

ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНОГО СТАНУ $1/2^-$ ІЗОТОПУ ^{117}In В РЕАКЦІЯХ (γ, p)

В. С. Бохінюк¹, З. М. Біган², О. М. Парлаг¹, **І. В. Соколюк¹**, Д. М. Симочко², Т. Й. Маринець²

¹Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, Ужгород, UA-88000

²Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, Ужгород, UA-88017

(Отримано 5 лютого 2009 р.; в остаточному вигляді — 12 жовтня 2009 р.)

У діапазоні енергій 17–26 MeV досліджено енергетичну залежність збудження ізомерного стану $1/2^-$ в реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$. Одержані експериментальні ізомерні відношення порівнюються з розрахунками в межах програмного пакета TALYS-1.0.

Ключові слова: фотоядерні реакції, ізомерні відношення, гальмівний пучок, теорія Фермі-газу.

PACS number(s): 25.20.–x

Одним із напрямків досліджень фотоядерних реакцій, їхніх механізмів (статистичного, напівпрямого) є вимірювання ймовірності утворення дочірніх ядер у виділених квантових станах. До таких задач належить і вивчення в цих реакціях енергетичних залежностей ізомерних відношень (тобто відношення виходів реакцій утворення дочірнього ядра в ізомерному та основному станах).

Метою цієї роботи є вивчення енергетичної залежності ізомерних відношень виходів реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ в області енергій 17–26 MeV. Актуальність теми зумовлена, насамперед, відсутністю систематичних вимірювань такої залежності в цьому енергетичному діапазоні. Водночас подібні дослідження дають змогу встановити роль напівпрямих процесів у фотопротонних реакціях.

Складність вивчення цієї реакції пов'язана з тим, що, по-перше, її переріз малий і, відповідно, вихід її порівняно, наприклад, з конкуруючою реакцією (γ, n) приблизно на два порядки менший. По-друге, аналітична гамма-лінія з $E\gamma = 315$ keV від розпаду ^{117m}In є близько до лінії $E\gamma = 311$ keV від розпаду ^{119m}In , що утворюється в реакції $^{120}\text{Sn}(\gamma, p)^{119m}\text{In}$. Це ускладнює визначення ізомерних відношень виходів реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$.

Ця стаття є продовженням вивчення процесів збудження ізомерного стану ^{117m}In в реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$, виконаних на гамма-пучку бе-

татрона Ужгородського національного університету при максимальних енергіях гальмівного спектра 22–24 MeV [1].

За останні роки значення ізомерних відношень для цієї реакції опубліковані в низці робіт [2–10] (значення наведені в Таблиці 1), але всі вони отримані в окремих енергетичних точках, на установках з різними характеристиками і, відповідно, з різними систематичними похибками. Так, у працях [4, 5] опромінення проводили на бетатронах Б-25/30 і СБ-50 відповідно, в інших — використовували мікротрони й лінійні прискорювачі. У ролі мішені брали як природну суміш олова вагою до 15 г [4], так і ізотопно збагачені мішені [2]. Наведені в роботах середньоквадратичні похибки лежать у межах 8–20%, але, як видно з таблиці, одержані дані мають дуже суттєвий розкид, що не дає змоги провести оцінку енергетичної залежності ізомерного відношення $Y_m/Y_g = f(E_\gamma)$.

Досліджували фотоядерну реакцію $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ на бетатроні Б-25/30 УжНУ з кроком 0.5–1.0 MeV. Для вимірів використовували зразки, виготовлені з природної суміші ізотопів олова у вигляді металевих дисків вагою 7 г і товщиною 1 мм. Зразки опромінювали на відстані 25 см від гальмівної мішені бетатрона. Тривалість опромінення t_{irr} була в межах 20–50 хв. Наведену активність вимірювали гамма-спектрометром з Ge(Li) детектором об'ємом 100 см³.

$E\gamma m$	15	16	18	20	22	22
Y_m/Y_g	11.1±4.8	4.17 ± 0.32	5.88 ± 0.88	2.17 ± 0.23	9.5 ± 2.7	2.67 ± 0.18
Посил.	[2]	[2]	[2]	[10]	[4]	[5]
$E\gamma m$	24	24	24	25	30	30
Y_m/Y_g	3.8 ± 0.3	1.54 ± 0.35	1.48 ± 0.32	2.9 ± 0.2	3.1 ± 0.2	0.66 ± 0.07
Посил.	[8]	[7]	[9]	[5]	[5]	[10]

Таблиця 1. Значення ізомерних відношень.

