

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЇ $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111}\text{In}$ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МІШЕНІ З ПРИРОДНИМ ВМІСТОМ ІЗОТОПІВ

**В.С. Бохінюк, О.М. Парлаг, В.А. Пилипченко, М.Т. Саболчій,
І.В. Хіміч**

Ужгородський національний університет, кафедра теоретичної фізики
з курсом фізики ядра і елементарних частинок
88000, м. Ужгород, вул. Капітульна, 9а, Україна
E-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

Проведено аналіз експериментальних результатів виходів реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$ за інтенсивностями спектральних гамма-ліній з енергіями 536 кеВ ($^{111\text{m}}\text{In}$), 511 кеВ (^{112}Sn) та 245 кеВ ($^{111\text{g}}\text{In}$), які випромінював зразок природного олова після опромінення гальмівними гамма-квантами бетатрона з максимальними енергіями від 17 до 24 МеВ. Одержано криву виходу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$ та ізомерні відношення для ізоотопу $^{111\text{m}}\text{In}$. Показана можливість проведення досліджень на природних зразках олова.

Вступ

Реакцію $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)$ зручно досліджувати, використовуючи мішені, збагачені ізоотопом ^{112}Sn . (з огляду на те, що у природній суміші ізоотопів ^{112}Sn складає лише 0,95%). Проте вимірювання інтенсивностей гамма-ліній та визначення виходів відповідних кінцевих станів, характерних для даної реакції, теж можливе. До того ж використання природної мішені олова дозволяє порівняння інтенсивностей перебігу ядерних реакцій на різних ізоотопах в одній експозиції.

Авторами [1] проведено вимірювання гамма-спектрів від зразка природного олова, експонованого у пучку гальмівних γ -квантів бетатрона. За лініями з енергіями 511 і 536 кеВ виміряно криві виходу реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$ та $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$.

При визначенні виходу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$ за інтенсивністю лінії з енергією 245 кеВ необхідно враховувати підселення основного стану за рахунок процесу β^+ -розпаду ядра ^{111}Sn , яке утворюється в реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)$ (рис. 1). Разом з тим знання кривої виходу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$ цікаве хоч би тому, що існуючі дані про ізомерні відношення для $^{111\text{m}}\text{In}$ суперечливі [2,3,4].

У даній роботі показана можливість та описано результати розділення вкладу в утворення $^{111\text{g}}\text{In}$ реакцій (γ, n) і (γ, p) на ^{112}Sn за характером часової залежності інтенсивності лінії 245 кеВ. Розраховано вихід реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$, який розумно узгоджується з перерізом цієї реакції, одержаним у [3].

Визначення вкладу різних каналів реакцій у формування стану $^{111\text{g}}\text{In}$

Процеси утворення стану $^{111\text{g}}\text{In}$ схематично показані на рис. 1. Видно, що крім прямого утворення стану $^{111\text{g}}\text{In}$ у (γ, p) -реакції, він може утворюватись при ізомерному переході з ізомерного рівня в основний, а також в результаті β^+ -розпаду ядра ^{111}Sn , яке утворюється в реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)$.

Процеси нагромадження радіоактивних ізоотопів при опроміненні та їх розпад після опромінення описується відповідними системами диференціальних рівнянь [5].

При виміряних в одній експозиції інтенсивностях характеристичних гамма-ліній відповідних основному, ізомерному станам та лінії попередника (^{112}Sn), можна знайти ізомерне відношення за раніше розробленою І.В.Соколюком програмою ISORATIO.BAS [6], в основу якої

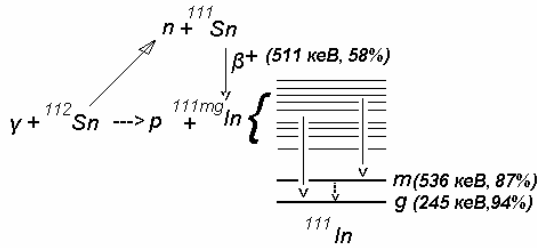


Рис. 1. Схема перебігу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$. У дужках вказано характеристичні енергії гамма-квантів. Розпад ^{111}Sn ($t_{1/2}=35\text{хв}$) підселяє лише стан $^{111\text{g}}\text{In}$.

покладено розв’язок згаданих систем диференціальних рівнянь. Знаючи ізомерне відношення та вимірюючи вихід ізомерного стану, можна розрахувати також вихід основного стану. Якщо вимірювання здійснені у різних експозиціях, при визначенні ізомерного відношення стає необхідним нормування інтенсивностей за дозою опромінення, що вносить помітну похибку.

