

В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей*

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

*Відповідальний автор: derecskei89@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНОГО СТАНУ 11/2⁻ ЯДРА ¹³⁹Ce В РЕАКЦІЇ (γ, n)^m В ОБЛАСТІ ГІГАНТСЬКОГО E1-РЕЗОНАНСУ

У діапазоні енергій 11 - 18 MeV із кроком 0,5 MeV виміряно ізомерні відношення виходів Y_m/Y_g в реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m,g}\text{Ce}$. Методом оберненої матриці проведено оцінку експериментального перерізу реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m}\text{Ce}$. Отриманий переріз збудження ізомерного стану ядра ^{139}Ce порівнюється з результатами теоретичних розрахунків, проведеними за допомогою програмного пакета TALYS-1.6.

Ключові слова: ізомерне відношення, переріз, гігантський дипольний резонанс, гальмівний гамма-спектр.

Вступ

Важливим джерелом інформації про властивості збуджених станів досліджуваних ядер є ядерні реакції з різними налітаючими і вилітаючими частинками. Одним із напрямків таких досліджень є вимірювання ізомерних відношень, тобто відношення перерізів (виходів), утворення у відповідній реакції кінцевих ядер в ізомерному m і основному g станах. Ці відношення залежать від спінів основного та ізомерного станів ядра мішені та від кутового моменту, принесеного в ядро, який визначається властивостями та енергією налітаючої частинки. Великий вплив на ізомерне відношення справляє також механізм реакції, що вивчається, і властивості рівнів дочірнього ядра як в області неперервного спектра при високих енергіях збудження, так і низькозбуджених дискретних рівнів, через які відбувається заселення основного та ізомерного станів. Тому вимірювання ізомерних відношень дозволяє робити висновки про механізм реакції та про параметри співвідношень, що описують статистичні властивості рівнів, а саме залежності їхньої густини від енергії збудження та кутового моменту, одержувати інформацію про спектроскопічні властивості рівнів, зв'язаних радіаційними переходами безпосередньо з ізомерним станом.

Одержана інформація буде тим більш однозначною, чим простіша реакція використовується для її одержання. Зразком таких простих реакцій є фотоядерні реакції з вильотом однієї частинки (γ, γ') , (γ, n) , (γ, p) в області гігантського E1-резонансу 10 - 18 MeV. У цих реакціях привноситься чітко визначений кутовий момент, а дисперсія моментів після випромінювання частинки мала – 2h - 3h. Усе це спрощує аналіз величин одержаних експериментальних ізомерних відношень і в результаті визначення з нього згаданих ядерних параметрів, у тому числі параметрів статистичної теорії.

Значна частина фотоядерних даних, отриманих на теперішній час, одержана на гальмівних гамма-пучках електронних прискорювачів. Безпосереднім експериментальним результатом таких досліджень є виходи фотоядерних реакцій $Y(E_{\gamma_{\max}})$, які зв'язані з перерізом цієї реакції $\sigma(E)$ інтегральним рівнянням

$$Y(E_{\gamma_{\max}}) = k \int_{E_{th}}^{E_{\gamma_{\max}}} \sigma(E) \Phi(E, E_{\gamma_{\max}}) dE. \quad (1)$$

У наведеній формулі k – нормуючий множник; E_{th} – поріг реакції; $E_{\gamma_{\max}}$ – максимальна енергія гальмівного спектра; $\Phi(E, E_{\gamma_{\max}})$ – спектр гальмівного гамма-випромінювання.

Збудження ізомерних станів у фотоядерних реакціях достатньо інтенсивно досліджувалося в реакціях $(\gamma, \gamma')^m$, $(\gamma, n)^m$. Перелік робіт по цій тематиці наведено в оглядах [1, 2], де показано вплив на ізомерне відношення різниці спінів основного та ізомерного станів, структури дискретних рівнів кінцевих ядер [3 - 6], а також оцінюються роль напівпрямих процесів.

