УДК 539.172.2
PACS 25.20.DC
DOI 10.24144/2415-8038.2019.45.39-49

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

Інститут електронної фізики НАН України, 88000, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна,
e-mail: derecskei89@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНОГО СТАНУ $11/2^-$ ЯДРА ^{137}Ba В РЕАКЦІЇ $(\gamma,\gamma')^m$

Виконане теоретичне та експериментальне дослідження перерізу збудження ізомерного стану $11/2^-$ ядра ^{137}Ba в реакції $(\gamma,\gamma')^m$. Експериментальне дослідження проводилося на гальмівному пучку мікротрону М-30 в області енергій 4–17 МеВ.
Ключові слова: атомне ядро, ядерні реакції, переріз, гігантський дипольний резонанс, гальмівний гамма-спектр, ізомерне відношення.

Вступ

Процеси розсіювання гамма-квантів атомними ядрами зв'язані з основними проблемами ядерної фізики: структурою ядра і механізмами його збудження. Цими обставинами в значній мірі і визначається постійний інтерес дослідників до даної проблеми [1].

Розсіювання фотонів атомними ядрами є універсальним процесом, що відбувається на всіх ядрах і при всіх енергіях. Воно може відбуватися із зміною (непружнє) і без зміни енергії фотона (пружнє). Ізомерні ядерні рівні збуджуються в непружніх процесах.

В останній час помітно зріс інтерес до вивчення збудження ізомерних станів ядер в реакціях (γ,γ'), як з точки зору вивчення їх механізмів збудження та уточнення перерізів збудження реакцій $(\gamma,\gamma')^m$, так і з метою їх прикладного використання в т.ч. в активаційних аналізах [2–4]. Відомо, що реакції $(\gamma,\gamma')^m$ йдуть зі значною ймовірністю при енергіях гамма-квантів нижче порогів (γ,n) або (γ,p) реакцій, які є джерелом утворення радіоактивних ядер і відповідно заважаючого гамма-фону. При такому використанні реакції (γ,γ') зовсім не активують широко розповсюджені елементи, які зазвичай присутні в дослідних зразках матриці. Тому виявляється можливим досягнути високої чутливості активаційного аналізу, недивлячись на присутність значних домішок сторонніх елементів.

Дана робота присвячена експериментальному і теоретичному дослідженням перерізу збудження ізомерного стану ядра ^{137}Ba в реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba в області E1-гігантського резонансу. Метастабільний стан ^{137}Ba має спін-парність $11/2^-$, енергію $E = 0,661$ МеВ і період напіврозпаду $T_{1/2} = 2,55$ хв [5].

Методика експерименту

Робота виконувалася на пучку гальмівних гамма-квантів мікротрону М-30 ІЕФ НАН України в області енергій 4 – 17 МеВ. Розкид енергій прискорених електронів становив $\pm$(5 – 20) кеВ і визначався фазовими коливаннями, амплітуда яких при числі орбіт $n > 3$ практично не залежить від їх числа [6].

Зміна енергії прискорених електронів здійснювалась двома методами: у широких межах – зміною числа орбіт, які проходять електрони, тобто зміною числа хвильоводних вставок і в малих межах – зміною величини провідного магнітного поля і відповідною зміною величини прискорювального потенціалу в резонаторі. Індукція магніт-

ного поля вимірювалася методом ядерного магнітного резонансу, при цьому похибка виміру не перевищувала $\pm$0,1%.

Більш ранні роботи з вивчення перерізів реакції $(\gamma,\gamma')^m$ виконувалися на бетатронах і синхротронах [7–9]. При відносно меншій інтенсивності гальмівного гамма-пучка важливою властивістю і перевагою цих експериментів була незмінність напрямку прольоту гамма-пучка. Перевагою мікротрону є суттєво більша інтенсивність гальмівного гамма-випромінювання ($\sim$ 2 порядки). Але при зміні енергії прискореного електронного пучка шляхом зміни напруженості провідного магнітного поля відбувається деяка зміна напрямку пучка, що вимагає контролю і корекції.

Пучок прискорених електронів, що виводився з прискорювача падав на танталову гальмівну мішень товщиною 0,5 мм. Для контролю електронного пучка використовувався монітор вторинної емісії, розташований безпосередньо перед вікном виводу пучка з мікротрону. Гальмівний пучок формувався залізним коліматором товщиною 30 см. Для очищення γ-пучка від електронів використовувався графітовий поглинач товщиною 7 см. В якості прохідного монітора гамма-пучка використовувалася іонізаційна камера, розташована безпосередньо перед досліджуваним зразком. Вона калібрувалася товстостінною алюмінієвою абсолютною камерою з об′ємом чутливої щілини 4,38 см^3 [10, 11], апаратурна функція якої враховувала наявність в пучку графітового поглинача.

Вимірювання зводилося до наступної процедури: в момент установки дослідного зразка в пучок одночасно включалася реєстрація інтенсивності гамма-випромінювання, що пройшло через дослідну мішень. Після встановленого часу опромінення зразок доставлявся транспортним пристроєм в вимірювальний блок на гамма-спектрометр. Всі операції: установка зразка на опромінення, транспортування, вимірювання наведеної активності, час вимірювання здійснювалися автоматично. Ідентифікація заселеності ізомерних рівнів ^{137}Ba здійснювалася по лінії з енергією 0,661 МеВ. Більш детально методика експерименту приведена в роботах [12, 13].