Ефективність реєстрації гамма-квантів з енергією 315 кеВ становила $3.9 \cdot 10^{-2}$, а з енергією 553 кеВ — $1.65 \cdot 10^{-2}$. Роздільна здатність становила 0.6 % для гамма-ліній ^{60}Co . Вміст ізотопу ^{118}Sn в природній суміші ізотопів олова — 24.03%, поріг реакції (γ, p) — 10.7 МеВ. Материнське ядро ^{118}Sn магічне за кількістю протонів $Z = 50$. Спін-парність $J_g^\pi = 9/2^+$ основного стану ^{117}In визначається підоболонкою $1g_{9/2}$, на якій є 9 протонів. Ізмерний стан з $J_m^\pi = 1/2^-$ є дірковим станом оболонки $2p_{1/2}$. Спектроскопічні характеристики ядра ^{117}In : спін-парність основного J_g^π і ізмерного станів J_m^π , їхні періоди напіврозпаду $T_{1/2}^g$, $T_{1/2}^m$, енергія аналітичних ліній E_γ , вихід лінії I_γ наведено в Таблиці 2 [11].

Ядро	J^π	$T_{1/2}$, хв	E_γ , кеВ	$I_\gamma(\%)$
^{117m}In	$1/2^-$	116.2	315.3	19.1
^{117g}In	$9/2^+$	40	552.9	100

Таблиця 2. Спектроскопічні характеристики ізотопу ^{117}In .

Амплітудні спектри від розпаду опроміненних зразків вимірювали через кожні 20 хвилин для виключення можливості похибки за рахунок різного заван-

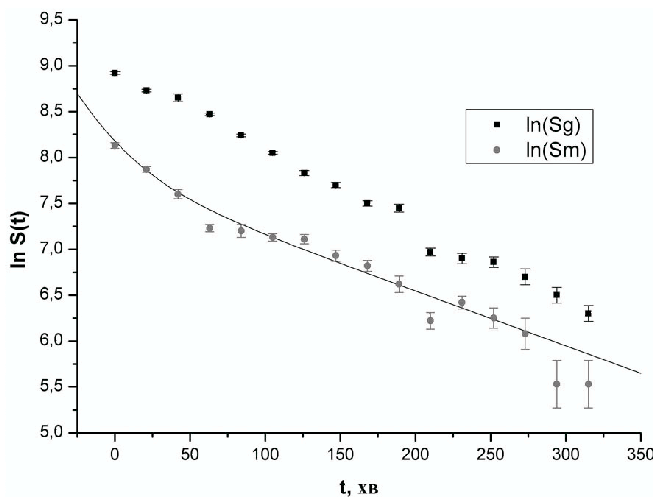


Рис. 1. Криві розпаду основного та ізмерного станів ^{117}In .

Визначали ізмерні відношення за методикою, описаною в статті [12]. Ізмерне відношення $d = Y_m/Y_n$ розраховували за формулою [13]:

$$d(E_{\gamma_{\max}}) = \frac{\lambda_g - \lambda_m}{\left[C \frac{N_g}{N_m} \frac{\varphi_m}{\varphi_g} (\lambda_g - \lambda_m) - p\lambda_g \right] \frac{\lambda_g}{\lambda_m} \frac{f_m(t)}{f_g(t)} + p\lambda_m},$$

таження спектрометра. Щоб зменшити завантаження спектрометра, інтенсивну лінію 158 кеВ, що супроводжує розпад продуктів (γ, n) реакції, відірізали дискримінатором.

На рис. 1 зображено залежність швидкості розпаду ліній 315 і 553 кеВ від часу — $S(t)$. Вимірювали з кроком 20 хв. Прямокутниками позначено розпад основного стану і відповідно лінії 553 кеВ, кружечками — розпад ізмерного стану і лінії 315 кеВ. Аналіз розпаду лінії 315 кеВ показує, що в ній наявна короткоживуча компонента з періодом напіврозпаду 18 хвилин. Вона належить ізотопу ^{119m}In , який випромінює гамма-кванти з енергією 311 кеВ і періодом напіврозпаду $T_{1/2} = 18.5$ хв. Тому вимірювали активності для розрахунку ізмерних відношень $^{117m,g}\text{In}$ після охолодження опроміненого зразка олова протягом 64 хвилин, а при розрахунку ізмерних відношень у площі під фотопіком N_m для лінії 315 кеВ вводили поправку на внесок від розпаду ^{119m}In . Криву розпаду ізмерного стану апроксимували функцією $A_1 \exp(-\lambda_1 t) + A_2 \exp(-\lambda_2 t)$ за допомогою методу найменших квадратів (λ_1 та λ_2 — сталі розпаду станів ^{119m}In та ^{117}In відповідно). Результати апроксимації наведено на рисунку 1 суцільною лінією. Одержано хороше узгодження експериментальних результатів та апроксимуючої функції при таких значеннях констант A_1 та A_2 : $A_1 = 1268.25718 \pm 145.34285$, $A_2 = 2295.7036 \pm 77.12724$.

