

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

СТРУКТУРНО-ЯДЕРНІ ЕФЕКТИ У ВНУТРІШНІЙ КОНВЕРСІЇ М1-ПЕРЕХОДІВ  
З ЕНЕРГІЯМИ 114 ТА 138 кеВ В  $^{175}\text{Lu}$ 

За допомогою магнітного  $\beta$ -спектрометра типу  $\pi\sqrt{2}$  та двох коаксіальних HPGe-детекторів поміряно інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії та  $\gamma$ -променів із розпаду  $^{175}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 70$  діб). Визначено коефіцієнти внутрішньої конверсії  $\alpha_K$  та параметри проникнення  $\lambda$  для ротаційних магнітних дипольних переходів  $\gamma 114$  і  $\gamma 138$  кеВ в  $^{175}\text{Lu}$ .

*Ключові слова:* радіоактивність,  $^{175}\text{Hf}$ , HPGe-детектори, магнітний спектрометр, інтенсивності  $\gamma$ -променів, інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії, внутрішня конверсія, параметр проникнення.

## Вступ

Сучасна теорія внутрішньої конверсії претендує на точність розрахунків коефіцієнтів внутрішньої конверсії (КВК) близько 1 % [1]. Цього вдається досягти, оскільки КВК слабко залежать від деталей ядерної структури. При теоретичних розрахунках структурно-ядерні ефекти або враховуються наближено (як, наприклад, в таблицях Банд і Тржасковської [2]), або ігноруються зовсім (таблиці Хагера і Зельцера [3] та Розеля, Фріза, Альдера і Паулі [4]). Проте такий підхід виправдовує себе лише в тому випадку, коли  $\gamma$ -випромінювання цього переходу не є значно загальмованим у порівнянні з оцінкою ймовірності одночастинкового переходу. Якщо ж перехід загальмований, то тоді значення КВК може суттєво залежати від структури ядра. У цьому випадку в теоретичні КВК потрібно внести поправки відповідно до робіт [5 - 7].

Величина таких поправок характеризується параметром проникнення  $\lambda$ . Параметр проникнення  $\lambda$  визначений в роботі [8] як відношення безрозмірних матричних елементів проникнення і  $\gamma$ -випромінювання. Внутрішньоядерний конверсійний матричний елемент як виглядом підінтегральних функцій, так і межами інтегрування відрізняється від радіаційного матричного елемента. Іноді це призводить до різних правил відбору для матричних елементів  $\gamma$ -випромінювання і внутрішньоядерної конверсії [9].

Загальмованість  $\gamma$ -переходу означає, що радіаційний матричний елемент значно зменшений. У цьому випадку внутрішньоядерна конверсія може стати суттєвою і визначати собою величину КВК. При цьому, безумовно, необхідно, щоб правила відбору, відповідальні за зменшення ймовірності  $\gamma$ -випромінювання, не впливали (або впливали несуттєво) на ймовірність внутрішньоядерної конверсії. Дійсно, у деяких випадках правила відбору

для матричних елементів  $\gamma$ -випромінювання і внутрішньоядерної конверсії виявляються різними [10], а КВК аномальними. Зокрема, це випадки  $l$ -заборони та заборони за асимптотичними квантовими числами в деформованих ядрах. Предмет наших досліджень – структурно-ядерні ефекти у внутрішній конверсії ротаційних М1-переходів, зумовлені збігом гіромагнітних відношень остова та індивідуальних частинок.

## «Випадкова» заборона ротаційних М1-переходів у деформованих ядрах

В узагальненій моделі ядра приведена ймовірність переходу М1 між рівнями ротаційної смуги (для  $K \neq 1/2$ ) визначається формулою [11]

$$B(M1, I+1 \rightarrow I) = \frac{3}{4\pi} \left( \frac{e\hbar}{2mc} \right)^2 (g_K - g_R)^2 \frac{K^2(I+1+K)(I+1-K)}{(I+1)(2I+3)}. \quad (1)$$

Гіромагнітні відношення для внутрішнього і колективного рухів ( $g_K$  та  $g_R$ ), які входять у формулу (1), пов'язані з магнітним моментом  $\mu_0$  основного стану смуги

$$\mu_0 = \frac{I_0}{I_0 + 1} (g_K I_0 + g_R). \quad (2)$$

Вони можуть бути обчислені за допомогою експериментально виміряних значень  $B(M1)$  і  $\mu_0$ .

У деяких випадках, гіромагнітні відношення остова  $g_R$  і частинки поза ним  $g_K$  виявляються близькими за величиною. Це призводить до «випадкової» заборони М1-переходів у деформованих ядрах.

Експериментальні значення  $g_R$  для ядер із непарним  $A$  в середині області деформації концентруються поблизу величини  $\sim 0,3$ , на краях області наближуються до оцінки узагальненої моделі

$g_R \cong Z/A$ , яка ґрунтується на припущенні про рух рівномірно зарядженої ядерної речовини [12]. У той же час  $g_K$ -фактор змінюється в більш широких межах і є характерною величиною, яку можна використати для ідентифікації конфігурації ядерних станів [13]. Аналізуючи дані магнітних  $g_K$ -факторів для непарних деформованих ядер з [14], ми прийшли до висновку [15], що «випадкова» заборона  $M1$ -переходів може спостерігатись у ротаційних смугах, побудованих як на одночастинкових станах непарного протона –  $3/2[402]$  і  $7/2[404]$ , так і на одночастинкових станах непар-

ного нейтрона –  $5/2[523]$  і  $7/2[514]$ . Конфігурація  $\pi 7/2[404]$  приписана, зокрема, основному стану  $^{175}\text{Lu}$ , а переходи  $\gamma 114$  та  $\gamma 138$  кеВ належать до його ротаційної смуги. Фактори заборони  $M1$ -випромінювання відносно оцінок Вайскопфа за даними [16] становлять відповідно  $F_w(\gamma 114) = 28,2 \pm 1,1$  та  $F_w(\gamma 138) = 15,9 \pm 0,8$ .