Досліджувані мішені являли собою диски порошкоподібного вуглекислого барію $BaCO_3$ вагою 2 г запресовані в капролонові касети діаметром 30 мм. Використовувалися ізотопічно збагачені зразки Барію. При цьому при дослідженні реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba в склад мішені входили (82,2$\pm$0,05)% ізотопу ^{137}Ba і (17,49$\pm$0,02)% ізотопу ^{138}Ba.

Оскільки в досліджуваних зразках ^{137}Ba був присутній в якості домішки ізотоп ^{138}Ba, то паралельно з вимірюванням виходу реакції (γ,γ') вище порогу реакції (γ,n) проводилося вимірювання виходу реакції ^{138}Ba$(\gamma,n)^{137m}$Ba (мішень складалася з (99,8$\pm$0,05)% процентів ізотопу ^{138}Ba), що дозволяло вносити відповідні поправки у вихід реакції $(\gamma,\gamma')^m$.

Експериментальні результати і їх аналіз

Експериментальна крива вимірювання виходу реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba проводилися з кроком 0,5 МеВ і була використана для розрахунку перерізу $\sigma_m(E)$ реакції $(\gamma,\gamma')^m$. Обчислення проводилося методом Пенфолда-Лісса [11] з кроком $E = 1$ МеВ. Одержаний переріз реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba приведений на рис. 1. Вказані на рис. 1 похибки стандартні. Як видно з рис. 1 переріз реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba в інтервалі енергій гамма-квантів 5 – 18 МеВ має двогорбий характер. Перший максимум при енергії 7,0 МеВ досягає 0,78 $\pm$ 0,04 мб, другий – широкий максимум при енергії $\sim$15,0 МеВ становить 0,22$\pm$0,10 мб.

З метою порівняння одержаних експериментальних даних з теоретичними розрахунками нами за допомогою програмного пакета TALYS – 1.9 [14] розрахований повний переріз розсіювання гамма-квантів σ^{tot}_{scat} на ядрі ^{137}Ba. Програма TALYS – 1.9 – зібраний в одному коді пакет сучасних моделей, що описують процес ядерних реакцій.

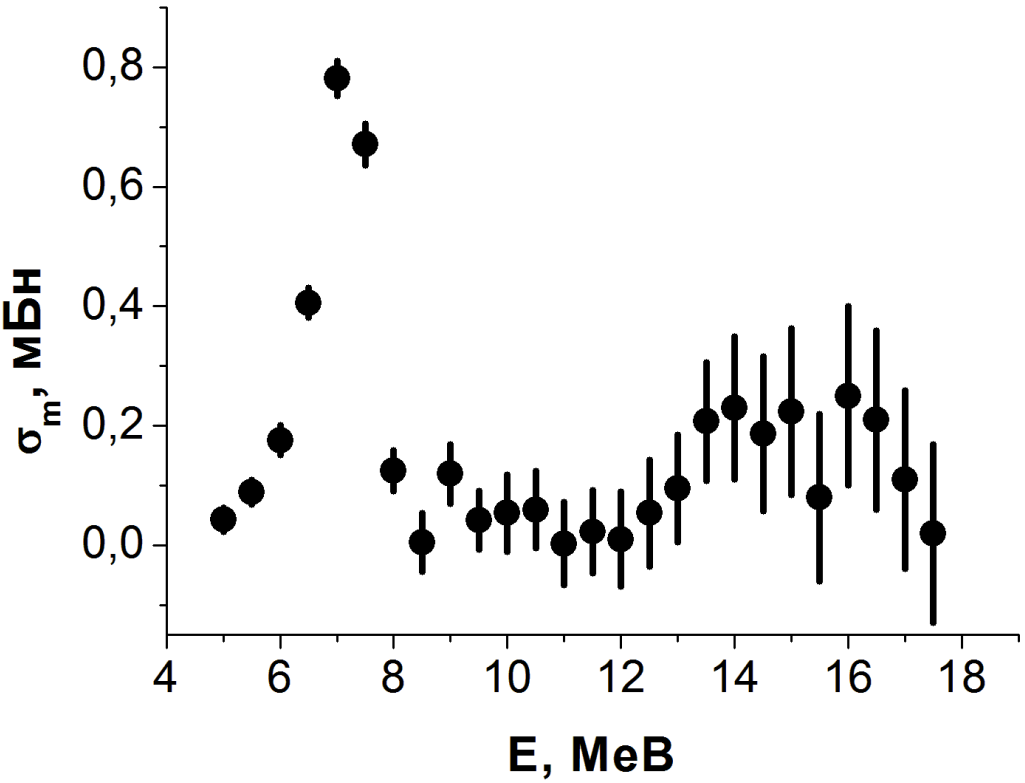

Рис. 1: Експериментальний переріз реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba.

