

# ЕФЕКТИВНИЙ ПЕРЕРІЗ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРНОГО СТАНУ ЯДРА $^{115}\text{In}$ В РЕАКЦІЇ $(\gamma, \gamma)$

В.С. Бохінюк, А.І. Гутій, О.М. Парлаг, М.Т. Саболчій,

**I.V. Соколюк, I.V. Хіміч**

Ужгородський національний університет, кафедра ядерної фізики 88000, м. Ужгород,  
вул. Капітульна, 9а, Україна E-mail: [nphys@univ.uzhgorod.ua](mailto:nphys@univ.uzhgorod.ua)

На гальмівному пучку бетатрона та мікротрона кафедри ядерної фізики Ужгородського національного університету одержано криву виходу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$  в інтервалі енергій 7-25 МеВ з кроком 0,5-1 МеВ. З одержаної кривої виходу розрахований ефективний переріз реакції. Виявлено, що при енергії 22 МеВ спостерігається другий максимум в ефективному перерізі реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$ .

## Вступ

Реакції непружного розсіяння гамма-квантів на ядрах є найбільш ефективним засобом збудження ізомерних станів ядер. Дослідження енергетичної залежності ефективних перерізів збудження ізомерних станів в реакції  $(\gamma, \gamma)$  дає важливу інформацію стосовно механізму заселення ізомерів при дезбудженні ядер, а також про основні властивості збуджених станів та радіаційних переходів між ними.

В області гігантського резонансу при поглинанні гамма-квантів ядром, його розрядка супроводжується випромінюванням різного типу частинок. Вище порогу випромінювання нейтронів найбільш імовірною є реакція  $(\gamma, n)$  і ефективний переріз утворення ізомеру за рахунок реакції  $(\gamma, \gamma)$ , повинен здавалось би спадати.

Однак, в роботах [1-5] експериментально зафіксовано зростання перерізів збудження ізомерних станів для ряду ядер в реакції  $(\gamma, \gamma)$  вище порогу вильоту нейтронів. Зокрема, в області енергій 5-25 МеВ на різних експериментальних установках були проведені виміри ефективних перерізів реакцій  $(\gamma, \gamma)^m$  на ядрах  $^{89}\text{Y}$  [2],  $^{103}\text{Rh}$  [3],  $^{115}\text{In}$  [1],  $^{109}\text{Ag}$  [4],  $^{197}\text{Au}$  [5]. Отримані результати вказують на те, що ефективні перерізи  $(\gamma, \gamma)^m$  реакції для цих ядер мають два максимуми: один – нижче порога реакції

$(\gamma, n)$ , а другий - в районі 14-20 МеВ. Зауважимо, що процитовані вище праці [1-5] були виконані в 60-х роках, а тому точність визначення величини і положення другого максимуму в реакції  $(\gamma, \gamma)^m$  бажає істотного уточнення.

У роботі [6], яка була опублікована в 2001 р., показано також зростання перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$  в інтервалі 9-30 МеВ, що вказує, мабуть, на існування другого максимуму в перерізі цієї реакції.

Виміри ефективного перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$  [7, 8], проведені в 1986-1987 роках показали, що при енергії 8-9 МеВ спостерігається максимум у ході залежності перерізу від енергії  $\gamma$ -квантів, величина перерізу у максимумі складає 1-2 мбн. Вище порогу  $(\gamma, n)$ -реакції переріз різко спадає і більше не зростає до енергії 30 МеВ, тобто дані робіт [7, 8] свідчать про відсутність другого максимуму. Отже, видається актуальним подальше експериментальне і теоретичне дослідження енергетичної залежності ефективних перерізів збудження ізомерних станів для приведених вище ядер в реакції  $(\gamma, \gamma)$  в широкому енергетичному інтервалі, який охоплює область гігантського дипольного резонансу.

У зв'язку з суперечливими результатами, приведеними в роботах [1-8], ми мали за мету провести вимір виходу та оцінити величину ефективного перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma)^{115\text{m}}\text{In}$  в області енергій 7-25 МеВ.

### Методика вимірювань

Виміри виходу реакції проводились активаційною методикою. Джерелами гальмівного випромінювання були: мікротрон (7-8,5 MeV) та бетатрон (8-25 MeV) кафедри ядерної фізики УжНУ. Вимірювання гамма-випромінювання зразків після опромінення проводилось Ge(Li) детектором об'ємом 80 см<sup>3</sup> з роздільною здатністю 6 кеВ для лінії 1332 кеВ. Для вимірювань використано зразки індію з природної суміші ізотопів у вигляді металевих дисків діаметром 3 см та товщиною 1-1,2 мм. Нижче в табл. 1 приведено дані про ядерно-фізичні характеристики ізотопів індію, радіоактивні ізотопи та ізомерні стани, які утворюються при опроміненні стабільних ізотопів індію гамма-квантами та нейтронами за рахунок реакцій ( $\gamma, \gamma'$ ), ( $\gamma, n$ ) і ( $n, \gamma$ ). Вказано також, тип випромінювання, енергія випроміню-

вання та інтенсивність деяких гамма-ліній і порогові енергії реакцій.