Метою даної роботи є вивчення процесу збудження ізомерного стану 11/2⁻ ¹³⁹Ce в реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m}\text{Ce}$ методом ізомерних відношень виходів $d = Y_m/Y_g$. До теперішнього часу систематичних досліджень залежності ізомерного відношення виходів від максимальної енергії гальмівних гамма-квантів $d = f(E_{\gamma_{\max}})$ для ізотопу ¹⁴⁰Ce в області гігантського E1-резонансу не проводилося. Ядро ¹⁴⁰Ce – магічне з числом нейтронів $N = 82$. Ізомерний стан дочірнього ядра, що збуджується в реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m,g}\text{Ce}$, формується підоболонкою $1h_{11/2}$, а основний – підоболонкою $1s_{1/2}$.

© В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей, 2017

Експериментальна установка та вимірювання

Вивчення ізомерних відношень у реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m,g}}\text{Ce}$ проводилося на гальмівному гамма-пучку мікротрона М-30 із кроком $\Delta E = 0,5$ МеВ в інтервалі енергій 10 - 18 МеВ. Напруженість провідного магнітного поля мікротрона, а так само й енергія прискорених електронів контролювалися методом ядерного магнітного резонансу. Середній струм прискорених електронів утримувався на рівні 5 мкА. В якості гальмівної мішені служила танталова пластинка товщиною 0,5 мм. Експериментальні мішені були виготовлені з порошку високочистого окису церію, запресованого в тонкостінні капролонові касети діаметром 20 мм і масою 2 г.

В експерименті використовувалась активаційна методика. Час опромінення дослідних зразків становив 2 год при енергіях поблизу порога реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$ і 20 хв при $E_{\gamma\text{max}} = 15$ -

18 МеВ. Тривалість охолодження становила 1 хв для вимірювання гамма-лінії від розпаду ізомера і 20 хв для вимірювання розпаду основного стану, час вимірювання якого тривав 22 - 24 год. Наведена гамма-активність опромінених зразків вимірювалася в хороших фонових умовах спектрометром із високою роздільною здатністю на базі HP Ge-детектора об'ємом 175 см^3 і багатоканального аналізатора фірми ORTEC, зв'язаного з комп'ютером для накопичення й обробки даних. Роздільна здатність детектора ~ 2 кеВ для лінії 1332 кеВ ^{60}Co .

Спектроскопічні характеристики досліджуваних ізоотопів, наведені в таблиці, бралися з роботи [6]. Тут J^π – спін-парність станів, V_n – поріг (γ, n) реакції материнського ядра ^{140}Ce , $T_{1/2}$ – період напіврозпаду, E_{iso} – енергія ізомерного рівня, E_γ – енергія аналітичної лінії, α – інтенсивність гамма-переходу.

| Ізотоп | J^π | V_n , МеВ | $T_{1/2}$ | E_{iso} , кеВ | E_γ , кеВ | α (%) |
|---------------------------|----------|-------------|-----------|------------------------|------------------|--------------|
| $^{139\text{g}}\text{Ce}$ | $1/2^+$ | 9,2 | 137 дн | 754,2 | 754,2 | 80,1 |
| $^{139\text{m}}\text{Ce}$ | $11/2^-$ | | 548 с | | 165,8 | 92 |

Фрагмент експериментального апаратного спектра зразка CeO_2 , опроміненого при максимальній енергії гальмівного спектра 15,5 МеВ наведено на рис. 1, де N – число імпульсів в каналі аналізатора.