При розрахунках повного перерізу реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137}$Ba використовувалась наступна схема: на ядро-зразок з параметрами (Z_i, N_i) і спін-парністю (J_i, π_i) падає гамма-квант з енергією E_γ ($E_\gamma = E_c$) і створюється ядро (компаунд) із значенням спіну і парності (J_c, π_c), а далі розраховується повний переріз фотопоглинання σ_{tot}, для опису якого використовуються одержані експериментальні параметри гігантських резонансів [15]. Вважається, що розпад збудженого ядра відбувається за рахунок двох каналів: нерівноважного процесу [16] і статистичного механізму Хаузера-Фешбаха [17]. Густина рівнів розраховувалась за допомогою моделі Фермі-газу зі зміщенням по енергії [18]. Спектр низькорозташованих рівнів враховувався. До енергії збудження 3 МеВ бралися рівні з бази даних RIPL-3. Для розрахунку конкуренції радіаційного каналу і каналів з вильотом інших частинок обчислювались передаточні коефіцієнти, які входять в модель Хаузера-Фешбаха. Радіаційні силові функції, що входять в передаточні коефіцієнти бралися для E1-переходів у виді узагальненого лоренціана запропонованого Копецким і Углем [19], для переходів інших мультиполів використовувалась формула Акселя-Брінка [20, 21]. Результати розрахунку повного перерізу розсіювання гамма-квантів σ^{tot}_{scat} в реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137}$Ba приведені на рис. 2. Як видно з рис. 2 характер енергетичної залежності перерізу σ^{tot}_{scat} реакції (γ,γ') в загальних рисах повторює одержаний нами експериментальний переріз реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba (рис. 1). В повному перерізі розсіювання також спостерігаються два максимума – при енергіях 7,0 МеВ і 15,0 МеВ, але при цьому σ^{tot}_{scat} складає в максимумі 10,3 мб при $E = 7,0$ МеВ і 1,5 мб при $E = 15,0$ МеВ, що суттєво більше ніж в реакції $(\gamma,\gamma')^m$.

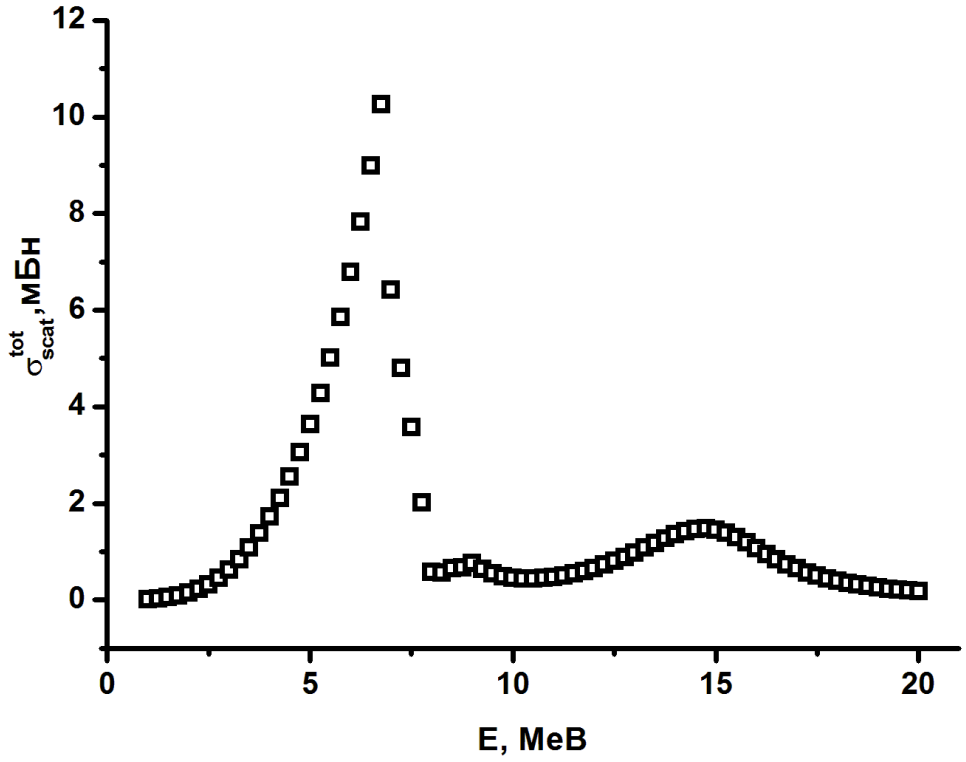

Рис. 2: Повний переріз розсіювання гамма-квантів σ^{tot}_{scat} в реакції (γ, γ').

