

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕННЯ ІЗОМЕРІВ ІНДІО В РЕАКЦІЯХ  $(\gamma, \gamma')$ ,  $(\gamma, n)$  ТА  $(\gamma, p)$ В. С. Бохінюк, О. М. Парлаг, М. Т. Саболчій, **І. В. Соколюк**, І. В. Хіміч*Ужгородський національний університет,  
кафедра фізики ядра і елементарних частинок, Ужгород, Україна*

На гальмівному пучку бетатрона кафедри фізики ядра і елементарних частинок 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 розраховано ефективний переріз реакції. Виявлено, що при енергії 22 МеВ спостерігається другий максимум в ефективному перерізі реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ . Проведено дослідження енергетичної залежності ізомерного відношення виходів для реакцій  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$  та  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$ . Для реакції  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$  в інтервалі 12 - 16 МеВ спостерігається зростання ізомерного відношення від 1,8 до 2,89, далі з 16 до 19 МеВ - рівномірне зменшення, а з 19 до 24 МеВ ізомерні відношення лежать в межах 2,5 - 2,6. Для реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$  в інтервалі 14 - 20 МеВ спостерігається зростання ізомерного відношення від 1,55 до 1,82, а далі до 24 МеВ ізомерні відношення коливаються в межах 1,75 - 1,85.

**1. Вступ**

У зв'язку з суперечливими даними, наведеними в [1 - 4], нами проведено вимірювання виходу та розраховано ефективний переріз реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  в області енергій 7 - 25 МеВ. Також досліджено ізомерні відношення для реакцій  $^{112}\text{In}(\gamma, n)^{111\text{m.g}}\text{In}$  та  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$ .

**2. Методика вимірювань**

Вимірювання виходу досліджуваних реакцій проводились активаційною методикою на експериментальній установці на базі бетатрона Б-25/30 кафедри ядерної фізики. Інтенсивність гальмівного випромінювання бетатрона 25 Р/хв. на віддалі 1 м від гальмівної мішені при максимальній енергії 23 МеВ. У зв'язку з тим, що інтенсивність гальмівного випромінювання бетатрона не залишалась стабільною під час опромінення зразків, вимірювання дози з допомогою абсолютної іонізаційної камери проводився приладом, який автоматично враховував коливання інтенсивності гамма-випромінювання (РС-інтегратор).

Вимірювання наведеної гамма-активності зразків 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 та олова з природної суміші, ізотопів у вигляді металевих дисків діаметром 3 см та товщиною 1 - 3 мм. Для розрахунків виходів реакцій та ізомерних відношень виходів ми користувалися ядерно-фізичними характеристиками ізотопів індію та олова, наведеними в роботі [5].

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

Проведені в 1986 - 1987 рр. вимірювання [2, 3] ефективного перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  показали, що спостерігається тільки один максимум в енергетичній залежності ефективного перерізу цієї реакції при енергії 8 - 9 МеВ, причому величина перерізу у максимумі складає 1 - 2 мбн. Вище порогу  $(\gamma, n)$ -реакції ефективний переріз цієї реакції різко спадає і далі з збільшенням енергії не зростає аж до енергії 30 МеВ, тобто дані робіт [2, 3] свідчать про відсутність другого максимуму в області енергій гігантського дипольного резонансу в наведеній вище реакції.

У праці [5], яка опублікована у 2001 р., виявлено зростання ефективного перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  вище порогу  $(\gamma, n)$ -реакції, зокрема в інтервалі 9 - 30 МеВ.

У даній роботі у зв'язку з суперечливими результатами, наведеними в [1 - 3, 5], нами проведено вимірювання виходу та розраховано ефективний переріз реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  в області енергій 7 - 25 МеВ.

Для перевірки правильності нашої методики було проведено вимірювання виходу реакції  $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$  та розраховано переріз цієї реакції. Одержані дані добре узгоджуються з результатами роботи [6], автори якої вимірювали переріз реакції за допомогою квазімонохроматичних гамма-квантів.

