

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ПРОДУКТІВ ФОТОЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ НА ІЗОТОПАХ ІНДІО ПРИ ЕНЕРГІЇ ГАММА-КВАНТІВ ВИЩЕ 33 МеВ

О. А. Безшийко¹, О. М. Водін², Л. О. Голінка-Безшийко¹, А. М. Довбня², І. М. Каденко¹,
О. А. Коваленко¹, В. А. Кушнір³, О. І. Левон⁴, В. В. Мітроченко³, С. М. Олійник², Г. Е. Туллер²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

²Інститут фізики високих енергій та ядерної фізики ННЦ ХФТІ, Харків

³НПК «Прискорювач» ННЦ ХФТІ, Харків

⁴Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Ізотопні відношення виходів продуктів фотоядерних реакцій (γ , xn) одержано для максимальних енергій гальмівних гамма-квантів (E_{max}) у діапазоні 34 - 90 МеВ. Ізотопні відношення для ядра $^{110m.g}\text{In}$ визначено в реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ при $E_{max} = 34 - 43$ МеВ та в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$ при $E_{max} = 60 - 90$ МеВ. Ізотопні відношення для ядра $^{108m.g}\text{In}$ одержано в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$ при $E_{max} = 90$ МеВ. Одержані результати порівнюються з розрахунками в коді TALYS з використанням статистичного та передрівноважних модельних підходів.

Ключові слова: ізотопні відношення, фотоядерні реакції, нейтрони, індій, TALYS.

Вступ

У фотоядерних реакціях гамма-квантами не вноситься в складене ядро ні помітний кутовий момент, ні додаткова енергія збудження, пов'язана з енергією зв'язку налітаючої частинки. Саме тому ядерні реакції з гамма-квантами у вхідному каналі широко використовуються при дослідженні механізмів ядерних реакцій.

На сучасних джерелах гальмівного випромінювання з використанням прискорювачів електронів можливе апаратне регулювання енергії гамма-квантів, що дає змогу одержувати гальмівне випромінювання з різними максимальними енергіями, працювати в квазімоноенергетичному режимі в поєднанні з високими енергіями гамма-квантів. Це дає можливість досліджувати фотоядерні реакції в тому енергетичному діапазоні, де внаслідок недостатності даних відсутнє повне розуміння ядерних процесів.

У діапазоні енергій гігантського дипольного резонансу та в області енергій вище порога утворення піона характеристики фотоядерних реакцій вивчені достатньо детально. Проміжок енергій від 30 до 100 МеВ досліджено набагато гірше як в експериментальному, так і в теоретичному плані. Це є наслідком суттєво менших, ніж в області гігантського дипольного резонансу, значень перерізів у цій області енергій та обмеженої кількості регульованих по енергії інтенсивних джерел гамма-квантів.

За останні роки відбувся помітний прогрес у розвитку теоретичних та модельних підходів до опису фотоядерних реакцій у цьому діапазоні енергій, таких як квазідейтронна модель [1], і підходи до опису передрівноважних процесів та множинного вильоту частинок [2, 3]. Зростаючий інтерес до розвитку джерел енергії з використанням

прискорювачів, а також помітний прогрес у створенні високоінтенсивних джерел квазімоноенергетичних гамма-квантів у світі [4] також стимулює проведення подібних досліджень. До того ж мала кількість детальних експериментальних даних сильно обмежує можливості тестування та розвитку модельних підходів по взаємодії гамма-квантів з ядрами в області енергій 30 -100 МеВ.

Метою даної роботи є отримання експериментальних даних та розрахунків ізотопних відношень для ядра $^{110m.g}\text{In}$, що утворюється в реакціях $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ та $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$, та ядра $^{108m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$ при опроміненні ядер мішені гамма-квантами гальмівного спектра.

Експериментальна методика

Вивчаючи відношення заселення ізотопного рівня до заселення основного стану ядра при розрядці збуджених станів шляхом випромінювання гамма-квантів, можна оцінювати середні величини спінів початкових збуджених станів ядер-продуктів реакції, а також досліджувати механізми розрядки збуджених станів ядер [5, 6].

