

М.Ф. МИТРОХОВИЧ, А.П. ЛАШКО, Т.М. ЛАШКО, Л.П. СИДОРЕНКО

Інститут ядерних досліджень НАН України

(Просп. Науки, 47, Київ 03680; e-mail: anatolii.lashko@gmail.com)

УДК 539.163

## ПРО СТРУКТУРУ РІВНЯ $K^\pi = 3/2^+$ , 362 кеВ В $^{165}\text{Ho}$

На магнітному  $\beta$ -спектрометрі типу  $\pi\sqrt{2}$  з високою точністю виміряні відношення інтенсивностей електронів внутрішньої конверсії на К- та L-оболонках  $^{165}\text{Ho}$  для  $\gamma$ -переходу з енергією 362 кеВ. Вперше визначені параметр проникнення  $\lambda$  для M2-компонента цього  $\gamma$ -переходу та параметр змішування  $\delta(E3/M2)$ . Величина домішки E3-мультипольності відповідає ймовірності радіаційного переходу  $B(E3)(362 \text{ кеВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$ , що свідчить про її колективну природу і, можливо, про октупольну деформацію ядра  $^{165}\text{Ho}$ .

**Ключові слова:** радіоактивність,  $^{165}\text{Dy}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ , магнітний спектрометр, внутрішня конверсія, параметр проникнення, параметр змішування за мультипольностями.

### 1. Вступ

Під час дослідження конверсійного спектра  $^{165}\text{Dy}$  ( $T_{1/2} = 2,34$  години), фрагмент схеми розпаду якого наведено на рис. 1, нами було встановлено, що  $\gamma$ -перехід з енергією 362 кеВ між протонними станами  $K^\pi = 3/2^+ 3/2 [411]$  та  $K^\pi = 7/2^- 7/2 [523]$  в  $^{165}\text{Ho}$  має змішану (M2 + E3)-мультипольність [1]. Порівняно з теоретичними оцінками одночастинкової моделі Вайскопфа, M2-компонент цього переходу загальмований ( $F_W(M2) \cong 12$ ), і для нього можливі аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії  $\gamma$ -променів, зумовлені ефектом проникнення. Ця обставина може суттєво вплинути на результати розрахунків величини параметра змішування  $\delta(E3/M2)$  на основі конверсійних даних і потребує додаткового вивчення.

### 2. Методика експерименту

Джерела  $^{165}\text{Dy}$  було отримано в реакції (n,  $\gamma$ ) при опроміненні мішеней на реакторі ВВР-М потоком теплових нейтронів інтенсивністю  $5 \cdot 10^{13}$  нейтронів  $\cdot \text{см}^{-2}$ . Мішені виготовлялись шляхом напилення в вакуумі збагаченого  $^{164}\text{Dy}$  на алюмінієву

основу. Товщина напилення дорівнювала близько  $10 \text{ мкг} \cdot \text{см}^{-2}$ .

Спектри електронів внутрішньої конверсії (ЕВК)  $\gamma$ -переходу з енергією 362 кеВ були виміряні на магнітному  $\beta$ -спектрометрі типу  $\pi\sqrt{2}$  з позиційно-чутливим детектором (ПЧД) [2]. З метою отримати більш точні дані про інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії цього  $\gamma$ -переходу на К- та L-підоболонках  $^{165}\text{Ho}$ , були проведені скрупульозні дослідження залежності ефективності реєстрації ПЧД з мікроканалних пластин, розміщеного у фокальній площині  $\beta$ -спектрометра, від місця детектування. Вона виявилася нелінійною і змінюється в межах 10–15% вздовж фокальної площини спектрометра.

На рис. 2 наведено ділянку конверсійного спектра  $^{165}\text{Dy}$  в області розташування L-ліній  $\gamma$ -переходу з енергією 362 кеВ, скорегованого на ефективність реєстрації ПЧД. Висока роздільна здатність  $\beta$ -спектрометра (0,035% по  $B\rho$ ) дає змогу визначати відносні інтенсивності конверсійних ліній з точністю до 1%.