Ізотоп  $^{115\text{m}}\text{In}$  може утворюватись також і за рахунок реакції  $(n, n')$ . Фонові нейтрони (фотонейтрони швидкі й повільні) можуть утворюватись у гальмівній мішені та інших конструктивних деталях бета-

трона. Але опромінення зразків індію в площині, паралельній пучку гальмівних гамма-квантів, показало, що активністю від фонових нейтронів можна знехтувати.

Розрахунки абсолютного виходу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  проводились на основі площі під фотопіком гамма-квантів 336 кеВ.

На рис. 1 наведено залежність абсолютного виходу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  від максимальної енергії гальмівного випромінювання (на графіку показано середньоквадратичні статистичні похибки 3 - 4 серій вимірювань).

З одержаної таким чином кривої виходу реакції розраховано ефективний переріз реакції в області енергій 7 - 25 МеВ. Розрахунок перерізу проводився методом оберненої матриці (метод Пенфольда - Лейса) з використанням програми розробленої в ХФТІ та адаптованої до наших умов. На рис. 2 наведено результати розрахунків, з якого бачимо, що в області 22 МеВ спостерігається другий максимум у перерізі. 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 МеВ зростає й існує другий максимум. Саме це твердження суперечить результатам робіт [6, 7], де стверджується, що після першого максимуму спостерігається падіння перерізу і, починаючи з енергії 12 МеВ, переріз у межах похибок стає рівним нулю.

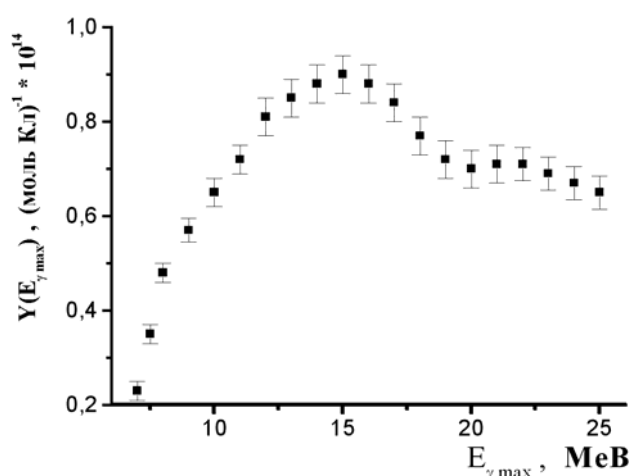


Рис. 1. Залежність абсолютного виходу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  від максимальної енергії гальмівного випромінювання.

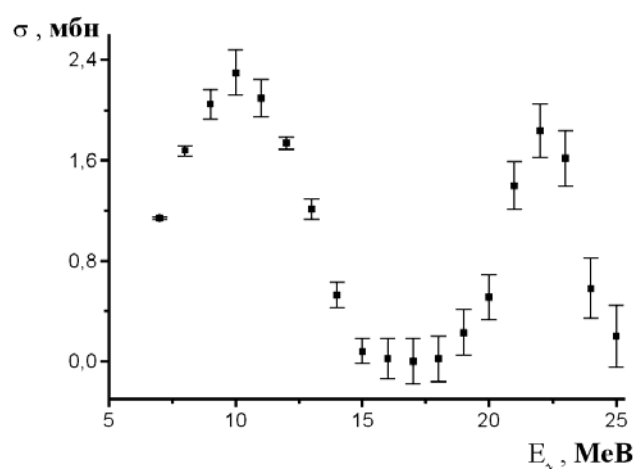


Рис. 2. Залежність ефективного перерізу реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  від енергії гамма-квантів.

У працях [8 - 10], що стосуються дослідження фотозбудження ізомерних станів у реакції непружного розсіювання гамма-квантів на ядрах, відзначалась можливість існування двох максимумів у перерізі  $(\gamma, \gamma')^m$ -реакції. Зокрема, у працях [9 - 10] обговорювався в рамках існуючих модельних підходів механізм появи другого максимуму в ефективному перерізі  $(\gamma, \gamma')^m$ -реакції, однак його кількісних оцінок не приводилось. Одержані в даній роботі експериментальні результати виявили існування другого максимуму в ефективному перерізі реакції  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  при енергії 22 МеВ. Видається актуальним проведення в подальшому досліджень енергетичної залежності ефективних перерізів заселення ізомерних станів у реакції  $(\gamma, \gamma')^m$  для ряду інших ядер, в області ГДР та до енергії 25.

