

УДК 539.172

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

Інститут електронної фізики НАН України, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21
e-mail: nuclear@email.uz.ua

ПЕРЕРІЗ РЕАКЦІЇ (γ, n) НА ЯДРІ ^{120}Te В ОБЛАСТІ Е1-ГІГАНТСЬКОГО РЕЗОНАНСУ

Приведено результати вивчення перерізу реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ в інтервалі енергії гамма-квантів 10-18 МеВ. Вимірювання проведені за активаційною методикою. Зроблено порівняння експериментальних результатів з теоретичними розрахунками, виконаними за допомогою програмного коду TALYS-1.2.

Ключові слова: фотонейтронні реакції, переріз, гігантський дипольний резонанс.

Основною особливістю в перерізах поглинання гамма-квантів ядрами σ_{tot} є гігантський дипольний резонанс (ГР) – широкий максимум в області 12-18 МеВ, вивчення якого зіграло визначальну роль у формуванні сучасних уявлень про колективні високозбуджені стани в ядрах.

Широкомасштабне дослідження характеристик гігантського Е1-резонансу було проведено як методом сумування парціальних перерізів (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ і т. д. реакцій [1], так і безпосереднім вимірюванням перерізу σ_{tot} методом поглинання [2, 3, 4].

Новий підйом інтересу до дослідження перерізів фотоядерних реакцій в районі Е1-гігантського резонансу, що спостерігається в теперішній час, зв'язаний з рядом причин, і в тому числі із створенням принципово нових, високовартісних джерел квазімонохроматичного гамма-випромінювання [5, 6] та із необхідністю одержання відсутньої інформації по перерізам фотоядерних реакцій, зокрема для астрофізичних обчислень [7].

В астрофізиці відомо, що ядра важчі заліза синтезовані в зірках, в основному, в ядерних реакціях шляхом нейтронного захоплення (r - і s -процеси). Але є в наявності кілька десятків нейтронно-дефіцитних стабільних ізотопів екранованих від захоплення швидких нейтронів стабільними ізобарами. Ці ядра, звичайно іменовані як p -ядра, продукуються через ланцюжок фотоядерних реакцій (γ, n) , (γ, p) , (γ, α)

[8-10]. Для обчислення багатьох p -процесів необхідні масиви, що включають сотні перерізів фотоядерних реакцій. Незважаючи на помітні зусилля, зроблені в останні роки, наявна експериментальна інформація про характеристики реакцій, відповідальних за протікання p -процесів, все ще є недостатньою.

До p -ядер належить і ізоотоп ^{120}Te [10]. До теперішнього часу переріз реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ не досліджувався. Вивчення еволюції форми гігантського дипольного резонансу було проведено для важких ізотопів $^{124-130}\text{Te}$ і $^{140,142}\text{Ce}$ в роботі [11]. Вимірювання проводилися в інтервалі 8-26 МеВ. При цьому вивчався повний переріз фотопоглинання $\sigma_{tot} = \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n) + \dots$

Метою даної роботи є вивчення перерізу реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ в області енергій 10-18 МеВ.

Методика експерименту

Для проведення досліджень була використана активаційна методика. Досліджувані мішені були виготовлені у вигляді дисків склоподібного окису телуру TeO_2 діаметром 25 мм і товщиною 2 мм, чистотою 99,99%. Опромінювання дослідних взірців проводилося на гальмівному гамма-пучку мікротрона М-30 відділу фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України. Основні характеристики мікротрона приведені в роботі

[12]. Зміна енергії прискорених електронів відбувалася двома способами: в широких межах – зміною числа орбіт електронного пучка, а в межах одного числа орбіт – зміною провідного магнітного поля. Величина напруженості магнітного поля контролювалася методом ядерного магнітного резонансу. Розкид по енергії електронного пучка в прискорювачі не перевищував 30-50 кеВ [12]. Середній струм прискорювача складав 5 μ А. Контроль за струмом здійснювався кожні 1,2 с і записувався в ЕОМ. Опромінення дослідних зразків здійснювалося в області 9-18 МеВ з кроком $\Delta E=0,5$ МеВ. Час опромінення t_{irr} складав 20 хв. при високих енергіях і 2 години поблизу порогу (γ, n) реакції. Часи охолодження і вимірювання вибиралися з оптимальних умов реєстрації гамма-ліній від розпаду дочірніх ядер. При цьому прорахунки реєструючої апаратури були менші 5 %.

