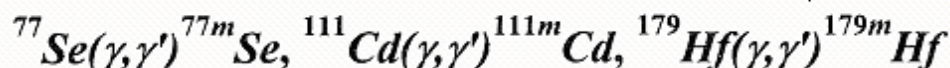


ІНТЕГРАЛЬНІ ПЕРЕРІЗИ РЕАКЦІЙ



**А.І. Гутій, В.С. Бохінюк, О.Г. Окунєв, А.П. Осипенко,
О.М. Парлаг, О.М. Фрадкін., 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 мікротрона одержано криві виходу збудження ізомерних станів ${}^{77m}\text{Se}$, ${}^{111m}\text{Cd}$, ${}^{179m}\text{Hf}$ в інтервалі енергій 5-8 МеВ з кроком 0,1-0,2 МеВ. По одержаним кривим виходу розраховані інтегральні перерізи збудження відповідних ізомерів в (γ, γ') -реакції.

Вступ

Експериментальні і теоретичні дослідження гігантського дипольного резонансу (ГДР) на пучках гамма-квантів має ряд переваг в порівнянні з іншими способами, де задіяні сильновзаємодіючі частинки. Перша з них полягає в тому, що взаємодія гамма-квантів з ядром відбувається за рахунок електромагнітної взаємодії, закономірності і властивості якої найбільше вивчені і добре відомі.

Теоретичний опис експериментальних даних процесів обумовлених електромагнітною взаємодією можливо проводити в рамках теорії збурень на відміну від ядерних процесів, обумовлених сильною взаємодією.

Друга особливість полягає в тому, що гамма-кванти з енергією $\hbar\omega$ привносять в ядро фіксований переданий імпульс $\hbar\omega/c$ на відміну від електронів чи нуклонів, які при взаємодії з ядром можуть передавати ядру змінний імпульс. З цієї точки зору пучки гамма-квантів найбільш ефективні інструменти для дослідження структури енергетичних рівнів та механізмів їх збудження.

По-третє, для пояснення положення і ширини гігантського дипольного резонансу існує ряд теоретичних моделей (як одночастинкових так і колективних) але наявного експериментального матеріалу недостатньо для того, щоб віддати перевагу одній із існуючих моделей.

Подальший розвиток дослідження гігантського Е1-резонансу в експериментальному плані в значній мірі пов'язаний з вивченням різноманітних каналів його розпаду і в першу чергу таких, в результаті яких відбувається заселення ізомерних станів ядер.

Єдиними каналами розпаду високозбуджених станів ядер нижче порогу вильоту нуклонів є канали пружного (γ, γ) і непружного (γ, γ') розсіювання гамма-квантів на ядрі.

Та обставина, що ізомерні переходи в ядрах представляють собою, в основному, переходи Е3, М4, М5 - типу, а γ -кванти поглинаються ядрами в розглядуваній області енергій збудження в основному через Е1 або М1-переходи свідчить про те, що ізомерні стани заселяються в реакції непружного розсіювання γ -квантів на ядрах шляхом каскадних γ -переходів. Тому дослідження збудження ізомерних станів ядер в реакції (γ, γ') дає можливість

одержати інформацію про роль каскадних γ -переходів і, зокрема, активаційних рівнів, через які відбувається збудження ізомерних станів.

Таким чином, представляється актуальним проведення систематичних експериментальних вимірів в абсолютних одиницях кривих виходу і розрахунку інтегральних ефективних перерізів збудження довгоживучих ізомерних станів ядер в непружному розсіюванні гамма-квантів на ядрах.

Дослідження, проведені в попередні роки показали, що енергетичний хід перерізу реакції типу $A(\gamma, \gamma')^m A$ для всіх ядер проявляє загальну закономірність: всі перерізи мають різкий максимум поблизу порогу реакції (γ, n), малу величину в області максимуму "гігантського" резонансу і другий максимум при енергії близько 15 - 20 MeV.

У роботі [1] описаний експеримент по вимірюванню інтегрального перерізу реакцій $A(\gamma, \gamma')^m A$ на ядрах ^{167}Er , ^{79}Br , ^{191}Ir , ^{183}W , ^{197}Au , ^{77}Se , ^{89}Y , ^{137}Ba в інтервалі енергій від 1.5 до 6 MeV з кроком 0,25 MeV. Вимірювання проводились за допомогою сцинтиляційного детектора і лінійного прискорювача електронів в якості джерела гальмівного випромінювання. Показано, що практично для всіх ізотопів на кривій залежності перерізу від енергії спостерігається ряд максимумів та мінімумів, що може свідчити про наявність при таких енергіях активаційних рівнів.