Як бачимо з табл. 1, при опроміненні зразків індію гамма-квантами з енергією більше 10 MeV за рахунок ( $\gamma, \gamma'$ ), ( $\gamma, n$ ) реакцій утворюється 6 радіоактивних ізотопів, в тому числі, і ізомерів індію: <sup>112</sup>In, <sup>112m</sup>In, <sup>113m</sup>In, <sup>114</sup>In, <sup>114m</sup>In, <sup>115m</sup>In, періоди напіврозпаду яких лежать в межах від 72 секунд до 50 діб і випромінюють вони гамма-кванти, бета-частинки та позитрони. Гамма-кванти, що випромінюються ізомером <sup>115m</sup>In мають енергію 336 кеВ, а енергія гамма-квантів ізомеру <sup>113m</sup>In – 392 кеВ.

Враховуючи великий період напіврозпаду ізомеру <sup>115m</sup>In, для вимірів було виготовлено 10 зразків. Під час опромінення зразки знаходились на віддалі 25 см від гальмівної мішені бетатрона.

Табл. 1. Ядерно-фізичні характеристики ізотопів індію.

Ізотоп	Пошир. %	T <sub>1/2</sub>	E <sub>γ</sub> , КеВ	E <sub>β</sub> , КеВ	Реакція - енергія порогу, МеВ
<sup>112</sup> In	-	14,4 хв.	511, 119	β+ 1500, β- 650	<sup>113</sup> In( $\gamma, n$ ) <sup>112</sup> In -9,58
<sup>112m</sup> In	-	20,9 хв.	157	-	<sup>113</sup> In( $\gamma, n$ ) <sup>112m</sup> In -9,58
<sup>113</sup> In	4,3	1015 р.			
<sup>113m</sup> In	-	99,4 хв.	392		<sup>113</sup> In( $\gamma, \gamma'$ ) <sup>113m</sup> In -0,39
<sup>114</sup> In	-	71,9 сек.	1299 (0,14) 588	β- 1988, β+ 395	<sup>115</sup> In( $\gamma, n$ ) <sup>114</sup> In -9,23
<sup>114m</sup> In	-	49,5 діб	190	-	<sup>115</sup> In( $\gamma, n$ ) <sup>114m</sup> In -9,23
<sup>115</sup> In	95,7	5,1014 р.		495(46%)	
<sup>115m</sup> In	-	4,486 год	336 (45,9%) 497	β- 830	<sup>115</sup> In( $\gamma, \gamma'$ ) <sup>115m</sup> In -0,33
<sup>116m</sup> In		54,1 хв.	138 (3,3%) 417	1000	<sup>115</sup> In( $n, \gamma$ ) <sup>116m</sup> In
<sup>116</sup> In		14,1 сек.	1293	3290	<sup>115</sup> In( $n, \gamma$ ) <sup>114</sup> In

На рис. 1 приведено для прикладу апаратний спектр гамма-випромінювання зразка після його опромінення при енергії 22 MeV. На рисунку ми бачимо три максимуми, обумовлені ізомерними переходами для ізотопів <sup>116m</sup>In, <sup>113m</sup>In та <sup>116m</sup>In

Для перевірки правильності методики на бетатроні було проведено вимірювання абсолютного виходу реакції

<sup>63</sup>Cu( $\gamma, n$ )<sup>62</sup>Cu, на основі якого розраховано диференціальний переріз цієї реакції. Одержані дані добре узгоджуються з результатами роботи [9], автори якої вимірювали переріз реакції з допомогою квазі-монохроматичних гамма-квантів, що є певним свідченням про відсутність систематичних похибок у методиці наших вимірів.

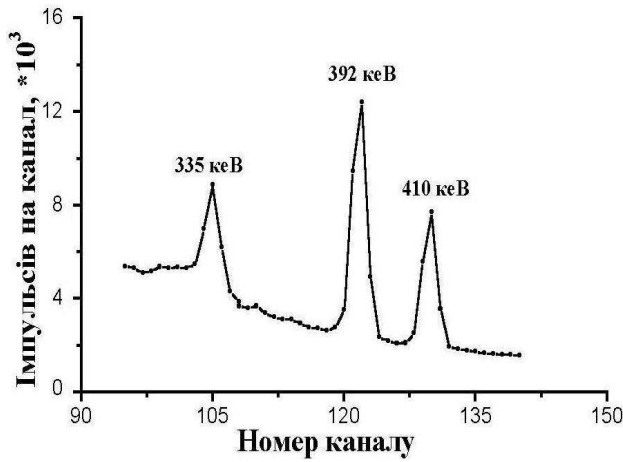


Рис. 1. Апаратурний спектр гамма-випромінювання зразка In при енергії 22 MeV.