Інший варіант визначення виходу основного стану полягає в аналізі акуратно вимірної кривої розпаду лінії основного стану (245 кеВ).

Експериментальні дані для аналізу складових лінії 245 кеВ наведено в таблиці 1 та на рис.2 (експериментальні точки). Як видно з рис. 2, залежність інтенсивності лінії 245 кеВ від часу при витримках, більших за 150 хв, має характер повільного спаду. На цей час розпадаються практично всі ядра ізомерного стану і попередника ^{111}Sn . Апроксимація логарифмічної залежності від часу експериментальних значень прямою лінією (рис. 2) дає період напіврозпаду, який відповідає часу життя $^{111\text{g}}\text{In}$ (2,83 доби). Разом з тим на рис. 2 можна помітити певне систематичне відхилення експериментальних точок від прямої.

Наростання інтенсивності при менших охолодженнях зумовлене розпадом ядер попередника (період напіврозпаду ^{111}Sn складає 35 хв) і накопиченням при цьому ядер основного стану:

$$^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn} \xrightarrow{\beta^+} ^{111\text{g}}\text{In}. \quad (1)$$

Таблиця 1. Експериментальні дані про залежність інтенсивності гамма-лінії з енергією 245 кеВ від часу охолодження

Час охолодження, хв	Експериментальна сума
1	1595±207
22	1881±167
42	2710±155
63	2704±150
84	3077±122
105	2940±114
126	3433±102
147	3429±98
168	3451±101
189	3380±105
210	3347±102
231	3240±95
252	3221±91
273	3184±79
294	3052±84
315	3044±90

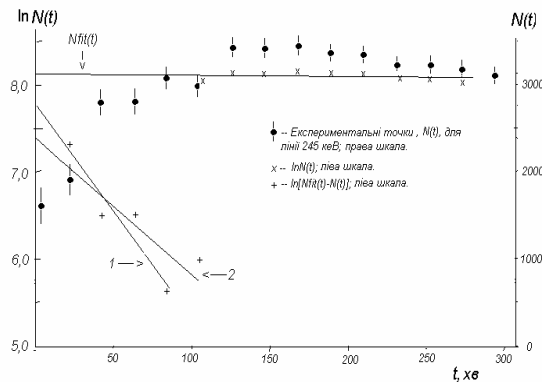


Рис. 2. Апроксимація ділянок кривої розпаду лінії 245 кеВ ($^{111\text{g}}\text{In}$) прямими: $N_{\text{fit}}(t)$ —апроксимація точок при часі охолодження, більшому за 105 хв; 1,2 – результат апроксимації різниць відповідно для точок від 2-ї до 5-ї та від 2-ї до 6-ї.

Одержаний на основі розв’язків відповідних диференціальних рівнянь вклад у максимум реакції (1) з утворенням основного стану $^{111\text{g}}\text{In}$ пропорційний:

$$S_{ng} = \frac{\lambda_g \lambda_n N_n}{\lambda_g - \lambda_n} \left[\frac{1}{\lambda_n} e^{-\lambda_n t} (1 - e^{-\lambda_n t_{vm}}) - \frac{1}{\lambda_g} e^{-\lambda_g t} (1 - e^{-\lambda_g t_{vm}}) \right], \quad (2)$$

$$N_n = \frac{Y_n}{\lambda_n} (1 - e^{-\lambda_n t_0}). \quad (3)$$

Тут Y_n – числа ядер попередника, які утворюються за одиницю часу, λ_g, λ_n – сталі розпаду відповідно основного стану і попередника; t_o, t, t_{vm} – відповідно інтервали часу опромінення, охолодження та вимірювання.

При витримках, значно менших за період напіврозпаду основного стану, залежність від t визначається швидкістю розпадів ядер попередника (перший член у квадратних дужках у формулі (2)). Апроксимація прямою лінією логарифмічної залежності різниць між відповідними точками $N_{fit}(t)$ та експериментальними точками від другої до шостої у межах похибок узгоджується з періодом напіврозпаду попередника (рис. 2). Похилі прямі є результатом підгонки при врахуванні різного набору експериментальних точок. Знайдене при цьому значення N_n дозволяє визначити відносний вихід реакції (1), який у межах 20% співпадає із знайденим виходом цієї реакції по лінії 511 кеВ. На рис. 3 (а також у таблиці 2) показано залежність вкладу попередника в інтенсивність лінії 245 кеВ.

