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНИХ СТАНІВ ЯДЕР КАДМІЮ У ФОТОЯДЕРНИХ РЕАКЦІЯХ

О.В. Кириєнко, А.П. Осипенко, О.М. Парлаг, В.А. Пилипченко,

М.Т. Саболчій, **І.В. Соколюк**, І.В. Хіміч

Ужгородський національний університет, кафедра фізики ядра і елементарних частинок,  
вул. Капітульна, 9а, Ужгород 88000

[nphys@univ.uzhgorod.ua](mailto:nphys@univ.uzhgorod.ua), [vpilip@univ.uzhgorod.ua](mailto:vpilip@univ.uzhgorod.ua)

Методом  $\gamma$ -спектрометрії визначені відношення виходів ізомерів  $^{111m}\text{Cd}$  та  $^{115m}\text{Cd}$  до виходу основного стану  $^{115}\text{Cd}$  у  $(\gamma, n)$ -реакціях на ізотопах  $^{112}\text{Cd}$  та  $^{116}\text{Cd}$  в області максимальних енергій гальмівного  $\gamma$ -випромінювання бетатрона вище гігантського резонансу. Результати підтверджують суттєву роль напівпрямих процесів у  $(\gamma, n)$ -реакціях. Обговорюється перспективність досліджень виходів ізомерів у реакціях фотоподілу.

## Вступ

Дослідження парціальних каналів розпаду E1-гігантського резонансу атомних ядер є важливим джерелом інформації про властивості високозбуджених станів ядер. Одним із методів досліджень у цій області є спектрометрія гамма-квантів із реакцій типу  $(\gamma, x\gamma)$ , в яких формуються ізомерні стани ядер [1]. Ізомерні стани властиві ядрам з незаповненими зовнішніми нуклонними оболонками і описуються комбінаціями хвильових функцій різних оболонкових конфігурацій. Це з одного боку ускладнює інтерпретацію експериментальних даних, але з іншого боку дає можливість глибше зрозуміти взаємодію нуклонів у ядрах. Для формування спрощуючих гіпотез, які б полегшили аналіз, потрібні систематичні експериментальні дані.

Результати ранніх робіт [2] свідчили, що ізомери формуються приблизно однаково у ядерних реакціях, викликаних різними налітаючими частинками. Пізніші роботи [3-5] показали, що ймовірність утворення ізомерних станів, а отже і ізомерні відношення залежать як від енергії збудження і розподілу їх станів по спіну, так і від типу реакцій, які приводять до формування метастабільних рівнів. Різна оболонкова структура основного та ізомерного стану робить ізомерні відношення чутливим інструментом вивчення збу-

дження та розпаду гігантського дипольного резонансу у фотоядерних реакціях.

У роботах [6-9] для  $(\gamma, n)$ -реакцій на ядрах fрг-оболонки виявлено кореляцію між величиною ізомерного відношення  $\eta = Y_h/(Y_h+Y_l)$  та заселеністю нейтронами  $1g_{9/2}$ -підоболонки ( $Y_h$ ,  $Y_l$  – відповідно виходи кінцевих станів з високим і низьким значенням спіну). Для непарно-непарних і парно-непарних ядер заселення ізомерних станів носить однаковий характер, що пояснюється суттєвим вкладом у реакцію механізму напівпрямого фотоефекту.

Дослідження збудження ізомерних станів кадмію цікаве тим, що ізотопи Cd мають числа нейтронів, близькі до числа 64, яке є претендентом на роль додаткового магічного числа.

Як видно з табл. 1, у фотоядерних реакціях типу  $(\gamma, \gamma)$ ,  $(\gamma, n\gamma)$ ,  $(\gamma, pn\gamma)$  та  $(\gamma, 2p\gamma)$  при використанні стабільних мішеней у принципі можливе вивчення формування ізомерів  $^{111m}\text{Cd}$ ,  $^{113m}\text{Cd}$ ,  $^{115m}\text{Cd}$  та  $^{117m}\text{Cd}$ . Крім названих ізомерів, у реакціях фотоподілу важких ядер можливе вивчення також ізомерного стану  $^{119m}\text{Cd}$ .

При формуванні ізомерів у процесі фотоподілу ізомерні відношення можуть відображати зміну властивостей ядер при переході від сідлової точки до точки роздвоєння ядра [10]. Спостереження формування ізомерів кадмію при фотоподілі виявило незвичайну поведінку залежності

ймовірності симетричного поділу від енергії  $\gamma$ -квантів в околі 6 MeV [3,11].

