

ПЕРЕРІЗ РЕАКЦІЇ $(\gamma, n)^m$ ДЛЯ ЯДРА ^{116}Cd В ОБЛАСТІ ГІГАНТСЬКОГО Е1-РЕЗОНАНСУ

В.М. МАЗУР,¹ Д.М. СИМОЧКО,¹ З.М. БІГАН,¹ Т.В. ПОЛТОРЖИЦЬКА,² П.С. ДЕРЕЧКЕЙ²

¹Інститут електронної фізики НАН України

(Вул. Університетська, 21, Ужгород 88016; e-mail: nuclear@email.uz.ua)

²Ужгородський національний університет

(Вул. Волошина, 54, Ужгород)

УДК 592
© 2011

В області енергій гігантського дипольного резонансу досліджено залежність ізомерних відношень виходів та перерізу від енергії гамма-квантів в реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m.g}\text{Cd}$. Одержані експериментальні результати порівняно з розрахунками, проведеними за допомогою програмного пакета TALYS-1.0.

Головною особливістю в перерізах поглинання гамма-квантів ядрами є гігантський дипольний резонанс (ГР). В області середніх і важких ядер це різко виражений максимум при енергіях 14–20 МеВ і шириною 4–8 МеВ. Експериментальні дослідження різних властивостей ГР в тому числі процесів його розпаду, відіграли визначальну роль у формуванні сучасних уявлень про колективні збудження в ядрах. До теперішнього часу гігантський дипольний резонанс для ізотопів кадмію залишається вивченим недостатньо. Було проведено дослідження у вивченні перерізів повного поглинання гамма-квантів методом підсумовування парціальних реакцій на мішенях природного ізотопного складу [1], а також вивчено переріз реакції $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111m}\text{Cd}$ [2].

Систематичні дослідження перерізів парціальних каналів розпаду ГР для ядра ^{116}Cd не проводили. Існує декілька робіт з вивчення ізомерних відношень

виходів $d = Y_m/Y_g$ для реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m.g}\text{Cd}$ в окремих енергетичних точках вище енергії максимуму гігантського резонансу [3, 4] (тут, відповідно, Y_m , Y_g – виходи збудження ізомерного і основного станів).

Дану роботу присвячено дослідженню у залежності від енергії гамма-квантів ізомерних відношень та перерізу реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m.g}\text{Cd}$. Основні і низькорозташовані збуджені стани дочірнього ядра ^{115}Cd формуються підоболонками $2d_{5/2}$, $2d_{3/2}$, $3s_{1/2}$ та $1h_{11/2}$. При цьому підоболонка $1h_{11/2}$ формує ізомерний стан. Експерименти проведено в Інституті електронної фізики НАН України на пучку гальмівних гамма-квантів прискорювача електронів – мікротрона М-30 в діапазоні енергій 8–20 МеВ з кроком $\Delta E = 0,5$ МеВ. Виведений з мікротрона пучок електронів падав на гальмівну танталову мішень товщиною 0,5 мм. Для контролю струму пучка використовували монітор вторинної емісії, прокалібрований циліндром Фарадея. Енергію прискорених електронів визначали величиною провідного магнітного поля, яке контролювали методом ядерного магнітного резонансу. Досліджувані мішені кадмію природного ізотопного складу були у вигляді металічних пластинок діаметром 30 мм і вагою 1,5 г. Спектроскопічні характеристики досліджуваних ядер: спірність основного і ізомерного стану J^π , періоди їх напіврозпаду $T_{1/2}$, енергію реєстрованого гамма-переходу E_γ , кількість гамма-квантів на акт розпаду I , поріг (γ, n) реакції для материнського ядра B_n взято з робіт [5, 6] і наведено в таблиці. Ідентифікацію заселення ізомерного рівня ^{115m}Cd здійснено за лінією 935 кеВ.

