

# ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ПРОДУКТІВ ФОТОЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ $^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$

О. А. Безшийко<sup>1</sup>, В.І. Берест<sup>1</sup>, О. М. Водін<sup>2</sup>, Л. О. Голінка-Безшийко<sup>1</sup>, І. М. Каденко<sup>1</sup>, А. В. Котенко<sup>1</sup>, В. А. Кушнір<sup>2</sup>, В. В. Мітроченко<sup>2</sup>, А. Палінічак<sup>1</sup>, С. М. Олійник<sup>2</sup>, С. А. Пережогін<sup>2</sup>, С. Vallerand<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ;  
<sup>2</sup>НДК "Прискорювач" ННЦ ХФТІ НАН України, м. Харків;  
<sup>3</sup>Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL), Orsay, France

Дослідження ізомерних відношень продуктів ядерних реакцій є одним із джерел інформації щодо механізмів перебігу таких реакцій та властивості збуджених станів атомних ядер. Незначна кількість експериментальних даних з ізомерних відношень продуктів фотоядерних реакцій значно ускладнює систематизацію та всебічний аналіз залежності ізомерних відношень від різних характеристик ядер і ядерних реакцій. Використання  $\gamma$ -квантів у вхідному каналі при дослідженні властивостей ядер має значні переваги перед іншими налітаючими частинками. Внесення низького спіну в ядро-мішень незалежно від енергії збудження є важливою властивістю при дослідженні кутових моментів збуджених станів ядер, уламків поділу та модельних характеристик дезбудження ядер - продуктів реакцій. Відсутність протягом багатьох років інтенсивних джерел моноенергетичних пучків  $\gamma$ -квантів не давала можливості ефективно застосовувати ці переваги, тому для дослідження фотоядерних реакцій в основному використовують інтенсивні джерела гальмівного випромінювання.

Особливо актуальним у таких дослідженнях є проведення вимірювань характеристик високопорогових фотоядерних реакцій з множинним вильотом частинок у проміжній області від енергій гігантського дипольного резонансу до порогу утворення піона, що є дослідженою набагато менше як з теоретичної, так і з експериментальної точок зору.

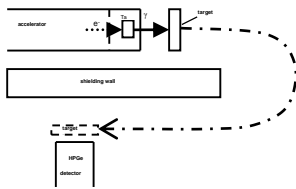
У рамках цієї роботи нами проведено вимірювання ізомерних відношень для ядра  $^{118\text{m,g}}\text{Sb}$ , що є продуктом фотоядерної реакції  $(\gamma,3n)$  на  $^{121}\text{Sb}$ . При опроміненні використовувалися зразки металічного стібю збагаченого за ізотопом  $^{121}\text{Sb}$ . Опромінення проводилося гамма-квантами гальмівного спектру з граничною енергією 60.5 MeV та 65.4 MeV. Джерелом гамма-квантів слугував прискорювач електронів ЛУЕ-40 НДК «Прискорювач» ННЦ ХФТІ. Гальмівна мішень представляла собою танталову пластину, товщиною 1,05 мм. Для вимірювання наведеної  $\gamma$ -активності зразків використовувалася напівпровідниковий спектрометр на базі HPGe-детектора з відносною ефективністю 20% і енергетичною роздільною здатністю 1,9 кеВ для  $\gamma$ -лінії 1332 кеВ при розпаді  $^{60}\text{Co}$ .

У роботі ізомерне відношення виходів розраховувалося як відношення заселення рівня з вищим спіном до заселення рівня з нижчим спіном:  $D = \frac{Y_H}{Y_L}$ . Оскільки метастабільний стан ядра  $^{118\text{m,g}}\text{Sb}$  має спін та парність 8<sup>-</sup>, а основний стан має спін та парність 1<sup>+</sup>, для продукту реакції  $^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$  ізомерне відношення визначалося як відношення виходів ізомерного стану ядра до основного.

Проведено порівняння отриманого ізомерного відношення для продуктів реакції  $^{123}\text{Sb}(\gamma,5n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$  з експериментальними даними для цієї реакції, взятими з бази даних EXFOR [1], та результатами розрахунків для 6 моделей, які виконано з використанням коду TALYS [2]. Експериментальне значення добре узгоджується з даними з бази даних [1] та теоретичними розрахунками (див. Рис. 1).