Автори роботи [2] повідомляють про дослідження збудження 19 ізомерів у реакціях $A(\gamma, \gamma')^m A$ на ядрах ^{167}Er , ^{79}Br , ^{191}Ir , ^{197}Au , ^{77}Se , ^{89}Y , ^{137}Ba , ^{179}Hf , ^{199}Hg , ^{111}Cd , ^{113}In , ^{87}Sr , ^{176}Lu , ^{115}In , ^{180}Tl , ^{135}Ba , ^{195}Pt , ^{117}Sn , ^{123}Tc . У якості джерел гальмівного опромінювання використано 4 різні прискорювачі електронів, які забезпечували максимальну енергію гальмівного випромінювання від 0,5 до 11 MeV. Спектри γ -випромінювання ізомерних переходів досліджуваних ядер реєструвалися за допомо-

гою NaI детекторів, а β -випромінювання реєструвалося черенковським лічильником. Для більш ніж половини випадків відмічається наявність прискорених каналів резонансного збудження, для яких інтегральні перерізи виявляються на 3-4 порядки більше величини, що характеризує (γ, γ') -реакцію. Пропонується пояснення, що цим каналам відповідають активаційні рівні, які лежать на 3-4 MeV вище основного стану, через які і проходить заселення спостережуваних ізомерів.

У роботі [3] описано дослідження збудження ізомерів у (γ, γ') реакціях на ядрах ^{167}Er , ^{179}Hf , ^{197}Au , ^{191}Ir . Опромінення зразків проводилось гальмівним випромінюванням Дармштадського лінійного прискорювача, прискорюючі елементи якого працювали у режимі надпровідності. Функції збудження вимірювалися в діапазоні енергій від 2 до 7 MeV. Автори відмічають, що збудження ізомерів здійснювалось через окремі "активаційні рівні", інтегральний переріз резонансного поглинання для яких складає порядку $10^{-26} \text{ см}^2 \text{ кЕв}$. На кривій виходу для реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m}\text{Hf}$ при енергіях 2.5, 4 MeV спостерігаються зломи, пов'язані з окремими активаційними рівнями.

У роботах [4, 5] приведені данні про виміряні виходи та розраховані перерізи реакції (γ, γ') для ізотопів ^{167}Er , ^{179}Hf , ^{183}W , ^{197}Au

У роботі [6] одержані перерізи реакції (γ, γ') з збудженням ізомерних станів ядер ^{77}Se , ^{78}Br , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{137}Ba в області енергій 4-15 MeV з кроком 0,5 MeV а також приведені данні про величину інтегральних перерізів реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$ для 12 ізотопів ядер що мають ізомерні стани, зокрема, для ^{179}Hf , ^{199}Hg , ^{111}Cd , ^{77}Se .

Метою даної роботи є дослідження функції збудження реакції $A(\gamma, \gamma')^m A$ для ядер ^{77}Se , ^{111}Cd , ^{179}Hf в області енергій 7-9,5 MeV і перевірка наявності в цій області енергій активаційних рівнів.

2. Експериментальна установка та методика вимірів

Виміри проводилась активаційною методикою на гальмівному пучку гамма-випромінювання мікротрона М-10 кафедри ядерної фізики Ужгородського університету.

Під час опромінення зразків максимальна енергія гальмівного випромінювання змінювалась з кроком 0,1-0,2 МеВ.

Для моніторингу пучка гальмівного випромінювання використано іонізаційну камеру, струм від якої подавався на інтегруючий РС - ланцюжок. Величини R та C підбиралися таким чином, щоб їх добуток дорівнював значенню періода напіврозпаду ядер ізотопів, які одержувалися в процесі опромінення досліджуваних мішеней.

Наведена активність в зразках реєструвалась з допомогою сцинтиляційного гамма-спектрометра з кристалом NaI(Tl) розмірами 60*60 мм.

У роботах [7, 8] приведено опис активаційної методики вимірів виходу ядерних реакцій при опроміненні зразків гальмівним випромінюванням і нейтронами, яка включає такі етапи: а) опромінення зразка гальмівним випромінюванням і одночасний вимір інтенсивності дози гальмівного випромінювання чи дози; б) "охолодження" - переміщення зразка у положення для виміру наведеної активності; в) вимір спектру гамма-випромінювання наведеної активності; г) калібровка іонізаційної камери-монітора гальмівного пучка та калібровка гамма-спектрометра; д) розрахунок виходу реакції.