### 3. Результати та їх обговорення

Обробку конверсійних спектрів проводили по розроблених нами програмах. Отримані значення ін-

© М.Ф. МИТРОХОВИЧ, А.П. ЛАШКО, Т.М. ЛАШКО, Л.П. СИДОРЕНКО, 2014

ISSN 2071-0194. Укр. фіз. журн. 2014. Т. 59, № 1

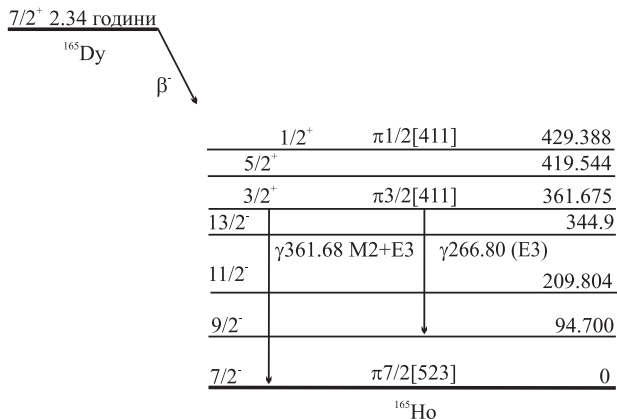


Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду <sup>165</sup>Dy

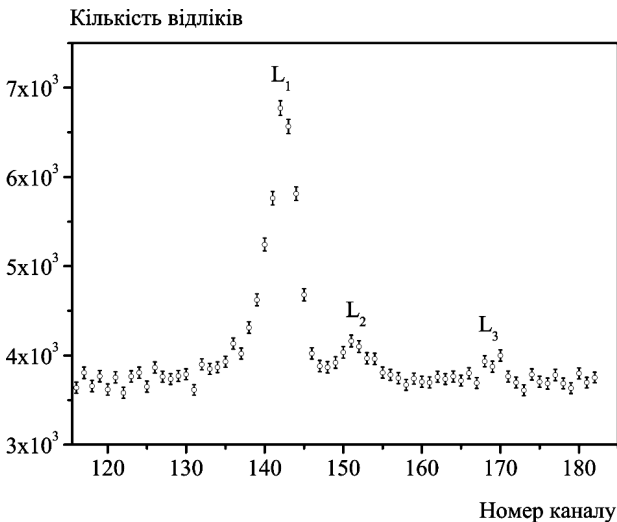


Рис. 2. Ділянка конверсійного спектра, яка містить лінії ЕВК  $\gamma$ -переходу з енергією 362 кеВ на L-підоболонках <sup>165</sup>Ho

Таблиця 1. Відносні інтенсивності ліній ЕВК  $\gamma$ -переходу з енергією 362 кеВ на К- та L-оболонках <sup>165</sup>Ho

Оболонка	$I_e$ , відн. од.	Оболонка	$I_e$ , відн. од.
K	$643 \pm 8$	L <sub>2</sub>	$17,9 \pm 0,8$
L <sub>1</sub>	100	L <sub>3</sub>	$6,9 \pm 0,8$

тенсивностей ліній ЕВК для переходу  $\gamma$ 362 кеВ на К- та L-оболонках <sup>165</sup>Ho наведені в табл. 1.

Щодо результатів інших авторів, то на сьогоднішній день відомі три експериментальні роботи в цій області. Персоном зі співавторами [3] визначено коефіцієнт внутрішньої конверсії (КВК)  $\gamma$ -

переходу з енергією 362 кеВ на К-оболонці <sup>165</sup>Ho ( $\alpha_K = 0,22 \pm 0,04$ ) та відношення інтенсивностей ліній ЕВК на К- і L-оболонках <sup>165</sup>Ho ( $K/L = 4,8 \pm 1,2$ ). В роботах [4, 5] для цього переходу були поміряні відношення інтенсивностей ліній ЕВК ( $K/L = 6,3 \pm 1,8$ ) та ( $K/L_1 = 4,8 \pm 0,5$ ) відповідно. Наші виміри  $K/L = 5,16 \pm 0,10$  дуже добре узгоджуються з даними робіт [3, 4], і мають значно кращу точність; відношення  $K/L_1 = 6,43 \pm 0,08$  узгоджується з результатами роботи [5] в межах трьох середньоквадратичних похибок.