Одержаний нами експериментальний переріз реакції $(\gamma, \gamma')^m$ дозволяє одержати для каналу розсіювання оцінку експериментального ізомерного відношення $r = \sigma_m/\sigma^{tot}_{scat}$ і порівняти з розрахунками. Апроксимація перерізу повного поглинання гамма-квантів ядрами σ_{tot} лоренцовою кривою задовільно описує експериментальні дані на віддалі одної-двох ширин від максимуму гігантського E1-резонансу, тому є можливість, використовуючи літературні експериментальні дані по повним перерізам фотопоглинання (повним фотонейтронним перерізам) для ядер барію-138 [22], оцінити експериментальне ізомерне відношення розсіювання $r = \sigma_m/\sigma^{tot}_{scat}$ в області порогу реакції ^{137}Ba$(\gamma, \gamma')^{137m}$Ba, оскільки в області порогу реакції (γ, n) і нижче повний переріз фотопоглинання вичерпується повним перерізом розсіювання σ^{tot}_{scat}. Із-за відсутності експериментального перерізу σ_{tot} для барію-137 в якості його значень бралися повні перерізи для ^{138}Ba. Так як ядра ^{137}Ba і ^{138}Ba є сусідніми і не лежать в перехідній області, то завдяки слабій залежності параметрів гігантського резонансу від маси ядер , таке використання являється допустимим. Одержане нами ізомерне відношення $r = \sigma_m/\sigma^{tot}_{scat}$ для каналу розсіювання для енергії фотонів $E = 7,0$ МеВ складає 0,085 $\pm$ 0,02 і приведене точкою на рис. 3. На цьому ж рисунку приведені результати розрахунку ізомерних відношень по статистичній теорії Фермі-газу в дусі роботи [23]. При цьому робились наступні допущення: поглинається дипольний гамма-квант, ядро переходить в стан із спіном (J$_c$, π_c). Збудження утвореного дочірнього ядра знімається каскадом гамма-переходів, останній з яких (вирішальний) заселяє основний або ізомерний стан.

При розрахунках спінова частина густини ядерних рівнів бралася із формули Бете-Блоха [24]:

$$\rho(J) = (2J+1) \cdot \exp\left[-\frac{J+1/2}{2\sigma^2}\right],$$

де σ – параметр обмеження по спіну, який у відповідності з [24] обчислюється за формулою:

$$\sigma^2 = 0,0889\sqrt{aU} \cdot A^{2/3},$$

тут a – параметр густини рівнів, A – масове число, U – ефективна енергія збудження. Середнє число гамма-переходів в каскаді обчислювалося за формулою для дипольного випромінювання [25]:

$$N = \frac{1}{2}\sqrt{aU}.$$

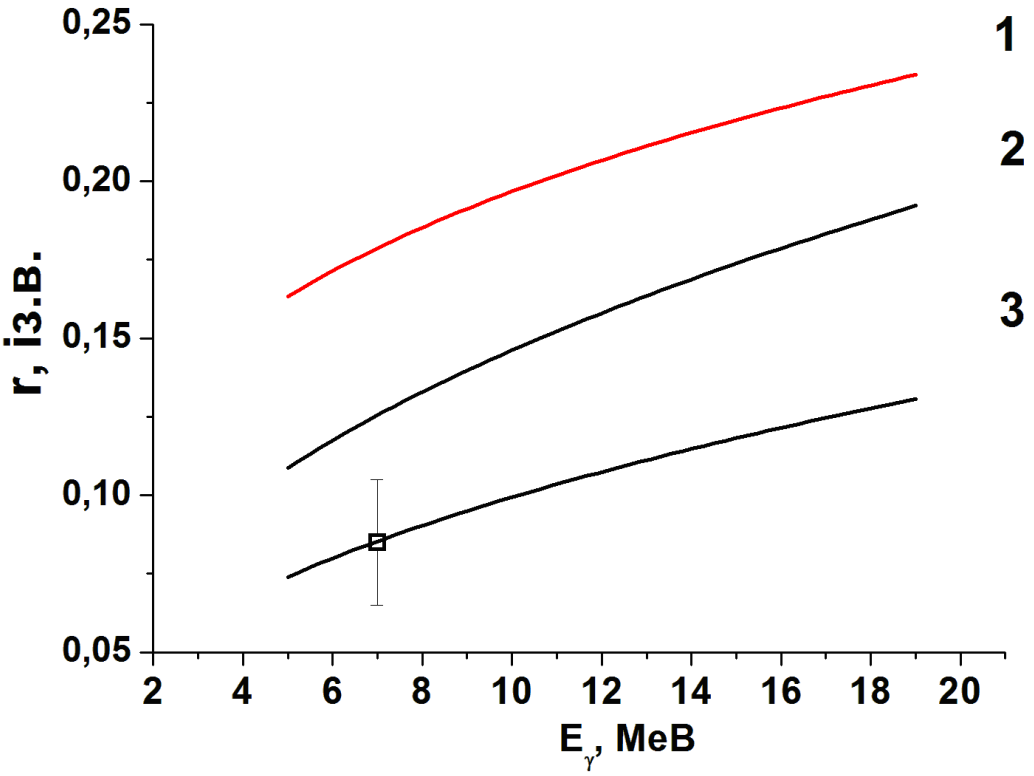

Рис. 3: Ізомерне відношення реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba.

Більш детально опис результатів для обчислення ізомерних відношень в реакції (γ,γ') приведено в роботі [26].

На рис. 3 крива 1 – це результат розрахунку залежності ізомерних відношень перерізів реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba від енергії гамма-квантів при фіксації параметра обмежень спіну σ на рівні $\sigma^2 = 9$, крива 2 – на рівні $\sigma^2 = 6.25$. Треба відзначити, що зменшення параметру σ покращує узгодження з експериментом. Обидві криві демонструють схожу залежність r від енергії фотонів. Із рисунку видно, що розрахунки по статистичній моделі вказують на плавний ріст ізомерного відношення r з ростом енергії гамма-квантів, що зв'язано із збільшенням кількості переходів в гамма-каскаді, що заселяє ізомерний стан. Крива 3 на рис. 3 – це віднормована на експериментальне ізомерне відношення при E=7,0 МеВ крива 2. Така крива дозволяє достатньо надійно оцінити ізомерне відношення перерізів в реакції (γ,γ') при більш високих енергіях гамма-квантів (10 – 18 МеВ), а відповідно, використовуючи теоретичний повний переріз розсіювання розрахувати теоретичний переріз збудження ізомерного стану реакції $(\gamma,\gamma')^m$ для ізотопу ^{137}Ba. На рис. 4 суцільною лінією приведений результат розрахунку перерізу збудження ізомерного стану в реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba. Видно, що він задовільно узгоджується з експериментальними даними як в інтервалі 5 – 8 МеВ так і в області 15 – 16 МеВ, тобто в області максимуму гігантського дипольного резонансу.

