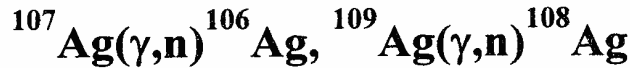


ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПЕРЕРІЗІВ РЕАКЦІЙ



**В.С. Бохінюк, А.П. Осипенко, О.М. Парлаг,
М.Т. Саболчій, І.В. Соколюк, І.В. Хіміч**

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

На гальмівному пучку бетатрона одержано криві виходу реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$ в інтервалі енергій 10÷22 МеВ з кроком 1 МеВ. По одержаних кривих виходу розраховані диференціальні перерізи реакцій.

Вступ

В області енергій 10÷25 МеВ основною особливістю в ефективних перерізах взаємодії γ -квантів з ядрами є гігантський дипольний резонанс (ГДР). Основними механізмами непружного розсіяння γ -квантів ядрами, мабуть, є раман-ефект і каскадні процеси, зокрема, з заселенням ізомерних станів.

Одним із напрямків дослідження фото-ядерних реакцій на кафедрі ядерної фізики УжНУ є вивчення фотозбудження ізомерних станів ядер γ -квантами з енергіями 6÷24 МеВ. Як джерело γ -квантів використовується гальмівне випромінювання електронних прискорювачів – мікротрона М-10 (6÷9 МеВ) і бетатрона Б-25 (8÷25 МеВ).

Виміри виходів реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$, зокрема, з малим кроком по енергії, і розрахунки інтегральних перерізів в області малих енергій (6÷10 МеВ) дають можливість визначити наявність активаційних рівнів, через які іде заселення ізомерних станів ядер та деякі їх характеристики. Вивчення ефективних перерізів в області гігантського резонансу (10÷20 МеВ) дає можливість одержати інформацію, необхідну для з'ясування механізму протікання фотоядерних реакцій.

Метою циклу робіт, які проводяться в даний час, є вивчення механізму збудження ізомерних станів ізоотопів срібла ^{107m}Ag та ^{109m}Ag з періодами напіврозпаду

відповідно 44 сек. та 39 сек. та вимір диференціальних перерізів в області гігантського резонансу. При опроміненні зразків срібла гамма-квантами з енергіями вище 9,5 МеВ за рахунок реакції (γ, n) крім ізомерів утворюються і радіоактивні ізотопи ^{106}Ag та ^{108}Ag , які випромінюють γ -кванти, β^+ -, β^- -частинки і мають період напіврозпаду 2,4 хв., 24 хв. і таким чином суттєво ускладнюють методіку виміру перерізів реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$ в області гігантського резонансу, тобто при енергіях більше 10 МеВ.

З метою вивчення впливу реакції (γ, n) на методіку виміру виходу реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, \gamma')^{107m}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma, \gamma')^{109m}\text{Ag}$, а також у зв'язку з тим, що в опублікованих раніше роботах [1-7] приводяться результати тільки по вивченню перерізу реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ та $^{107}\text{Ag}(\gamma, \gamma')^{107m}\text{Ag}$ та перерізу реакції (γ, n) на природній суміші ізоотопів срібла, в даній роботі приведені результати виміру перерізів реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$ з використанням збагачених зразків ^{107}Ag (99,3%) та ^{109}Ag (99,7%).

Робота проводилась активаційною методикою, яка включає опромінення зразків і вимір γ -спектрів наведеної активності. Аналіз γ -спектрів наведеної активності дозволяє одержати інформацію про кількість радіоактивних ізоотопів, що утворились в процесі опромінення та їх парціальну активність.

Опромінення зразків гальмівними γ -квантами, які мають неперервний спектр, дає можливість виміряти вихід $Y(E_{\gamma_{\max}})$ реакцій, який пов'язаний з її ефективним перерізом таким співвідношенням:

$$Y(E_{\gamma_{\max}}) = \eta \cdot \alpha(E_{\gamma_{\max}}) \int_{E_p}^{E_{\gamma_{\max}}} W(E_{\gamma_{\max}}, E_{\gamma}) \sigma(E_{\gamma}) dE_{\gamma} \quad (1)$$

Отже, вимірявши вихід реакції, можна з виразу (1) визначити ефективний переріз відповідної реакції.

Огляд опублікованих робіт

В [1] дано огляд експериментального дослідження 23 ізотопів, які збуджуються внаслідок реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$, проведених в період 1939-1957 рр. Зокрема, для 5-ти ізотопів приведено залежність перерізів реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$ в інтервалі 4÷25 MeV одержані в експериментах з гальмівним випромінюванням. Для ізотопів ^{72}Se , ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In приведені дані про ефективні перерізи збудження ізотопів γ -квантами ізотопних джерел та гальмівним випромінюванням в інтервалі 0,2÷1,7 MeV, тобто, визначено перерізи збудження ізотопів через окремі активаційні рівні.