У випадку моноенергетичного потоку налітаючих частинок ізотопне відношення визначається як

відношення перерізів $\frac{\sigma_m(E)}{\sigma_g(E)}$, де $\sigma_{g(m)}(E)$ - переріз утворення ядра в основному (ізотопному) стані,

або ж як $\frac{\sigma_h(E)}{\sigma_l(E)}$, тобто як відношення перерізів

станів з більшим ($\sigma_h(E)$) та меншим ($\sigma_l(E)$) спінами.

В експериментах на пучках гальмівних гамма-квантів, коли гамма-спектр не є моноенергетич-

ним, використовують ізомерне відношення d виходів основного та ізомерного станів при максимальній енергії гальмівного випромінювання $d(E_{\max}) = \frac{Y_m}{Y_g}$. Вихід реакції в такому випадку визначається за формулою

$$Y_{m,g} = N_t \int_{E_{por}^{m,g}}^{E_{\max}} \sigma_{m,g}(E) \cdot W(E, E_{\max}) dE, \quad (1)$$

де N_t - кількість ядер мішені; $Y_{m,g}$ - вихід реакції з утворенням кінцевого ядра в метастабільному (m) або основному (g) стані; E_{\max} - максимальна енергія гальмівних гамма-квантів; $W(E, E_{\max})$ - енергетичний спектр гальмівних гамма-квантів; $\sigma_i(E)$ ($i = g, m$) - переріз реакції з утворенням кінцевого ядра в основному (метастабільному) стані для енергії E гамма-квантів; E_{por}^i ($i = g, m$) - поріг реакції з утворенням кінцевого ядра в основному (метастабільному) стані.

Коли розрядка ізомерного рівня відбувається шляхом ізомерного переходу на основний рівень та бета-розпаду, а розпад з основного рівня йде тільки через бета-розпад при незмінному в часі потоці гамма-квантів, можна записати систему диференціальних рівнянь [7, 8]

$$\begin{cases} \frac{dN_m}{dt} = Y_m - \lambda_m \cdot N_m \\ \frac{dN_g}{dt} = Y_g - \lambda_g \cdot N_g + p \cdot \lambda_m \cdot N_m \end{cases}, \quad (2)$$

де N_i , $i = g, m$ - заселеність основного (метастабільного) рівня; Y_i , $i = g, m$ - вихід реакції згідно з формулою (1), λ_m , λ_g - сталі розпаду основного та ізомерного стану; p - коефіцієнт розгалуження (відношення ймовірності переходу з ізомерного рівня на основний до повної ймовірності розпаду ізомерного рівня).

Для випадку, коли в результаті бета-розпаду ізомерного та основного станів розрядка кінцевого ядра обумовлена випромінюванням гамма-квантів та йде через один і той самий рівень, розв'язок системи (2) наведено в роботі [9]. Оскільки для визначення площ піків використовуються однакові енергії гамма-ліній, то ефекти самопоглинання в одному й тому самому зразку не будуть вносити помітного внеску в похибку результатів вимірювань, а за рахунок достатньо

великих відстаней „зразок - детектор” (не менше 10 см) ефектами каскадного сумування можна знехтувати. У даній роботі ізомерне відношення виходів для досліджуваних ядер визначалось як $d = \frac{Y_h}{Y_l} = \frac{Y_g}{Y_m}$. Виходи реакції згідно з [9] пропор-

ційні деяким величинам $Y'_{m,g} = C \cdot Y_{m,g}$, що визначаються при підгонці експериментальних даних залежності

$$F = Y'_m X + Y'_g, \quad (3)$$

де F та X залежать від часу опромінення, охолодження та набору спектра згідно з [9]. Коефіцієнти C дозволяють урахувати для гамма-квантів відповідної енергії ефекти самопоглинання, каскадного сумування тощо. Похибка ефективності реєстрації гамма-квантів при розрахунках для кожного вимірюваного апаратурного гамма-спектра після відповідного часу витримки при зміні відстані „зразок - детектор” становила не більше 2 %.

Експериментальна частина

Дослідження фотоядерних реакцій проводилося з використанням гальмівного гамма-випромінювання з максимальними енергіями від 34 до 43 МеВ при визначенні ізомерного відношення для ядра $^{110m,g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$, від 60 до 90 МеВ при визначенні ізомерного відношення для ядра $^{110m,g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$, та при максимальній енергії 90 МеВ для ядра $^{108m,g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m,g}\text{In}$. Щоб уникнути заважаючих реакцій, що утворюються на ^{113}In , у двох останніх випадках використовували зразки, збагачені ізотопом ^{115}In . У роботі використовувалась активаційна методика, яка базується на вимірюванні спектрів гамма-випромінювання утворених продуктів реакції. В якості джерела гальмівного випромінювання використовувався лінійний прискорювач ЛУ-40 Національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” [10]. Нестабільність потоку налітаючих електронів не перевищувала 2 %.