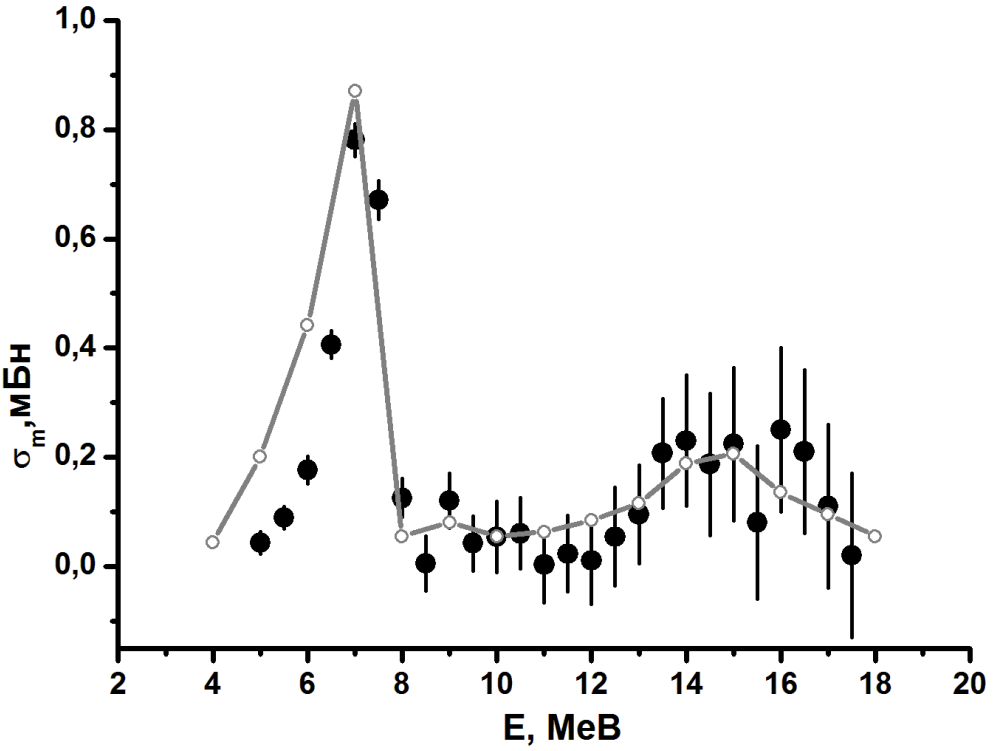

Рис. 4: Порівняння експериментального і теоретичного перерізів в реакції ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba.

Висновки

В результаті проведених досліджень одержана залежність перерізу збудження ізомерного стану $11/2^-$ ядра ^{137}Ba в реакції $(\gamma,\gamma')^m$. Експериментальне дослідження проводилося на гальмівному пучку мікротрону М–30 в області енергій 5 – 18 МеВ. Перший максимум в перерізі співпадає з порогом реакції (γ,n) на ядрі ^{138}Ba. Він формується з одного боку загальним ростом перерізу фотопоглинання в області 5 – 7 МеВ обумовлений гігантським дипольним резонансом із другого – спадом перерізу розсіювання вище 7 МеВ, викликаний конкуренцією каналів непружнього розсіювання гамма-квантів і (γ,n) реакції.

Другий максимум скоріш за все зв′язаний з загальним ростом перерізу фотопоглинання σ_{tot} в області максимуму гігантського E1-резонансу і відповідно з загальним ростом повного перерізу розсіювання гамма-квантів на ядрі ^{137}Ba в цій області енергій.

В досліджуваному інтервалі енергій проведено розрахунки перерізів розсіювання гамма-квантів на ізотопі ^{137}Ba по програмі TALYS–1.9, які доповнили обчислення ізомерних відношень в рамках статистичного підходу. Одержаний розрахунковий переріз реакції $(\gamma,\gamma')^m$ добре узгоджується з експериментальними даними. Таке узгодження скоріш за все свідчить про домінування статистичного механізму в досліджуваній реакції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Гангрский Ю.П. Рассеяние γ-квантов ядрами / Ю.П. Гангрский, В.М. Мазур // ЭЧАЯ – 2002. – Т. 33, вып. 1. – С. 158-200.

[2] Versteegen M. Low-energy modification of the γ-strength function of the odd-even nucleus ^{115}In / M. Versteegen, D. Denis-Petit, V. Méot, T. Bonnet, M. Comet, F. Gobet, F. Hannachi,

M. Tarisien, P. Morel, M. Martini, S. Péru // Phys. Rev. C. – 2016. – V. 94. – 044325. – P. 1–12.

[3] Dzhilavyan L.Z. Cross section for the reaction ^{115}In$(\gamma,\gamma')^{115m}$In in the region of the E1 giant resonance / L.Z. Dzhilavyan // Phys. Atom. Nucl. – 2015. – V. 78., Iss. 5 – P. 624 – 633.