#### 4. Дослідження енергетичної залежності ізомерного відношення виходів реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$

Уперше дослідження ізомерної пари  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  було проведено в праці [11]. Зразок природного індію опромінювався гальмівним випромінюванням з максимальною енергією 30 МеВ. У праці [12] проводилось дослідження реакції  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  в області енергій 12 - 25 МеВ активаційною методикою. Авторами [12] отримано ізомерні відношення перерізів у незалежних вимірюваннях, використовуючи як монітор пучка реакцію  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ .

Наші дослідження проводилися на пучку гальмівного випромінювання бетатрона Б25/30 кафедри ядерної фізики Ужгородського національного університету в області енергій 10 - 25 МеВ з кроком 0,5 МеВ.

Ізомерний стан ядра  $^{113}\text{In}$  розпадається з періодом піврозпаду 20,7 хв, випромінюючи гамма-кванти з енергією 155 кеВ. Основний стан ядра розпадається  $^{113}\text{In}$  з періодом піврозпаду 14,4 хв, при цьому випромінюються гамма-кванти з енергіями 511, 606, 618 кеВ.

Ізомерні відношення розраховувались за методикою, описаною в праці [13].

На рис. 3 наведено енергетичну залежність ізомерного відношення  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$ , де вказано середньоквадратичні похибки за трьома серіями вимірювань. Отримані результати узгоджуються з результатами робіт [11, 12].

Як видно з рис. 3 особливістю енергетичної залежності ізомерного відношення виходів реакції  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$  від максимальної енергії гальмівного пучка є те, що ізомерне відношення до енергії 17 MeV зростає, а далі починає спадати і виходить на плато.

Подібну ситуацію для реакцій  $^{39}\text{K}(\gamma, n)^{38}\text{K}$  пов'язують з ізоспіновим розщепленням E1-ГР. Згідно з оцінкою, проведеною за методикою [14], стає зрозумілим, що пояснити таку ситуацію ізоспіновим розщепленням неможливо, оскільки воно проявляється при менших енергіях.

Спад ізомерного відношення виходів, що починається при енергії 17 MeV, можна пояснити тільки тим, що при цій енергії починають проявлятися діркові стани нейтронної підоболонки  $1g_{9/2}$  з ізоспіном  $T_< = T_0 - 1/2$ , що буде приводити до заселення основного стану ядра  $^{112}\text{In}$ , оскільки у формуванні основного стану даного ядра бере участь нейтронна підоболонка  $1g_{7/2}$ .

### 5. Дослідження ізомерних відношень виходів в реакції $(\gamma, p)$ на ізотопах олова

Дослідження ізомерних відношень виходів у реакції  $(\gamma, p)$  на ізотопах  $^{112-124}\text{Sn}$  проводилось з метою виявлення впливу числа нейтронів на їх величину та поведінку. У роботах [15 - 22] опубліковано результати дослідження ізомерних відношень виходів у реакції  $(\gamma, p)$  на ізотопах  $^{112-124}\text{Sn}$ . Результати, отримані в цих роботах, у межах похибок в основному узгоджуються між собою, за винятком реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$ . Для цієї реакції отримане ізомерне відношення виходів на два порядки менше, ніж для інших ізомерних пар In. Причиною цього може бути те, що паралельно з реакцією  $(\gamma, p)$  на ядрі Sn протікає і реакція  $(\gamma, n)$ , у результаті якої утворюється радіоактивне ядро  $^{111}\text{Sn}$ , яке шляхом  $\beta^+$ -розпаду та  $e^-$ -захоплення перетворюється в ядро  $^{111}\text{In}$ . Таким чином, ми вважали за необхідне проведення експериментальних вимірювань відношень виходів у реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$  із коректним врахуванням впливу реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$ .