Вивчення розподілу фрагментів поділу актинідів при низьких енергіях збудження по величині спінів проясняє питання впливу ротаційних ступенів вільності, оскільки спіни фрагментів зумовлені статистичним заселенням різних колекти-

вних мод, таких як обертальні, коливальні та коливально-обертальні, разом з впливом кулонівського відштовхування [11,12] і збудження одночастинних (станів). Розподіл високозбуджених станів по величині спінів  $P(J)$  описується формулою:  $P(J) \sim (2J+1) \cdot \exp[-J(J+1)/J_{rms}^2]$ .

Таблиця. 1. Ізотопи кадмію та ізомери, які можуть утворюватись під дією  $\gamma$ -квантів.

A	Розповсюдженість, % чи $T_{1/2}$	Характеристичні $\gamma$ -лінії		Ядро-мішень, (реакція утворення ізомера)	Орієнт. вихід уламка, %
		E, keV	Квант. вихід, %		
106	1,3 %	-	-	-	-
108	0,9 %	-	-	-	-
110	12,5 %	-	-	-	-
111	12,8 %	-	-	-	-
111m	245,4	94,3		$^{111}\text{Cd},(1); ^{112}\text{Cd},(2); ^{113}\text{Cd},(3); ^{113}\text{In},(4)$	
	150,6	30,2			
112	24,1%	-	-	-	-
113	12,2%, $9 \cdot 10^{15}$ р.	-	-	-	-
113m	14 р.	263,7	0,02%	$^{113}\text{Cd},(1); ^{114}\text{Cd},(2); ^{115}\text{Sn},(5)$	
114	28,7%	-	-	-	-
115	53,4 год	527,7	26,7%		0.0097
115m	44,8 доби	933,6	2,1%	$^{116}\text{Cd},(2); \text{U},(6).$	0.00071
116	7.5%	-	-	-	-
117	144 хв	315.3	78.7%		0.006
117m	204 хв	1234.5	11.4%	$^{119}\text{Sn},(5); \text{U},(6).$	
		1433	14.38%		
118	50.3 хв	-	-	-	-
119	2.7 хв	311,4	36.4%		0.005
		293	25%		
119m	1.9 хв	1025	28.6	$\text{U},(6).$	
		720.6	20.7		

Примітка: Ядерні реакції, у яких можуть формуватись ізомерні стани ядер, вказані в дужках: 1 –  $\text{Cd}(\gamma, \gamma)$ ; 2 –  $\text{Cd}(\gamma, n\gamma)$ ; 3 –  $\text{Cd}(\gamma, 2n\gamma)$ ; 4 –  $\text{In}(\gamma, pn\gamma)$ ; 5 –  $\text{Sn}(\gamma, 2p\gamma)$ ; 6 –  $\text{U}, \text{Th}(\gamma, f\gamma)$  – фотоподіл важких ядер.

З незалежних ізомерних відношень шляхом аналізу на основі статистичної моделі можна одержати значення моменту ( $J_{rms}$ ). Значення ( $J_{rms}$ ) розраховується також теоретично на основі термічної рівноваги різних колективних мод після розгляду процесу здійснення багатоканального поділу. Опубліковані дані для реак-

цій  $^{238}\text{U}(\alpha, f)$ ,  $^{238}\text{U}(p, f)$  та  $^{238}\text{U}(\gamma, f)$  [11,12] вказують, що на величину моменту кількості руху фрагмента впливають як енергія збудження у вхідному каналі, так і вхідний момент імпульсу; величина моменту кількості руху фрагмента залежить від структури ядра, зокрема від наближення

до заповнення оболонки, проявляється непарно-парний ефект.

Виявлено також вплив деформації ядра на величини спінів фрагментів, що підтверджується зменшенням спінів з ростом кінетичної енергії уламків чи зменшенням енергії збудження.

Отже, експериментальне дослідження середніх спінів ( $J_{rms}$ ) фрагментів поділу при низьких і середніх енергіях дає інформацію про вплив на поділ параметрів вхідного каналу, впливу ротаційних ступенів вільності, форми подільного ядра у точці розриву і ситуації у момент розділення уламків.

Можна сподіватись, що систематичне вивчення ізомерних відношень для ізотопів кадмію у різних реакціях, викликаних гамма-квантами, може забезпечити повніше розуміння механізмів здійснення різних каналів взаємодії гамма-квантів з цими ізотопами, зокрема оцінку магічності числа 64.