Спектроскопічні характеристики ядра ^{115}Cd

Ядра	J^π	$T_{1/2}$	E_γ , МеВ	I , %	B_n , МеВ
^{115g}Cd	1/2 ⁺	53,46 год	0,336	47	8,7
^{116m}Cd	11/2 ⁻	44,6 діб	0,935	1,95	–

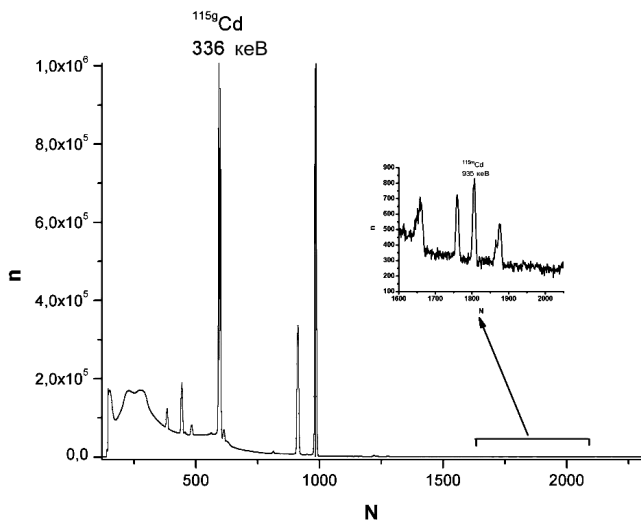


Рис. 1. Ділянка експериментального гамма-спектра від опромінення мішені Cd

Для вивчення реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$ використовували активаційну методику. Наведена після опромінення мішені гамма-активність вимірювалась за допомогою спектрометра на базі Ge(Li) детектора об'ємом 100 см^3 з роздільною здатністю $\approx 3,0$ кеВ для лінії 1,173 МеВ кобальту-60. Ділянку експериментального гамма-спектра від опроміненої при $E_{\gamma_{\text{max}}} = 17$ МеВ кадмієвої мішені (час опромінення становив 2 год, час охолодження 24 год, час вимірювання 24 год) наведено на рис. 1. На цьому рисунку введено такі позначення: N – номер каналу аналізатора, n – кількість імпульсів у каналі.

Спеціальну увагу було приділено вивченню і врахуванню спектрів природного фону. Оскільки у фоновому спектрі методами пасивного захисту не вдалося повністю подавити лінію 934,8 кеВ, випромінювану ізотопом ^{214}Bi , який знаходиться в радіоактивному ряді ^{238}U , то цю обставину необхідно було врахувати при багатоденних вимірах спектрів розпаду ^{115m}Cd .

Основний стан ^{115g}Cd нестабільний, і тому ізомерне відношення виходів $d = Y_m/Y_g$ для реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$ можна визначити безпосередньо в експерименті. Розрахунки ізомерного відношення здійснювали за формулою [7]:

$$d(E_{\gamma_{\text{max}}}) = \frac{Y_m}{Y_n} = \frac{Y_m}{Y_m + Y_n} = \frac{1}{1 + 1/d} = C \frac{N_m \lambda_m \varphi_g f_g}{N_g \lambda_g \varphi_m f_m}, \quad (1)$$

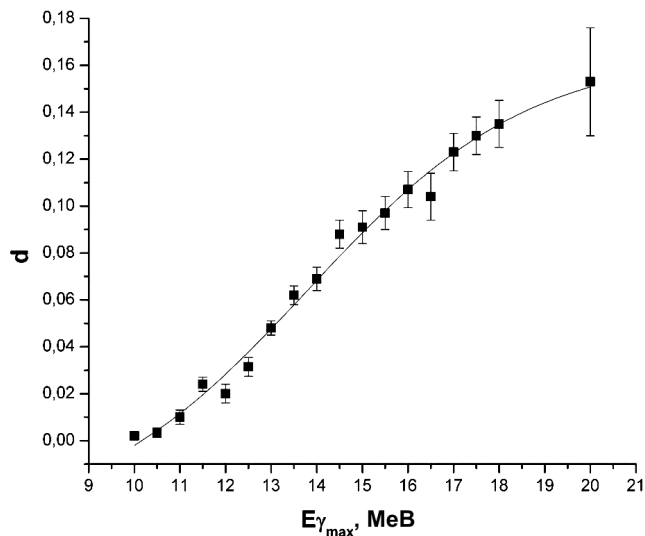


Рис. 2. Експериментальне ізомерне відношення для реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$