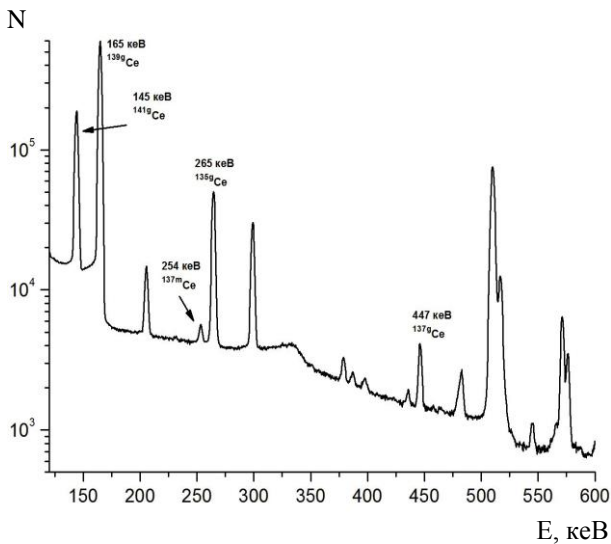


Рис. 1. Ділянка апаратного спектра від опроміненого зразка CeO_2 .

Ізомерне відношення d у даній роботі визначалося за співвідношенням [7]

$$d = \frac{\lambda_g - \lambda_m}{\left[c \frac{N_g}{N_m} \cdot \frac{\Phi_m}{\Phi_g} (\lambda_g - \lambda_m) - p\lambda_g \right] \frac{\lambda_g}{\lambda_m} \frac{f_m(t)}{f_g(t)} } + p\lambda_m \quad (2)$$

У формулі (2) $\phi_{m,g} = \xi_{m,g} \cdot k_{m,g} \cdot \alpha_{m,g}$, де $\xi_{m,g}$ – фотоефективність реєстрації гамма-лінії; $k_{m,g}$ – коефіцієнт самопоглинання гамма-ліній від розпаду відповідно ізомерного m і основного g станів; $\alpha_{m,g}$ – інтенсивність аналітичних ліній; N_m, N_g – кількість зареєстрованих імпульсів від розпаду відповідних станів; p – коефіцієнт розгалуження; c – коефіцієнт, що враховує можливі накладання; i розрахунки імпульсів; $f_{m,g}$ – часова функція:

$$f_{m,g} = [1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_{\text{irr}})] \times \exp(-\lambda_{m,g} t_{\text{cool}}) \cdot [1 + \exp(-\lambda_{m,g} t_{\text{meas}})] \quad (3)$$

Тут $\lambda_{m,g}$ – сталі розпадів основного і ізомерного станів; $t_{\text{irr}}, t_{\text{cool}}, t_{\text{meas}}$ – тривалість опромінення, охолодження та вимірювання відповідно. Одержані таким чином експериментальні відношення виходів $d = Y_m/Y_g$ для реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m,g}}\text{Ce}$ із стандартними похибками наведено точками на рис. 2.

Установлено, що ефективний експериментальний поріг реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m,g}}\text{Ce}$ становить $11,2 \pm 0,2$ МеВ, що на $\sim 2,0$ МеВ перевищує поріг реакції (γ, n). Така суттєва різниця між порогами реакцій (γ, n) і (γ, n)^m указує на наявність у цій області активаційного рівня. А якщо врахувати, що помітна кількість нейтронів із моментом $l = 2$ з'являється при енергії нейтронів 300 - 400 кеВ, то таким рівнем може бути рівень з

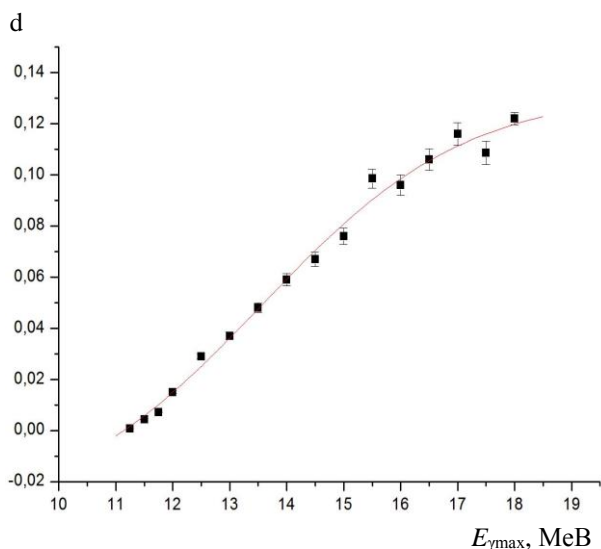


Рис. 2. Експериментальні відношення виходів для реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$.