На виході прискорювача електронів було встановлено гальмівну мішень у вигляді танталового конвертора товщиною 1,05 мм, за нею знаходився поглинач з алюмінію циліндричної форми, товщина поглинача 10 см, діаметр 9 см, відстань від танталового конвертора до поглинача 2 см. Зразок, що досліджувався, знаходився від танталового конвертора на відстані 20 см.

Для вивчення реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$ використовувалися зразки металевого індію

природного ізотопного складу у вигляді дисків товщиною 2 мм та діаметром від 2 до 10 мм. Для визначення ізомерного відношення для ядра $^{110m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$, та для ядра $^{108m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$, використовувалися зразки металевого та у вигляді порошку індію, збагачені ізотопом ^{115}In (збагачення 99,7 %), маса зразків становила 139,9, 161 та 273,4 мг. Час опромінення зразків варіювався від 20 до 40 хв. Після опромінення зразки переміщалися в зону вимірювань з використанням пневматичної системи, час транспортування зразків не більше 8 с. Вимірювання наведеної активності опромінених зразків проводилося на напівпровідниковому спектрометрі із детектором з надчистого германію з роздільною здатністю 1,9 кеВ для енергії гамма-квантів 1332 кеВ ^{60}Co . Відносна ефективність ресстрації гамма-квантів становила 20 %. Вимірювання наведеної активності зразків проводилося серіями послідовних наборів спектрів через різні інтервали часу. Час

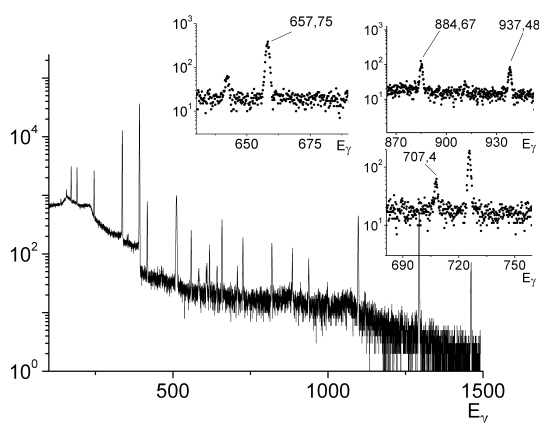


Рис. 1. Апаратурний гамма-спектр продуктів активації після опромінення зразків індію природного ізотопного складу квантами гальмівного спектра з максимальною енергією 34 - 43 МеВ. Реакція $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$.

Основні результати

Для визначення ізомерного відношення виходів ядра $^{110m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ та в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$, використовувалася гамма-лінія з енергією 657,75 кеВ, яка характерна для метастабільного та основного станів. Кількість гамма-квантів на один розпад ядра (f_γ) для цієї гамма-лінії при розпаді основного стану становить 98,6 %, а при розпаді метастабільного стану – 98 %. Гамма-лінії с енергіями 884,7, 937,5 та 707,4 кеВ, характерні для розпаду основного стану ядра, були використані для перевірки узгодженості періоду напіврозпаду досліджуваного ядра с літературними даними. Фрагменти схем розпаду ядер

витримки зразка від моменту опромінення до набору спектра від 8 с до 16 год. Час опромінення, охолодження та набору спектра для ізомерної пари визначався з урахуванням схеми розпаду. Необхідні для обробки результатів вимірювань величини були взяті з бази даних ENSDF [11].

З метою оптимізації часу вимірювання та вхідного завантаження спектрометра набір спектрів проводився на різних відстанях „зразок - детектор”. Калібровка ефективності детектора була виконана на всіх відстанях „зразок - детектор”, на яких проводився набір спектрів. Для калібровки використовувалися джерела з набору ОСГІ. Відхилення калібрувальних значень від лінійної залежності в подвійному логарифмічному масштабі не перевищувало 2 % в діапазоні робочих енергій гамма-квантів.

Приклади спектрів та аналітичні лінії в апаратурних спектрах, що були використані для визначення ізомерних відношень, наведено на рис. 1, 2 та 5.