Вихід реакції $Y(E_m)$ розраховувався по формулі

$$Y(E_m) = \frac{\lambda \cdot S(E_m) \cdot k}{\varepsilon \cdot \eta \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t_0)) \cdot I(E_m, t)} \quad (1)$$

де: λ - стала розпаду ядер ізотопів, $S(E_m)$ - площа під фотопіком у апаратному спектрі гамма-випромінювання досліджуваного ізотопу після опромінення зразка при енергії E_m , ε - ефективність реєстрації гамма-випромінювання ізотопу, η -

коефіцієнт, що враховує квантовий вихід лінії ізотопу та коефіцієнт внутрішньої конверсії, $I(E_m, t)$ - доза гальмівного випромінювання в одиницях струму товсто-стінної іонізаційної камери, t_0 - час опромінення, k - коефіцієнт, що враховує час виміру та час охолодження зразка.

Інтегральний переріз знаходився згідно виразу [10, 11]:

$$\sigma_{int} = \int_{E_p}^{E_n} \sigma(E_\gamma) \cdot dE_\gamma = \frac{Y(E_m) \cdot (E_m - E_\gamma)}{\int_{E_p}^{E_n} W(E_m, E_\gamma) \cdot dE_\gamma} \quad (2)$$

Результати

1. Реакція $^{111}\text{Cd} (\gamma, \gamma') ^{111m}\text{Cd}$.

Для вимірів виходів використано зразки виготовлені з металевого кадмію, природної суміші ізотопів. Опромінення зразків кадмію проводилось на протязі 30 хв., опромінювались одночасно два зразки. Після опромінення зразки переносились на гамма-спектрометри – сцинтиляційний та напівпровідниковий. Час охолодження не перевищував 180 секунд. Виміри спектрів наведеної активності проводилися на протязі 1800 секунд. По даним вимірів будувались ділянки апаратних спектрів гама-квантів ізотопного переходу. Виміри проводились на двох різних гамма-спектрометрах та по двох лініях: 151 КеВ, 246 КеВ [12], що випромінював ^{111m}Cd .

Знаючи вихід, знаходився інтегральний переріз згідно формули (2).

На рис. 1. приведений графік залежності інтегрального перерізу σ_{int} , від максимальної енергії гальмівного випромінювання. Як бачимо з рис.1. хід кривої σ_{int} рівномірний, не спостерігається різних зломів, які б свідчили про наявність в цій області енергій окремих активаційних рівнів з великим перерізом. На графіку відкладені похибки вимірів та розрахунку, які складають разом величину 10-15 %.

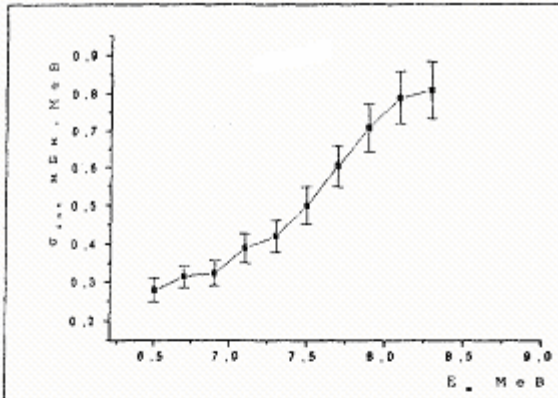


Рис 1. Графік залежності σ_{int} від E_m для реакції $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111m}\text{Cd}$.

2. Реакція $^{77}\text{Se}(\gamma, \gamma')^{77m}\text{Se}$.

Для вимірів виходів використано зразок виготовлений з гранул металевого селену в плексиглазовому контейнері. Опромінення зразка проводилось на протязі 40 секунд, охолодження 5 секунд та час вимірювання 40 секунд.

Вихід ядер ізомерів ^{77m}Se визначався по числу відліків під фотопіком лінії з енергією 160 кеВ. [12]. Оскільки зразок мав велику товщину, вводилась поправка на самопоглинання гамма-квантів у зразку, яка дорівнювала 0,85.

На рис. 2 приведені результати вимірів та розрахунків інтегрального перерізу σ_{int} . Як видно з цих даних на кривих залежності виходу та інтегрального перерізу не спостерігається суттєвих зломів, які б свідчили про наявність в цьому інтервалі енергій активаційних рівнів з великими перерізами.