У даній роботі, як перший крок у таких дослідженнях, проведено вимірювання ізомерних відношень,  $Y_m/(Y_m+Y_g)$ , де  $Y_m$  – вихід ізомеру, а  $Y_g$  – вихід основного стану) для ізотопів кадмію  $^{111}\text{Cd}$  та  $^{115}\text{Cd}$  у реакціях  $^{112}\text{Cd}(\gamma, n\gamma)^{111m}\text{Cd}$  та  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n\gamma)^{115m,g}\text{Cd}$  при енергіях гальмівного випромінювання,  $E_{\gamma\text{max}}$ , від 15.5 до 24.5 MeV.

### Експеримент

Для визначення відносних виходів ізомерних станів на пучку бетатрона кафедри фізики ядра і елементарних частинок УжНУ використовувався напівпровідниковий спектрометр  $\gamma$ -квантів. У якості мішеней брались пластинки природного кадмію товщиною 1 мм. Ізотопний склад мішені можна знайти у таблиці 1. Час опромінення мішеней складав від 10 або 120 хвилин. Виходи визначались за інтенсивністю гамма-ліній для  $^{111m}\text{Cd}$ – 245,4 кеВ з квантовим виходом 94,3%;  $^{115g}\text{Cd}$ – 527,7 кеВ з квантовим виходом 26,7%;  $^{115m}\text{Cd}$  – 933,6 кеВ з квантовим виходом 2,1% (табл. 1).

Малий квантовий вихід  $\gamma$ -лінії з енергією 933 кеВ ускладнює дослідження формування ізомерного стану  $^{115m}\text{Cd}$ : вимагає великих тривалостей опромінення та набору спектрів і пред'являє підвищені вимоги до стабільності апаратури. У даній роботі випробувана методика вимірювання ізомерних відношень для пари  $^{115m,g}\text{Cd}$  шляхом спектрометрії  $\beta$ -випромінювання. При цьому зростає ефективність реєстрації випромінювання і усувається проблема малого квантового виходу.  $\beta$ -спектри вимірювались з допомогою сцинтиляційного спектрометра з органічним сцинтилятором. Ціна каналу спектрометра та його ефективність визначалась шляхом підгонки форми експериментального спектру від стронцій-ітрієвого  $\beta$ -джерела до еталонного спектру. Для визначення ізомерного відношення вимірювалась часова залежність інтенсивності  $\beta$ -випромінювання. На рис. 1. показана залежність логарифму інтенсивності  $\beta$ -променів від часу.

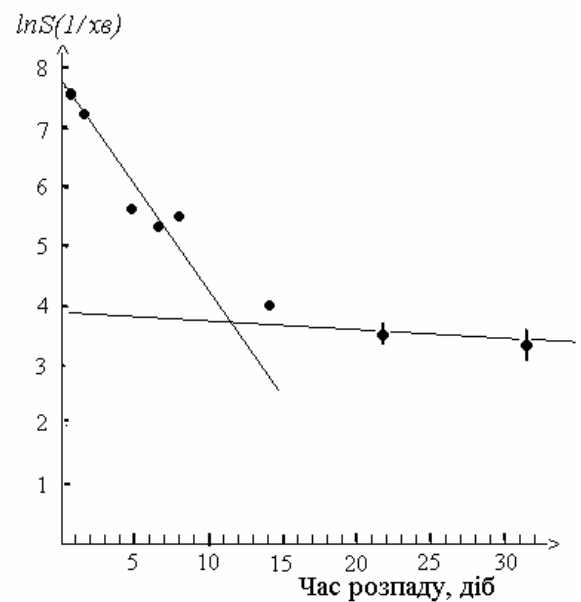


Рис. 1. Залежність логарифму інтенсивності  $\beta$ -променів, які випромінює зразок природного кадмію, опроміненого гамма-квантами, від часу витримки після опромінення.

Розклад спектру на 2 групи дозволив ідентифікацію періодів напіврозпаду двох груп  $\beta$ -часток з періодами  $42,1 \pm 4,4$  доби і  $54 \pm 5$  годин. Перша відповідає  $\beta$ -випро-

мінюванню ізомерного стану, а друга – основного стану  $^{115}\text{Cd}$ .

У роботі проведено перевірку можливого вкладу у лінію основного стану з енергією 527 кеВ реакції  $^{114}\text{Cd}(n, \gamma)^{115\text{m,g}}\text{Cd}$  за рахунок нейтронів, які утворюються при взаємодії високоенергетичних квантів з матеріалом захисту. Переріз утворення основного стану  $^{115\text{g}}\text{Cd}$  складає 0,3 барн, а ізомерного  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  – 0,036 барн [13]. Інтенсивність потоку теплових нейтронів у районі мішені оцінювалась по інтенсивності  $\gamma$ -лінії ізомерного переходу  $^{116\text{m}}\text{In}$  з енергією 1294 кеВ (переріз реакції  $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$  складає близько 162 барни [13]). Експериментально оцінений вклад від  $(n, \gamma)$ -реакції склав менше 3% і не враховувався.