В [2] приведені дані досліджень збудження ізотопів гальмівним випромінюванням в інтервалі максимальних енергій 0,2÷1,8 MeV. Вимірювались криві виходу з малим кроком 0,05 MeV та визначалися інтегральні перерізи збудження ізотопів через окремі активаційні рівні. У роботі приведені дані для ізотопів ^{115}In , ^{113}In , ^{111}Cd , ^{77}Sc , ^{199}Hg , ^{107}Ag , ^{109}Ag . Так, для ізотопів срібла визначено такі активаційні рівні:

^{107m}Ag – 423, 780, 945, 1250 - 1325 keV;

^{109m}Ag – 410, 680, 885, 1210, 1480, 1675 keV.

У роботі [3] приведено дані про визначення енергії активаційних рівнів та ефективні перерізи збудження ізотопів, що відповідають цим рівням. Виміри проводились з кроком 0,02 MeV. В публікації приведені криві виходу та таблиці з даними про визначені інтегральні перерізи та спіни і ширини рівнів. Так, для рівня 1250 keV $\sigma_{\text{int}} = 3 \cdot 10^{-2}$ мбн.МеВ, 1210 keV $\sigma_{\text{int}} = 8,5 \cdot 10^{-2}$ мбн.МеВ та 1675 keV,

$\sigma_{\text{int}} = 1,3 \cdot 10^{-1}$ мбн.МеВ. У роботі [4] вивчалась енергетична залежність перерізу реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, \gamma')^{107m}\text{Ag}$ в інтервалі енергій 4÷25 MeV. Детально описана методика досліджень, приведена крива виходу для зразка, збагаченого ізотопом ^{107}Ag , та природної суміші $^{107}\text{Ag} + ^{109}\text{Ag}$ і графік залежності перерізу від енергії γ -квантів. Спостерігаються 2 максимуми: при 10 MeV - 1,7 мбн. та 2,9 мбн. при 21 MeV.

Авторами [5] виміряні фотонейтронні перерізи реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ активаційним методом. Криві виходу реакції порівнювалися з кривою виходу реакції $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$ і таким чином визначалася абсолютна величина виходу реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$. Переріз розраховано методом "різниці фотонів". Максимум перерізу реакції досягає 240 мбн. при енергії 14 MeV, напівширина в області резонансу 5,3 MeV. Інтегральний переріз реакції при енергії 24 MeV складає 2,28 мбн.МеВ.

У роботі [6] приведені графіки енергетичної залежності ефективного перерізу реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ та $\text{Ag}(\gamma, n)\text{Ag}$ (на природній суміші ізотопів), оцінені інтегральні перерізи згаданих реакцій. Отримані результати [6] проведені на пучках квазімонохроматичних γ -квантів. Як бачимо з приведених графіків, максимальне значення перерізу реакції (γ, n) на ізотопі ^{107}Ag при енергії 17 MeV досягає значення 160 мбн., для природної суміші ізотопів срібла при енергії 16 MeV значення перерізу досягає 200 мбн. Інтегральний переріз для реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ при енергії 29,5 MeV має значення 1,09 мбн.МеВ. Більш повний огляд робіт по дослідженню непружного розсіювання γ -квантів ядрами із збудженням ізотопних станів ядер приведений в [7].

Дослідження перерізу реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, \gamma')$ та $^{109}\text{Ag}(\gamma, \gamma')$ при енергіях вище 10 MeV важко провести завдяки тому, що за рахунок реакції (γ, n) утворюються радіоактивні ізотопи: $^{106,106m}\text{Ag}$ та $^{108,108m}\text{Ag}$ періоди напіврозпаду яких перевищують 2 хвилини (лежать відповідно в інтервалах 2 хв.+8 днів) та випромінюють γ -кванти з енергіями вище 0,2 MeV, β^- -частинки, та β^+ -частинки з максимальними енергіями до 1,9 MeV. Ізотопи ^{107m}Ag , ^{109m}Ag мають

періоди напіврозпаду 44,3 с. та 39,2 с. та випромінюють γ -кванти з енергіями 30 та 87 кеВ.

Таким чином, виміри виходу реакцій (γ, γ') на ізотопах срібла в області гігантського резонансу проводяться на рівні великого фону від γ -, $\beta^+\beta^-$ -випромінювань ізотопів з великими періодами напіврозпаду. Крім того, слід відмітити, що переріз реакції (γ, n) для ізотопів срібла приблизно в $10 \div 100$ раз перевищує переріз реакції (γ, γ').