Нові, уточнені значення інтенсивностей ліній ЕВК, були проаналізовані з урахуванням ефекту внутрішньоядерної конверсії. Мова йде про аномалії в коефіцієнтах внутрішньої конверсії  $\gamma$ -променів, які зумовлені ефектом проникнення. Під ефектом проникнення або внутрішньоядерною конверсією в теорії внутрішньої конверсії розуміють поправку в КВК, яка виникає при заміні перехідних електромагнітних потенціалів, обчислених для точкового ядра (які виникають в момент переходу ядра з одного ядерного рівня на інший), на перехідні потенціали, обчислені для ядра певного розміру.

Ефект проникнення у випадку переходів магнітної мультипольності можна описати одним ядерним параметром  $\lambda$  [6]. Методика аналізу аномалій в КВК переходів змішаної мультипольності детально описана в роботі [7]. Параметр проникнення  $\lambda$  і параметр змішування  $\delta$  знаходять за розв'язками системи рівнянь для абсолютних або відносних КВК. Для будь-якої  $i$ -підоболонки змішаного ( $M2 + E3$ )-переходу експериментальні КВК, з урахуванням ефекту проникнення в  $M2$ -компоненті, мають вигляд [8]:

$$\alpha_{i, \text{exp}} = \frac{\alpha_i(M2)(1 + B_1^i \lambda + B_2^i \lambda^2) + \delta^2 \alpha_i(E3)}{1 + \delta^2}, \quad (1)$$

де  $B_1^i$  і  $B_2^i$  – параметри, які залежать тільки від хвильових функцій електрона і табульовані в [8];  $\alpha_i(M2)$  і  $\alpha_i(E3)$  – теоретичні значення КВК на  $i$ -підоболонці для  $M2$ - і  $E3$ -переходів відповідно;  $\alpha_{i, \text{exp}}$  – експериментальні значення КВК на  $i$ -підоболонці.

Аналогічний вираз можна записати і для відношень КВК.

Для пошуку аномалій в коефіцієнтах внутрішньої конверсії змішаних переходів дуже важливо

Таблиця 2. Енергії і структура основних та перших двох збуджених станів в ізотопах  $^{159,161,163,165}\text{Ho}$ 

Ядро	$K^\pi$	Енергія, кеВ		Структура
		експеримент	теорія	
$^{159}\text{Ho}$	$7/2^-$	0	0	523↑ 97%
	$3/2^+$	–	250	411↑ 94%
	$1/2^+$	206	380	411↓ 88% 411↑ + Q <sub>1</sub> (22) 9%
$^{161}\text{Ho}$	$7/2^-$	0	0	523↑ 97%
	$3/2^+$	299	260	411↑ 94% 411↓ + Q <sub>1</sub> (22) 3%
	$1/2^+$	211	380	411↓ 88% 411↑ + Q <sub>1</sub> (22) 9%
$^{163}\text{Ho}$	$7/2^-$	0	0	523↑ 98%
	$3/2^+$	360	240	411↑ 95% 411↓ + Q <sub>1</sub> (22) 2%
	$1/2^+$	298	390	411↓ 91% 411↑ + Q <sub>1</sub> (22) 8%
$^{165}\text{Ho}$	$7/2^-$	0	0	523↑ 99%
	$3/2^+$	362	160	411↑ 95%
	$1/2^+$	429	220	411↓ 95%

мати прецизійні дані не тільки про відносні, а і про абсолютні КВК на різних підоболонках атома. Саме тому, при аналізі разом з даними табл. 1 було використано значення  $\alpha_K$  з роботи [3].

Аналогічно [9] система рівнянь для абсолютних та відносних КВК розв'язувалась шляхом мінімізації функціоналу за методом найменших квадратів:

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

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;  $\alpha_i(\lambda, \delta)$ ,  $\alpha_j(\lambda, \delta)$  і  $\alpha_i(\lambda, \delta)/\alpha_j(\lambda, \delta)$  – теоретичні значення КВК і відношень КВК на  $i$ - і  $j$ -підоболонках, які залежать від значень  $\lambda$  та  $\delta$ , які є параметрами підгонки за методом  $\chi_{\min}^2$ .

Щоб уникнути локальних мінімумів, початкові значення  $\lambda$  і  $\delta$  знаходили з розв'язків системи рівнянь графічним методом. Теоретичні значення КВК отримані за допомогою інтерполяції табличних значень з роботи [10], а електронних параметрів – з роботи [8].