Характеристики переходу  $\gamma 114$  кеВ можна досліджувати в радіоактивному розпаді як  $^{175}\text{Yb}$  ( $T_{1/2} = 4,2$  діб), так і  $^{175}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 70$  діб) (рис. 1). Перехід з енергією 138 кеВ збуджується лише при  $\beta$ -розпаді  $^{175}\text{Yb}$ .

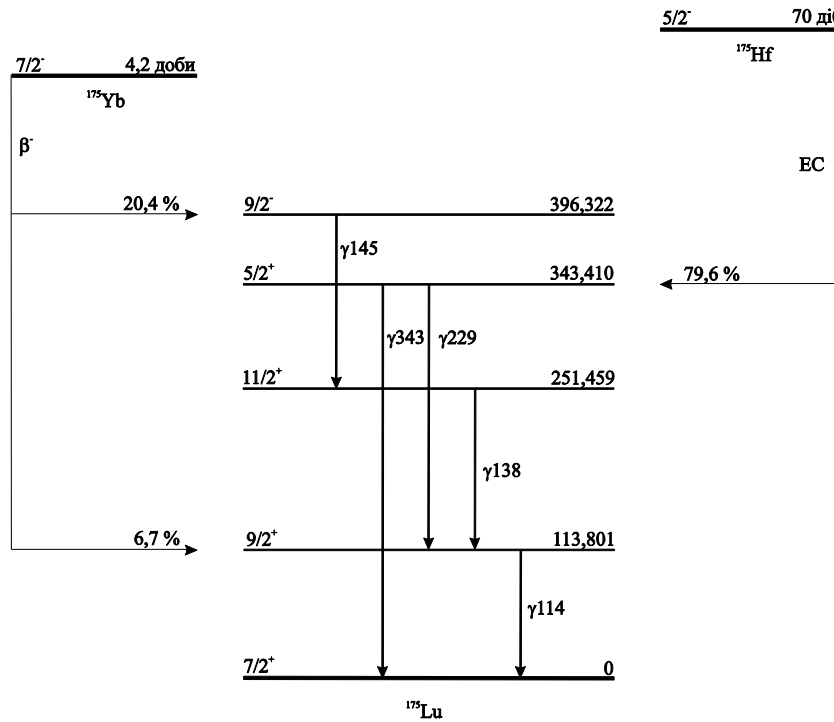


Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду  $^{175}\text{Yb}$  та  $^{175}\text{Hf}$ .

Параметр проникнення  $\lambda$  для переходу  $\gamma 138$  кеВ не визначався взагалі, а для переходу  $\gamma 114$  кеВ дані суперечливі [17 - 22]. Оскільки очікуваний вклад у КВК, зумовлений структурно-ядерними ефектами, згідно з теоретичними оцінками не перевищуватиме кількох відсотків [23], необхідні прецизійні вимірювання КВК для цих переходів. Ми проаналізували всі доступні на сьогоднішній день експериментальні дані [16] з внутрішньої конверсії та кутових кореляцій, а також провели вимірювання КВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для переходу  $\gamma 114$  кеВ.

### Експеримент

Оскільки при визначенні КВК шляхом прямого співставлення інтенсивностей електронів внутрішньої конверсії (ЕВК) і  $\gamma$ -променів дуже важко досягти необхідної точності, ми визнача-

ємо їх наступним чином. У спектрах ЕВК і  $\gamma$ -променів вибирається перехід добре відомої мультипольності, значення КВК якого використовуються як нормуючі. Помірявши відношення інтенсивностей ЕВК і  $\gamma$ -променів цих двох переходів, абсолютні значення КВК можна визначити за формулою

$$\alpha_i = \alpha_j \frac{I_e^i I_\gamma^j}{I_e^j I_\gamma^i}, \quad (3)$$

де  $I_e^{i,j}$ ,  $I_\gamma^{i,j}$  – експериментальні значення інтенсивностей ЕВК і  $\gamma$ -променів відповідних переходів;  $\alpha_{i,j}$  – абсолютні значення їхніх КВК.

Таким переходом з добре відомим КВК ( $\alpha_K = 0,114 \pm 0,001$  [24]) є  $M1+E2$ -перехід з енергією 343 кеВ, який з високою інтенсивністю збуджується при розпаді  $^{175}\text{Hf}$ .

Джерела випромінювання  $^{175}\text{Hf}$  були отримані в реакції  $(n, \gamma)$  на дослідницькому реакторі ІЯД НАН України. Використовували гафнієві мішені як з природним вмістом ізотопів, так і збагачені до 13,9 %  $^{174}\text{Hf}$ .

Вимірювання  $\gamma$ -спектрів проводили на  $\gamma$ -спектрометрі, що складався з двох горизонтальних коаксіальних детекторів із надчистого германію (GEM-40195 та GMX-30190 з роздільною здатністю 1,73 і 1,89 кеВ на лінії  $\gamma$ 1332  $^{60}\text{Co}$  відповідно) та багатоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC. Було виконано ретельне градування детекторів по ефективності реєстрації за допомогою еталонних спектрометричних джерел  $\gamma$ -випромінювання  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{228}\text{Th}$  та  $^{241}\text{Am}$  в діапазоні енергій від 26 до 1620 кеВ. Форма кривої ефективності реєстрації добре описується функцією Кемпбела [25], похибка градування для обох детекторів не перевищує 2 % (при  $E_\gamma > 100$  кеВ).

Щоб звести до мінімуму можливі систематичні похибки, вимірювання проводили серіями на детекторах різних типів, при різних коефіцієнтах підсилення та різних ширинах каналу амплітудно-цифрового перетворювача (8192 і 16384 рівня квантування вхідного сигналу). Усього було виконано 38 серій вимірювань.