Методика вимірювань та обробка результатів

Виміри проводились на експериментальній установці на базі бетатрона з системою дозиметрії гальмівного випромінювання та Ge(Li)-спектрометра γ -випромінювання. Для вимірювань використано зразки ізотопів срібла ^{107}Ag (збагачення 99,3%) та ^{109}Ag (збагачення 99,7%).

Для перевірки правильності методики вимірів та розрахунків проведено вимір кривої виходу реакції $^{63}\text{Cu}(\gamma, n)^{62}\text{Cu}$. Розрахований на основі цих вимірів переріз добре узгоджується з результатами опублікованих робіт [1-7]. Опромінення зразків проводилось на протязі $5 \div 10$ хвилин в інтервалі $11 \div 24$ МеВ. Після опромінення зразки переносилися на γ -спектрометр для виміру наведеної активності. Час охолодження зразків займав $1 \div 60$ хвилин. Вимір наведеної активності проводився на протязі $5 \div 30$ хвилин. По даним вимірів наведеної активності будувалися ділянки апаратурного спектру, які були використані для знаходження площі під фотопіками γ -квантів від ізотопів срібла з енергіями 432 кеВ, 511 кеВ, 618 кеВ та 632 кеВ. На вимірних апаратурних спектрах видно фотопіки від γ -квантів, що випромінюються зразками срібла, а саме 0,511 та 0,618 МеВ від зразка ^{107}Ag та 0,43; 0,511; 0,618 та 0,632 МеВ від зразка ^{109}Ag .

Вихід реакції $Y(E_m)$ розраховувався по формулі

$$Y(E_m) = \frac{S(E_m)\lambda}{\epsilon \eta I(E_m, t) \cdot (1 - e^{-\lambda_{op}}) e^{-\lambda_{oh}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{up}})}, \quad (2)$$

де: λ - стала розпаду ядер, $S(E_m)$ - площа

під фотопіком у апаратурному спектрі гамма-випромінювання досліджуваного ізотопу після опромінення зразка при енергії E_m , ϵ - ефективність ресстрації гамма-випромінювання, η - коефіцієнт, що враховує квантовий вихід лінії яка використана для виміру та коефіцієнт внутрішньої конверсії, $I(E_m, t)$ - доза гальмівного випромінювання в одиницях струму товсто-стінної іонізаційної камери, t_{op} , t_{oh} , t_v - час опромінення, час охолодження, час виміру наведеної активності зразка.

Виміри проводились з кроком 1 МеВ. 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 вимірювальної смності якого підключалися резистори. Величина їх підбиралася таким чином, щоб напруга на виході зростала не лінійно, а по експоненті з показником рівним сталій розпаду досліджуваного радіоактивного ізотопу. Це дало можливість автоматично врахувати коливання інтенсивності гамма-випромінювання бетатрона під час опромінення зразків.

Результати експерименту

Із врахуванням вищевказаного одержані криві виходу реакцій $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ та $^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$. З одержаних таким чином кривих виходу реакцій розраховано диференціальні перерізи досліджуваних реакцій в області енергій $11 \div 21$ МеВ. Розрахунок перерізу проводився методом оберненої матриці (метод Пенфольда-Лейса). На рис. 1 і 2 приведено відповідно результати розрахунків диференціального перерізу досліджуваних реакцій та для порівняння результатів вимірів проведених з допомогою квазімонохроматичних γ -квантів [6].

На рис. 1 приведено дані одержані нами для реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ та дані з роботи [6].

Як бачимо, наші дані добре узгоджуються з опублікованими, що свідчить про правильний вибір методики вимірів.

На рис. 2 приведені дані для реакції

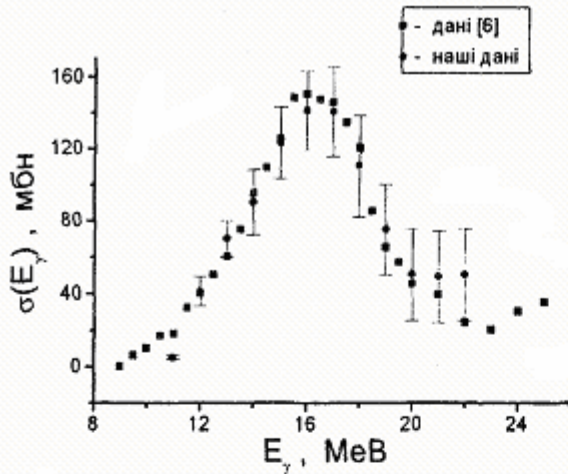


Рис. 1. Переріз реакції $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106}\text{Ag}$.

