

УДК 539.172.2

PACS 25.20.DC

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.153-160

В.М.Мазур

Інститут електронної фізики НАН України, 88000, м. Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: nuclear@iep.org.ua

ВИМІРЮВАННЯ ІЗОМЕРНИХ ВІДНОШЕНЬ ВИХОДІВ ДЛЯ РЕАКЦІЙ (γ, n) НА ВАЖКИХ ІЗОТОПАХ ЦЕРІЮ

На гальмівному пучку мікротрону М-30 в області енергій 11 - 18 МеВ досліджені ізомерні відношення виходів для реакцій $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m}}\text{gCe}$ та $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{gCe}$.

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

Вступ

Ядерні реакції з емісією різних частинок у вихідному каналі є важливим джерелом інформації про природу і структуру атомних ядер. Ядра з метастабільними (ізомерними) станами і нестабільним основним станом утворені в ядерних реакціях можуть бути використані для виміру відносної заселеності цих двох станів, що ідентифікується як ізомерне відношення і визначається як відношення перерізів $r = \sigma_m / \sigma_g$ або виходів $d = Y_m / Y_g$, де σ_m , Y_m і σ_g , Y_g відповідно переріз та вихід заселення ізомерного m і основного g станів. Ізомерне відношення залежить від різних фізичних параметрів, таких як: спіновий розподіл збуджених станів компаунд ядер, кутовий момент, який забирає випромінена частинка, характер гамма-каскаду і спіни ізомерних станів [1-4].

За попередні роки досліджено значне число ізомерних відношень на різних ядрах і при різних енергіях, одержаних в різних типах ядерних реакцій, індукованих зарядженими частинками [5, 6], нейтронами [7, 8] і гамма-квантами [1-4]. Важкі частинки (протони, нейтрони і т.д.) бомбардуючи ядро привносять в нього великий кутовий момент, тоді як фотоядерні

реакції по причині дипольного характеру фотонного поглинання викликають тільки малі зміни кутового моменту, а в нашій області енергій досліджень це фактично фіксований момент $1 \hbar$.

В зв'язку з розвитком методів розрахунку перерізів ядерних реакцій, ізомерних відношень [9] повстало актуальне питання про повноту і надійність експериментальних даних по ізомерним відношенням і їх залежності від енергії $r = f(E)$ або $d = f(E_{\gamma\text{max}})$.

Метою даної роботи є вивчення збудження ізомерного стану $11/2^-$ важких ізоотопів церію ^{137}Ce і ^{139}Ce шляхом вимірювання залежності ізомерного відношення виходів від максимальної енергії гальмівних гамма-квантів $d = f(E_{\gamma\text{max}})$ в області гігантського $E1$ -резонансу. Ізомерні стани дочірніх ядер, що збуджуються в реакціях $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m}}\text{gCe}$, $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{gCe}$ формуються підоболонкою $1h_{11/2}$, а основні стани – підоболонкою $3s_{1/2}$. І хоча вивчення ізомерних відношень в реакції (γ, n) для ядер оболонки $1h_{11/2}$ проводилося досить широко [1, 3, 4], систематичних досліджень функцій $d = f(E_{\gamma\text{max}})$ для ізоотопів церію в області гігантського дипольного резонансу не проводилося.

Методика експерименту

Оскільки дана робота проводилася на пучку гальмівних гамма-квантів, то безпосереднім результатом таких експериментів являються виходи фотоядерних реакцій $Y(E_{\gamma\max})$, які зв'язані з перерізами цих реакцій $\sigma(E)$ інтегральним рівнянням:

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

В приведенім співвідношенні k – нормуючий множник, E_{tr} – поріг реакції, $E_{\gamma\max}$ – максимальна енергія гальмівного спектру, $\Phi(E, E_{\gamma\max})$ – спектр гальмівного випромінювання. Для ядерної ізомерної пари в більшості випадків, в тому числі для важких ізотопів церію, основний стан дочірнього ядра заселяється двома шля-

$$d = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{\lambda_g - \lambda_m}{\left\{ c \cdot \frac{N_g}{N_m} \cdot \frac{\varphi_m}{\varphi_g} (\lambda_g - \lambda_m) - p \lambda_g \right\} \frac{\lambda_g f_m(t)}{\lambda_m f_g(t)} + p \cdot \lambda_m}. \quad (3)$$