Спектри ЕВК на  $K$ -оболонках  $^{175}\text{Lu}$  вивчали за допомогою магнітного  $\beta$ -спектрометра типу  $\pi\sqrt{2}$  із залізним ярмом і радіусом рівноважної орбіти 50 см. Роздільна здатність спектрометра 0,03 % по імпульсу при тілесному куті 0,07 % від  $4\pi$ . Характеристики спектрометра дають змогу виміряти відносні інтенсивності конверсійних ліній з точністю не гірше 1 % [26].

Таблиця 1. Експериментальні значення КВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для переходу з енергією 114 кеВ

Робота	[29]	[30]	[31]	[32]	[32]	[19]	[22]	Наша робота	Середнє зважене
$\alpha_K(114)$	1,73(21)	2,07(6)	1,94(20)	1,80(8)*	1,90(8)*	1,82(15)	1,86(6)	2,20(19)	1,94(4)

\* Наведено два значення  $\alpha_K(114)$ .

Згідно з рекомендаціями Б. С. Джелєпова [33] результати вимірювань порівнюють між собою для з'ясування узгодженості вагових похибок ( $S_B$ ) з похибками розкиду ( $S_P$ ). Якщо  $S_P/S_B < 2$ , то вимірювання вважаються узгодженими, а якщо  $S_P/S_B > 2$ , то має місце протиріччя, яке може бути зумовлене, зокрема, недооцінкою похибок. У нашому випадку  $S_P/S_B \approx 1$ . Тому ми можемо використати при аналізі аномалій в КВК середнє зважене значення  $\alpha_K(114)$ .

У ряді робіт [22, 34, 35] наводяться також значення КВК на  $L$ - і  $M$ -оболонках  $^{175}\text{Lu}$ . Проте точ-

Обробку  $\gamma$ -спектрів проводили за програмою WinSpectrum [27]. Спектри було проаналізовано також за періодом напіврозпаду, щоб виключити можливі впливи домішкових радіонуклідів. Остаточні значення інтенсивностей  $\gamma$ -ліній визначали як зважене середнє з 38 серій вимірювань. В якості невизначеності експериментальних значень використано або вагову похибку, або похибку розкиду, залежно від того, яка з них була більшою.

Отримані нами дані добре узгоджуються з результатами інших експериментальних робіт. Застосування різних типів детекторів дало змогу покращити точність визначення відносних інтенсивностей  $\gamma$ -променів. Повністю результати вимірювань опубліковано в роботі [28]. Відносні інтенсивності  $\gamma$ -променів із розпаду  $^{175}\text{Hf}$ , які ми використовуємо, такі:  $I_\gamma(114)/I_\gamma(343) = 0,00346 \pm 0,00020$ .

Обробку спектрів ЕВК проводили за розробленими нами програмами [26]. Відношення інтенсивностей ліній ЕВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для вищезазначених переходів становить  $I_K(114)/I_K(343) = 0,067 \pm 0,004$ . За формулою (3) визначаємо КВК для переходу з енергією 114 кеВ:  $\alpha_K(114) = 2,20 \pm 0,19$ .

#### Аналіз експериментальних даних із внутрішньої конверсії для $\gamma$ -переходів з енергіями 114 та 138 кеВ в $^{175}\text{Lu}$

Вісім найбільш точних експериментальних значень КВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для переходу з енергією 114 кеВ наведено в табл. 1. В останньому стовпчику таблиці наведено також і розраховане нами середнє зважене значення  $\alpha_K(114)$ .

ніть їхнього визначення значно поступається відношенням КВК на  $L$ -підоболонках атома. Тому при аналізі аномалій в КВК ми використали середні зважені значення  $\alpha_{L1}/\alpha_{L2}$  та  $\alpha_{L1}/\alpha_{L3}$  з табл. 2.

Експериментальні дані з внутрішньої конверсії для переходу  $\gamma$ 138 кеВ в  $^{175}\text{Lu}$  значно скромніші. У роботі [30] поміряно КВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$   $\alpha_K(138) = 1,19 \pm 0,08$ , авторами [38] та [39] - відношення КВК на  $K$ - та  $L$ -підоболонках  $\alpha_K/\alpha_L = 4,3 \pm 0,4$  і  $\alpha_{L1}/\alpha_{L2}/\alpha_{L3} = 1/(0,29 \pm 0,02)/(0,22 \pm 0,03)$  відповідно.

**Таблиця 2. Експериментальні значення відношень КВК на  $L$ -підоболонках  $^{175}\text{Lu}$  для переходу з енергією 114 кеВ**

Робота	[21]	[36]	[37]	Середнє зважене
$\alpha_{L1}/\alpha_{L2}$	2,50(13)	2,41(5)	2,46(3)	2,45(3)
$\alpha_{L1}/\alpha_{L3}$	3,45(24)	3,23(5)	3,24(3)	3,24(3)

Ще в роботі [39] наводиться відношення інтенсивностей ліній електронів внутрішньої конверсії на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для переходів  $\gamma 145$  та  $\gamma 138$  кеВ:  $I_K(145)/I_K(138) = 0,248 \pm 0,011$ .

Перехід з енергією 145 кеВ згідно з [40] є чистим  $E1$ -переходом. Теоретичне значення  $\alpha_K(145) = 0,110$  разом із даними про відносні інтенсивності  $\gamma$ -променів  $^{175}\text{Yb}$  з компіляції [40] було використано нами для розрахунку КВК на  $K$ -оболонці  $^{175}\text{Lu}$  для переходу  $\gamma 138$  кеВ за формулою (3):  $\alpha_K(138) = 1,26 \pm 0,10$ .

При аналізі аномалій у КВК ми використали середнє зважене значення  $\alpha_K(138) = 1,22 \pm 0,06$  та наведені вище відношення КВК на  $K$ - та  $L$ -підоболонках  $^{175}\text{Lu}$ .