де $\lambda_{m,g}$ – сталі розпаду ізомерного та основного станів, $N_{m,g}$ – число зареєстрованих імпульсів відповідних станів, C – коефіцієнт, що враховує прорахунки і накладання імпульсів, $\varphi_{m,g} = \kappa_{m,g} \alpha_{m,g}$; $\kappa_{m,g}$ – коефіцієнт реєстрації гамма-ліній розпаду ізомерного і основного стану, $\alpha_{m,g}$ – інтенсивність ліній, p – коефіцієнт розгалуження, $t_{\text{irr}}, t_{\text{cool}}, t_{\text{meas}}$ – часи опромінення, охолодження та вимірювання, $f_{m,g}$ – часова функція: $f_{m,g} = [1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_{\text{irr}})] \exp(-\lambda_{m,g} t_{\text{cool}})$. Стандартний час вимірювання одного значення ізомерного відношення становив одну добу. Одержані таким чином ізомерні відношення виходів d наведено точками на рис. 2. Вказані похибки – середньоквадратичні. Як видно з рисунка, вище порога реакції $(\gamma, n)^m$ ізомерне відношення d для ^{115}Cd , як функція енергії $E_{\gamma_{\text{max}}}$, швидко наростає і в області 20 МеВ досягає насичення. Суцільною кривою на рис. 2 наведено результат апроксимації експериментальних даних кривою Больцмана:

$$y = A + (B - A) / [1 + \exp((E - E_0) / \Delta E)], \quad (2)$$

де A, B, E_0 і ΔE – параметри. Апроксимацію здійснювали методом найменших квадратів. Оптимальної підгонки досягнуто при таких значеннях параметрів: $A = 0,16555 \pm 0,01183$, $B = -0,03714 \pm 0,02003$, $E_0 = 13,80461 \pm 0,399$ та $\Delta E = 2,43724 \pm 0,47554$.

Як впливає з аналізу спектрометричних даних [6], рівні, які могли б слугувати першими активаційними для ізомерного стану з $J^\pi = 11/2^-$ для ^{115}Cd , є рівні з енергією $E = 393,9$ кеВ і $J^\pi = 7/2^-$ та рівень з

$E = 417,2$ кеВ і $J^\pi = 9/2^-$. Розпадаючись, ці рівні з ймовірністю 100% заселяють ізомерний стан. Однак у припороговій області фотонейтронної реакції заселення рівня з $J^\pi = 9/2^-$ швидше за все відбуватися не буде, оскільки для заселення цього рівня вилітаючі нейтрони мають забирати момент не менший $l = 4$. Згідно з розрахунками [8] виліт таких нейтронів у кількості 1–2% можливий лише за умови, що їх енергія становитиме 1,5 МеВ. Для заселення рівня з $J^\pi = 7/2^-$ нейтрони повинні забрати з собою момент рівний $l = 2$. Для появи нейтронів з такими моментами достатньо, щоб їх енергія була всього 250–300 кеВ [8], що в межах похибок узгоджується з одержаними експериментальними значеннями d в припороговій області. Другим активаційним станом може бути рівень з $E = 719,9$ кеВ і $J^\pi = 5/2^-$, який майже з 100% імовірністю через рівні з $E = 393,9$ кеВ і $E = 417,2$ кеВ заселяє ізомерний стан. Використовуючи одержані експериментальні ізомерні відношення d для реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$ (рис. 2) і маючи повний переріз (γ, n) реакції на ізотопах кадмію [1], нами методом оберненої матриці [9] розраховано переріз реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$. Отриманий експериментальний переріз показано точками на рис. 3. Як видно з рисунка – це одnogорба крива з максимумом при енергії $E_0 = 16,1$ МеВ. Порівняння одержаного перерізу з повним перерізом (γ, n) реакції [1] показує, що переріз $(\gamma, n)^m$ реакції дещо зсунутий в бік більших енергій, що зумовлено видом функції $d = f(E_{\gamma_{\text{max}}})$. Суцільною кривою на рис. 3 наведено результат апроксимації експериментального перерізу кривою Лоренца вигляду

$$\sigma(E) = \sigma_0(\Gamma_0^2 E^2) / [(E^2 - E_0^2)^2 + \Gamma_0^2 E^2]. \quad (3)$$

Тут σ_0 , E_0 , Γ_0 – параметри. Апроксимацію здійснено методом найменших квадратів. У результаті одержано такі значення параметрів $\sigma_0 = (37,85 \pm 0,93)$ мб, $E_0 = (16,13 \pm 0,041)$ МеВ, $\Gamma_0 = (4,6 \pm 0,16)$ МеВ. Наведений на рис. 3 експериментальний переріз реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$ дозволяє оцінити, використовуючи повний переріз (γ, n) реакції, ізомерні відношення перерізів $r = \sigma_m / \sigma_{\text{tot}}$. Визначення r проводилося в околі максимуму перерізу, тобто в області, де відносна похибка мінімальна і становить близько 16%. Одержані таким чином ізомерні відношення для ^{115}Cd при енергіях 15,5; 16,0; 16,5 МеВ становлять, відповідно, 0,156; 0,171; 0,184.