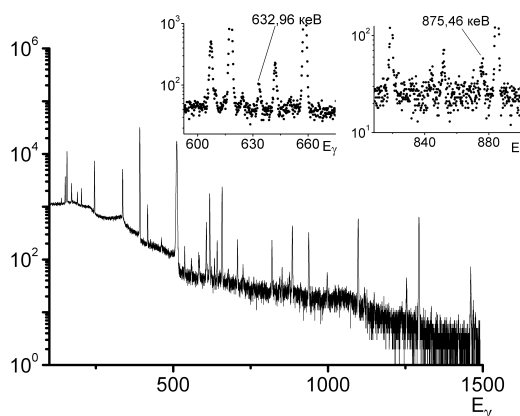


Рис. 2. Апаратурний гамма-спектр продуктів активації після опромінення зразків індію, збагаченого ізотопом ^{115}In , квантами гальмівного спектра з максимальною енергією 90 МеВ. Реакція $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$.

продуктів реакцій $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$ та $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$ наведено на рис. 3 та 4. Спін та парність ядра мішені ^{113}In -

$$I^\pi = \frac{9}{2}^+, \text{ ядра мішені } ^{115}\text{In} - I^\pi = \frac{9}{2}^+$$

Результати апроксимації експериментальних точок $F(X)$ при опроміненні зразка індію гамма-квантами з максимальною енергією 90 МеВ наведено на рис. 6.

Для визначення ізомерного відношення виходів ядра $^{108m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$, використовувалася гамма-лінія з енергією 632,96 кеВ, яка характерна для метастабільного та основного станів. Кількість гамма-квантів на розпад ядра (f_γ) для цієї гамма-лінії при розпаді з основного стану становить

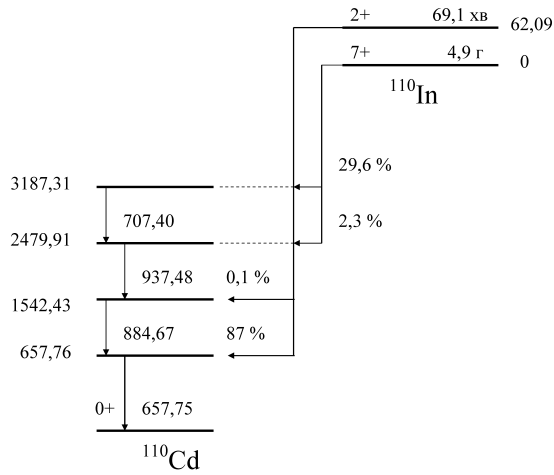


Рис. 3. Фрагмент схеми розпаду ядра $^{110m.g}\text{In}$, що утворюється в реакціях $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ та $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$.

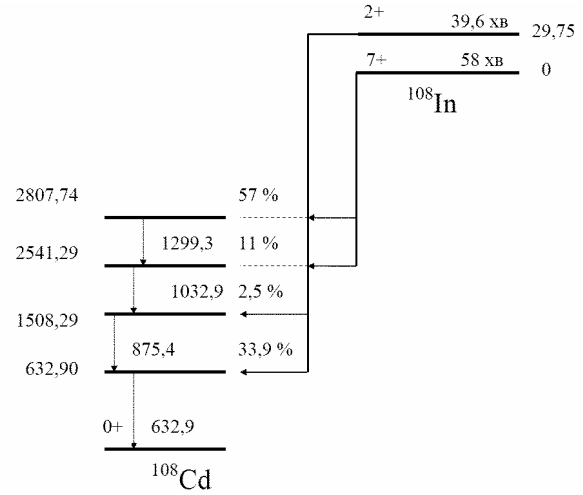


Рис. 4. Фрагмент схеми розпаду ядра $^{108m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$.

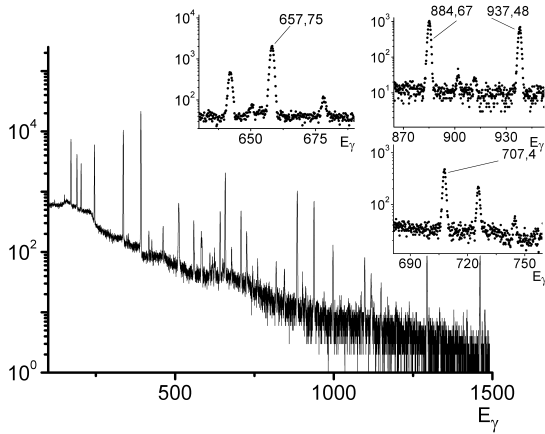


Рис. 5. Апаратурний гамма-спектр продуктів активації після опромінення зразків індію, збагаченого ізотопом ^{115}In , квантами гальмівного спектра з максимальною енергією 90 МеВ. Реакція $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$.