**Методика аналізу аномалій в КВК змішаних ( $M1 + E2$ )-переходів**

Ефект проникнення у випадку переходів магнітної мультипольності можна описати одним ядерним параметром  $\lambda$  [5]. Методику аналізу аномалій у КВК переходів змішаної мультипольності детально описано в роботі [41]. Параметр проникнення  $\lambda$  і параметр змішування  $\delta$  знаходять за розв'язками системи рівнянь для абсолютних або відносних КВК. Для будь-якої  $i$ -підоболонки змішаного ( $M1 + E2$ )-переходу експериментальні КВК, з урахуванням ефекту проникнення в  $M1$ -компоненті, мають вигляд [6]

$$\alpha_{i,\text{exp}} = \frac{\alpha_i(M1)(1 + B_1^i \lambda + B_2^i \lambda^2) + \delta^2 \alpha_i(E2)}{1 + \delta^2}, \quad (4)$$

де  $B_1^i$  та  $B_2^i$  – параметри, що залежать тільки від хвильових функцій електрона й табульовані в [6];  $\alpha_i(M1)$  та  $\alpha_i(E2)$  – теоретичні значення КВК на  $i$ -підоболонці для  $M1$ - та  $E2$ -переходів відповідно;  $\alpha_{i,\text{exp}}$  – експериментальні значення КВК на  $i$ -підоболонці.  $E2$ -компонент у переходах такого типу прискорений у порівнянні з оцінкою ймовірності одночастинкового переходу. Тому аномалій у КВК, зумовлених ефектом проникнення, у цьому компоненті бути не може.

**Таблиця 3. Експериментальні значення параметра проникнення  $\lambda_{\text{exp}}$  для переходу з енергією 114 кеВ в  $^{175}\text{Lu}$**

Робота	[17]	[18]	[19]	[19]	[20]	[21]	[22]	Наша робота
$\lambda_{\text{exp}}$	8,4(25)	-3(1)	3,3(41)*	3,8(41)*	$\approx 2$	-3(1)	1,60(14)	-1,5(3)

\* При  $\delta^2(E2/M1)$  із різних робіт.

Такий же вираз можна записати і для відношень КВК.

Як і в [15], система рівнянь для абсолютних та відносних КВК розв'язувалась шляхом мінімізації функціонала за методом найменших квадратів:

$$\chi_{\text{min}}^2 = \left( \frac{\alpha_{i,\text{exp}} - \alpha_i(\lambda, \delta)}{\Delta \alpha_{i,\text{exp}}} \right)^2 + \sum_{i,j} \left( \frac{(\alpha_i / \alpha_j)_{\text{exp}} - \alpha_i(\lambda, \delta) / \alpha_j(\lambda, \delta)}{\Delta(\alpha_i / \alpha_j)_{\text{exp}}} \right)^2, \quad (5)$$

де  $\alpha_{i,\text{exp}}$ ,  $\Delta \alpha_{i,\text{exp}}$ ,  $(\alpha_i / \alpha_j)_{\text{exp}}$ ,  $\Delta(\alpha_i / \alpha_j)_{\text{exp}}$  – експериментальні значення КВК і відношень КВК на  $i$ - та  $j$ -підоболонках зі своїми похибками;  $\alpha_i(\lambda, \delta)$ ,  $\alpha_j(\lambda, \delta)$  та  $\alpha_i(\lambda, \delta) / \alpha_j(\lambda, \delta)$  – теоретичні значення КВК і відношень КВК на  $i$ - та  $j$ -підоболонках, що залежать від значень  $\lambda$  та  $\delta$ , які є параметрами підгонки за методом  $\chi_{\text{min}}^2$ .

Щоб уникнути локальних мінімумів, початкові значення  $\lambda$  і  $\delta$  знаходили з розв'язків системи рівнянь графічним методом. Теоретичні значення КВК отримано за допомогою інтерполяції табличних значень з роботи [3], а електронних параметрів – з роботи [6].

Стандартні похибки визначаються за допомогою співвідношення

$$\chi^2(\lambda_{\text{opt}} \pm \Delta \lambda) = \chi_{\text{min}}^2 + 1, \quad (6)$$

де  $\lambda_{\text{opt}}$  – оптимальне значення параметра  $\lambda$ , що мінімізує величину  $\chi^2$ . При цьому всі інші параметри фіксовані і відповідають своїм оптимальним значенням.

Аналогічно визначаються й похибки  $\Delta \delta$ .

**Результати та обговорення**

Результати розрахунків для переходу з енергією 114 кеВ в  $^{175}\text{Lu}$  разом з даними авторів інших робіт наведено в табл. 3.

Отримане нами значення параметра проникнення  $\lambda$  узгоджується з результатами досліджень [18, 21], але суперечить даним робіт [17] та [22]. При детальному аналізі стає зрозумілою причина таких розбіжностей. Для пошуку аномалій в КВК змішаних ( $M1 + E2$ )-переходів дуже важливо мати прецизійні дані не тільки про відносні, але й про абсолютні КВК на різних підоболонках атома або ж залучати додатково дані кутових кореляцій. Лише за такої умови функціонал (5) буде мати чіткий мінімум [5].

У [17] для знаходження параметра проникнення  $\lambda$  було взято експериментальні відношення КВК на  $L$ -підоболонках  $^{175}\text{Lu}$  з роботи [37]. Отриманий при підгонці параметр змішування  $\delta^2(E2/M1)$  протирічить даним кутових кореляцій (див. компіляцію [42]).

М. А. Лістенгартеном [18] були використані експериментальні відношення КВК на  $K$ -,  $L$ - і  $M$ -підоболонках  $^{175}\text{Lu}$  з роботи [36], авторами [19] – власне значення  $\alpha_K$  при  $\delta(E2/M1)$  з різних робіт. У роботі [20] наведена оцінка можливої величини параметра проникнення, виходячи з власного  $\delta(E2/M1)$  та конверсійних даних з [36].