Ізотоп  $^{115m}\text{In}$  може утворюватись також і за рахунок реакції  $(n, n')$ . Фонові нейтрони (фотонейтрони швидкі і повільні) можуть утворюватись у гальмівній мішені бетатрона та інших конструктивних деталях бетатрона. Просторовий розподіл цих нейтронів ізотропний. Для оцінки впливу нейтронного фону і відповідно реакції  $^{115}\text{In}(n, n')^{115m}\text{In}$  проводилось опромінення зразка індію в положенні поза пучком гальмівного випромінювання, але в цьому випадку на апаратурному спектрі спостерігалось тільки гамма-випромінювання з енергією 417 keV, тобто за рахунок реакції  $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ .

### Переріз реакції $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115m}\text{In}$

Згідно даних вимірів наведеної активності, будувалися частини апаратурного спектру, які були використані для знаходження площі під фотопіком гамма-квантів з енергією 336 keV.

Вихід реакції  $Y(E_m)$  розраховувався по формулі

$$Y(E_m) = \frac{S(E_m) \cdot \lambda}{n \cdot \varepsilon \cdot \eta \cdot D \cdot (1 - e^{-\lambda_{on}}) \cdot e^{-\lambda_{ox}} \cdot (1 - e^{-\lambda_g})}, \quad (1)$$

де:  $\lambda$  - стала розпаду ізомера;  $S(E_m)$  - площа під фотопіком 336 keV в апаратурному спектрі гамма-випромінювання досліджуваного ізомеру після опромінення зразка при енергії  $E_m$ ;  $\varepsilon$  - ефективність реєстрації гамма-випромінюван-

ня ізомеру;  $\eta$  - коефіцієнт, що враховує квантовий вихід лінії ізомеру та коефіцієнт внутрішньої конверсії;  $D$  - доза гальмівного випромінювання в одиницях струму товстостінної іонізаційної камери;  $t_{on}$  - час опромінення;  $t_{ox}$  - час охолодження зразка;  $t_g$  - час вимірювання.

У зв'язку з тим, що інтенсивність гальмівного випромінювання не залишалась стабільною під час опромінення зразків, вимір дози з допомогою абсолютної іонізаційної камери проводився приладом, до виміральної ємності якого підключалися резистори. Величина їх підбиралася таким чином, щоб напруга на виході зростала не лінійно, а по експоненті, з показником рівним сталій розпаду для ізомеру  $^{115m}\text{In}$ . Таким чином, було автоматично враховано коливання інтенсивності гамма-випромінювання бетатрона під час опромінення зразків.

На рис. 2 приведено залежність абсолютного виходу реакції від максимальної енергії гальмівного випромінювання на графіку вказано середньоквадратичні статистичні похибки 3-4 серій вимірів.

З одержаної таким чином кривої виходу реакції розраховано ефективний переріз реакції в області енергій 7-25 MeV. Розрахунок перерізу проводився методом оберненої матриці (метод Пенфольда-Лейса) з використанням програми розробленої в ХФТІ та адаптованої до наших умов. На рис. 3 приведено результати розрахунків.

Бачимо, що в області 20 MeV спостерігається максимум у перерізі. Дані вимірів виходу одержані з статистичною похибкою 3%. Як бачимо, дані про переріз одержані нами підтверджують результати робіт [1-5] про те, що переріз реакції непружного розсіювання гамма-квантів на ядрах після 15 MeV зростає й існує другий максимум. Саме це твердження суперечить результатам робіт [7, 8], де стверджується, що після першого максимуму спостерігається падіння перерізу і, починаючи з енергії 12 MeV, переріз в межах похибок стає рівним нулю.

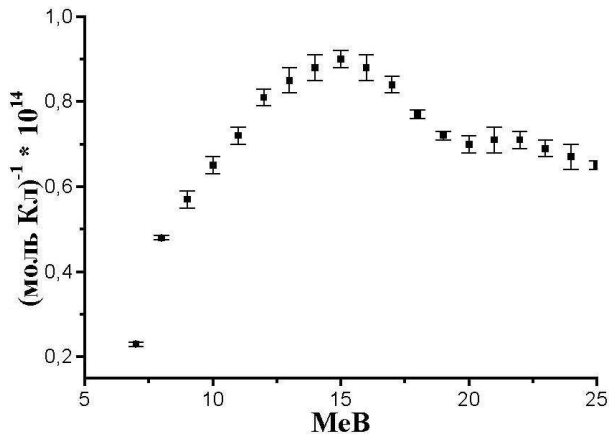


Рис. 2. Залежність абсолютного виходу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  від максимальної енергії гальмінового випромінювання.