Гамма-спектри опроміненних мішеней вимірювалися гамма-спектрометром з високою роздільною здатністю на базі германійового HPGe – детектора об'ємом 175 cm^3 ; 8192-каналним аналізатором CANBERRA, зв'язаним з комп'ютером для накопичення даних. Роздільна здатність детектора складала 1,9 кеВ для лінії 1332 кеВ кобальту-60. Ділянка апаратурного спектру від опроміненої мішені при-

ведена на рис. 1, де N – кількість за-реєстрованих імпульсів:

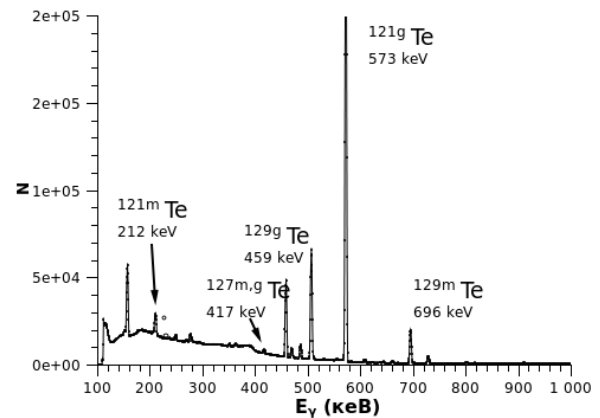


Рис. 1. Ділянка апаратурного спектру від опроміненої мішені.

Паралельно з вимірюванням гамма-лінії від розпаду ^{119}Te проводилося вимірювання гамма-лінії від розпаду ^{129}Te одержаного в реакції $^{130}Te(\gamma, n)^{129m,g}Te$, яка використовувалася для нормування і абсолютної калібровки виходу реакції $^{120}Te(\gamma, n)^{119g}Te$. Перерізи реакції $^{130}Te(\gamma, n)^{129}Te$ бралися з роботи [11].

Спектроскопічні характеристики від розпаду основних і ізомерних станів ізоотопів ^{119}Te і ^{129}Te приведені в таблиці 1 [13-15]:

Таблиця 1

Спектроскопічні характеристики ядер

		V_n (MeB)	J^π	E_{iso} (кеВ)	E_γ (кеВ)	$T_{1/2}$ (год)	$\alpha(\%)$
1	^{119m}Te		$11/2^-$	261	1212	112,8	66,2
2	^{119g}Te	10,292	$1/2^+$		644	16,05	84,0
3	^{129m}Te		$11/2^-$	105	696	806,4	2,9
4	^{129g}Te	8,419	$3/2^+$		459	1,16	7,7

В таблиці приведено: V_n – пороги (γ, n) реакцій, J^π – спін-парність, E_{iso} – енергія ізомерного рівня, E_γ – енергія аналітичної гамма-лінії, $T_{1/2}$ – періоди напіврозпаду, α – інтенсивність лінії, P – коефіцієнт розгалуження.

Безпосередньо в експерименті нами були одержані відношення виходів збуд-

ження основного стану ізоотопу ^{119}Te (Y_1) до виходу збудження основного стану ізоотопу ^{129}Te (Y_2):

$$\eta = \frac{Y_1}{Y_2} = c_1 \frac{N_1 \lambda_1 \phi_2 f_2}{N_2 \lambda_2 \phi_1 f_1} \quad (1)$$

Тут $\phi_{1,2} = \xi_{1,2} \cdot k_{1,2} \cdot \alpha_{1,2}$, де $\xi_{1,2}$ – фотоефективність реєстрації аналітичних гамма-ліній

при розпаді основних станів, $k_{1,2}$ – коефіцієнти самопоглинання цих ліній в матеріалі досліджуваної мішені, $\alpha_{1,2}$ – інтенсивність аналітичних гамма-ліній, c – коефіцієнт, що враховує прорахунки і накладання імпульсів, $N_{1,2}$ – число імпульсів під фотопіками аналітичних гамма-ліній, $\lambda_{1,2}$ – відповідні постійні розпаду, $f_{1,2}$ – часова функція:

$$f(t) = (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_{cool}} (1 - e^{-\lambda t_{meas}}) \quad (2)$$