А. Г. Троїцька зі співавторами [21] брала власні експериментальні відношення КВК на  $L$ -підоболонках  $^{175}\text{Lu}$ , а в роботі [21] наводиться середня величина  $\lambda$  з отриманого ними ж  $\alpha_K$  при  $\delta(E2/M1)$  із різних робіт.

Наше значення параметра змішування  $|\delta(E2/M1)| = 0,475 \pm 0,002$  не протирічить даним кутових кореляцій [42] і дуже близьке до найбільш точного значення  $\delta(E2/M1) = 0,465 \pm 0,005$  з роботи [20].

Для переходу з енергією 138 кеВ в  $^{175}\text{Lu}$  було знайдено параметр проникнення  $\lambda_{exp} = -(3,4 \pm 1,4)$  та параметр змішування  $|\delta(E2/M1)| = 0,48 \pm 0,02$ . Величину параметра проникнення  $\lambda_{exp}$  визначено нами вперше, величина параметра змішування добре узгоджується з даними [42].

Одним із інструментів систематики даних по

параметрам проникнення є пошук емпіричної залежності  $\lambda$  (за абсолютною величиною) від величини фактора заборони по Вайскопфу ( $F_W$ ). У роботі [41] неодноразово підкреслювалося, що такі залежності потрібно будувати не лише окремо для конкретних типів переходів, але й окремо для різних видів заборони  $\gamma$ -випромінювання. Необхідні дані для такого аналізу по «випадково» заборонених ротаційних  $M1$ -переходах у деформованих ядрах наведено на рис. 2.

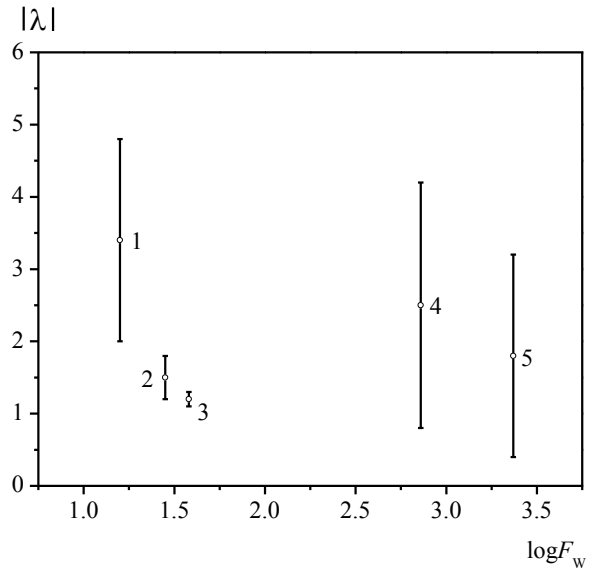


Рис. 2. Експериментальні значення ядерного параметра проникнення  $\lambda$  (за абсолютною величиною) залежно від фактора заборони по Вайскопфу ( $F_W$ ) для ротаційних  $M1$ -переходів у деформованих ядрах: 1 –  $^{175}\text{Lu}$  (138); 2 –  $^{175}\text{Lu}$  (114); 3 –  $^{191}\text{Ir}$  (129); 4 –  $^{163}\text{Er}$  (84); 5 –  $^{177}\text{Hf}$  (113); у дужках – енергія переходу, кеВ.

У межах експериментальних похибок залежність величини параметра проникнення  $\lambda$  від величини фактора заборони по Вайскопфу не спостерігається. Можна лише стверджувати, що при факторах заборони  $F_W \leq 2300$  величина параметра проникнення  $\lambda$  за абсолютною величиною не перевищить 5.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Raman S., Nestor Jr. C.W., Ichihara A., Trzhaskovskaya M.B. How good are the internal conversion coefficients now? // Phys. Rev. C. - 2002. - Vol. 66. - 044312.
2. Банд И.М., Тржасковская М.Б. Таблицы коэффициентов внутренней конверсии гамма-лучей на  $K$ -,  $L$ - и  $M$ -оболочках  $10 \leq Z \leq 104$ . - Л.: ЛИЯФ, 1978. - 179 с.
3. Hager R.S., Seltzer E.C. Internal conversion tables. Part I:  $K$ -,  $L$ -,  $M$ -shell conversion coefficients for  $Z = 30$  to  $Z = 103$  // Nucl. Data Tables A. - 1968. - Vol. 4. - P. 1 - 235.
4. Rösler F., Fries H.M., Alder K., Pauli H.C. Internal conversion coefficients for all atomic shells // Atom. Data Nucl. Data Tables. - 1978. - Vol. 21. - P. 91 - 514.
5. Банд И.М., Листенгартен М.А., Фересин А.П. Аномалии в коэффициентах внутренней конверсии гамма-лучей. - Л.: Наука, 1976. - 175 с.
6. Hager R.S., Seltzer E.C. Internal conversion tables. Part III: Coefficients for the analysis of penetration effects in internal conversion and  $E0$  internal conversion // Nucl. Data Tables A. - 1969. - Vol. 6. - P. 1 - 127.
7. Pauli H.C. Finite nuclear size effects in internal conversion // Helv. Phys. Acta. - 1967. - Vol. 40. - P. 713 - 744.
8. Church E.L., Weneser J. Effect of the finite nuclear