У випадку ізомерної пари  $^{115\text{m,g}}\text{Cd}$  ізомерні відношення розраховувались стандартним чином [5]. Оскільки основний стан  $^{111\text{g}}\text{Cd}$  стабільний, для аналізу енергетичної залежності вихід  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  порівнювався з виходом основного стану  $^{115\text{g}}\text{Cd}$ .

У табл. 2 та на рис. 2 наведені величини відношень виходів ізомерів  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  та  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  до виходу основного стану  $^{115\text{g}}\text{Cd}$ . Виявлене помітне зростання ізомерного відношення для  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  при  $E_{\gamma\text{max}} > 20$  МеВ, що пов'язується з проявленням реакції  $^{113}\text{Cd}(\gamma, 2n)^{111\text{m}}\text{Cd}$  та зменшенням перерізу реакції  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$  за рахунок конкуренції реакцій  $(\gamma, 2n)$  та  $(\gamma, np)$ .

Таблиця 2. Відношення виходів ізомер  $^{111\text{m}}\text{Cd}(V_{111} = Y_{111\text{m}}\text{Cd} / Y_{115\text{g}}\text{Cd})$  та  $^{115\text{m}}\text{Cd}(V_{115} = Y_{115\text{m}}\text{Cd} / Y_{115\text{g}}\text{Cd})$  до виходу основного стану  $^{115\text{g}}\text{Cd}$ .

$E_{\gamma\text{max}}$ , МеВ	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5	24.5
$V_{111}$	0,09	0,17	0,21	0,25	0,27	0,38	0,38	0,45	0,28	0,33
$V_{115}$	-	-	-	-	0,10± 0,01	0,106± 0,020	0,135± 0,018	-	0,168± 0,020	-

Примітка: Похибки визначення ізомерних відношень для  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  складають  $\leq 10\%$ .

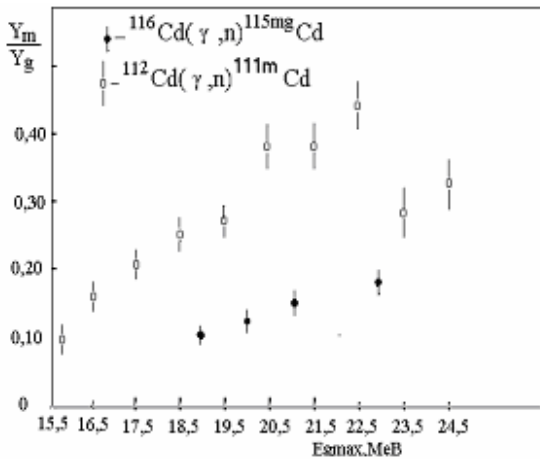


Рис. 2. Ізомерні відношення виходів  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  та  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  до виходу основного стану  $^{115\text{g}}\text{Cd}$ .

Розрахунок ізомерних відношень у межах статистичної теорії [1] з використанням даних про проникності нейтронів з [14] та описом збуджених густини станів у межах моделі Фермі-газу дають значно

вищі значення відношень. При цьому енергетична залежність носить монотонний характер. Це узгоджується з припущенням про важливу роль напівпрямого механізму формування ізомерних станів [1].

### Висновки

Одержане співвідношення ізомерних відношень для  $^{111\text{m}}\text{Cd}$  та  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  проявило нетиповий характер, що можна розглядати як підтвердження властивості магічності числа 64. Це вказує на необхідність подальших комплексних експериментальних досліджень ізомерних відношень для ізотопів кадмію у різних фотоядерних реакціях.

Дані про енергетичну залежність ізомерних відношень для ізотопів кадмію можуть бути корисними при визначенні ізотопного складу зразків кадмію.