Для порівняння експериментальних результатів з теоретичними даними нами проведено розрахунок перерізу реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$ за допомогою програмного пакета TALYS – 1,0 [10]. Пакет є зведенням

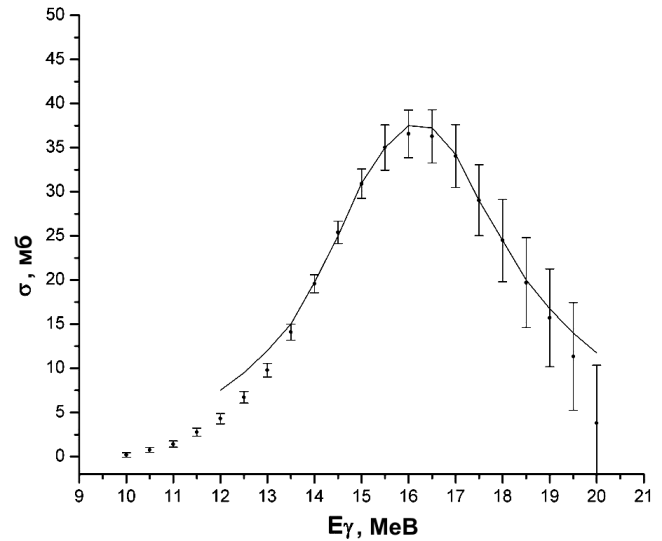


Рис. 3. Переріз збудження ізомерного стану в реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$

в одному кодї більшості сучасних моделей, які описують всі стадії протікання ядерних реакцій, що забезпечує достатньо повний і точний опис цих процесів. При розрахунку використовували таку схему: на ядро-мішень з параметрами (Z_i, N_i) і спін-парністю (J_i, π_i) падає налітаючий гамма-квант з енергією E_γ , формується компаунд-ядро з енергією збудження E_x ($E_x = E_\gamma$) і спектром можливих значень спіну та парності (J_c, π_c) . Обчислено повний переріз фотопоглинання σ_{tot} . Розпад збудженого ядра відбувається або за механізмом напівпрямих процесів (частка яких становить 1–14% в залежності від природи ядра та енергії збудження), або за статистичним механізмом Хаузера–Фешбаха [11]. Емісію нейтронів розраховано на конкретні рівні (зони) дочірнього ядра з урахуванням коефіцієнтів проникності T_l , обчислених за оптичною моделлю. При цьому до енергії збудження дочірнього ядра $E = 3$ МеВ використовували інформацію про спектроскопічні та розпадні характеристики дискретних рівнів ядер із бази даних RIPL-3. При вищих енергіях збудження спектр описували модельною густиною рівнів $\rho(E_x, J, \pi)$ і розбивали на певну кількість енергетичних зон. Розпад збудженого стану на зону в неперервному спектрі розраховували з використанням ефективного коефіцієнта проникності.

У наших розрахунках для опису густини рівнів неперервного спектра ρ було використано два варіанти. У першому для опису ρ використовували зміщену за енергією модель Фермі-газу [12], в другому варіанті використовували значення густин ядерних рівнів, розрахованих у межах комбінаторної мікро-

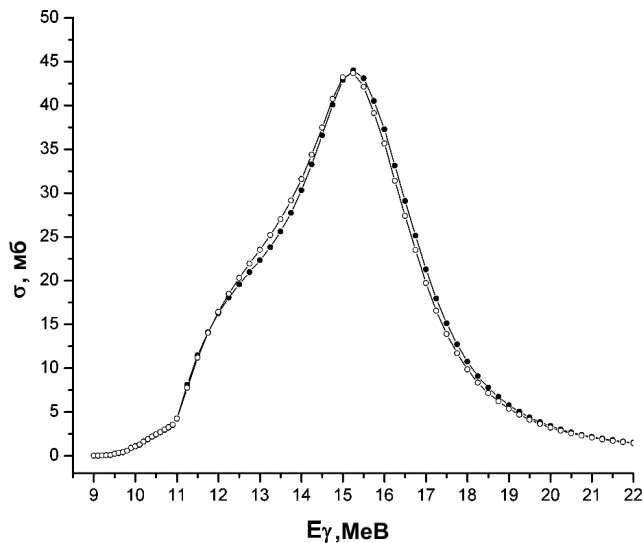


Рис. 4. Розрахунковий переріз збудження ізомерного стану в реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$