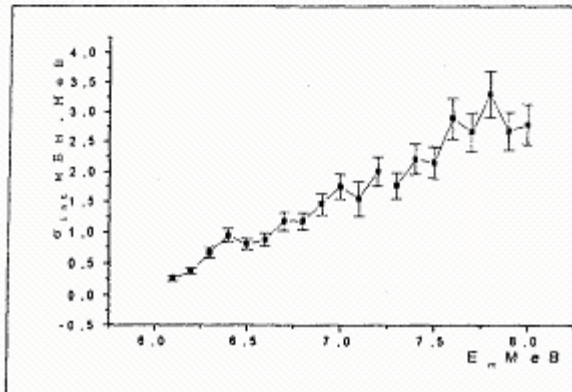


Рис 2. Графік залежності σ_{int} від E_m для реакції $^{77}\text{Se}(\gamma, \gamma')^{77m}\text{Se}$.

3. Реакція $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m}\text{Hf}$.

Вимір виходу реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179m}\text{Hf}$ здійснювався на тій же установці і по тій же методиці, що і виміри з Se. Для вимірів використано зразок, виготовлений з сполуки HfB_2 . Сполука розміщувалася в плексиглазовому контейнері діаметром 33 мм та товщиною 9 мм.

При опроміненні природного гафнію гамма-квантами з максимальною енергією більше 6 МеВ можуть утворюватись 4 ізомери з періодами напіврозпаду 1 сек., 4,3 сек., 18,6 сек. та 5,5 год., які випромінюють гамма-кванти різних енергій, але спектри від різних ізотопів мало відрізняються один від другого. Таким чином виникає проблема перевантаження амплітудного аналізатора великим числом гамма-квантів, які рееструються після опромінення зразка Hf та ідентифікації того чи іншого ізомера.

Для того, щоб уникнути впливу випромінювання ізомерів ^{177m}Hf , ^{178m}Hf , ^{180m}Hf на наші виміри був вибраний такий режим: опромінення зразка 100 секунд, час охолодження 20 секунд та час виміру 100 секунд. Таким чином активність мішаючих ізомерів на початку вимірів зменшувалась до величини 0,5 % від активності ізомера ^{179m}Hf . Виміри виходу проводились по найбільш інтенсивній лінії з енергією 0,215 МеВ, інтенсивність якої 82 % [12].

Розрахунки кривої виходу та інтегрального перерізу проводились по тій же методиці, яка була використана для випадку Se.

На рис. 3 приведені розраховані значення інтегрального перерізу. Як бачимо з рис 3 на кривій залежності інтегрального перерізу від енергії спостерігаються два зломи при енергіях 6,2 та 7,2 МеВ, які свідчать про наявність активаційного рівня з великим перерізом при енергії

6,2 MeV. Злом при енергії 7,2 MeV пов'язаний з порогом реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, n)^{179\text{m}}\text{Hf}$.

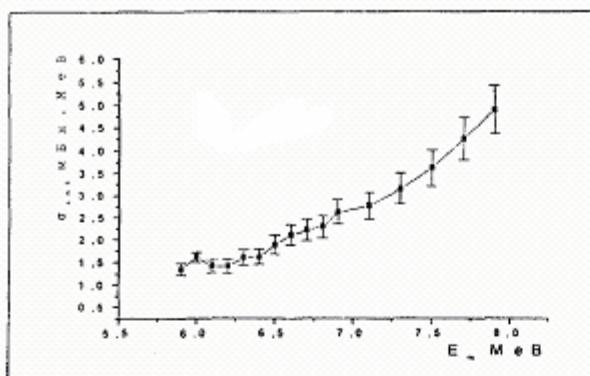


Рис.3. Графік залежності σ_{int} від E_m для реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179\text{m}}\text{Hf}$.

Висновки

Як видно з рис.1 залежність інтегрального перерізу реакції $^{111}\text{Cd}(\gamma, \gamma')^{111\text{m}}\text{Cd}$ від енергії в інтервалі енергій від 6,4 до 8,3 MeV зростають рівномірно, що свідчить про відсутність в цій області енергій активаційних рівнів з великим перерізом збудження. Якщо порівнювати величину інтегрального перерізу бачимо, що розбіжність даних результатів з даними роботи [6] не перевищує + 15 % при енергії 8 MeV.