- size on internal conversion // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 104. - P. 1382 - 1386.
9. *Войханский М.Е., Листенгартен М.А.* О правилах отбора при конверсионных переходах // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1959. - Т. 23. - С. 238 - 243.
  10. *Листенгартен М.А.* Внутренняя конверсия гамма-лучей // Гамма-лучи / Под ред. Л. А. Слива - М., Л.: Изд-во АН СССР, 1961. - С. 271 - 507.
  11. *Войханский М.Е.* Радиационные переходы в обобщенной модели ядра // Там же. - С. 44 - 84.
  12. *Берлович Э.Е.* Экспериментальные исследования радиационных переходов в ядрах // Там же. - С. 85 - 270.
  13. *Бор О., Моттельсон Б.* Структура атомного ядра / Пер. с англ.; Под ред. Л.А. Слива - М.: Мир, 1977. - Т. 2. - 664 с.
  14. *Гродзинс Л.* Магнитные дипольные моменты возбужденных состояний ядер // УФН. - 1971. - Т. 103. - С. 37 - 86.
  15. *Кирищук В.И., Лашко А.П., Лашко Т.М.* Аномалии в коэффициентах внутренней конверсии заглывованих ротацийних гамма-переходів // УФЖ. - 2012. - Т. 57. - С. 1097 - 1107.
  16. *Evaluated Nuclear Structure Data File (National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory)* [<http://www.nndc.bnl.gov>].
  17. *Protop C.* On the calculation of the penetration factor for the internal conversion of magnetic dipole transitions in deformed nuclei // Rev. Roum. Phys. - 1971. - Vol. 16. - P. 951 - 959.
  18. *Листенгартен М.А.* Актуальные задачи физики, связанные с исследованием электронов внутренней конверсии с помощью магнитных спектрометров // Призменные бета-спектрометры и их применение. - Вильнюс: Изд-во Ин-та физики АН ЛитССР, 1971. - С. 169 - 192.
  19. *Constantinescu F., Enulescu Al., Gelberg A. et al.* Internal conversion of 113.8 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1974. - Bd. 267. - S. 389 - 391.
  20. *Quinones L.M., Behar M., Grabowski Z.W. et al.* Multipole mixing ratios of transitions in  $^{175}\text{Lu}$  populated from the decay of  $^{175}\text{Hf}$  // Z. Phys. A. - 1975. - Vol. 274. - P. 173 - 178.
  21. *Троицкая А.Г., Карташов В.М., Шевелев Г.А.* Внутрядерная конверсия в редкоземельных элементах // Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат. - 1977. - № 4. - С. 8 - 15.
  22. *Deera S., K.V. Sai, D. Rao et al.* Anomalous conversion of the 113,8 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Proc. of the DAE Symposium on Nuclear Physics. - 2011. - Vol. 56. - P. 378 - 379.
  23. *Фересин А.П., Шульц Г.* Анализ M1-внутрядерной конверсии на основе потенциала Саксона - Вудса // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1972. - Т. 36. - С. 890 - 898.
  24. *Булгаков В.В., Кирищук В.И., Лашко А.П. и др.* Определение коэффициентов внутренней конверсии  $\gamma$ -перехода с энергией 343 кэВ на K- и L-подоболочках  $^{175}\text{Lu}$  // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1989. - Т. 53. - С. 855 - 857.
  25. *McNelles L.A., Campbell J.L.* Absolute efficiency calibration of coaxial Ge(Li) detectors for the energy range 160-1330 keV // Nucl. Instrum. Methods. - 1973. - Vol. 109. - P. 241 - 251.
  26. *Булгаков В.В., Гаврилюк В.И., Лашко А.П. и др.* Магнитный бета-спектрометр высокого разрешения ИЯИ АН УССР. - К., 1986. - 48 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-86-33).
  27. *Хоменков В.П.* Дослідження атомно-ядерних ефектів у процесі внутрішньої конверсії гамма-променів: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / ІЯД. - К., 2003. - 19 с.
  28. *Lashko A.P., Lashko T.N., Martinishin V.A.* The gamma-ray intensities from the  $^{175}\text{Hf}$  decay // LXIII Intern. Conf. "Nucleus 2013": Book of abstracts (October 8 - 12, 2013, Moscow). - Saint-Petersburg, 2013. - P. 91.
  29. *Emery G.T., Perelman M.L.* Dynamic penetration effects in the internal conversion of electric dipole transitions in  $\text{Lu}^{175}$  // Phys. Rev. - 1966. - Vol. 151. - P. 984 - 992.
  30. *Ashery D., Blaugrund A.E., Kalish R.* E2/M1 mixing ratios and K conversion coefficients in odd-mass rotational nuclei // Nucl. Phys. - 1966. - Vol. 76. - P. 336 - 346.
  31. *Nilsson O., Tornkvist S, Malmsten. G. et al.* Internal conversion studies of the 114 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 221. - P. 106 - 112.
  32. *Reiersen J.D., Nelson G.C., Hatch E.N.* Gamma-ray measurements with a bent-crystal spectrometer // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 153. - P. 109 - 120.
  33. *Джелепов Б.С.* Методы разработки сложных схем распада. - Л.: Наука, 1974. - 232 с.
  34. *Hatch E.N., Boehm F., Marmier P., DuMond J.W.M.* Rotational and intrinsic levels in  $\text{Tm}^{169}$  and  $\text{Lu}^{175}$  // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 104. - P. 745 - 752.
  35. *Johansen K.H., Bengtson B., Hansen P.G., Hornshoj P.* The 1/2<sup>-</sup> [514] rotational band in  $^{175}\text{Lu}$  and the Q-value of the electron-capture decay // Nucl. Phys. A. - 1969. - Vol. 133. - P. 213 - 221.
  36. *Nilsson O., Tornkvist S, Malmsten. G. et al.* Internal conversion studies of the 114 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 221. - P. 106 - 112.
  37. *Novakov T., Hollander J.M.* Anomalous L subshell ratios in mixed M1-E2 transitions // Nucl. Phys. - 1964. - Vol. 60. - P. 593 - 608.
  38. *Bernstein E.M., Graetzer R.* Internal conversion electrons following Coulomb excitation of highly deformed odd-A nuclei // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 119. - P. 1321 - 1330.
  39. *Григорьев В.Н., Сергеев Ю.В.* Внутренняя конверсия электрических дипольных переходов в  $^{175}\text{Lu}$  // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1971. - Т. 35. - С. 1638 - 1643.
  40. *Basunia M. S.* Nuclear Data Sheets for A = 175 // Nucl. Data Sheets - 2004. - Vol. 102. - P. 719 - 900.
  41. *Листенгартен М.А.* Аномальная внутренняя конверсия в электромагнитных переходах атомных ядер // Современные методы ядерной спектроскопии 1985 / Под ред. Б. С. Желепова - Л.: Наука, 1986. - С. 142 - 204.
  42. *Krane K.S.* E2, M1 multipole mixing ratios in odd-mass nuclei, A > 150 // Atom. Data Nucl. Data Tables. - 1976. - Vol. 18. - P. 137 - 203.