Стандартні похибки визначаються за допомогою співвідношення:

$$\chi^2(\lambda_{\text{opt}} \pm \Delta\lambda) = \chi_{\min}^2 + 1, \quad (3)$$

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

Аналогічно визначаються і похибки  $\delta$ .

Були отримані такі результати:  $-2,7 \leq \lambda_{\text{exp}} \leq 2,5$ ;  $|\delta(E3/M2)| = 0,329 \pm 0,022$ .

Експериментальне значення параметра проникнення не протирічить очікуваному  $\lambda_{\text{th}} \cong 1$  для такого типу переходів [7].

Період напіврозпаду рівня  $3/2^+$  362 кеВ в  $^{165}\text{Ho}$  відомий і згідно з даними компіляції [11] становить  $T_{1/2}(362,675 \text{ кеВ}) = (1,512 \pm 0,004) \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Визначена нами величина домішки  $E3$ -мультипольності відповідає ймовірності радіаційного переходу  $B(E3)(362 \text{ кеВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$ , що свідчить про її колективну природу і, можливо, про октупольну деформацію ядра  $^{165}\text{Ho}$ .

Зазначимо також, що ймовірність радіаційного переходу  $\gamma_{267 \text{ кеВ}}$  з рівня  $3/2^+$  362 кеВ на перший збуджений ротаційний рівень  $9/2^-$  95 кеВ основного стану  $^{165}\text{Ho}$ , також становить кілька одностинкових одиниць  $B(E3)(267 \text{ кеВ}) = (6,7 \pm \pm 2,1) \text{ W.u.}$  [11].

В.Г. Соловйовим та ін. [12, 13] було проведено розрахунки структури збуджених неротаційних станів ізотопів  $^{159,161,163,165}\text{Ho}$  в рамках надтекучої моделі ядра з урахуванням взаємодії квазічастинки з вібраційними фононами. Результати розрахунків до енергії збудження 500 кеВ наведені в табл. 2. В п'ятому стовпчику таблиці наведений

отриманий з умови нормування хвильової функції внесок (у відсотках) найбільших компонентів хвильової функції. Наприклад, для стану  $^{159}\text{Ho}$  з  $K^\pi = 1/2^+$  через  $411\downarrow 88\%$  позначено внесок одноквазічастинкового стану, а через  $411\uparrow + + Q_1(22)$  9% позначено внесок компонента: квазічастинка в стані  $411\uparrow$  плюс фонон  $Q_1(22)$ .

Згідно з розрахунками [12, 13] перший неротаційний збуджений рівень в  $^{159,161,163,165}\text{Ho}$  – одноквазічастинковий стан з характеристиками  $K^\pi = 3/2^+ 3/2[411]$ , а другий – з характеристиками  $K^\pi = 1/2^+ 1/2[411]$ . Така послідовність рівнів узгоджується з експериментальними даними лише для  $^{165}\text{Ho}$ . Для  $^{161}\text{Ho}$  та  $^{163}\text{Ho}$  рівні розташовані навпаки, для  $^{159}\text{Ho}$  рівень з  $K^\pi = 3/2^+$  поки що не знайдено.

Структурні характеристики збуджених станів в ізотопах  $^{159,161,163,165}\text{Ho}$  також виявилися схожими. Було показано, що збуджені стани цих ядер мають складну структуру і тільки найнижчі та невелика кількість станів з більш високою енергією збудження виявилися близькими до одноквазічастинкових.

Згідно з даними табл. 2 внесок одноквазічастинкового стану в структуру хвильової функції для рівнів з  $K^\pi = 1/2^+$  та  $K^\pi = 3/2^+$  не дуже відрізняється. Проте експериментальні дані свідчать, що це не так. В  $^{159}\text{Ho}$ ,  $^{161}\text{Ho}$  та в  $^{163}\text{Ho}$  ймовірність радіаційних  $E3$ -переходів  $\gamma 206$ ,  $\gamma 211$  і  $\gamma 298$  кеВ з рівня  $1/2^+$  в основний стан становить лише  $B(E3)(206 \text{ кеВ}) = 0,025 \pm 0,004$ ,  $B(E3)(211 \text{ кеВ}) = 0,00281 \pm 0,00004$  та  $B(E3)(298 \text{ кеВ}) = 0,00264 \pm 0,00008$  одначастинкових одиниць Вайскопфа відповідно [11]. Зовсім іншу картину маємо при розрядці рівня  $3/2^+ 362 \text{ кеВ}$  в  $^{165}\text{Ho}$ .