скопичної моделі [13]. Результати розрахунків наведено на рис. 4. Чорними кружечками наведено дані, одержані при використанні густини рівнів з моделі Фермі-газу, білими кружечками – з комбінаторної моделі. Обидва розрахунки добре узгоджуються між собою. Порівняння розрахунків з експериментом показує, що теорія задовільно описує експериментальний переріз збудження ізомерного стану $11/2^-$ в реакції $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$, положення та величину його максимуму. Наявність у розрахунках невеликої особливості в перерізі в околі енергії 12 MeV може бути пов'язана або з недостатньо точним врахуванням коефіцієнтів розгалуження під час розгляду розпадів дискретних рівнів, або з некоректним алгоритмом “зшивки” розрахунків, отриманих для дискретного та неперервного спектрів.

1. A.V. Varlamov, V.V. Varlamov and P.S. Rudenko *et al.*, *Atlas of Giant Dipole Resonance* (IAEA, INDC (NDS)-394, Vienna, 1999).
2. В.М. Мазур, З.М. Біган, Д.М. Симочко, УФЖ **52**, 744 (2007).
3. А.Г. Белов, Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев и др., ЯФ **59**, 585 (1996).
4. Н.А. Демехина, А.С. Дангулян и Г.С. Карапетян, ЯФ **65**, 390 (2002).
5. E. Browne and R. Firestone, *Table of Radioactive Isotopes* (Wiley, New York, 1986).

6. J. Blachot, Nucl. Data Sheets **104**, 967 (2005).
7. R. Vänška and R. Rieppo, Nucl. Instr. Meth. **179**, 525 (1981).
8. Г.М. Марчук, В.Е. Колесов, *Применение численных методов для расчета нейтронных сечений* (Атомиздат, Москва, 1970).
9. O.V. Bogdankevich and F.A. Nikolaev, *Methods in Bremsstrahlung Research* (Academic Press, New York, 1996).
10. A.J. Koning, S. Hilaire, and M.C. Duijvestijn, in *Proceed. of the Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology* (Nice, 2007), p. 211.
11. W. Hauser and H. Feshbach, Phys. Rev. **87**, 336 (1952).
12. W. Dilg, W. Schantl, H. Vonach *et al.*, Nucl. Phys. **43**, 1446 (1973).
13. S. Hilaire and S. Goriely, Nucl. Phys. A **779**, 63 (2006).
Одержано 13.06.10

СЕЧЕНИЕ РЕАКЦИИ $(\gamma, n)^m$ ДЛЯ ЯДРА ^{116}Cd В ОБЛАСТИ ГИГАНТСКОГО Е1-РЕЗОНАНСА

В.М. Мазур, Д.М. Симочко, З.М. Біган,
Т.В. Полторжыцкая, П.С. Деречкей

Резюме

В области энергий гигантского дипольного резонанса исследована зависимость изомерных отношений выходов и сечения от энергии гамма-квантов в реакции $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$. Полученные экспериментальные результаты сравнены с расчетами, проведенными с помощью программного пакета TALYS-1.0.

CROSS SECTION OF THE $(\gamma, n)^m$ REACTION FOR ^{116}Cd NUCLEUS IN THE REGION OF GIANT E1-RESONANCE

V.M. Mazur¹, D.M. Symochko¹, Z.M. Bigan¹,
T.V. Poltorzhyska², P.S. Derechkei²

¹Institute of Electron Physics, Nat. Acad. of Sci. of Ukraine
(21, Universytets'ka Str., Uzhgorod 88016, Ukraine;
e-mail: nuclear@email.uz.ua)

²Uzhhorod National University
(54, Voloshina Str., Uzhgorod 88000, Ukraine)

Summary

The isomeric yield ratios and the cross section of the reaction $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m,g}\text{Cd}$ have been studied as functions of the energy of gamma quanta. The obtained experimental results have been compared with calculations performed with the use of the TALYS-1.0 software.