де t_{irr} , t_{cool} , t_{meas} – часи опромінення, охолодження і вимірювання. Для всіх ядер ізотопів телуру в реакціях (γ, n) заселялися основні і ізомерні стани. При цьому повний вихід (γ, n) реакції Y_n , зв'язаний з виходами збудження основного Y_g і ізомерного стану Y_m наступним чином:

$$Y_n = Y_g + Y_m = Y_g \left(1 + \frac{Y_m}{Y_g} \right) = Y_g (1 + d) \quad (3)$$

Ізомерне відношення виходів d було визначено нами в окремому експерименті раніше. Таким чином, вимірюючи відношення виходів заселення в реакціях (γ, n) основних станів ізотопів телуру, ми визначили відношення повних виходів реакції (γ, n) на ізотопі ^{120}Te до повного виходу реакції $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}$, тобто $B = Y_n^{120} / Y_n^{130}$. Залежність відношення виходів B від максимальної енергії гамма-випромінювання $E_{\gamma\text{max}}$ приведена темними точками на рис. 2. Середньоквадратична похибка становить менше 0,5% і не перевищує розміри точки.

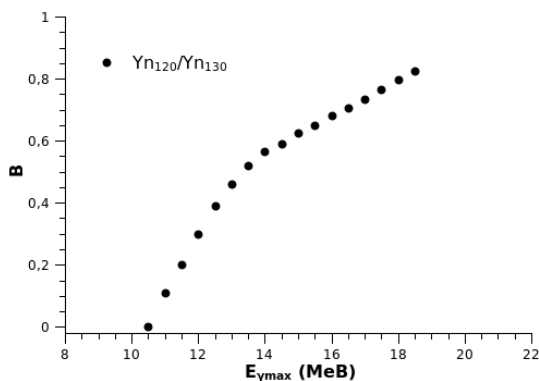


Рис. 2. Відношення виходів фотонейтронних реакцій Y_n^{120} / Y_n^{130} .

Наявність експериментальних залежностей відношення виходів від максимальної енергії гальмівного гамма-спектра дозволяє, використовуючи переріз реакції $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129}\text{Te}$, виміряний раніше [11], розрахувати переріз реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$. Розрахунок вівся методом оберненої матриці [16] з кроком 1 МеВ. В області порогу реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ визначення відношень Y_n^{120} / Y_n^{130} проводилося з кроком 0,25 МеВ. Розрахунок перерізів вівся з кроком $\Delta E = 0,5$ МеВ. Одержані перерізи реакції (γ, n) приведені на рис. 3.

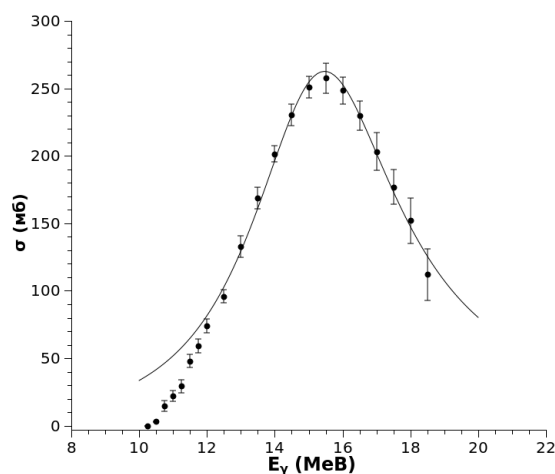


Рис. 3. Переріз реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$.

Перерізи мають односторонню форму з максимумом при енергії $\sim 15,4$ МеВ. Суцільною кривою на рис. 3 приведений результат апроксимації перерізу кривою Лоренца:

$$\sigma(E) = \sigma_0 \frac{E^2 \Gamma_0^2}{(E^2 - E_0^2)^2 + \Gamma_0^2 E^2} \quad (4)$$

Тут σ_0 , E_0 , Γ_0 – параметри. Апроксимація здійснювалася методом найменших квадратів. Одержані в результаті підгонки значення параметрів наступні: $\sigma = (262, \pm 2,1)$ мб, $E_0 = (15,47 \pm 1,0)$ МеВ і $\Gamma_0 = (5,33 \pm 0,11)$ МеВ.