В формулі (3) $\varphi_{m,g} = \xi_{m,g} \cdot k_{m,g} \cdot \alpha_{m,g}$, де $\xi_{m,g}$ – фотоефективність реєстрації гамма-ліній від розпаду відповідно ізомерного m і основного g станів, $k_{m,g}$ – коефіцієнт самопоглинання цих гамма-ліній, $\alpha_{m,g}$ – інтенсивність аналітичних гамма-ліній, N_m, N_g – кількість зареєстрованих імпульсів від розпаду відповідних станів, p – коефіцієнт розгалуження, c – коефіцієнт, що враховує можливі накладання і прорахунки імпульсів, $f_{m,g}$ – часова функція:

$$f_{m,g} = [1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_{irr})] \cdot \exp(-\lambda_{m,g} t_{cool}) \cdot [1 + \exp(-\lambda_{m,g} t_{meas})] \quad (4)$$

Тут $t_{irr}, t_{cool}, t_{meas}$ – відповідно тривалість опромінення, охолодження та вимірювання відповідно. Коефіцієнт самопоглинання аналітичних гамма-ліній визначався за формулою $k = \mu x / (1 - \mu x)$, де x –

тами – безпосередньо зразу після розпаду материнського ядра і через розпад метастабільного стану. Утворення ізомерної пари може бути описано наступними диференціальними рівняннями [10]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_m}{dt} &= Y_m - \lambda_m N_m \\ \frac{dN_g}{dt} &= Y_g - \lambda_g N_g + p \lambda_m N_m \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Тут N_m, N_g – число ядер в ізомерному і основному станах, λ_m, λ_g – відповідно постійні розпаду цих станів і p – коефіцієнт розгалуження для розпаду ізомерного в основний стан.

За допомогою приведених диференціальних рівнянь була одержана формула для розрахунку ізомерних відношень [10]:

товщина зразка, μ – лінійний коефіцієнт поглинання.

Експеримент проводився на гальмівному гамма-пучку мікротрону М-30 ІЕФ НАН України з кроком $\Delta E = 0.5$ МеВ в інтервалі енергій 11–18 МеВ. Розкид енергії прискорених електронів становив $\pm(5-20)$ кеВ і визначався фазовими коливаннями, амплітуда яких при числі орбіт $n > 3$ практично не залежить від їх числа. Відомо, що в вузлах фазових коливань розкид по енергії менший і складає орієнтовано 5–8 кеВ [11].

Зміна енергії прискорених електронів здійснювалась двома методами: у широких межах – зміною числа орбіт, які проходять електрони, тобто зміною хвильоводних вставок і в малих межах – зміною величини провідного магнітного поля. Індукція магнітного поля вимірювалася методом ядерного магнітного резонансу. Похибка приладу при вимірюванні магнітної індукції не перевищувала $\pm 0.1\%$.

Прискорений пучок електронів виводився з мікротрону і падав на гальмівну мішень, в якості якої використовувалася танталова пластинка товщиною 0.5 мм і яка була розташована безпосередньо за вікном виводу. Середній струм пучка підтримувався на рівні 5 μ А.

Досліджувані мішені були приготовлені із високочистого (99.9 %) окису церію запресованого у тонкостінні капролонові касети у вигляді дисків діаметром 20 мм і вагою 2г. При опроміненні зразки розташовувалися на віддалі 20 см від гальмівної мішені.