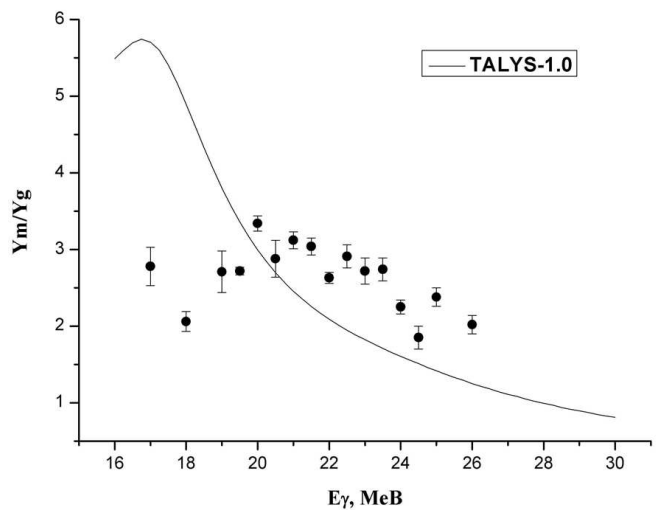


Рис. 2. Експериментальні та теоретично розраховані ізмерні відношення, одержані в реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$.

де $\lambda_{m,g}$ — сталі розпаду ізомерного й основного станів ^{117}In , N_g , N_m — кількість імпульсів під відповідними фотопічками, $\varphi_{m,g} = \zeta_{m,g} \cdot \kappa_{m,g} \cdot \alpha_{m,g}$; $\zeta_{m,g}$ — фотоефективність реєстрації гамма-ліній розпаду ізомерного й основного станів, $\kappa_{m,g}$ — коефіцієнт самопоглинання ліній мішені, $\alpha_{m,g}$ — інтенсивність ліній, $f_{m,g}$ — часова функція: $f_{m,g} = [1 - \exp(-\lambda_{m,g} \cdot t_{\text{irr}})] \cdot \exp(-\lambda_{m,g} \cdot t_{\text{cool}})[1 - \exp(-\lambda_{m,g} \cdot t_{\text{meas}})]$, t_{irr} , t_{cool} , t_{meas} — часи опромінення, охолодження, вимірювання, C — коефіцієнт, що враховує прорахунки q накладання імпульсів.

Результати розрахунків експериментальних ізомерних відношень виходів реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ від максимальної енергії спектра $E_{\gamma \text{max}}$ наведені на рис. 2. Вказані середньоквадратичні похибки розраховані на основі 3 серій вимірів. Отримані результати в області енергій 20–24 МеВ добре узгоджуються з результатами праць [8, 9, 10]. Аналіз залежності ізомерного відношення від енергії гальмівного випромінювання $d(E_{\gamma \text{max}})$ демонструє тенденцію до спаду величини d зі зростанням енергії $E_{\gamma \text{max}}$. Так, величина Y_m/Y_g змінюється від 2.75 при $E_{\gamma \text{max}} = 17.0$ МеВ до $Y_m/Y_g = 2$ при $E_{\gamma \text{max}} = 25$ МеВ.

Ми виконали теоретичні розрахунки залежності ізомерного відношення досліджуваної реакції від енергії гамма-квантів за допомогою пакета TALYS-1.0 [14]. Розрахунки зводилися до такої процедури. Ядром мішені поглинається дипольний гамма-квант. Переріз поглинання описується Лоренцевою кривою з експериментально визначеними параметрами. Оскільки материнське ядро ^{118}Sn парне, то утворене компаунд-ядро має спін-парність $J^\pi = 1^-$. Розпад цього стану по каналу (γ, p) реакції можливий за механізмом напівпрямих процесів або компаунд-ядра. Якщо емісія частинки відбувається на етапі утворення пари частинка-дірка $1p-1h$ або $2p-2h$ (але не більше $6p-6h$), то процес вважали передрівноважним і для розрахунків застосовували двокомпоненту екситонну модель. Після утворення шостої пари частинка-

дірка процес вважали таким, що йде за статистичним механізмом Гаузера-Фешбаха. При енергії збудження 20 МеВ доля передрівноважних процесів для реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117}\text{In}$ становила 13%. Емісію протонів на конкретні рівні (зони) дочірнього ядра знаходили з урахуванням коефіцієнтів проникності, одержаних у межах оптичної моделі.