Аналіз результатів

З метою порівняння експериментальних результатів з теоретичними оцінками нами проведені розрахунки перерізу

реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ за допомогою програмного пакету TALYS-1.2 [17].

В межах розрахункової процедури використовується наступна схема: ядро-мішень з характеристиками (Z_i, N_i) і спінопарністю (J_i, π_i) поглинає гамма-квант з енергією E_γ і формується компаунд-ядро з енергією збудження E_c ($E_c = E_\gamma$) і спектром можливих значень спіна і парності (J_c, π_c) . Розраховується повний переріз фотопоглинання σ_{tot} за допомогою параметризованих характеристик гігантського E1-резонансу. Розпад збудженого ядра відбувається у відповідності з статистичним механізмом Хаузера-Фешбаха [18], при цьому враховується і домішок (на рівні 5-10 %) напівпрямих процесів. Емісія нейтронів розраховується на конкретні рівні (зони) дочірнього ядра з використанням коефіцієнтів проникності T_1 , розраховані по оптичній моделі [19]. При цьому до енергії збудження дочірніх ядер $E=3$ MeV бралися конкретні дискретні рівні з бази даних RIPL-3 [20]. При більш високих енергіях збудження, спектр вважався неперервним, описувався густиною рівнів $\rho(E, J, \pi)$ і розбивався на певну кількість енергетичних зон. В нашому випадку 50. Для кожної зони визначався ефективний коефіцієнт проникності T_1^{ef} .

Для опису густини рівнів ρ в даних розрахунках використовувалася зміщена по енергії модель Фермі-газу [21]. Результати розрахунку перерізу реакції $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ приведені світлими кружками на рис. 4.

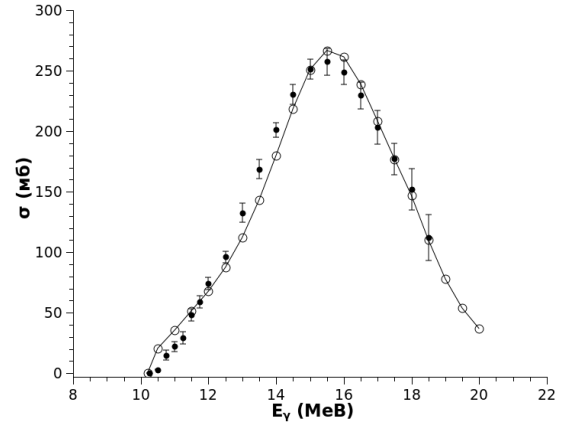


Рис. 4. Порівняння розрахунку повного перерізу реакції (γ, n) на ядрі ^{120}Te з експериментальними даними.

Порівняння розрахованих і експериментальних результатів (чорні точки на рис. 4) показує на їх задовільне узгодження. Таке узгодження скоріше за все вказує на визначальний вклад статистичного механізму у переріз розглянутої (γ, n) реакції і відповідно порівняно менший вклад напівпрямих процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Varlamov A.V. et al. Atlas of Giant Dipole Resonances – Vienna: IAEA, INDC(NDS)-394, 1999.
2. Мазур В.М. Возбуждение изомерных состояний ядер в фотонейтронных реакциях в области гигантского дипольного резонанса // ФЭЧАЯ. – 2000. – Т.31. – С. 385.
3. Gurevich G.M., Lazareva L.E., Mazur V.M. et al. Giant resonance in the total photoabsorption cross-section of $Z=90$ nuclei // Nucl. Phys. A. – 1976. – V.273. – P. 326.
4. Gurevich G.M., Lazareva L.E., Mazur V.M. Total nuclear photoabsorption cross-sections in the region $150 < A < 190$ // Nucl. Phys. A. – 1981. – V.351. – P. 257.
5. Weller H.R., Ahmed M.W. The HIγS facility: a free-electron laser generated gamma-ray beam for research in nuclear physics // Modern Phys. Letters. – 2003. – V.18. – №23 – P. 1569.
6. Horikawa K., Miyamoto S., Amano S. et al. Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering γ -ray photons generated in an electron storage ring: NewSUBARU // Nucl. Instr. And Meth. – 2010. – A618. – P. 209.
7. Nair C., Junghans A.R., Erhard M. et al. Dipole strength in ^{144}Sm studied via (γ, n) , (γ, p) and (γ, α) reactions // Phys. Rev. C. – 2010. – V.81. – 055806.
8. Burbidge E.M., Burbidge G.R., Fowler W.A. et al. Synthesis of the