При вимірюванні використовувалася активаційна методика. Час опромінення мінявся і складав 2 години при енергіях поблизу порогів (γ, n) реакцій і 20 хв при енергіях 15 – 18 МеВ. Час охолодження складав 1 хв, а 3 хв вимірювався розпад ізомерного стану ядра ^{139m}Ce . Після цього зразок знову охолоджувався (загальний час охолодження становив 20 хв) і потім продовжувалося вимірювання розпадів основного стану ядра ^{139g}Ce і ізомерної пари $^{137m,g}\text{Ce}$, час виміру яких тривав 22 – 24 години. Гамма-активність опромінених зразків вимірювалась в хороших фонових умовах спектрометром на базі HPGe – детектора об'ємом 175 cm^3 і багатоканального аналізатора фірми ORTEC, зв'язаного з комп'ютером для накопичення і обробки даних. Роздільна здатність спектрометра становила ~ 2.0 кеВ для лінії 1332 кеВ кобальту-60.

Спектроскопічні характеристики досліджуваних ізотопів бралися з роботи [12] і

приведені в таблиці 1. Тут J^π – спін-парність ізомерного і основного станів, B_n – поріг реакції (γ, n) материнських ядер ^{138}Ce і ^{140}Ce , $T_{1/2}$ – період напіврозпаду, E_{iso} – енергія ізомерних рівнів, E_γ – енергія аналітичних ліній, α – інтенсивність відповідних гамма-переходів.

Фрагмент експериментального апаратурного спектру від розпаду CeO_2 , опроміненого при максимальній енергії гальмівного спектру $E_{\gamma\text{max}}=16.5$ МеВ приведено на рис. 1, де N – число імпульсів в каналі аналізатора.

Одержані згідно з формулою 3 експериментальні ізомерні відношення виходів $d=Y_m/Y_g$ для реакції $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137m,g}\text{Ce}$ з стандартними похибками приведені точками на рис. 2.

Оскільки для реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139m,g}\text{Ce}$ із-за великої різниці в періодах напів-розпаду ^{139m}Ce і ^{139g}Ce виходи Y_m і Y_g вимірювалися не одночасно, то ізомерне відношення для $^{139m,g}\text{Ce}$ безпосередньо з експеримента визначалися у виді:

$$\eta = \frac{Y_m}{Y_n} = \frac{Y_m}{Y_g} + Y_m,$$

Де Y_n – повний вихід (γ, n) реакції на ядрі ^{140}Ce . З одержаного ізомерного відношення η розраховувалося ізомерне відношення виходів d :

$$d = \frac{Y_m}{Y_g} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)},$$

яке приведені на рис. 3.

Таблиця 1. Спектроскопічні характеристики

Ізотоп	J^π	B_n , МеВ	$T_{1/2}$	E_{iso} , кеВ	E_γ , кеВ	α (%)
^{137g}Ce	$1/2^+$	9.72	9.0 год	–	447	2.24
^{137m}Ce	$11/2^-$	–	34.4 год	254	254	10.9
^{139g}Ce	$1/2^+$	9.2	137.6 дн		165.8	80.1
^{139m}Ce	$11/2^-$		54,8 с	754.2	754.2	92