$J^\pi = 7/2^-$ і енергією 1,578 MeV, який E2 переходом розпадається на ізомерний рівень. Із рис. 2 видно, що ізомерне відношення від порога реакції $(\gamma, n)^m$ зростає і в області 18 MeV виходить на насичення. Суцільною лінією на рис. 2 наведено результат апроксимації експериментальних результатів кривою Больцмана

$$y = A + (B - A) / \left(1 + e^{\frac{E - E_0}{\Delta E_1}} \right),$$

де A, B, E_0 і ΔE_1 – параметри. Апроксимація здійснювалась методом найменших квадратів в інтервалі 11,0 - 18,0 MeV. У результаті апроксимації одержано такі значення параметрів: $A = 0,133 \pm 0,007, B = -0,0035 \pm 0,017, E_0 = 13,56 \pm 0,33$ MeV, $\Delta E_1 = 1,81 \pm 0,33$ MeV.

Аналіз даних

Одержані експериментальні ізомерні відношення виходів як функція від максимальної енергії гальмівного спектра $d = f(E_{\gamma\text{max}})$ дозволяють, використовуючи наявні повні перерізи (γ, n) реакцій [8], розрахувати перерізи збудження ізомерних станів реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$. Розрахунок перерізу σ_m зроблено методом оберненої матриці [9] із кроком $\Delta E = 0,5$ MeV. При розрахунках $\sigma_m(E)$ крива виходу Y_m згладжувалась. Отриманий переріз збудження метастабільних станів у реакції (γ, n) на ядрі ^{140}Ce наведено точками на рис. 3.

На рис. 3 видно, що переріз $\sigma_m(E_\gamma)$ має однокриву форму з максимумом при енергії $\sim 15,5$ MeV. Суцільною кривою наведено результат апроксимації перерізу $\sigma_m(E)$ кривою Лоренца

$$\sigma_m(E) = \sigma_0 \cdot \frac{\Gamma^2 E^2}{(E^2 - E_0^2) + \Gamma^2 E^2}.$$

Тут σ_0, E_0, Γ_0 – параметри. Підгонка кривої була виконана методом найменших квадратів. У результаті одержано такі значення параметрів: $\sigma_0 = 60,0 \pm 3,0$ мб, $E_0 = 15,62 \pm 0,08$ MeV, $\Gamma_0 = 3,28 \pm 0,26$ MeV.

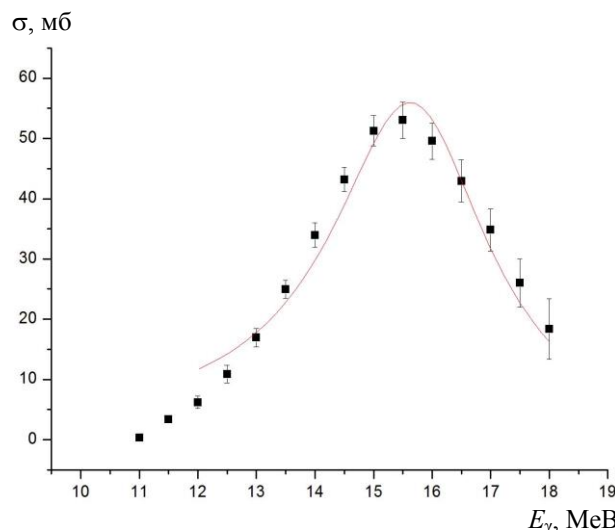


Рис. 3. Переріз реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$.