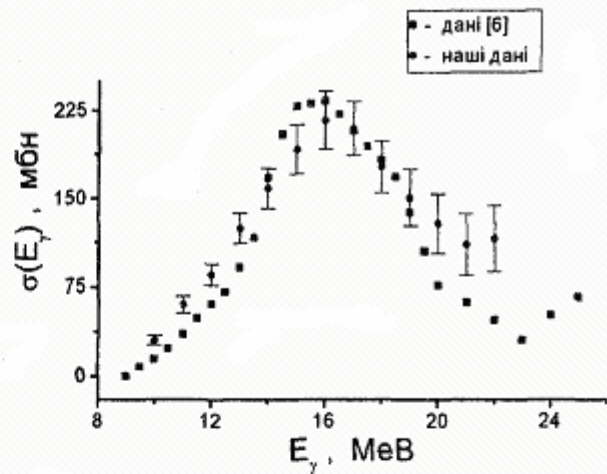


Рис. 2. Переріз реакції $^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$.

$^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$, одержані в нашій роботі. У літературі відсутні дані по цій реакції. Для порівняння одержаних даних ми оцінили переріз реакції $^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$ з експериментальних даних роботи [6], одержаних для природної суміші ізотопів срібла на квазімонохроматичних пучках γ -квантів.

Вихід реакції (γ,n) із зразка природного срібла Ag складається з виходів реакції на ізотопах ^{107}Ag , ^{109}Ag з врахуванням числа ядер відповідного ізотопа та перерізу реакції

$$Y_{\text{nat}} = Y_{107} + Y_{109}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{nat}} \cdot n_{\text{nat}} = \sigma_{107} \cdot n_{107} + \sigma_{109} \cdot n_{109}, \quad (3a)$$

де: $n_i = N \cdot m_i / A_i$ число ядер ізотопа з масовим числом A_i та масою m_i , N - число Авогадро, σ_{nat} , σ_{107} , σ_{109} - перерізи реакції на природному сріблі Ag , ізотопі ^{107}Ag та ізотопі ^{109}Ag . З рівняння (3a) знаходимо, що для оцінки перерізу реакції $^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$ при різних енергіях можна використати вираз

$$\sigma_{109} = (1/0,00448) \cdot (\sigma_{\text{nat}} \cdot 0,0093 - \sigma_{107} \cdot 0,0048). \quad (4)$$

Як бачимо з рис. 2, виміряні нами дані узгоджуються з оціненими даними згідно формули (4). Розбіжність наших даних з оціненими даними – вище 19 MeV.

1. Абрамс Пелекис. Возбуждение изомерных состояний ядер гамма-лучами. Известия АН Латвийской ССР. №1, с.19-27 (1968).
2. M.Boivin., Y.Cachois. Etude sur le photo-activation nuclear par rayon γ . EUR-3298 f. (1967).
3. M.Boivin. Photoactivation nuclear de ^{78}Sc , ^{107}Ag , ^{109}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In et ^{199}Hg . Nuclear physics. A 137, p.520-530 (1959).
4. О.В.Богданкевич. Неупругое рассеяние γ -квантов по ядрах ^{107}Ag . ЖЕТФ. 45, вып. 4(10), стр.883 (1963).

5. Natsuro-Naoski, Ohnuki Yuyi Sato et al. Photoneutron cross section for ^{107}Ag , ^{92}Mo and ^{90}Zn . J.Phys.Soc Jabon. V.14, №12, p.1649-1653 (1959).
6. Samuel S. Dietrich, Barry L. Berman. Atlas of Photoneutron Cross Section Obtained with Monoenergetic Photons. Atomic Date and Nuclear Date Tables. V.38, №2, p.199-338 (1988).
7. Ю.П.Гангрский, В.М.Мазур. Рассеяние γ -квантов ядрами и возбуждение изомерных состояний. ЭЧАЯ. 33, вып.1, стр.159-200 (2002).

INVESTIGATION OF EFFICIENT CROSS-SECTIONS OF THE REACTIONS $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$

**V.S. Bohinyuk, A.P. Osipenko, A.M. Parlag,
M.T. Sabolchiy, I.V. Sokolyuk, I.V. Khimich**

Uzhgorod National University, Department of Nuclear Physics
9a, Kapitulna str., Uzhgorod 88000, Ukraine

E-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

On brake bunch of a betatron are received curves of leaving the reactions $^{107}\text{Ag}(\gamma,n)^{106}\text{Ag}$, $^{109}\text{Ag}(\gamma,n)^{108}\text{Ag}$ in interval of energy 10÷22 MeV with at a walk 1 MeV. On got crooked output are calculated the differential cross-sections of reaction