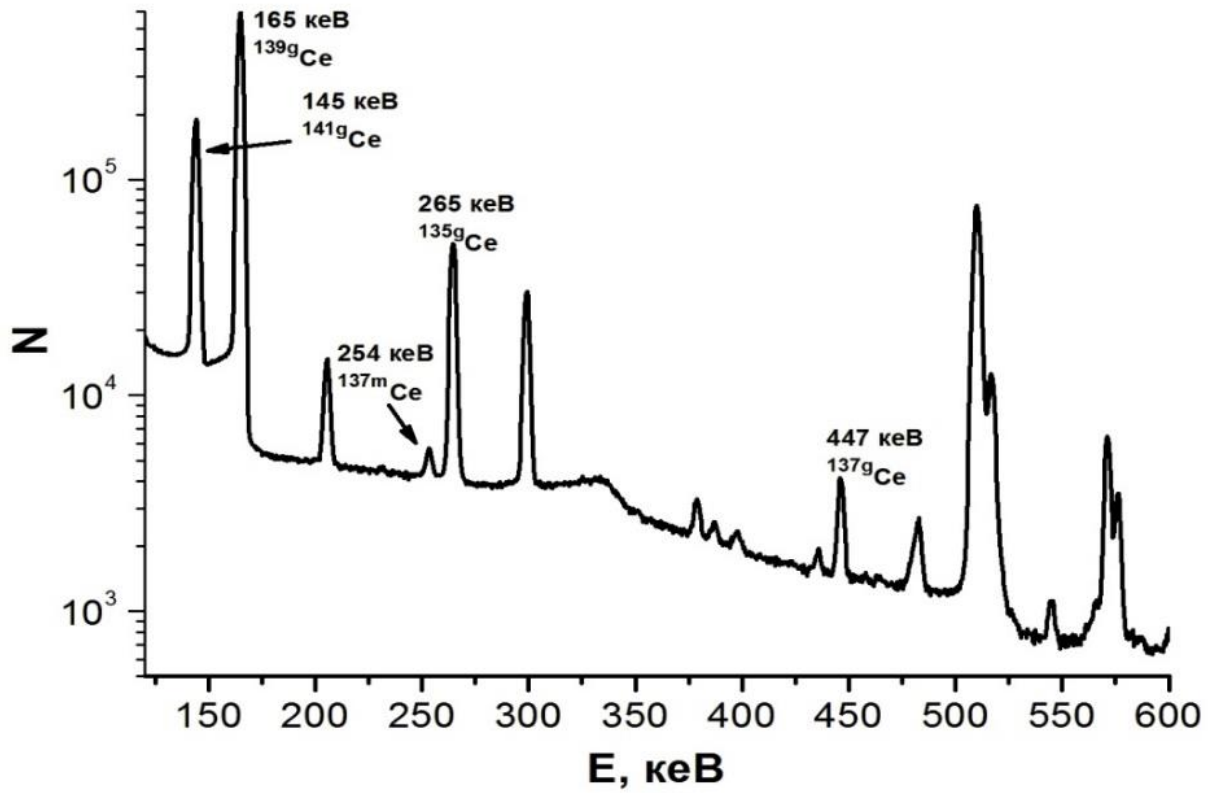


Рис. 1. Ділянка апаратного спектру від опроміненого зразка CeO_2 .