На рис. 2 приведені дані про вихід та інтегральний переріз реакції $^{77}\text{Se}(\gamma, \gamma')^{77\text{m}}\text{Se}$ в залежності від енергії в

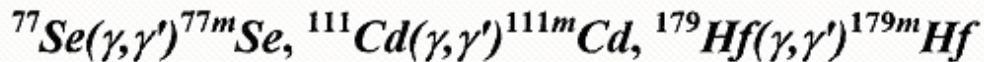
інтервалі енергій від 5,8 до 8,0 MeV. Як видно з рис.2 хід кривих в межах похибок вимірів рівномірний і теж немає підстав вважати, що в цій області є наявні активаційні рівні з великими перерізами. Величина інтегрального перерізу даної роботи на 20% менша від приведеної в роботі. Результати дослідження реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, \gamma')^{179\text{m}}\text{Hf}$ приведені на рис.3. Як видно з рис.3 в ході кривої залежності інтегрального перерізу від енергії спостерігаються два "злومي": при енергії 6,2 MeV та 7,2 MeV. Якщо перший "злом" можна пояснити наявністю активаційного рівня при цій енергії, то другий "злом" ми можемо пояснити тим, що при енергії 7,3 MeV лежить порогова енергія реакції $^{179}\text{Hf}(\gamma, n)^{179\text{m}}\text{Hf}$ за рахунок якої вихід починає швидко зростати. У природній суміші ізотопів гафнію міститься ізотопу ^{180}Hf 35,4 %, а ізотопу ^{179}Hf тільки 13,7%. Згаданий "злом" може бути використаний для перевірки енергетичної шкали прискорювача електронів, наприклад, мікротрона чи лінійного прискорювача.

Величина інтегрального перерізу при енергії 8 MeV, яка виміряна в даній роботі на 20 % менша від приведеної в роботі [6].

1. J.A. Anderson. Nuclear photoactivation cross section for short-lived isomeric states excited with a 6 MeV linac. Nucl.Instr.and Method in Phis.Rev. **B40/41**, 452 (1989).
2. J.J. Carrol, M.J. Byrd, D.G. Richmond et al. Photoexitation of nuclear isomer by (γ, γ') reactions. Phys. Rev. C. **43**, 3, 1238 (1991).
3. C.V. Collins, J.J. Carrol et al. Common thresholds and role of deformations in the photoexitation of isomers. Phys.Rev. C, **46**,3, 952 (1992).
4. В.М. Мазур, А.А. Теке. Измерение сечений неупругого рассеяния гамма-квантов на ядрах гафния. Препринт КИЯИ-81-40.
5. З.М. Биган, В.М.Мазур, И.В. Соколюк. Фотовозбуждение изомеров ^{167}Er , $^{179\text{m}}\text{Hf}$, $^{183\text{m}}\text{W}$. Препринт КИЯИ-84-13.
6. В.М. Мазур, И.В. Соколюк и др. Сечение возбуждения ядерных изомеров в реакциях $(\gamma, \gamma')^{\text{m}}$ в области энергий 4-15 MeV. ЯФ. **56**, 20 (1993).

7. J. Perdijon. L'analys par activation. Masson et c ,editeurs Paris. 1967, p.256.
8. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. Изд. Московского университета. М., 1979.
9. В.М. Андреянов та ін. Інтегральні перерізи фотозбудження ізомерів ^{197}Au , ^{137}Ba , ^{79}Br , ^{179}Hf гальмівним випромінюванням з максимальною енергією 6-9 МеВ. Депоновано в ДНТБ України, №97, Ук 95 від 10.01.1995 р.
10. А.Д. Антонов и др. Измерение интегральных сечений (γ, p) -реакций в области гигантского резонанса. ЯФ, 53, вып.1, (1991), 14-19.
11. Ю.П. Гангрский, А.П. Тончев, Н.П. Балабанов. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях, ЕЧАЯ, том 27, вып. 4, стр.1042-1098.
12. Lederer C., Shirley V. Table of isotopes.- Ed. N.Y.: Viley,1978.

INTEGRAL CROSS-SECTIONS OF THE REACTION



**A.I. Guthy, V.S. Bohinyuuk, A.G. Okunev, A.P. Osipenko,
A.M. Parlag, A.M. Fradkin, I.V. Khimich**

Uzhgorod National University, Department of Nuclear Physics,

9a, Kapitulna str., Uzhgorod 88000, Ukraine

e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

In microtron bremsstrahlung beam yield curves of excitation of isomeric states were obtained for nuclei ^{77}Se , ^{111}Cd , ^{179}Hf in the energy range 5-8 MeV with step 0,1-0,2 MeV. On the basis of yield curves integral cross-sections of excitation of corresponding isomer were calculated in the (γ, γ') -reaction.