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

**СТРУКТУРНО-ЯДЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ  
M1-ПЕРЕХОДОВ С ЭНЕРГИЯМИ 114 И 138 кэВ В  $^{175}\text{Lu}$**

При помощи магнитного  $\beta$ -спектрометра типа  $\pi\sqrt{2}$  и двух коаксиальных HPGe-детекторов измерены интенсивности линий электронов внутренней конверсии и  $\gamma$ -лучей из распада  $^{175}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 70$  сут). Определены коэффициенты внутренней конверсии  $\alpha_K$  и параметры проникновения  $\lambda$  для ротационных магнитных дипольных переходов  $\gamma 114$  и  $\gamma 138$  кэВ в  $^{175}\text{Lu}$ .

*Ключевые слова:* радиоактивность,  $^{175}\text{Hf}$ , HPGe-детекторы, магнитный спектрометр, интенсивности  $\gamma$ -лучей, интенсивности линий электронов внутренней конверсии, внутренняя конверсия, параметр проникновения.

A. P. Lashko, T. N. Lashko

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**NUCLEAR STRUCTURE EFFECTS IN THE INTERNAL CONVERSION  
OF THE 114 and 138 keV M1-TRANSITIONS IN  $^{175}\text{Lu}$**

Conversion-line and  $\gamma$ -ray intensities from the decay of  $^{175}\text{Hf}$  ( $T_{1/2} = 70$  days) have been measured with  $\pi\sqrt{2}$  magnetic  $\beta$ -spectrometer and two coaxial HPGe-detectors. The values of the internal conversion coefficient  $\alpha_K$  and penetration parameter  $\lambda$  for intraband magnetic dipole transitions  $\gamma 114$  and  $\gamma 138$  keV in  $^{175}\text{Lu}$  were determined.

*Keywords:* radioactivity,  $^{175}\text{Hf}$ , HPGe-detectors, magnetic spectrometer, measurements  $I_\gamma$ ,  $I(\text{ce})$ , internal conversion, penetration parameter.

REFERENCES

1. Raman S., Nestor Jr. C.W., Ichihara A., Trzhaskovskaya M.B. How good are the internal conversion coefficients now? // Phys. Rev. C. - 2002. - Vol. 66. - 044312.
2. Band I.M., Trzhaskovskaya M.B. Tables of gamma rays internal conversion coefficients on K-, L- and M-shells  $10 \leq Z \leq 104$ . - Leningrad: Leningrad Nuclear Physics Institute, 1978. - 179 p. (Rus)
3. Hager R.S., Seltzer E.C. Internal conversion tables. Part I: K-, L-, M-shell conversion coefficients for  $Z = 30$  to  $Z = 103$  // Nucl. Data Tables A. - 1968. - Vol. 4. - P. 1 - 235.
4. Rösler F., Fries H.M., Alder K., Pauli H.C. Internal conversion coefficients for all atomic shells // Atom. Data Nucl. Data Tables. - 1978. - Vol. 21. - P. 91 - 514.
5. Band I.M., Listengarten M.A., Feresin A.P. Anomalies in the gamma rays internal conversion coefficient. - Leningrad: Nauka, 1976. - 175 p. (Rus)
6. Hager R.S., Seltzer E.C. Internal conversion tables. Part III: Coefficients for the analysis of penetration effects in internal conversion and E0 internal conversion // Nucl. Data Tables A. - 1969. - Vol. 6. - P. 1 - 127.
7. Pauli H.C. Finite nuclear size effects in internal conversion // Helv. Phys. Acta. - 1967. - Vol. 40. - P. 713 - 744.
8. Church E.L., Weneser J. Effect of the finite nuclear size on internal conversion // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 104. - P. 1382 - 1386.
9. Vojkhanskij M.E., Listengarten M.A. // Izv. AN SSSR. Ser.fiz. - 1959. - Vol. 23. - P. 238 - 243. (Rus)
10. Listengarten M.A. Gamma rays internal conversion // Gamma rays / Ed. L. A. Sliv. - Moskva, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1961. - P. 271 - 507. (Rus)
11. Vojkhanskij M.E. Radiative transitions in a generalized model of the nucleus // Ibid. - P. 44 - 84. (Rus)
12. Berlovich E.E. Experimental studies of radiative transitions in nuclei // Ibid. - P. 85 - 270. (Rus)
13. Bor O., Mottelson B. The structure of the atomic nucleus / Trans. from English; Ed. L. A. Sliv. - Moskva: Mir, 1977. - Vol. 2. - 664 p. (Rus)
14. Grodzins L. // UFN. - 1971. - Vol. 103. - P. 37 - 86. (Rus)
15. Kyrshchuk V.I., Lashko A.P., Lashko T.M. // UFZh. - 2012. - Vol. 57. - P. 1097 - 1107. (Ukr)
16. Evaluated Nuclear Structure Data File (National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory) [<http://www.nndc.bnl.gov>].
17. Protop C. On the calculation of the penetration factor for the internal conversion of magnetic dipole transitions in deformed nuclei // Rev. Roum. Phys. - 1971. - Vol. 16. - P. 951 - 959.
18. Listengarten M.A. Actual problems of physics related to the study of internal conversion electrons with magnetic spectrometers // Prismatic beta spectrometers and their application. - Vilnius: Publishing House of the Institute of Physics, Academy of Sciences of the Lithuanian SSR, 1971. - P. 169 - 192. (Rus)
19. Constantinescu F., Enulescu Al., Gelberg A. et al. Internal conversion of 113.8 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1974. - Bd. 267. - S. 389 - 391.
20. Quinones L.M., Behar M., Grabowski Z.W. et al. Multipole mixing ratios of transitions in  $^{175}\text{Lu}$  populated from the decay of  $^{175}\text{Hf}$  // Z. Phys. A. - 1975. - Vol. 274. - P. 173 - 178.
21. Troitskaya A.G., Kartashov V.M., Shevelev G.A. // Izv.