### Література

1. Биган З.М., Мазур В.М., Торич З.З. Изомерные отношения в реакциях  $(\gamma, n)$  на тяжелых ядрах. // Препринт КИЯИ-84-10.- Киев, 1984.- 16 с.
2. Carver J.H., Coote G.E., Sherwood T.P. Isomeric  $(\gamma, n)$  cross-section ratios and the spin dependence of nuclear level density.// Nucl. Phys.- 1962.- V.37, 4.- P.449-456.
3. Мазур В.М., Соколюк И.В., Биган З.М., Кобаль И.Ю., Сычев С.И. // Препринт КИЯИ-91-2.- Киев, 1991.- 12 с.
4. Мазур В.М., Соколюк И.В., Биган З.М. Поперечные сечения реакции  $(\gamma, n)^m$  для ядер  $^{78,80,82}\text{Se}$  в области гигантского E1-резонанса. // ЯФ.- 1991.- Т.54, вып.4 (10).- С.895-900.
5. Желтоножский В.А., Мазур В.М., Решитько С.В., Соколюк И.В. // Исследование реакции  $(\gamma, n)^m$  для ядер  $74 < A < 90$ . // УФЖ.- 1992.- Т.37, №11.- С.1628-1632.
6. Мазур В.М., Соколюк И.В., Бохинюк В.С., Биган З.М. Збудження ізомерних станів ядер в реакції  $(\gamma, n)$  на ядрах фр-оболонки. // Збірник доповідей ювілейної конференції «ІЕФ-93».- Ужгород, 1993.- С.173-176.
7. Биган З.М., Мазур В.М., Соколюк И.В. Сечение образования изомеров  $^{87m}\text{Sr}$ ,  $^{137m}\text{Ba}$  в реакциях  $(\gamma, \gamma')$  и  $(\gamma, n)$ . // Препринт КИЯИ-86-54.- Киев, 1986.- 16 с.
8. Биган З.М., Мазур В.М., Соколюк И.В. Заселение низколежащих состояний  $2p1/2$  в реакциях  $(\gamma, n)$  на ядрах замкнутой оболочки  $N=50$  в интервале энергий 10-20 МэВ. // УФЖ.- 1990.- Т.35, №4.- С.509-514.
9. Мазур В.М., Бохинюк В.С., Биган З.М., Соколюк И.В. Фотовозбуждение изомерных состояний в реакции  $(\gamma, n)$  на ядрах  $^{81}\text{Br}$  и  $^{121}\text{Sb}$  в области 10-25 МэВ. // УФЖ.- 1992.- Т.37, №11.- С.1632-1635.
10. Вишневикий И.Н., Желтоножский В.А., Решитько С.В. Измерение изомерных отношений в ядрах-продуктах деления  $^{232}\text{Th}$ . // Известия АН. Серия физ.- 1997.-Т.61, №1.- С.102-105.
11. Gangrsky Yu.P., Mishinsky G.V., Maslova M.Yu., Penionzhkevich Yu.E., Szollos O., Zhemienik V.I. Independent yields of Kr and Xe isotopes for the photofission of heavy nuclei. // Preprint JINR E15-2002-147.- Dubna, 2002.- 20 p.
12. Naik H., Dange S.P., Singh R.J., Das S.K., Guin R. Some important aspects of fragment angular momentum in medium energy fission of  $^{238}\text{U}$ . // Nuclear Physics A.- 1999.- V.648.- P.45-63.
13. Радиационный захват нейтронов: Справочник. / Т.С.Беланова, А.В.Игнатюк и др.- М.: Энергия, 1986.- 248 с.
14. Марчук Г.И., Колесов В.Е. Применение численных методов для расчета нейтронных сечений.- М.: Атомиздат, 1970.- 304 с.

## INVESTIGATION OF THE CADMIUM NUCLEI ISOMERS STATE EXCITATION IN THE PHOTONUCLEAR REACTIONS

A.V. Kyryjenko, A.P. Osipenko, A.M. Parlag, V.A. Pylypchenko,  
N.T. Sabolchiy, I.V. Sokolyuk, I.V. Khimich

Uzhgorod National University, Chair of Nuclear Physics and Elementary Particles,

9a, Kapitulna str., Uzhgorod 88000

[nphys@univ.uzhgorod.ua](mailto:nphys@univ.uzhgorod.ua), [vpilip@univ.uzhgorod.ua](mailto:vpilip@univ.uzhgorod.ua)

The isomer  $^{111m}\text{Cd}$  and  $^{115m}\text{Cd}$  yield to the ground state  $^{115}\text{Cd}$  yield ratios in  $^{112,116}\text{Cd}(\gamma, n)$ -reactions at energy region some higher then giant resonanse energy was determined by  $\gamma$ -spectrometry method. The results confirm an essential part of semidirect processes in  $(\gamma, n)$ -reactions. The perspective of the investigations of the Cd isomeric state yields in photofission reactions is discussed.