Для теоретичного розрахунку перерізів було використано 6 модельних підходів (LD1-LD6) для опису густини рівнів, з яких 3 є феноменологічними: модель постійної температури і модель Фермі-газу, модель Фермі-газу зі зворотнім зсувом, узагальнена надплинна модель, та 3 табульовані густини рівнів, розраховані з використанням: сили Скірма та таблиці Горелі, сили Скірма та комбінаторні таблиці Хілларі, сили Гоньї та комбінаторні таблиці Хілларі. Розрахунок перерізів проводився з урахуванням та без урахування передрівноважних процесів. Оскільки зазвичай для отримання гальмівного випромінювання використовуються тонкі мішені та зразки опромінюються на відстані, значно більшій за розміри зразку, то спектр налітаючих квантів добре описується в рамках наближення Шиффа [3].

## Вимірювання наведеної активності

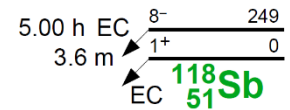


## Результати досліджень

## Досліджувана реакція

Експериментальні результати				
Reaction	$E_{max}$ , MeV	$I_m$	$I_g$	$d(E_{max}) = \frac{Y_g}{Y_m}$
$^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$	60.5	8 <sup>-</sup>	3 <sup>+</sup>	0.21±0.05
$^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$	65.4	8 <sup>-</sup>	3 <sup>+</sup>	0.17±0.04

$^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$



## Методика розрахунку

Утворення та розпад ізомерних пар описується системою рівнянь:

Розв'язок системи та графічне представлення результатів

$$\begin{cases}
 \frac{dN_m}{dt} = Y_m - \lambda_m \cdot N_m \\
 \frac{dN_g}{dt} = Y_g - \lambda_g \cdot N_g + p \cdot \lambda_m \cdot N_m
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 \frac{S_m}{C_m \epsilon_m f_m} = Y_m \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_9 \\
 \frac{S_g}{C_g \epsilon_g f_g} = Y_g \Lambda_2 \Lambda_5 \Lambda_8 + \\
 + Y_m (\Lambda_1 \Lambda_5 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_4 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_7) \\
 C_m = C_g = C \quad \epsilon_m = \epsilon_g = \epsilon
 \end{cases}$$

де  $N_i$  - заселеність рівнів ( $i=m$  для метастабільного рівня,  $i=g$  - основного рівня),  $Y_i$  - виходи реакції з кінцевим продуктом у метастабільному та основному станах,  $\lambda_m, \lambda_g$  - сталі розпаду основного та ізомерного стану, відповідно,  $p$  - коефіцієнт розгалуження (імовірність  $\gamma$ -переходу з ізомерного стану на основний стан).

де  $S_i, i=g,m$  - площа ліку повного поглинання, що відповідає енергії гамма-кванту, який випромінюється при розпаді ізомерного ( $i=m$ ) та основного ( $i=g$ ) станів;  $\epsilon_i, i=g,m$  - ефективність реєстрації гамма-кванта відповідної енергії,  $C_{i=g,m}$  - коефіцієнти, що визначають поправки на ефекти самопоглинання, каскадного долавання тощо;  $f_i, i=g,m$  - ймовірність випромінювання гамма-квантів даної енергії при розпаді  $i$ -ого стану ядра; коефіцієнти  $\Lambda_i, i=1,9$  однозначно визначаються через  $t_1, t_2, t_3$  - часи опромінення, витримки та вимірювання зразка, відповідно.

Результат розв'язку можна представити у вигляді:

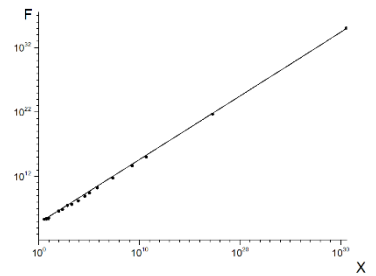
$$F = C(Y_m X + Y_g)$$

F та X визначаються як

$$F = \frac{S}{f_g \Lambda_2 \Lambda_5 \Lambda_8}$$

$$X = \frac{(\Lambda_1 \Lambda_5 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_4 \Lambda_8 + \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_7) + \frac{f_m}{f_g} \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_9}{\Lambda_2 \Lambda_5 \Lambda_8}$$

де  $S = S_m + S_g$  - сумарна площа фотоліку;  $Y_{m,g} = C \cdot Y_{m,g}$  - величини, пропорційні виходам реакції.



Графічне представлення результатів розрахунків для ізомерної пари  $^{118\text{m,g}}\text{Sb}$ , що утворюється в реакції  $^{121}\text{Sb}(\gamma,3n)^{118\text{m,g}}\text{Sb}$

## Порівняння результатів досліджень з розрахунками

## Приклад апаратного спектру наведеної активності