На значення сум імпульсів перших двох точок залежності на рис. 3 впливає розпад ядер ізомера в основний стан (період напіврозпаду ізомера рівний 7,6 хв). У принципі, вклад ізомера та його вихід можна визначити, як і для попередника. Але для цього необхідне більш детальне і точне вимірювання залежності інтенсивності лінії 245 кеВ від часу при малих витримках. Крім того, для короткоживучого попередника слід враховувати ядра основного стану, які утворюються у період опромінення.

Наведений у таблиці 2 вклад ізомерного переходу в основний стан оцінювався за експериментальними даними про лінію 536 кеВ.

Користуючись даними, наведеними на рис. 3, можна розрахувати вклади в суму лінії 245 кеВ процесів розпаду ядер ізомерного стану та ядер ^{111}Sn .

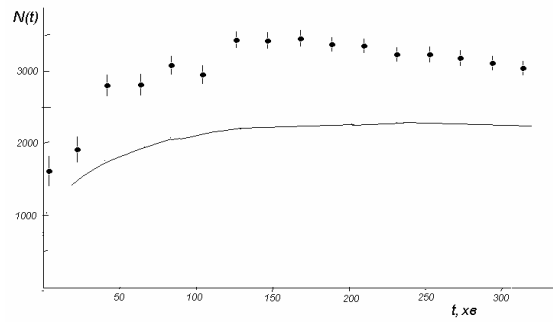


Рис.3. Розрахована частка імпульсів у максимумі при енергії 245 кеВ, зумовлена розпадом ^{111}Sn (суцільна крива).

Ефект від безпосереднього утворення основного стану ^{111g}In знаходився шляхом віднімання розрахованих вкладів від загальної суми імпульсів. Для зменшення впливу на результат значних похибок вимірювання у роботі використовувалось згладжування залежностей виходів від максимальної енергії гамма-квантів.

За визначеними сумами імпульсів, пов'язаних з безпосереднім утворенням основного стану, було розраховано криву виходу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111g}\text{In}$ (рис. 4) та відповідне ізомерне відношення. Пунктир на рис. 4 показує криву виходу досліджуваної реакції, розраховану за даними роботи [3].

Помітна розбіжність оціненого виходу і пунктирної лінії, особливо вище гігантського резонансу може бути пов'язана з наявністю неврахованого в експерименті фактора впливу на точність вимірювань (наприклад, прорахунків при реєстрації γ -квантів). Можливо, згадане вище невелике систематичне відхилення експериментальних точок від N_{fit} (рис. 2) має ту ж причину.

З рис. 4 видно, що до $E_{\gamma_{max}}=21$ МеВ (γ, p)-реакція на ^{112}Sn іде з переважним утворенням основного стану. Це, можливо, пов'язане з впливом на хід реакції кулонівського та відцентрового бар'єрів при емісії протонів. При вищих енергіях помічається суттєве зростання ізомерного відношення.

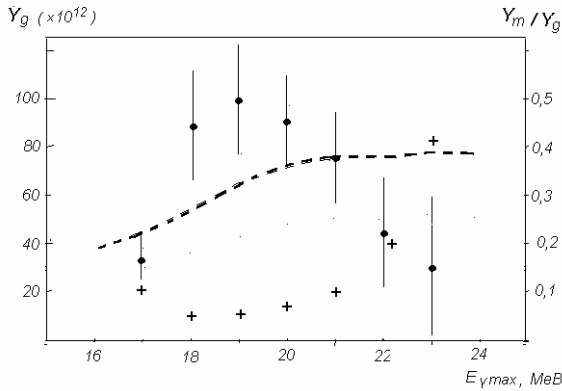


Рис. 4. Крива виходу реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$ (ліва шкала) та оцінені ізомерні відношення (хрестики, права шкала).

Однак, для цієї області енергій експериментальні дані отримані із значною похибкою. Розрахунок ізомерного відношення за програмою ISORATIO [6] на основі наших експериментальних даних при $E_{\gamma\text{max}}=22$ MeV дає величину, меншу за 0,1. Отже, за нашими даними ізомерне відношення у діапазоні максимальних енергій гальмівного випромінювання від 17 до 24 MeV помітно нижче, ніж у роботі [2].

Результати даної роботи свідчать про можливість дослідження виходів та ізомерних відношень для (γ, p) -реакція на ^{112}Sn при використанні мішені з природною сумішшю ізотопів та вимірюванні інтенсивності гамма-ліній з енергіями 245, 511 та 536 MeV. Показана можливість розраховувати ці ж виходи за вимірюною з хорошою статистичною точністю часовою залежністю розпаду лінії 245 keV.