У результаті вимірювань отримано дві криві виходу для реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$  та крива виходу  $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$ , на основі яких було обчислено експериментальні ізомерні відношення виходів у реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$ . Ідентифікація ядер  $^{111}\text{Sn}$ ,  $^{111\text{m}}\text{In}$ ,  $^{111\text{g}}\text{In}$  здійснювалась по  $\gamma$ -лініях 511, 536, 171 та 245 кеВ відповідно.

Опромінення зразків здійснювалось протягом 30 хв. Для ідентифікації ізомеру  $^{111\text{m}}\text{In}$  вимірювання наведеної активності у зразку проводилося через 1 хв після закінчення опромінення протягом по 10 хв. Далі проводилася серія вимірювань по 1 - 2 год для ідентифікації ядер  $^{111}\text{Sn}$ ,  $^{111\text{g}}\text{In}$ .

Отримані результати наведено на рис. 4. Вказано середньоквадратичні похибки. Видно, що величини ізомерного відношення виходів в області енергій вище 20 MeV дорівнює в середньому  $1,8 \pm 0,05$ .

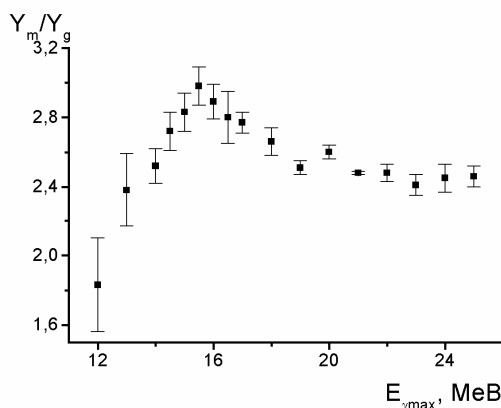


Рис. 3. Енергетична залежність ізомерних відношень виходів для реакції  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m.g}}\text{In}$ .

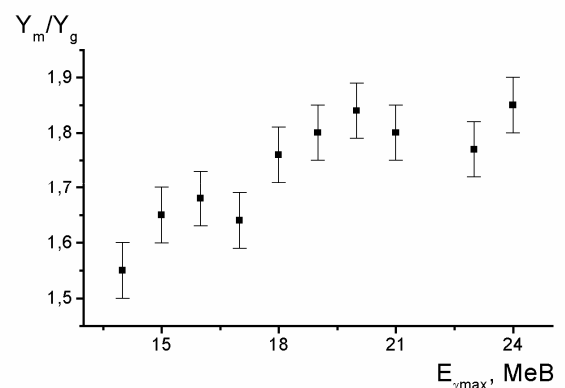


Рис. 4. Енергетична залежність ізомерних відношень виходів реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$ .

На рис. 5 наведено відношення виходу реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$  до виходу реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$  залежно від максимальної енергії пучка гальмівного випромінювання.

Для порівняння й перевірки отриманих за нашою методикою експериментальних ізомерних відношень виходів у реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m.g}}\text{In}$  на рис. 6 наведено аналогічні результати для інших ізотопів при енергії 24 MeV, отримані іншими авторами. Як бачимо, отримані нами результати добре узгоджуються з літературними даними.

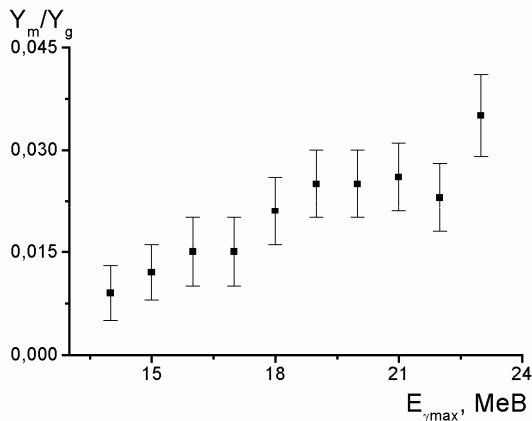


Рис. 5. Відношення виходу реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$  до виходу реакції  $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$ .