[4] Versteegen M. Effective photoexcitation cross-section of ^{115}In$(\gamma,\gamma')^{115m}$In from photoactivation data / M. Versteegen, D. Denis-Petit, V. Méot, T. Bonnet, M. Comet, F. Gobet, F. Hannachi, P. Morel, M. Martini, S. Péru, M. Tarisien, M-M. Aléonard // EPJ Web of Conferences – 2016. – V. 122. – 03001. – P. 1–12.

[5] Firestone R.B. Table of Isotopes, 8th. Edition / R.B. Firestone. – New-York: J. Wiley and Sons, 1996. – 348 p.

[6] Kapica S.P. The Microtron / S.P. Kapica, V.N. Melechin. – London: Harwood Academie, 1978. – 211 p.

[7] Богданкевич О.В. Неупругое рассеяние фотонов на ядрах Rh^{103} / О.В. Богданкевич, Л.Е. Лазарева, А.М. Моисеев // ЖЭТФ – 1960. – Т. 39 – С. 1224 –1228.

[8] Silva E. Inelastic Scattering of photons in ^{89}Y / E. Silva, J. Goldemberg // Phys. Rev. – 1958. – V. 110 – №5. – P. 1102 –1103.

[9] Meyer-Schizmeister L. Inelastic Nuclear Scattering of Photons by ^{137}Au / L. Meyer-Schizmeister, V.L. Telegdi // Phys. Rev. – 1956. – V. 104 – №1. – P. 186 –192.

[10] Flowers B.H. A thick-walled ionization chamber for measuring the intensity of X – Radiation of energy up to 25 Mev / B.H. Flowers, J.D. Lawson, E.B. Fossey // Proc. Phys. Soc. – 1952. – V. 65B. – P. 286 – 292.

[11] Bogdankevich O. V. Methods in Bremsstrahlung Research / O. V. Bogdankevich, F.A. Nikolaev. – New-York: Academic Press, 1966. – 247 p.

[12] Mazur V. M. Excitation of the ^{119}Te^m, ^{121}Te^m, ^{123}Te^m, ^{127}Te^m and ^{129}Te^m isomers in (γ, n) reactions from 10 to 20 MeV / V.M. Mazur, D.M. Symochko, Z.M. Bigan, T.V. Poltorzhytska // Phys. Rev. C – 87. – 2013. – 044604. – P. 1 – 8.

[13] Мазур В.М. Изучение сечений заселения изомеров ^{111m}Cd и ^{199m}Hg при неупругом рассеянии фотонов при энергиях 4 – 10 МэВ / З.М. Биган, Мазур В.М., И.В. Соколюк. – К. КИЯИ, 1988. – 15 с. – (Препринт / НАН Украины, Институт ядерных исследований; КИЯИ-88-13).

[14] Koning A.J. TALYS: Comprehensive nuclear reaction modelling / A.J. Koning, S. Hilarie, M.C. Duijvestijn // AIP Conference Proceedings – V. 769 – P. 1154 – 2005.

[15] Varlamov A.V. Atlas of Giant Dipole Resonances / A.V. Varlamov, V.V. Varlamov, D.S. Rudenko, M.E. Stepanov // IAEA, INDS(NDS) – 394, Vienna, Austria – 1999 – 350 p.

[16] Gadiodi E. Pre-equilibrium Nuclear Reaction / E. Gadiodi, P.E. Hadgson. – Oxford: University Press – Oxford, 1992. – 150 p.

[17] Hauser W. The inelastic scattering of neutrons / W. Hauser, H. Fesbach // Phys. Rev. – 1952. – V. 87. – P. 366 – 373.

[18] Dilg W. Level density parameters for the Back-shifted fermi-gas model in the mass range $40 < A < 250$ / W. Dilg, W. Schatl, H. Vonach, M. Uhl // Nucl. Phys. A. – 1973. – V. 217. – P. 269 – 298.

[19] Kopecky J. Test of gamma-ray strength functions in nuclear reaction model calculations / J. Kopecky, M. Uhl // Phys. Rev. C. – 1990. – V. 41. – P. 1941–1955.

[20] Brink D.M. Individual particle and collective aspects of the nuclear photoeffect / D.M. Brink // Nucl. Phys. – 1957. – V. 4. – P. 215 – 220.

[21] Axel P. Electric Dipole Ground-State Transition Width Strength Function and 7-MeV photon Interactions / P. Axel // Phys. Rev. – 1962. – V. 126. – P. 671 – 683.

[22] Berman B.L. Photoneutron Cross Sections for Ba^{128} and N^{14} / B.L. Berman // Phys. Rev. C. – 1970. – V. 2. – P. 2318 – 2323.

[23] Арифов Л.Я. Относительная вероятность заселения изомеров в реакции радиационного захвата / Л.Я. Арифов, Б.С. Мазитов, В.Г. Уланов // Ядерная Физика – 1981 – Т. 34. – вип.4 – С. 1028 – 1043.