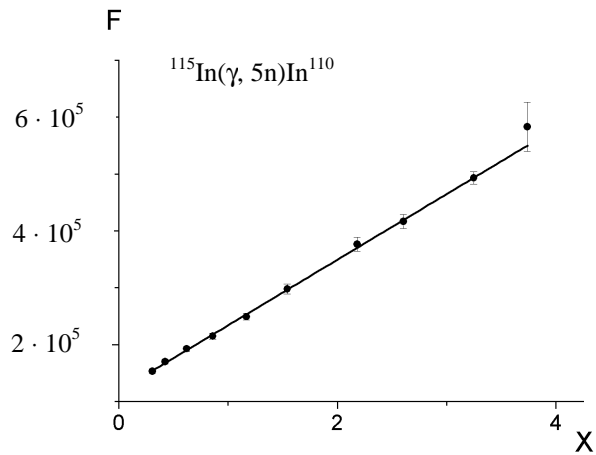


Рис. 6. Залежність $F(X)$ експериментальних значень та її апроксимація виразом (3) при дослідженні реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$ для максимальної енергії гамма-квантів 90 МеВ.

100 %, а при розпаді метастабільного стану – 73 %. Гамма-лінія з енергією 875,46 кеВ, характерна для розпаду основного стану ядра, була використана для перевірки узгодженості періоду напіврозпаду досліджуваного ядра з літературними даними.

Ізмерне відношення визначалося як $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$, де $Y_h(E_\gamma)$ - вихід реакції з утворенням кінцевого ядра з більшим спіном (основний стан), $Y_l(E_\gamma)$ - вихід реакції з утворенням кінцевого ядра з меншим спіном (метастабільний стан).

Величини ізмерних відношень виходів $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma) = Y_{s^+}(E_\gamma)/Y_{s^-}(E_\gamma)$ для ядра $^{110m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ і в реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$, та ядра $^{108m.g}\text{In}$, що утворюється в реакції

$^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m.g}\text{In}$, наведено в таблиці, що містить отримані та раніше опубліковані дані.

Оскільки для дослідження реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$ використовувались зразки індію природного ізотопного складу, де вміст ізотопу ^{113}In був 4,29 %, а поріг реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m.g}\text{In}$ становить 43,4 МеВ, то ізмерне відношення виходів для ядра $^{110m.g}\text{In}$, продукту реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$, досліджувалось тільки на проміжку енергій гальмівних гамма-квантів від 34 до 43 МеВ.

Порівняння експериментально отриманих залежностей $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$ від максимальної енергії гальмівних гамма-квантів та розрахованих з використанням комп'ютерного коду TALYS [12] наведено на рис. 7 і 8. Для опису густини рівнів використовувалась комбінована модель Фермі-газу та постійної температури [13]. Отримані на-

Реакція	$Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$	$E_{\gamma_{max}}$, MeV	Примітка
$^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$	$0,31 \pm 0,07$	34	дана робота
	$0,44 \pm 0,07$	36	дана робота
	$0,62 \pm 0,06$	38	дана робота
	$0,54 \pm 0,04$	40	дана робота
	$0,52 \pm 0,05$	43	дана робота
	$0,75 \pm 0,03$	43	[8]
$^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$	$0,40 \pm 0,04$	60	дана робота
	$0,67 \pm 0,13$	80	дана робота
	$0,83 \pm 0,08$	85	дана робота
	$1,02 \pm 0,02$	90	дана робота
$^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m,g}\text{In}$	$0,90 \pm 0,25$	90	дана робота

ми величини ізомерного відношення виходів ядра $^{110m,g}\text{In}$ як продукту реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$ непогано узгоджуються з розрахованими за допомогою коду TALYS, з використанням статистичного та передрівноважних модельних підхо-

дів. Ізомерне відношення виходів для ядра $^{110m,g}\text{In}$ продукту реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$ при максимальній енергії гальмівних гамма-квантів 43 MeV, отримане нами, приблизно в півтора рази менше від наведеного в роботі [8].