У роботах [12, 13] авторами зроблено висновок про те, що на енергію та структуру стану, який близький до одноквазічастинкового, суттєвий вплив може мати відхилення рівноважної деформації ядра в збудженому стані від рівноважної деформації ядра в основному стані. Можливо, саме з таким випадком ми й маємо справу в  $^{165}\text{Ho}$ .

1. Н.Ф. Митрохович, Л.П. Сидоренко, А.И. Феоктистов, Изв. АН СССР. Сер. физ. **55**, 2154 (1991).
2. Н.Ф. Митрохович, Л.П. Сидоренко, в *Вопросы точности в ядерной спектроскопии 1990* (ИФ Литовской АН, Вильнюс, 1990), с. 21.
3. L. Persson, R. Hardell, and S. Nilsson, Arkiv Fysik **23**, 1 (1963).

4. В.А. Бондаренко, П.Т. Прокофьев, Л.И. Симонова, Изв. АН СССР. Сер. физ. **29**, 2168 (1965).
5. B.C. Dutta, T.V. Egidy, Th.W. Elze, and W. Kaiser, Z. Phys. **207**, 153 (1967).
6. И.М. Банд, М.А. Листенгартен, А.П. Фересин, *Аномалии в коэффициентах внутренней конверсии гамма-лучей* (Наука, Ленинград, 1976).
7. М.А. Листенгартен, в *Современные методы ядерной спектроскопии 1985* (Наука, Ленинград, 1986), с. 142.
8. R.S. Hager and E.C. Seltzer, Nucl. Data Tables A **6**, 1 (1969).
9. В.І. Киришук, А.П. Лашко, Т.М. Лашко, УФЖ **57**, 1097 (2012).
10. R.S. Hager and E.C. Seltzer, Nucl. Data Tables A **4**, 1 (1968).
11. A.K. Jain, A. Ghosh, and B. Singh, Nucl. Data Sheets **107**, 1075 (2006).
12. В.Г. Соловьев, П. Фогель, Г. Юнгклауссен, Изв. АН СССР. Сер. физ. **31**, 518 (1967).
13. В.Г. Соловьев, С.П. Федотов, Изв. АН СССР. Сер. физ. **36**, 706 (1972).

Одержано 25.02.13

Н.Ф. Митрохович,  
А.П. Лашко, Т.Н. Лашко, Л.П. Сидоренко

О СТРУКТУРЕ УРОВНЯ  $K^\pi = 3/2^+$ , 362 кэВ В  $^{165}\text{Ho}$

Р е з ю м е

На магнитном  $\beta$ -спектрометре типа  $\pi\sqrt{2}$  с высокой точностью измерены отношения интенсивностей электронов внутренней конверсии на K- и L-оболочках  $^{165}\text{Ho}$  для  $\gamma$ -перехода с энергией 362 кэВ. Впервые определены параметр проникновения  $\lambda$  для M2-компонента этого  $\gamma$ -перехода и параметр смешивания  $\delta(E3/M2)$ . Величина примеси E3-мультипольности соответствует вероятности радиационного перехода  $B(E3)(362 \text{ кэВ}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$ , что свидетельствует о ее коллективной природе и, возможно, об октупольной деформации ядра  $^{165}\text{Ho}$ .

N.F. Mitrokhovich,  
A.P. Lashko, T.N. Lashko, L.P. Sidorenko

ON THE STRUCTURE  
OF  $K^\pi = 3/2^+$  362-keV LEVEL IN  $^{165}\text{Ho}$

S u m m a r y

High-precision measurements are carried out on a  $\pi\sqrt{2}$  magnetic  $\beta$ -spectrometer for the relative intensities of the electron lines of internal conversion on the K- and L-shells of  $^{165}\text{Ho}$  nucleus, with the 362-keV  $\gamma$ -transition being used. The penetration parameter  $\lambda$  for the M2-component of this transition and the multipole mixing ratio  $\delta(E3/M2)$  are determined for the first time. The value of E3-multipolarity admixture corresponds to the probability of radiative transition  $B(E3)(362 \text{ keV}) = (46 \pm 6) \text{ W.u.}$ , which testifies to its collective nature and a probable octupole deformation of  $^{165}\text{Ho}$  nucleus.