Для кожного з дочірніх ядер до енергії збудження 3 МеВ брали відомі експериментальні дані по енергетичних рівнях та переходах між ними з бібліотеки RIPL-2. Вище від останнього відомого дискретного рівня енергію збудження зображали як квазінеперервний спектр, розбитий на скінченну (50) кількість еквідистантних енергетичних зон. Якщо материнське ядро розпадається в зону в неперервному спектрі, то використовується поняття ефективного коефіцієнта проникності. Густина рівнів розраховували в межах зміщеної за енергію моделі Фермі-газу [15]. Далі, починаючи з найвищої заселеної енергетичної зони, розглядали конкурентний процес розрядки каскадом гамма-квантів. Розрахунок каналів заселення низьколежачих зон та дискретних рівнів проводили до останнього закритого каналу, після чого залишалися заселеними лише основний та ізомерний стани.

Результати розрахунків зображені суцільною лінією на рис. 2. В області енергій $E_{\gamma \text{max}} = 20 \div 26$ МеВ спостерігаємо задовільне узгодження експериментальних даних із результатами обчислень. Водночас при енергіях, нижчих від 18 МеВ, криві дещо розходяться, що може бути об'єктом подальших досліджень. На жаль, у цій області величина перерізу фотопротонних реакцій різко спадає зі зменшенням енергії, тому подальші дослідження реакції $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ бажано провести на більш інтенсивних, ніж бетатрон, прискорювачах.

Автори висловлюють подяку В. М. Мазурові за змістовні дискусії та консультації.

-
- [1] И. И. Беседа, В. С. Бохинюк, В. М. Мазур, *Тезисы докладов 42-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра* (Наука, Санкт-Петербург, 1992), р. 245.
- [2] О. А. Бешейко *и др.*, Изв. РАН, сер. физ. **62**, №56, 663 (2005).
- [3] D. Kolev, J. Ernst, J. Phys. G **24**, 589 (1998).
- [4] М. Г. Давидов, В. К. Магера, А. Б. Трухов, Э. М. Шомуродов, Атом. Энергия **58**, №44 (1985).
- [5] С. Р. Палванов, О. Э. Ражабов. Атом. Энергия **87**, №10, 75 (1999).
- [6] Р. М. Осокина, Е. Ф. Ядровская. Изв. Акад. Наук СССР, сер. физ. **34**, №1, 182 (1970).
- [7] J. P. Hummel. Phys. Rev. **123**, 950 (1961).
- [8] Ю. П. Гангрский, П. Зузан, Н. Н. Колесников, Яд. физ. **62**, 1733 (1999).
- [9] D. Kolev, *et al.* Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A **356**, 390 (1995).
- [10] Н. А. Демёхина, А. С. Данагулян, Г. С. Карапетян. Яд. физ. **65**, 390 (2002).
- [11] J. Blachot, Nucl. Data Sheets **95**, 679 (2002).
- [12] В. С. Бохинюк *та ін.* Укр. фіз. журн. **43**, 907 (1998).
- [13] R. Vännska, R. Rieppo, Nucl. Instrum. Meth. **179**, 525 (1981).
- [14] A. Koning, S. Hilaire, M. Duijvestijn, *Proceedings of International conference on Nuclear Data for Science and Technology — ND2004, AIP, V. 769, Sept. 26 — Oct. 1 2004* (Santa Fe, USA, 2005), p. 1154.
- [15] W. Dilg, W. Schantl, H. Vonach, M. Uhl, Nucl. Phys. A **217**, 269 (1973).

EXCITATION OF ^{117}In $1/2^-$ ISOMERIC STATE IN (γ, p) REACTIONS

V. S. Bokhinuk¹, Z. M. Bigan², O. M. Parlag¹, I. V. Sokoluk¹, D. M. Symochko², T. J. Marynets²

¹*Uzhhorod National University Pidhirna St., 46, Uzhhorod, UA-88000, Ukraine*

²*Institute of Electron Physics of NAS of Ukraine
Universytetska St., 21, Uzhhorod, UA-88017, Ukraine*

The energy dependence of the $1/2^-$ the isomeric state excitation in $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$ the reaction has been investigated in the 17–26 MeV range. The experimental isomeric ratios are compared with the TALYS-1.0 calculations.