[24] Малышев А.В. Плотность уровней и структура атомных ядер / А.В. Малышев. – Москва: Атомиздат, 1969. – 350 с.

[25] Струтинский В.М. Спектры γ-лучей, возникших при захвате тепловых нейтронов тяжёлыми ядрами / В.М. Струтинский, М.В. Грошев, М.К. Акимов // ЖЭТФ – Т. 38 – №2 – 1960 – С. 598 – 611.

[26] Биган З.М. Изомерные отношения в реакции $(\gamma, \gamma$') на тяжёлых деформированных ядрах ^{167}Er, ^{179}Hf, ^{183}W / З.М. Биган, М.В. Гошовский, В.М. Мазур, З. З. Торич. – К.КИЯИ, 1985. – 12 с. – (Препринт / НАН Украины, Институт ядерных исследований; КИЯИ-85-15).

Стаття надійшла до редакції 3.04.2019

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

Институт электронной физики НАН Украины, 88000, г. Ужгород, ул. Университетская, 21, Украина, e-mail: derecskei89@gmail.com

ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРНОГО СОСТОЯНИЯ $11/2^-$ ЯДРА ^{137}Ba В РЕАКЦИИ $(\gamma, \gamma')^m$

Исполнено теоретическое и экспериментальное исследование сечения возбуждения изомерного состояния $11/2^-$ ядра ^{137}Ba в реакции $(\gamma, \gamma')^m$. Экспериментальное исследование проводилось на тормозном пучке гамма-квантов микротрона М-30 в области энергий 4–17 МэВ.
Ключевые слова: атомное ядро, ядерные реакции, сечение, гигантский дипольный резонанс, тормозной гамма-спектр, изомерное отношение.

V.M. Mazur, Z.M. Bigan, P.S. Derechkei, D.M. Sумochko

Institute of electron physics of the NAS of Ukraine, 88000, 21 Universitetska str., Uzhhorod, Ukraine,
e-mail: derecskei89@gmail.com

INVESTIGATION OF THE $11/2^-$ ISOMERIC STATE EXCITATION OF THE ^{137}Ba NUCLEUS IN THE $(\gamma,\gamma')^m$ REACTION

Purpose. To determine the $(\gamma,\gamma')^m$ reaction cross section dependence on the gamma-quanta energy for the ^{137}Ba nucleus.
Methods. Activation analysis used for the measurement of the reaction output channels.
Results. This paper presents measurement results for the experimental determination of the ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba reaction cross section in the region $E_{\gamma max} = 5-18$ MeV for the maximum energies of the bremsstrahlung gamma-spectra. The work was performed on a beam of M-30 microtron electron accelerator Bremsstrahlung gamma rays. The energy dispersion of the accelerated electrons was ±(5–20) keV. The induction of the magnetic field of the accelerator and the corresponding energy of the accelerated electrons were determined by the method of nuclear magnetic resonance, and the measurement error did not exceed ±0.1%. The experimental yield curve of the reaction ^{137}Ba$(\gamma,\gamma')^{137m}$Ba was measured in 0.5 MeV increments and was used to calculate the cross section σ_m(E) of the reaction $(\gamma,\gamma')^m$. Calculations of σ_m(E) were performed by the Penfold-Leiss method. The obtained experimental results were compared with theoretical calculations performed using the TALYS–1.9 software.
Conclusion. In the obtained cross-sections a peak can be observed with a maximum of 0.8 mb at 7.0 MeV, and a smaller peak with a maximum at 15 MeV. The observation, that the theoretical cross section closely follows the experimental data points to the domination of the statistical mechanism in the $(\gamma,\gamma')^m$ reaction.
Keywords: nuclear reaction, isomeric yield ratio, giant dipole resonance, Bremsstrahlung gamma-spectrum.

REFERENCES

[1] Gangrsky, Yu.P., Mazur, V.M. (2002), «The scattering of γ-quanta by Nuclei and excitation isomer states» [«Rasseyanie γ-kvantov yadrami»], PEPAN [Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra], V. 33, Iss. 1, pp. 158 – 200.

[2] Versteegen, M., Denis-Petit, D., Méot, V., Bonnet, T., Comet, M., Gobet, F., Hannachi, F., Tarisien, M., Morel, P., Martini, M., Péru, S. (2016), «Low-energy modification of the γ-strength function of the odd-even nucleus ^{115}In», Phys. Rev. C., V. 94, 044325, pp. 1 – 12.

[3] Dzhilavyan, L.Z. (2015), «Cross section for the reaction ^{115}In$(\gamma,\gamma')^{115m}$In in the region of the E1 giant resonance», Phys. Atom. Nucl., V. 78, pp. 624 – 633.

[4] Versteegen, M., Denis-Petit, D., Méot, V., Bonnet, T., Comet, M., Gobet, F., Hannachi, F., Morel, P., Martini, M., Péru, S., Tarisien, M., Aléonard, M-M. (2016), «Effective photoexcitation cross-section of ^{115}In$(\gamma,\gamma')^{115m}$In from photoactivation data», EPJ Web of Conferences, V. 122, 03001, pp. 1 – 12.

[5] Firestone, R.B. (1996), Table of Isotopes, 8th. Edition, J. Wiley and Sons, New York, 347 p.