- Elements in Stars // *Rev. Mod. Phys.* – 1957. – V. 29. – P. 547.
9. Lambert R.D.L. The p-nuclei: abundances and origins // *The Astron. and Astrophys. Rev.* – 1992. – V.3. – P. 201.
 10. Arnould M. and Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics status// *Phys. Rep.* – 2003. – V.384. – P. 1.
 11. Leprêtre A., Beil H., Bergere R. et al. A study of the giant dipole resonance in doubly even tellurium and cerium isotopes // *Nucl. Phys. A.* – 1976. – V.258. – P. 350.
 12. Kapica S.P. and Melekhin V.M. *The Microtron* – London: Harwood Academic, 1978.
 13. Firestone R.B. *Table of Isotopes* – New York: J. Wiley and Sons, 1996.
 14. Symochko D.M., Browne E., Tuli J.K. *Nuclear Data Sheets for A = 119* // *Nucl. Data Sheets.* – 2009. – V.110. – P. 2945.
 15. Tendow Y. *Nuclear Data Sheets for A = 129* // *Nucl. Data Sheets.* – 1996. – V.77. – P. 631.
 16. Bogdankevich O.V. and Nicolaev F.A. *Methods in Bremsstrahlung Research.* – New York: Academic Press, 1996.
 17. Koning A.J., Hilarie S. and Duijvestijn M.C. *Proceed. of the Intern. Conference on Nucl. Data for Science and Technology.* – Nice, France: EDP Science.– 2008. – P. 211-214.
 18. Hauser W. and Feshbach H. The inelastic scattering of neutrons. // *Phys. Rev.* – 1952. – V.87. – P. 366.
 19. Koning A.J., Delaroche J.P. Local and global nucleon optical models from 1 keV to 200 MeV // *Nucl. Phys.* – 2003. – V.1713. – P. 231.
 20. Capote P., Heman M., Obložinsky P. et al. RIPL – Reference Input Parameter Library for Calculation of Nuclear Reactions and Nuclear Data Evaluations // *Nucl. Data Sheets.* – 2009. – V.110. – P. 3107.
 21. Dilg W. et al. Level density parameters for the back-shifted fermi gas model in the mass range $40 < A < 250$ // *Nucl. Phys. A.* – 1973. – V.17. – P. 269.

Стаття надійшла до редакції 7.02.2012

V.M. Mazur, D.M. Symochko, Z.M. Bigan, P.S. Derechkey

Institute of Electron Physics of NAS of Ukraine
88017, Uzhhorod, Universytetska Str., 21, Ukraine
e-mail: nuclear@email.uz.ua

CROSS SECTION OF THE (γ, n) REACTION ON ^{120}Te NUCLEUS IN THE GIANT E1-RESONANCE ENERGY REGION

Results of study on the cross-section of the $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ reaction in the energy region 10-18 MeV are presented. Measurements were made with the activation technique. A comparison of experimental results with TALYS-1.2 calculations was carried.

Key words: photoneutron reaction, cross section, giant dipole resonance.

В.М. Мазур, Д.М. Сымочко, З.М. Биган, П.С. Деречкей

Институт электронной физики НАН Украины, 88017, Ужгород, ул. Университетская, 21
e-mail: nuclear@email.uz.ua

СЕЧЕНИЕ РЕАКЦИИ (γ, n) НА ЯДРЕ ^{120}Te В ОБЛАСТИ E1-ГИГАНТСКОГО РЕЗОНАНСА

Представлены результаты изучения сечения реакции $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119}\text{Te}$ в интервале энергии гамма-квантов 10-18 МэВ. Измерения выполнены с помощью активационной методики. Проведено сравнение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами, выполненными с использованием программного кода TALYS-1.2.

Ключевые слова: фотонейтронные реакции, сечение, гигантский дипольный резонанс.