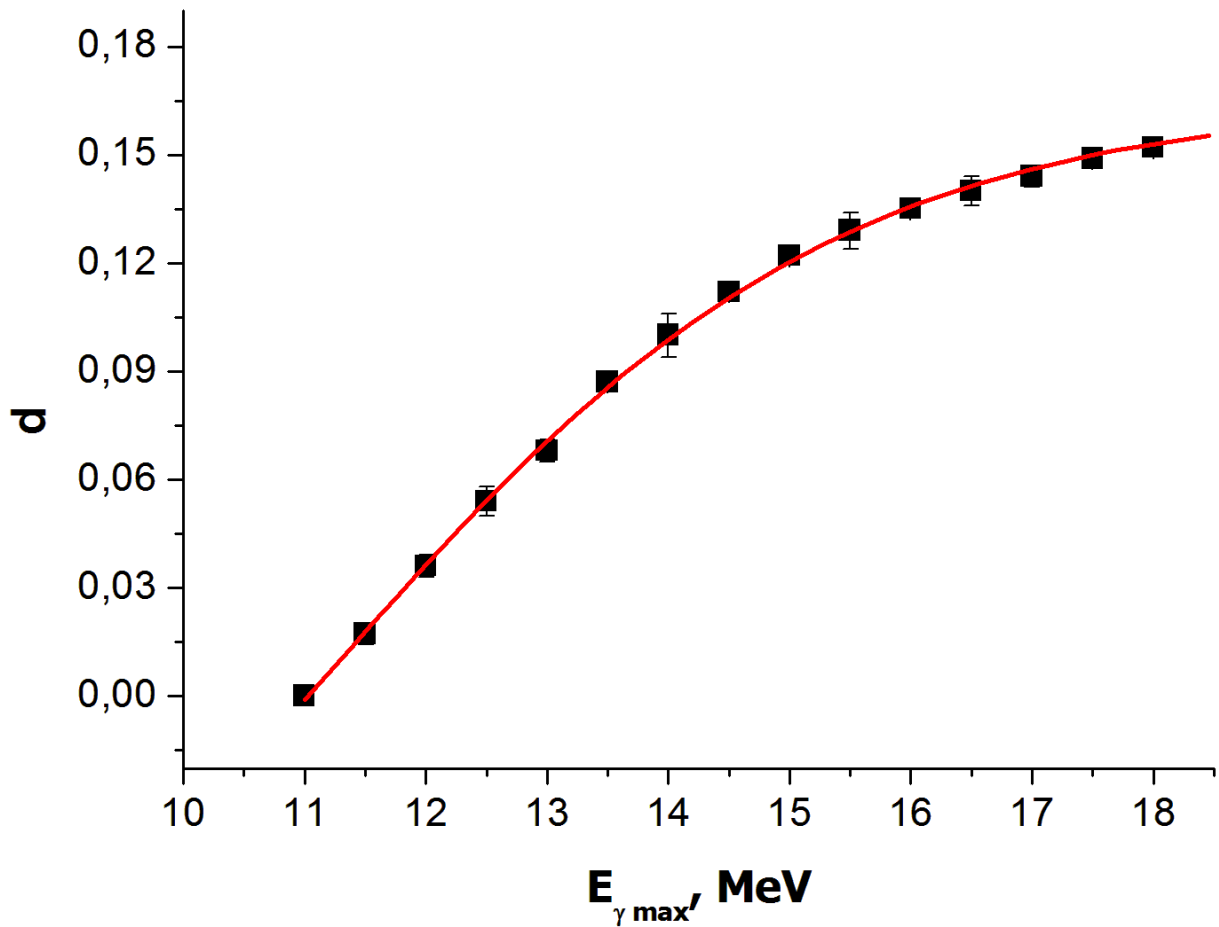


Рис. 2. Експериментальні відношення виходів $d = Y_m/Y_g$ для реакції $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137m, g}\text{Ce}$.

Суцільною кривою на рис. 2, 3 приведено результат апроксимації одержаних експериментальних ізомерних відношень виходів 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 в інтервалі 11.0 –

18.0 MeV методом найменших квадратів. В результаті одержані наступні значення параметрів: для ядра ^{137}Ce

$A = 0.1651 \pm 0.0014$, $B = -0.1556 \pm 0.0204$,
 $E_0 = 11.15 \pm 0.36$ (MeV) і

$\Delta E_1 = 2.116 \pm 0.115$ (MeV);

для ядра ^{139}Ce $A = 0.133 \pm 0.007$,

$B = -0.035 \pm 0.017$, $E_0 = 13.56 \pm 0.33$ (MeV),
 $\Delta E_1 = 1.81 \pm 0.33$ (MeV).