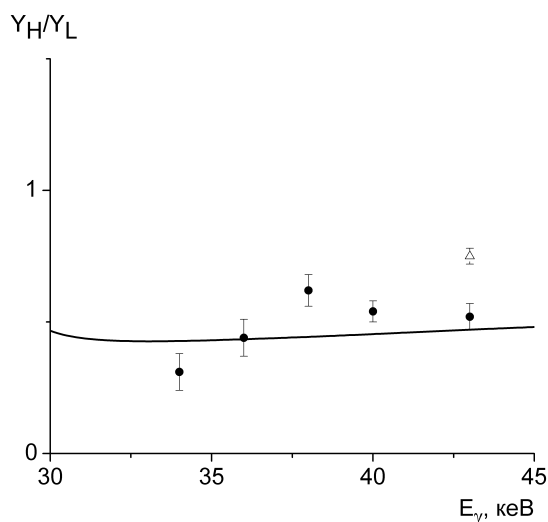


Рис. 7. Залежність $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$ від максимальної енергії гамма-квантів для реакції $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$. Лінія – розрахунок з використанням програмного коду TALYS, заповнені кружки – значення $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$, отримані експериментально в даній роботі, трикутник – значення з роботи [8].

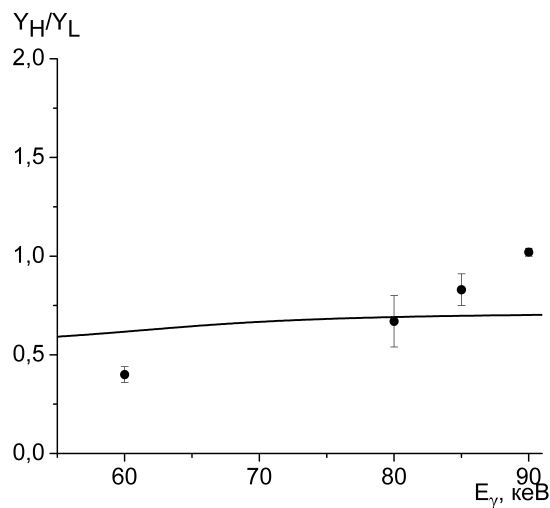


Рис. 8. Залежність $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$ від максимальної енергії гамма-квантів для реакції $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$. Лінія – розрахунок з використанням програмного коду TALYS, заповнені кружки – значення $Y_h(E_\gamma)/Y_l(E_\gamma)$, отримані експериментально в даній роботі.

Причиною такої розбіжності може бути відмінність форми спектра гальмівних гамма-квантів, адже експериментальні значення ізомерного відношення виходів, наведені в роботі [8], були отримані з використанням в якості джерела гальмівних гамма-квантів медичного прискорювача електронів. Також розбіжність експериментальних даних можна пояснити тим, що, як зазначають самі автори цієї роботи, ними була використана „погана” геометрія, тобто при накопиченні частини спектрів використовувалась ну-

льова відстань між зразком та детектором. У поєднанні з великими розмірами Ge(Li) детектора, який був використаний авторами [8], про що свідчить висока абсолютна ефективність (3 - 6 %), використання нульової геометрії впритул могло зумовити значну систематичну похибку ефекту каскадного сумування до результатів розрахунків, при цьому внесок від цього ефекту в роботі можливо не був коректно врахований.