[6] Kapica, S.P. and Melechin, V.N. (1978), The Microtron, Harwood Academie, London, 211 p.

[7] Bogdankevich, O.V., Lazareva, L.E., Moiseev, A.M. (1960), «Inelastic photon scattering on Rh^{103} nuclei» [«Neuprugoe rasseyanie fotonov na yadrakh Rh^{103}»], ZhETF, V. 39, pp. 1224 – 1228.

[8] Silva, E., Goldemberg, J. (1958), «Inelastic Scattering of photons in ^{89}Y», Phys. Rev., V. 110, №5, pp. 1102 – 1103.

[9] Meyer-Schizmeister, L., Telegdi, V.L., (1956), «Inelastic Nuclear Scattering of Photons by Au^{137}», Phys. Rev., V. 104, №1., pp. 186 – 192.

[10] Flowers, B.H., Lawson, J.D., Fossey, E.B. (1952), «A thick-walled ionization chamber for measuring the intensity of X–Radiation of energy up to 25 MeV», Proc. Phys. Soc., V. 65B., pp. 286 – 292.

[11] Bogdankevich, O.V., Nikolaev, F.A. (1966), Methods in Bremsstrahlung Research, Academic Press, New-York, 247 p.

[12] Mazur, V.M., Symochko, D.M., Bigan, Z.M., Poltorzhytska, T.V. (2013), «Excitation of the $^{119}Te^m$, $^{121}Te^m$, $^{123}Te^m$, $^{127}Te^m$ and $^{129}Te^m$ isomers in (γ, n) reactions from 10 to 20 MeV», Phys. Rev. C 87., 044604, pp. 1 – 8.

[13] Bigan, Z.M., Mazur, V.M., Sokolyuk, I.V. (1988), «Study of the cross sections populating the isomers ^{111m}Cd and ^{199m}Hg during the inelastic scattering of photons at energies 4-10 MeV» [«Izuchenie secheniy zaseleniya izomerov ^{111m}Cd i ^{199m}Hg pri neuprugom rasseyanii fotonov pri energiyakh 4-10 MeV»], Preprint KINR-88-13, Kyiv, 15 p.

[14] Koning, A.J., Hilarie, S., Duijvestijn, M.C. (2005), «TALYS: Comprehensive nuclear reaction modelling», AIP Conference Proceedings, v. 769, p.1154.

[15] Varlamov, A.V., Varlamov, V.V., Rudenko, D.S., Stepanov, M.E. (1999), Atlas of Giant Dipole Resonances, IAEA, INDS (NDS) – 394, Vienna, Austria, 311 p.

[16] Gadiodi, E. and Hadgson, P.E. (1992), Pre-equilibrium Nuclear Reaction, Oxford University Press, Oxford, 150 p.

[17] Hauser, W., Feshbach, H. (1952), «The inelastic scattering of neutrons», Phys. Rev., V. 87, pp. 366 – 373.

[18] Dilg, W., Schatl, W., Vonach, H., Uhl, M. (1973), «Level density parameters for the Back-shifted fermi-gas model in the mass range $40 < A < 250$», Nucl. Phys. A., V. 217., pp. 269-298.

[19] Kopecky, J. and Uhl, M. (1990), «Test of gamma-ray strength functions in nuclear reaction model calculations», Phys. Rev. C., V. 41, pp. 1941 – 1955.

[20] Brink, D.M. (1957), «Individual particle and collective aspects of the nuclear photoeffect», Nucl. Phys., V. 4, pp. 215 – 220.

[21] Axel, P. (1962), «Electric Dipole Ground-State Transition Width Strength Function and 7-MeV Photon Interactions», Phys. Rev., V. 126, pp. 671 – 683.

[22] Berman, B.L., Fultz, S.C., Caldwell, J.T. (1970), «Photoneutron Cross Sections for Ba^{138} and N^{14}», Phys. Rev. C., V. 2, pp. 2318 – 2323.

[23] Arifov, L.Y., Mazitov, B. S., Ulanov, V. G. (1981), «Relative probability of populating isomers in the radiation capture reaction» [«Otnositelnaya veroyatnost zaseleniya izomerov v reaktsii radiatsionnoho zakhvata»], YaF, №4, pp. 1028 – 1043.

[24] Malyshev, A.V. (1969), Level density and structure of atomic nuclei [Plotnost urovney i struktura atomnikh yader], Atomizdat, Moscow, 350 p.

[25] Strutinskiy, V.M., Groshev, M.V., Akimov, M.K. (1960), «Spectra of γ-beams, created in the capture of thermal neutrons by heavy nuclei» [«Spektry γ-luchey, voznikshikh pri zakhvate teplovykh neytronov tyazhelymi yadrami»], ZhETF, V. 38, №2, pp. 598 – 611.

[26] Bigan, Z.M., Goshovskiy, M.V. Mazur, V.M., Tarics, Z. Z. (1985), «Isomeric ratios in the (γ, γ') reaction in the heavy deformed nuclei ^{167}Er, ^{179}Hf, ^{183}W» [«Izomernye otnosheniya v reaktsii (γ, γ') na tyazhelykh deformirovannykh yadrakh ^{167}Er, ^{179}Hf, ^{183}W»], Preprint KINR-85-15, Kiyv, 12 p.

©Ужгородський національний університет