З метою теоретичного опису перерізів реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$ і наступним порівнянням одержаних теоретичних оцінок з експериментальними даними розраховано відповідні перерізи за допомогою програмного пакета TALYS-1.6 [10]. Програма TALYS – це зібраний в одному коді пакет основних сучасних моделей, що описують процес ядерних реакцій.

При таких розрахунках використовувалась така схема: на ядро-зразок з параметрами (Z_i, N_i) і спин-парністю (J_i, π_i) падає гамма-квант з енергією E_γ ($E_\gamma = E_c$) і спектром можливих значень спіну і парності (J_c, π_c) , а далі розраховується повний переріз фотопоглинання σ_{tot} , для опису якого використовуються одержані експериментально параметри гігантських резонансів [8]. Вважається, що розпад збудженого ядра відбувається за рахунок двох процесів, механізму напівпрямих процесів та статистичного механізму Хаузера - Фешбаха [11].

У даній роботі густина рівнів ρ розраховувалась за допомогою моделі Фермі-газу зі зміщенням по енергії [12]. Спектр нейтронів, що випромінюються в реакції (γ, n) , оцінювався за допомогою коефіцієнтів проникності T_l , розрахованих за оптичною моделлю [13]. При цьому розглядався перехід на конкретні збуджені рівні або зони дочірнього ядра. Спектр низьколежачих дискретних рівнів дочірнього ядра враховувався, і до

енергії збудження 3 МеВ бралися конкретні рівні з бази даних RIPL-3 [14]. Розрахунки проводилися при врахуванні до 15 рівнів. При більш високих енергіях спектр збудження станів дочірнього ядра вважався неперервним, його розбивали на 50 енергетичних зон і при цьому описували густиною рівнів $\rho(E, J, \pi)$. При розпаді ядра з певної енергетичної зони неперервного спектра використовувався усереднений ефективний коефіцієнт проникності T_l .

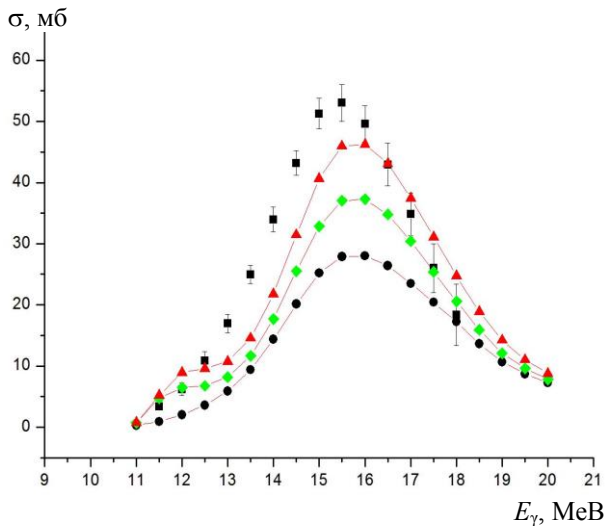


Рис. 4. Порівняння розрахункових та експериментальних перерізів реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$.

Порівняння розрахункових і експериментальних перерізів показано на рис. 4. Квадратними точками наведено експериментальні дані, а

суцільними кривими – результати теоретичного розрахунку. При цьому круглі точки відповідають розрахункам з урахуванням одного збудженого рівня, ромбики – п'яти і трикутники – 15 збуджених рівнів. Порівняння показує, що задовільне узгодження досягається при врахуванні 15 збуджених рівнів. Подальше врахування більшої кількості збуджених рівнів результат не покращує.

Розрахунки показують наявність невеликого піка при енергії 12 МеВ, який відсутній в експериментальних даних. Наявність такого піка в розрахунках може бути пов'язана з наявними неточностями й недостатньою повнотою експериментальних даних і коефіцієнтів розгалуження розпадів низьколежачих дискретних рівнів.