- An KazSSR. Ser. fiz.-mat. - 1977. - No. 4. - P. 8 - 15. (Rus)
22. *Deepa S., K.V. Sai, D. Rao et al.* Anomalous conversion of the 113,8 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Proc. of the DAE Symposium on Nuclear Physics. - 2011. - Vol. 56. - P. 378 - 379.
  23. *Feresin A.P., Shul'ts G.* // Izv. AN SSSR. Ser. fiz. - 1972. - Vol. 36. - P. 890 - 898. (Rus)
  24. *Bulgakov V.V., Kirishchuk V.I., Lashko A.P. et al.* // Izv. AN SSSR. Ser. fiz. - 1989. - Vol. 53. - P. 855 - 857. (Rus)
  25. *McNelles L.A., Campbell J.L.* Absolute efficiency calibration of coaxial Ge(Li) detectors for the energy range 160-1330 keV // Nucl. Instrum. Methods. - 1973. - Vol. 109. - P. 241 - 251.
  26. *Bulgakov V.V., Gavrilyuk V.I., Lashko A.P. et al.* High resolution magnetic beta-spectrometer in INR Ukrainian Academy of Sciences. - Kyiv, 1986. - 48 p. - (Preprint / Ukrainian Academy of Sciences. Institute for Nuclear Research; KINR-86-33). (Rus)
  27. *Khomenkov V.P.* Study of atomic and nuclear effects in the gamma rays internal conversion: Thesis PhD abstract / INR. - Kyiv, 2003. - 19 p. (Ukr)
  28. *Lashko A.P., Lashko T.N., Martinishin V.A.* The gamma-ray intensities from the  $^{175}\text{Hf}$  decay // LXIII Intern. Conf. "Nucleus 2013": Book of abstracts (October 8 - 12, 2013, Moscow). - Saint-Petersburg, 2013. - P. 91.
  29. *Emery G.T., Perelman M.L.* Dynamic penetration effects in the internal conversion of electric dipole transitions in  $\text{Lu}^{175}$  // Phys. Rev. - 1966. - Vol. 151. - P. 984 - 992.
  30. *Ashery D., Blaugrund A.E., Kalish R.*  $E2/M1$  mixing ratios and K conversion coefficients in odd-mass rotational nuclei // Nucl. Phys. - 1966. - Vol. 76. - P. 336 - 346.
  31. *Nilsson O., Tornkvist S., Malmsten. G. et al.* Internal conversion studies of the 114 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 221. - P. 106 - 112.
  32. *Reiersen J.D., Nelson G.C., Hatch E.N.* Gamma-ray measurements with a bent-crystal spectrometer // Nucl. Phys. A. - 1971. - Vol. 153. - P. 109 - 120.
  33. *Dzhelepov B.S.* Development methods complex decay schemes. - Leningrad: Nauka, 1974. - 232 p. (Rus)
  34. *Hatch E.N., Boehm F., Marmier P., DuMond J.W.M.* Rotational and intrinsic levels in  $\text{Tm}^{169}$  and  $\text{Lu}^{175}$  // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 104. - P. 745 - 752.
  35. *Johansen K.H., Bengtson B., Hansen P.G., Hornshoj P.* The  $1/2^-$  [514] rotational band in  $^{175}\text{Lu}$  and the Q-value of the electron-capture decay // Nucl. Phys. A. - 1969. - Vol. 133. - P. 213 - 221.
  36. *Nilsson O., Tornkvist S., Malmsten. G. et al.* Internal conversion studies of the 114 keV transition in  $^{175}\text{Lu}$  // Z. Phys. - 1969. - Vol. 221. - P. 106 - 112.
  37. *Novakov T., Hollander J.M.* Anomalous L subshell ratios in mixed  $M1-E2$  transitions // Nucl. Phys. - 1964. - Vol. 60. - P. 593 - 608.
  38. *Bernstein E.M., Graetzer R.* Internal conversion electrons following Coulomb excitation of highly deformed odd-A nuclei // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 119. - P. 1321 - 1330.
  39. *Grigor'ev V.N., Sergeenkov Yu.V.* // Izv. AN SSSR. Ser. fiz. - 1971. - Vol. 35. - P. 1638 - 1643. (Rus)
  40. *Basunia M. S.* Nuclear Data Sheets for  $A = 175$  // Nucl. Data Sheets - 2004. - Vol. 102. - P. 719 - 900.
  41. *Listengarten M.A.* Abnormal internal conversion of electromagnetic transitions in atomic nuclei // Modern methods of nuclear spectroscopy 1985 / Ed. B. S. Dzhelepov. - Leningrad: Nauka, 1986. - P. 142 - 204. (Rus)
  42. *Krane K.S.*  $E2, M1$  multipole mixing ratios in odd-mass nuclei,  $A > 150$  // Atom. Data Nucl. Data Tables. - 1976. - Vol. 18. - P. 137 - 203.

Надійшла 03.11.2014

Received 03.11.2014