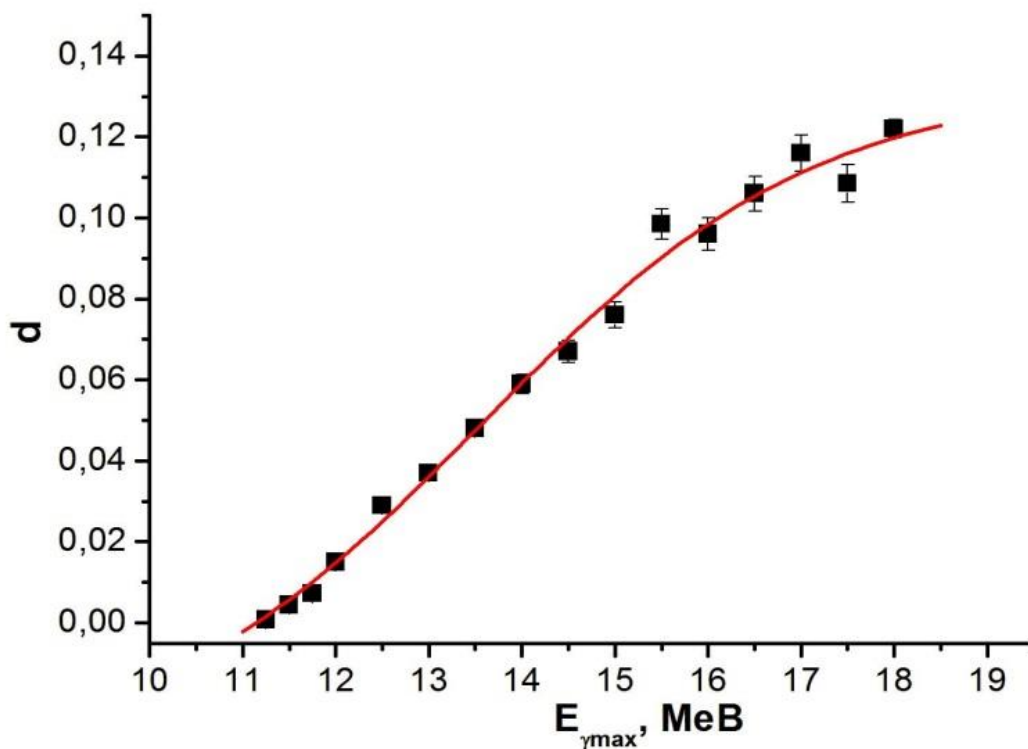


Рис. 3. Експериментальні відношення виходів для реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m,g}}\text{Ce}$.

На рис. 2 і 3 видно, що для обох ядер ^{137}Ce і ^{139}Ce ізомерне відношення від порогу реакції $(\gamma, n)^m$ зростає і в області вище 18 MeV виходить на насичення. Встановлений експериментальний ефективний поріг реакції $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m}}\text{Ce}$ становить 11.01 ± 0.25 MeV, що на ~ 1.4 MeV перевищує поріг реакції (γ, n) . Для реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m,g}}\text{Ce}$ ефективний поріг складає 11.2 ± 0.2 (MeV), що на ~ 2.0 MeV перевищує поріг реакції (γ, n) . Така помітна різниця між порогами реакцій (γ, n) і $(\gamma, n)^m$

може вказувати на наявність в цій області активаційних рівнів.

Висновок

Якщо розглянути спектр низькоенергетичних рівнів ядра ^{139}Ce [13] і взяти до уваги, що в реакції (γ, n) помітна кількість нейтронів (2 – 5 %) з моментом $l = 2$ може появитися при енергії вилітаючих нейтронів 300 – 400 кеВ [14], то активаційним рівнем ядра ^{139}Ce може бути стан з $J^\pi = 7/2^-$

і енергією 1.578 MeV, який E2 переходом розпадається на метастабільний рівень [13].

Що стосується ядра ^{137}Ce , то поки що відсутня можливість зробити висновок про ідентифікацію того чи іншого активаційного рівня, оскільки в базі даних по спектру низькоенергетичних збуджень ядра ^{137}Ce [15] взагалі не приведені низькоспінові рівні негативної парності $7/2^-$, $5/2^-$ і т. д., хоча в спектрах всіх сусідніх парно-непарних ядер такі рівні є.