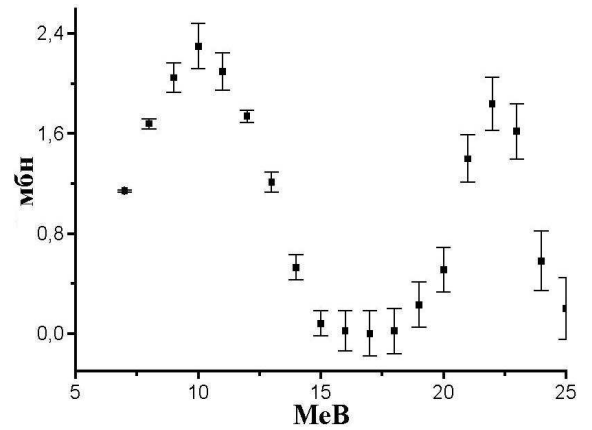


Рис. 3. Залежність ефективного періоду реакції  $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  від енергії гамма-квантів.

### Заключні міркування

У теоретичних працях [10-13], які стосуються дослідження фотозбудження ізомерних станів в реакції непружного розсіювання гамма-квантів на ядрах, відмічається можливість існування двох максимумів в перерізі  $(\gamma,\gamma')^m$ -реакції, а саме, в області до порогу випромінювання нейтронів і в області 14-20 MeV. Одержані в даній роботі експериментальні результати вказують на існування другого максимуму в перерізі реакції  $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  при енергії 22 MeV.

Подальший розвиток в експериментальному плані дослідження гігантського E1-резонансу в значній мірі пов'язаний з вивченням різноманітних каналів його розпаду і, в першу чергу, таких, в результаті котрих відбувається заселення ізомерних станів ядер. Представляється тому актуальним проведення аналогічних досліджень енергетичної залежності функцій збудження (перерізів) заселення ізомерних станів в реакції  $(\gamma,\gamma')^m$  для ряду інших ядер.

### Література:

1. Богданкевич О.В., Лазарева Л.Е., Николаев Ф.А. ЖЭТФ 31, 405 (1956).
2. Silva E. and Goldemberg J. Phys. Rev. 110, 1102 (1958).
3. Богданкевич О.В., Лазарева Л.Е., Николаев Ф.А. ЖЭТФ 39, 1224 (1960).
4. Богданкевич О.В., Долбилкин Б.С., Лазарева Л.Е., Николаев Ф.А. ЖЭТФ 45, 882 (1983).
5. Meyer-Schutzmeister L., Telegdi V.L. Phys. Rev. 104, 185 (1956).
6. Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карапетян Г.С. ЯФ 64, 1879 (2001).
7. Джилаван Л.З., Кучер Н.П., Мазур В.М., Рыжих Г.Г., Теке А.А., Чуприков А.Ю. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0473. - М.: ИЯИ АН СССР, 1986.
8. Джилаван Л.З., Кучер Н.П., Рыжих Г.Г., Чуприков А.Ю. Препринт ИЯИ АН СССР, П-0515. - М.: ИЯИ АН СССР, 1987.
9. Dietrich S.S., Berman V.L. Nuclear Data Table 38, 119 (1998).
10. Левиджер Д.С. Фотоядерные реакции. - М., 1962.
11. Балашов В.В. ЖЭТФ 43, 2199 (1962).
12. Балашов В.В. Труды междунар. конф. по электромагн. взаимодей. при низких и средних энергиях. - М., 1967.
13. Джилаван Л.З., Каруц В.Л., Фурман В.И. и др. ЯФ 51, 336 (1990).

# EFFICIENT CROSS-SECTION OF EXCITEMENT OF ISOMERIC STATE OF THE $^{115}\text{In}$ NUCLEUS IN THE $(\gamma,\gamma')$ REACTION

**V.S. Bohinyuk, A.I. Guthy, A.M. Parlag, M.T. Sabolchy,  
I.V. Sokolyuk, I.V. Khimich**

Uzhgorod National University, Department of Nuclear Physics9a, Kapitulna str., Uzhgorod  
88000, UkraineE-mail: [nphys@univ.uzhgorod.ua](mailto:nphys@univ.uzhgorod.ua)

On brake bunch of the betatron and the microtron of Department of Nuclear Physics of Uzhgorod National University is received curve of output to  $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  reaction in interval of energy 7-25 MeV with at a walk 0,5-1 MeV. On got crooked output is calculated the efficient section of reaction. It is revealed that the second maximum exists at energy 22 MeV in efficient section of  $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  reaction.