Висновки

На основі проведених досліджень збудження ізомерного стану ядра $^{139\text{m}}\text{Ce}$ в реакції (γ, n) слід відзначити важливу роль у заселенні метастабільного рівня $11/2^-$ низьколежачих станів з $J^\pi = 7/2^-$, скоріше за все $\epsilon(2^+ + 1h11/2^-)$ -станами, що з'явилися за рахунок взаємодії вібраційного кора з одночастинковим $1h11/2^-$ станом.

Наявність у розрахункових перерізах невеликого піка в області 12 МеВ, який відсутній в експерименті, указує на необхідність уточнення схем розпаду низькоенергетичних рівнів ядра ^{139}Ce .

Проведені розрахунки за програмою TALYS-1.6 дають підставу зробити висновок, що статистичний механізм є домінуючим при заселенні ізомерного стану ядра ^{139}Ce .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.М. Мазур. Возбуждение изомерных состояний ядер в фотонейтронных реакциях в области гигантского дипольного резонанса. *ФЭЧАЯ* 31(2) (2000) 386.
2. Ю.Г. Гангрский, В.М. Мазур. Рассеяние γ -квантов ядрами. *ФЭЧАЯ* 33(1) (2002) 158.
3. В.М. Мазур, В.А. Желтоножский, З.М. Биган. Исследование возбуждения изомерных состояний в реакциях (γ, n) для ядер оболочки $N = 82$. *ЯФ* 58(6) (1995) 970.
4. V.M. Mazur, Z.M. Bigan, D.M. Symochko. Population of metastable states in Rb isotopes in the photo-neutron reactions. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 37 (2010) 035101.
5. V.M. Mazur et al. Excitation of the $^{119}\text{Te}^{\text{m}}$, $^{121}\text{Te}^{\text{m}}$, $^{123}\text{Te}^{\text{m}}$, $^{127}\text{Te}^{\text{m}}$ and $^{129}\text{Te}^{\text{m}}$ isomers in (γ, n) reactions from 10 to 22 MeV. *Phys. Rev. C* 87 (2013) 044604.
6. R.B. Firestone, V.S. Shirley (eds.). *Table of Isotopes*. 8-th ed. (New York: J. Wiley and Sons, 1996).
7. R. Vanska, R. Rieppo. The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique. *Nucl. Instr. and Meth.* 179 (1981) 525.
8. A.V. Varlamov et al. Atlas of Giant Dipole Resonances. INDS(NDS)-394 (Austria, Vienna: IAEA, 1999).
9. O.V. Bogdankevich, F.A. Nikolaev. *Methods in Bremsstrahlung Research* (New York: Academic Press, 1966).
10. A.J. Koning, S. Hilarie, M.C. Duijvestijn. TALYS-1.0. Proc. of the Conf. on Nucl. Data for Science and Technology ND-2007 (France, 22 - 27 May, 2007), p. 211.
11. W. Hauser, H. Feshbach. The inelastic scattering of neutrons. *Phys. Rev.* 87 (1952) 366.
12. W. Dilg et al. Level density parameters for the basket-shifted Fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$. *Nucl. Phys. A* 217 (1973) 269.
13. A.J. Koning, J.P. Delaroche. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. *Nucl. Phys. A* 713 (2003) 231.
14. W. Burrows. Nuclear Data Sheets for $A = 139$. *Nucl. Data Sheets* 92 (2001) 623.

В. М. Мазур, З. М. Биган, П. С. Деречкей*

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород, Украина

*Ответственный автор: derecskei89@gmail.com

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРНОГО СОСТОЯНИЯ 11/2- ЯДРА ^{139}Ce
В РЕАКЦИИ $(\gamma, n)^m$ В ОБЛАСТИ ГИГАНТСКОГО Е1-РЕЗОНАНСА**

В диапазоне энергий 11 - 18 МэВ с шагом 0,5 МэВ измерены изомерные отношения выходов Y_m/Y_g в реакции $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m,g}\text{Ce}$. Методом обратной матрицы проведено оценку экспериментального сечения реакции $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m}\text{Ce}$. Полученное сечение возбуждения изомерного состояния ядра ^{139}Ce сравнивается с результатами теоретических расчетов, проведенных с помощью программного пакета TALYS-1.6.