Робота частково підтримана грантом НАН України ЯМРТ Х-9-535.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Chadwick M.B., Oblozinsky P., Hodgson P.E., Reffo G.* Pauli-blocking in the quasideuteron model of photoabsorption // *Phys. Rev. C.* - 1991. - Vol. 44. - P. 814 - 823.
2. *Herman M., Oblozinsky P., Capote R. et al.* Recent Development of the Nuclear Reaction Model Code Empire // *Proc. of Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. and Technology "ND2004"* (Santa Fe, USA, Sept. 26 - Oct. 1, 2004). - N.-Y., 2005. - AIP Conf. Proc. Vol. 769. - P. 1184 - 1187; <http://www.nndc.bnl.gov/empire219/manual.pdf>.
3. *Talou P., Kawano T., Young P.G., Chadwick M.B.* The McGNASH nuclear reaction code and its use for gas production cross-section calculations // *Nucl. Instrum. Meth.* - 2006. - Vol. A562. - P. 823 - 826.
4. <http://higs.tunl.duke.edu>.
5. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М.* // Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. - М.: МГУ, 1979. - 215 с.
6. *Гангерский Ю.П., Тончев А.П., Балабанов Н.П.* Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях // *ЭЧАЯ.* - 1996. - Т. 27, вып. 4. - С. 1043 - 1098.
7. *Vänskä R., Rieppo R.* // *Nucl. Instr. and Meth.* - 1981. - Vol. 179. - P. 525 - 532.
8. *Kolev D., Dobrev E., Nenov N., Todorov V.* // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* - 1995. - Vol. A356. - P. 390.
9. *Bezshyyko O.A., Golinka-Bezshyyko L.O., Kadenko I.M. et al.* Isomer ratios of photonuclear reaction products on silver and indium isotopes for bremsstrahlung energies above 35 MeV // *Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy: Proc. of the 2nd Int. Conf.* (Kyiv, Ukraine, June 9 - 15). - Kyiv, 2009. - Vol. I. - P. 252 - 256.
10. *Довбня А.Н., Айзацкий Н.И., Борискин В.Н. и др.* Параметры пучка линейного ускорителя электронов 10-см диапазона на энергию 30...100 МэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования.* - 2006. - № 2 (46). - С. 11 - 13.
11. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
12. <http://www.talys.eu/>.
13. *Gilbert A., Cameron A.G.* A composite nuclear-level density formula with shell corrections // *Can. J. Phys.* - 1965. - Vol. 43. - P. 1446 - 1496.

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ПРОДУКТІВ ФОТОЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ НА ІЗОТОПАХ ІНДІЯ ПРИ ЕНЕРГІЇ ГАММА-КВАНТІВ ВИЩЕ 33 МэВ

О. А. Бешейко, А. Н. Водин, Л. А. Голинка-Бешейко, А. Н. Довбня, И. Н. Каденко, А. А. Коваленко, В. А. Кушнир, А. И. Левон, В. В. Митроченко, С. Н. Олейник, Г. Э. Туллер

Приведены результаты расчета изомерных отношений продуктов фотоядерных реакций на ядре $^{110m,g}\text{In}$ – продукте реакции $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$ – для граничной энергии тормозных гамма-квантов в диапазоне от 34 до 43 МэВ. Также были экспериментально определены изомерные отношения для ядра $^{110m,g}\text{In}$ – продукта фотоядерной реакции $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$ – и для ядра $^{108m,g}\text{In}$ – продукта фотоядерной реакции $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m,g}\text{In}$ – для граничной энергии тормозных гамма-квантов от 43 до 100 МэВ. Измерение аппаратурных гамма-спектров облученных образцов проводилось полупроводниковым спектрометром на базе детектора из сверхчистого германия.

Ключевые слова: изомерные отношения, фотоядерные реакции, нейтроны, индий, TALYS.

ISOMER RATIOS OF PHOTONUCLEAR REACTION PRODUCTS FOR INDIUM ISOTOPES IN THE ENERGY REGION OVER 33 MeV

O. A. Bezshyyko, A. N. Vodin, L. O. Golinka-Bezshyyko, A. N. Dovbnya, I. M. Kadenko, O. A. Kovalenko, V. A. Kushnir, A. I. Levon, V. V. Mitrochenko, S. N. Olejnik, G. E. Tuller

This paper deals with the results of isomer ratio measurements for nuclei $^{110m,g}\text{In}$ and $^{108m,g}\text{In}$ from photonuclear reactions $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$, $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m,g}\text{In}$. Bremsstrahlung energies varied within (34÷43) MeV for $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m,g}\text{In}$ reaction, in energy region (43÷100) MeV for $^{115}\text{In}(\gamma, 5n)^{110m,g}\text{In}$ and $^{115}\text{In}(\gamma, 7n)^{108m,g}\text{In}$ reactions. The instrumental gamma-ray spectra of irradiated target specimens have been measured with high purity germanium semiconductor spectrometer. The isomer ratio results and dependence of isomer ratios upon maximal bremsstrahlung energies within selected range are obtained and discussed.

Keywords: isomer ratios, photonuclear reactions, neutrons, indium, TALYS.

Надійшла до редакції 26.05.09,
після доопрацювання – 06.07.09.