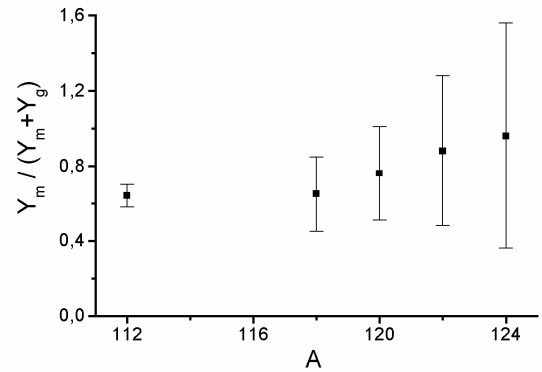


Рис. 6. Енергетична залежність ізомерних відношень виходів  $Y_m/(Y_m + Y_g)$  на ізотопах олова від масового числа А.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданкевич О.В., Лазарева Л.Е., Николаев Ф.А. Неупругое рассеяние фотонов на ядрах индия-115 // ЖЭТФ. - 1956. - Т. 31. - С. 405 - 412.
2. Джилаван Л.З., Кучер Н.П., Мазур В.М. и др. Измерение сечения заселения изомера  $^{115\text{m}}\text{In}$  для неупругого рассеяния фотонов при энергиях 4 - 14 МэВ. - М., 1986. - (Препр. / ИЯИ АН СССР; П-0473).
3. Джилаван Л.З., Кучер Н.П., Рыжих Г.Г., Чуприков А.Ю. О существовании большого пика в сечении реакции  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  при  $E_\gamma = 27$  МэВ. - М., 1987. - (Препр. / ИЯИ АН СССР; П-0515).
4. Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. - New York: Wiley, 1978. - 1523 p.
5. Демехина Н.А., Данагулян А.С., Каранетян Г.С. Замечания к вопросу образования изомерных состояний в  $(\gamma, \gamma')$ -реакциях в районе гигантского резонанса // ЯФ. - 2001. - Т. 64. - С. 1879 - 1881.
6. Samuel S Dietrich, Barry L. Berman. Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons // Atomic Date and Nuclear Date Tables. - 1988. - Т. 38. - P. 199 - 338.
7. Левинджер Д. С. Фотоядерные реакции. - М.: ИЛ, 1961. - 376 с.
8. Балашов В.В. О механизме неупругого рассеяния гамма-квантов на ядрах // ЖЭТФ. - 1962. - Т. 43. - С. 2199 - 2203.
9. Балашов В.В. Оболочечная теория ядерного фотоэффекта // Тр. междунар. конф. по электромагнитным взаимодействиям при низких и средних энергиях. - Москва., 1967. - Т. 3. - С. 307 - 329.
10. Carver T.N., Goote G.E., Sherwod T.R. Isomeric  $(\gamma, n)$  Cross Section Ratios and the Spin Dependence of Nuclear Level Density // Nucl. Phys. - 1962. - P. 449 - 456.
11. Vitiello S. A., Goldman I.D.  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112}\text{In}$  Reaction Isomeric and Ground-State Cross-Section // Novo Cimento. - 1983. - Vol. 74A. - P 17 - 27.
12. Vanska R., Riepo R. The Experimental Isomeric Cross Section Ratio in the Nuclear Activation Technique // Nucl. Instrum. and Methods. - 1981. - Vol. 179. - P. 525 - 535.
13. Morinaga H.Z. Isospin Selection Rules in Photoeffect on Heave Nucleus // Z. Phys. - 1965. - Vol. 188. - P. 182 - 185.
14. Бровцин В.К., Осокина Р.Н. Исследование механизма реакции  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$  в области дипольного гигантского резонанса // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1970. - Т. 34. - С. 928 - 930.
15. Hummel J.P. Isomer Ratio for the  $^{118}\text{Sn}(\gamma, \rho)$ -reaction // Phys. Rev. - 1961. - Vol. 123. - P. 950 - 953.
16. Го Ци-ди, Ратнер Б.С. Изучение реакции  $(\gamma, \rho)$  на изотопе Sn // ЖЭТФ. - 1960. - Т. 39. - С. 1578 - 1584.
17. Давыдов М.Г., Хамраев Ф.М., Шумуродов Э.М. Изомерные отношения выходов фотоядерной реакции  $^{112}\text{Sn}(\gamma, \rho)^{111\text{m}}\text{In}$  в районе гигантского дипольного резонанса // Тез. докл. 37-го Совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. - Л.: Наука, 1987. - 377 с.
18. Бабаджанов Р.Д., Палванов С.Р., Таджибаев Г.Ю., Ражабов О.Е. Изомерные отношения выходов реакций  $^{112}\text{Sn}(\gamma, \rho)^{111\text{m}}\text{In}$  и  $^{113}\text{Sn}(\gamma, 2p)^{111\text{m}}\text{In}$  // Тез. докл. 41-го Совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. - Л.: Наука, 1991. - 288 с.
19. Давыдов М.Г., Маера В.К., Трухов А.Б., Шумуродов Э.М. Изомерные отношения выходов фотоядерных реакций для  $\gamma$ -активационного анализа // АЭ. - 1985. - Т. 58. - С. 47 - 50.