Ядро ^{140}Ce – магічне з числом нейтронів $N=82$. Співставлення одержаних результатів для ядер ^{137}Ce , ^{139}Ce показує, що величини ізомерних відношень $d=f(E_{\gamma\text{max}})$ при загальній схожості залежності від енергії $E_{\gamma\text{max}}$ все-таки для церія-139 на 20 % менші ніж для церія-137. Цей ефект може бути зв'язаний з впливом замкнутості оболонки $1h_{11/2}$ на формування ізомерного відношення ядра ^{139}Ce і відповідно на його зменшення порівняно з d для ядра ^{137}Ce .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Belov A.G., Gangrsky et al. Excitation of isomeric $1h_{1/2}$ states in the reactions (γ, n) // Phys. of Atomic Nuclei. – 1996. – V. 59, p. 558-559.
2. Gangrsky Yu. P., Mazur V. M. The scattering of γ -quanta by Nuclei and excitation isomer states // Phys. Part. Nucl. – 2002. - V. 33. - p. 158 - 200. (Rus)
3. Mazur V. M. Excitation of the nuclear isomeric states in photonuclear reactions in the giant dipole resonance range // Phys. Part. Nucl. – 2000. - V. 31. - p. 386 - 430. (Rus)
4. Mazur V. M., Zheltonozsky V. A., Bigan Z. M. Investigation of isomer states excitation in (γ, n) reactions on nuclei shell near $N=82$ // Phys. At. Nucl. – 1995. - V. 58. - p. 970 - 974. (Rus)
5. Sudar S. et al. Isomeric cross-section ratio for the formation of $^{58m,g}\text{Co}$ in neutron, proton, deuteron and alpha – particle induced reactions in the energy region up to 25 Mev. // Phys. Rev. C.- 1996. – V. 53. - p. 2885 - 2892.
6. Uddin M.S. et al. Formation of the isomeric pair $^{194m,g}\text{Ir}$ in interactions of α particles with ^{92}Os // Phys. Rev. C.- 2011. – 84: 024605.
7. Qaim S.M. Isomer cross-section ratios in (n, t) reactions on some medium- and heavy-mass nuclei at 14.6 Mev // Nucl. Phys. A. – 1985. - V. 438. - p. 384 - 394.
8. Nesaraiya C.D., Sudar S. et al. Cross sections for the formation of $^{69m,g}\text{Zr}$ and $^{71m,g}\text{Zn}$ in neutron induced reactions near their their thresholds: effect of reaction channel on the isomeric cross-section ratio // Phys. Rev. C.- 2003. – 68: 024603.
9. Koning A. J., Hilarie S., Duijvestijn M. C. // Proceedings of the Conference on Nucl. Data for Science and Technology ND 2007, France, 22 - 27 May - 2007.
10. Vanska R., Rieppo R. The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique // Nucl. Instr. And Meth. - 1981. - Vol. 179. - p.525 - 532.
11. Kapica S. P. and Melechin V. N. The Microtron // Harwood Academie, London. - 1978.
12. Firestone R.B. // Table of Isotopes, 8th. Edition, J. Wiley and Sons, New York. - 1996.
13. Burrows W. Adopted levels, gammas for ^{139}Ce // Nucl. Data Sheets. - 2001. - Vol. 92. - p. 623 - 624.
14. Марчук Г.Н., Колесов . . . Применение численных методов для расчета нейтронных сечений // М., Атомиздат. - 1970.
15. Browne E., Tuli J. K. Adopted levels, gammas for ^{137}Ce // Nucl. Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - p. 2173 – 2174.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2017.

В. М. Мазур

Институт электронной физики НАН Украины,
88000, г. Ужгород, ул. Университетская, 21

ИЗМЕРЕНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ВЫХОДОВ ДЛЯ РЕАКЦИЙ (γ, n) НА ТЯЖЁЛЫХ ИЗОТОПАХ ЦЕРИЯ

На тормозном пучке микротрона М-30 в области энергий 11 - 18 МэВ исследованы изомерные отношения выходов для реакций $^{138}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m}}\text{Ce}$ и $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$.

Ключевые слова: ядерные реакции, изомерное отношение, сечение, гигантский дипольный резонанс, тормозной гамма-спектр.

PACS 25.20.DC

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.42.157-160

V.M. Mazur

Institute of electron physics of the NAS of Ukraine, Uzhhorod, st. Universitetska, 21
e-mail: nuclear@iep.org.ua

MEASUREMENT OF ISOMERIC YIELD RATIOS FOR THE HEAVY CERIUM ISOTOPES IN THE (γ, N) REACTIONS

Purpose: To determine the isomeric yield ratios for the heavy cerium isotopes and their dependences on the gamma-quanta energy in the (γ, n) reactions.

Methods: An activation method is used to measure the isomeric ratios.