Ключевые слова: изомерные отношения, сечение, гигантский дипольный резонанс, тормозной гамма-спектр.

V. M. Mazur, Z. M. Bigan, P. S. Derechkey*

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

*Corresponding author: derecskei89@gmail.com

**STUDY OF THE EXCITATION OF 11/2- ISOMERIC STATE OF THE NUCLEUS ^{139}Ce
IN REACTION $(\gamma, n)^m$ IN THE GIANT E1-RESONANCE REGION**

The isomeric yield ratio Y_m/Y_g is measured in $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m,g}\text{Ce}$ reaction in 11 - 18 MeV energy range with the step of 0.5 MeV. Using inverse matrix method the experimental cross section of $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m}\text{Ce}$ reaction is estimated. Obtained excitation cross section of the isomeric state of the nucleus ^{139}Ce is comparable with the results of the theoretical calculations performed with the TALYS-1.6 program suite.

Keywords: isomeric ratio, cross section, giant dipole resonance, bremsstrahlung, gamma-spectra.

REFERENCES

1. V.M. Mazur. Excitation of the nuclear isomeric states in photonuclear reactions in the giant dipole resonance range. *Phys. Part. Nucl.* 31 (2000) 386. (Rus)
2. Yu.P. Gangrskiy, V.M. Mazur. The scattering of γ -quanta by Nuclei and excitation isomer states. *Phys. Part. Nucl.* 33 (2002) 158. (Rus)
3. V.M. Mazur, V.A. Zheltonozsky, Z.M. Bigan Investigation of isomer states excitation in (γ, n) reactions on nuclei shell near $N = 82$. *Phys. At. Nucl.* 58 (1995) 970. (Rus)
4. V.M. Mazur, Z.M. Bigan, D.M. Symochko. Population of metastable states in Rb isotopes in the photo-neutron reactions. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 37 (2010) 035101.
5. V.M. Mazur et al. Excitation of the $^{119}\text{Te}^m$, $^{121}\text{Te}^m$, $^{123}\text{Te}^m$, $^{127}\text{Te}^m$ and $^{129}\text{Te}^m$ isomers in (γ, n) reactions from 10 to 22 MeV. *Phys. Rev. C* 87 (2013) 044604.
6. R.B. Firestone, V.S. Shirley (eds.). *Table of Isotopes*. 8-th ed. (New York: J. Wiley and Sons, 1996).
7. R. Vanska, R. Rieppo. The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique. *Nucl. Instr. and Meth.* 179 (1981) 525.
8. A.V. Varlamov et al. Atlas of Giant Dipole Resonances. INDS(NDS)-394 (Austria, Vienna: IAEA, 1999).
9. O.V. Bogdankevich, F.A. Nikolaev. *Methods in Bremsstrahlung Research* (New York: Academic Press, 1966).
10. A.J. Koning, S. Hilarie, M.C. Duijvestijn. TALYS-1.0. *Proc. of the Conf. on Nucl. Data for Science and Technology ND-2007* (France, 22 - 27 May, 2007), p. 211.
11. W. Hauser, H. Feshbach. The inelastic scattering of neutrons. *Phys. Rev.* 87 (1952) 366.
12. W. Dilg et al. Level density parameters for the basket-shifted Fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$. *Nucl. Phys. A* 217 (1973) 269.
13. A.J. Koning, J.P. Delaroche. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV. *Nucl. Phys. A* 713 (2003) 231.
14. W. Burrows. Nuclear Data Sheets for $A = 139$. *Nucl. Data Sheets* 92 (2001) 623.

Надійшла 24.04.2017

Received 24.04.2017