## INVESTIGATION OF EXCITEMENT OF INDIUM ISOMERS IN THE ( $\gamma, \gamma'$ ), ( $\gamma, n$ ) AND ( $\gamma, p$ ) REACTIONS

V. S. Bokhinyuk, O. M. Parlag, N. T. Sabolchiy, I. V. Sokolyuk, I. V. Khimich

On the bremsstrahlung beam of betatron of department of nuclear physics and elementary particles of Uzhgorod national university the curve of reaction yield  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  is got in the interval of energies 7 - 25 MeV with a step 0,5 - 1 MeV. From the got curve of output the effective section of reaction is expected. It is exposed, that at energy 22 MeV is observed the second maximum in the effective section of reaction  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ . Research of power dependence of isomer relation of outputs is conducted for the reactions  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  but  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m,g}}\text{In}$ . For the reaction  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  in an interval 12 - 16 MeV is observed growth of isomer relation from 1,8 to 2,89, farther from 16 to a 19 MeV even reduction, and from 19 to 24 MeV isomer relation lie within the limits of 2,5 - 2,6. For the reaction  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m,g}}\text{In}$  in an interval 14 - 20 MeV is observed growth of isomer relation from 1,55 to 1,82, and farther to 24 MeV isomer relations hesitate within the limits of 1,75 - 1,85.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИЗОМЕРОВ ИНДИЯ В РЕАКЦИЯХ ( $\gamma, \gamma'$ ), ( $\gamma, n$ ) И ( $\gamma, p$ )

В. С. Бохинюк, А. М. Парлаг, Н. Т. Саболчий, И. В. Соколюк, И. В. Химич

На тормозном пучке бетатрона кафедры физики ядра и элементарных частиц Ужгородского национального университета получена кривая выхода реакции  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$  в интервале энергий 7 - 25 МэВ с шагом 0,5 - 1 МэВ. Из полученной кривой выхода рассчитано эффективное сечение реакции. Выявлено, что при энергии 22 МэВ наблюдается второй максимум в эффективном сечении реакции  $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$ . Проведено исследование энергетической зависимости изомерного отношения выходов для реакций  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  и  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m,g}}\text{In}$ . Для реакции  $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$  в интервале 12 - 16 МэВ наблюдается рост изомерного отношения от 1,8 до 2,89, дальше с 16 до 19 МэВ – равномерное уменьшение, а с 19 до 24 МэВ изомерные отношения лежат в пределах 2,5 - 2,6. Для реакции  $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m,g}}\text{In}$  в интервале 14 - 20 МэВ наблюдается рост изомерного отношения от 1,55 до 1,82, а дальше до 24 МэВ изомерные отношения колеблются в пределах 1,75 - 1,85.