Results: Present paper presents the method and the results of measuring the isomeric yield ratios d obtained in the $(\gamma, n)^m$ reaction for the ^{137}Ce and ^{139}Ce isotopes in the region of the maximal energies of the Bremsstrahlung gamma spectrum $E_{\gamma\text{max}}=11-18$ MeV. The Boltzmann curve parameters approximating the $d=f(E_{\gamma\text{max}})$ curves as well as the thresholds for the $^{137}\text{Ce}(\gamma, n)^{137\text{m}}\text{Ce}$ and $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m}}\text{Ce}$ reactions have been obtained.

Conclusion: The analysis of the isomeric ratios d obtained for the ^{137}Ce and ^{139}Ce nuclei shows that, given the general similarity of their dependences $d=f(E_{\gamma\text{max}})$, the isomeric ratios for the cerium-139 are ~20% less than those for the cerium-137. This effect should be related to the influence of the closeness of the $1h_{11/2}$ shell of the ^{140}Ce nucleus on the isomeric ratio formation for the ^{139}Ce nucleus.

Keywords: nuclear reaction, isomeric yield ratio, giant dipole resonance, Bremsstrahlung gamma-spectrum.

REFERENCES

1. Belov A.G., Gangrsky et al. Excitation of isomeric $1h_{1/2}$ states in the reactions (γ, n) //Phys. of Atomic Nuclei. – 1996. – V. 59, p. 558-559.

2. Gangrsky Yu. P., Mazur V. M. The scattering of γ -quanta by Nuclei and excitation isomer states // *Phys. Part. Nucl.* – 2002. - V. 33. - p. 158 - 200. (Rus)
3. Mazur V. M. Excitation of the nuclear isomeric states in photonuclear reactions in the giant dipole resonance range // *Phys. Part. Nucl.* – 2000. - V. 31. - p. 386 - 430. (Rus)
4. Mazur V. M., Zheltonozsky V. A., Bigan Z. M. Investigation of isomer states excitation in (γ, n) reactions on nuclei shell near $N=82$ // *Phys. At. Nucl.* – 1995. - V. 58. - p. 970 - 974. (Rus)
5. Sudar S. et al. Isomeric cross-section ratio for the formation of $^{58m,g}\text{Co}$ in neutron, proton, deuteron and alpha – particle induced reactions in the energy region up to 25 Mev. // *Phys. Rev. C.* - 1996. – V. 53. - p. 2885 - 2892.
6. Uddin M.S. et al. Formation of the isomeric pair $^{194m,g}\text{Ir}$ in interactions of α particles with ^{92}Os // *Phys. Rev. C.* - 2011. – 84: 024605.
7. Qaim S.M. Isomer cross-section ratios in (n, t) reactions on some medium- and heavy-mass nuclei at 14.6 Mev // *Nucl. Phys. A.* – 1985. - V. 438. - p. 384 - 394.
8. Nesaraiia C.D., Sudar S. et al. Cross sections for the formation of $^{69m,g}\text{Zr}$ and $^{71m,g}\text{Zn}$ in neutron induced reactions near their their thresholds: effect of reaction channel on the isomeric cross-section ratio // *Phys. Rev. C.* - 2003. – 68: 024603.
9. Koning A. J., Hilarie S., Duijvestijn M. C. // *Proceedings of the Conference on Nucl. Data for Science and Technology ND 2007, France, 22 - 27 May - 2007.*
10. Vanska R., Rieppo R. The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique // *Nucl. Instr. And Meth.* - 1981. - Vol. 179. - p.525 - 532.
11. Kapica S. P. and Melechin V. N. *The Microtron* // Harwood Academie, London. - 1978.
12. Firestone R.B. // *Table of Isotopes, 8th. Edition, J. Wiley and Sons, New York.* - 1996.
13. Burrows W. Adopted levels, gammas for ^{139}Ce // *Nucl. Data Sheets.* - 2001. - Vol. 92. - p. 623 - 624.
14. Marchuk G. N., Kolesov V. B. Application of numerical methods calculations neutrons cross sections // *Moscow., Atomizdat.* - 1970.
15. Browne E., Tuli J. K. Adopted levels, gammas for ^{137}Ce // *Nucl. Data Sheets.* - 2007. - Vol. 108. - p. 2173 – 2174.

© Ужгородський національний університет