Для детальнішого аналізу кривих виходів та ізомерних відношень досліджуваних реакцій необхідно поширити вимірювання у бік більших (до 1-2 діб), а також провести детальніші вимірювання при менших часах охолоджень (1-15 хв).

Можливо також, враховуючи малий вміст ^{112}Sn у природних зразках олова, слід провести аналіз наявності у використаних мішенях домішок інших елементів, які

можуть певним чином впливати на результати вимірювання.

Таблиця 2. Оцінені вклади різних каналів у максимум при $E = 245$ keV

Час охолодження	Експериментальна сума	Вклад реакції $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)$		Вклад фонових реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)$	Сума вкладів
		$^{111\text{g}}\text{In}$	$^{111\text{m}}\text{I}$ n		
1	1595±207	184	558	1037	1779
22	1881±167	345	400	1482	2227
42	2710±155	531	418	1761	2710
63	2704±150	333	416	1954	2703
84	3077±122	583	416	2079	3078
105	2940±114	368	415	2158	2941
126	3433±102	813	413	2207	3433
147	3429±98	781	411	2237	3429
168	3451±101	784	413	2254	3451
189	3380±105	706	412	2263	3381
210	3347±102	671	411	2265	3347
231	3240±95	567	410	2264	3241
252	3221±91	554	408	2261	3223
273	3184±79	522	406	2256	3184
294	3052±84	398	405	2250	3053
315	3044±90	398	403	2243	3044

Висновки

Результати нашої роботи підтверджують можливість дослідження фотопротонних реакцій на мішенях з природною сумішшю ізотопів.

Показано можливість одержання кривої виходу реакції з поправкою на вклад фонових реакцій шляхом аналізу залежності від часу охолодження інтенсивності гамма-лінії з енергією 245 keV.

Оцінене в роботі ізомерне відношення помітно менше від значення, одержаного в роботі [2]. Для пояснення цього факту доцільно продовжити експериментальне дослідження, розширивши діапазон часів охолодження.

Література

1. Бохінюк В.С., Окунев О.Г., Парлаг О.М., Пилипченко В.А., Саболчій М.Т.

Дослідження реакцій $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$, $^{112}\text{Sn}(\gamma, n)^{111}\text{Sn}$ // *Наук. вісник*

- Ужгородського ун-та. Серія Фізика. – 2008. – Вип. 23. – С. 75-78.
2. Біган З.М., Мазур В.М., Соколюк И.В. Заселение низколежащих состояний $2p_{1/2}$ в реакциях (γ, n) на ядрах замкнутой оболочки $N=50$ в интервале энергий 10-20 МэВ // УФЖ. – 1990. – 35. – С. 509–514.
 3. Сорокин Ю.И., Хрущев В.А., Юрьев Б.А. Реакция на изотопах олова ^{112}Sn и ^{124}Sn // Ядерная физика. – 1971. - Т.14, вып.6. - С.1118-1122.
 4. Yuta H., Morinaga H. // Nucl. Phys. – 1960. – 16. – P. 119–137.
 5. Лабораторный практикум по экспериментальным методам ядерной физики / Под ред К.Г. Финогенова. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 432 с.
 6. Okunev A.G., Osipenko A.P., Pilipchenko Yu.V., Sokolyk I.V. Isomeric ^{135m}Xe Pair Excitation in ^{232}Th Nucleus Photofission Reaction // EI-100. Proceedings of the International Conf. – Ukraine: Uzhgorod, 18-19 August 1997. - Karpaty Publisher, 1997. - P. 149.

THE METHOD OF INVESTIGATION OF THE $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111}\text{In}$ REACTION USING A TARGET WITH NATURAL CONTENTS OF ISOTOPES

V.S. Bokhinyk, O.M. Parlag, V.A. Pylypchenko, N.T. Sabolchiy, I.V.Khimich

Uzhhorod National University, Department of Theoretical Physics
with Course of Nuclear and Particle Physics
9a, Kapitulna str., Uzhhorod 88000, Ukraine
E-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

The analysis of experimental results of the yields of $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$ reaction for intensity of spectral γ -lines with the energies 536 keV ($^{111\text{m}}\text{In}$), 511 keV (^{112}Sn) and 245 keV ($^{111\text{g}}\text{In}$), which a natural Sn targeted radiate after irradiation by bremsstrahlung γ -rays in diapason from 17 to 24 MeV, is carried out. The curve of the yield of $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{g}}\text{In}$ reaction and isomer ratio of the $^{111\text{m}}\text{In}$ isotope are obtained. The possibility of investigation of the $^{112}\text{Sn}(\gamma, p)^{111\text{m}}\text{In}$ reaction using the natural tin example is shown.