

ЕНЕРГІЇ ДЕЯКИХ ГАММА-ПЕРЕХОДІВ ІЗ РОЗПАДУ  $^{184m.g}\text{Re}$  ТА  $^{177m.g}\text{Lu}$ 

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

На магнітному  $\beta$ -спектрометрі типу  $\pi\sqrt{2}$  поміряно різниці енергій між парами деяких ліній електронів внутрішньої конверсії з розпаду  $^{183}\text{Re}$ ,  $^{184m.g}\text{Re}$  та  $^{177m.g}\text{Lu}$ . Спираючись на експериментальні результати та значення енергій ядерно-спектроскопічних нормалей, визначено з високою точністю енергії переходів у  $^{184}\text{Re}$  та  $^{184}\text{W}$ . Проведено аналіз на сумісність даних по енергіях переходів у  $^{177}\text{Lu}$  та  $^{177}\text{Hf}$ .

### Побудова сітки ядерно-спектроскопічних нормалей

При побудові Міжнародної системи одиниць (SI) постулюють швидкість світла у вакуумі  $c = 299\,792\,458\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  та частоту надтонкого розщеплення в цезії  $\nu_{\text{HFS}}(^{137}\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770\text{ Гц}$ , які використовують потім для визначення одиниці довжини та одиниці часу [1]. Оптичний еталон довжини реалізовано на хвилі стабілізованого  $^{129}\text{I}_2(\text{B})$  He-Ne-лазера шляхом порівняння частоти його випромінювання з частотою цезієвого годинника [2]. Сітка нормалей для ядерної спектроскопії побудована на результатах експериментів, які співвідносять довжини хвиль деяких  $\gamma$ -променів з довжиною хвилі оптичного еталона [3 - 5].

Найбільш точно довжини хвиль  $\gamma$ -переходів можна визначити за допомогою двокристалного рентгенівського спектрометра з використанням формули Бреґа. Для простої кубічної кристалічної ґратки, яку мають кремній і германій, вона записується як:

$$\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

де  $\theta$  - кут між падаючим променем і поверхнею кристала;  $d$  - стала ґратки.

Для більш складних випадків, при різних порядках відбивання та для різних кристалічних площин і з урахуванням поправок на заломлення  $\gamma$ -квантів у кристалі, формулу (1) можна замінити на більш удосконалену

$$\lambda = \frac{2d \sin \theta}{n\sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)}} \left(1 - \frac{1-\mu}{\sin^2 \theta}\right), \quad (2)$$

де  $n$  - порядок відбиття;  $h, k, l$  - кристалографічні індекси Міллера для відбиваючих площин;  $\mu$  - показник заломлення кристала для даної довжини хвилі  $\lambda$ .

У формулі (2)  $h, k$  та  $l$  - цілі числа,  $\mu$  близьке до 1, тому для визначення з високою точністю  $\lambda$  потрібно якомога точніше визначити  $\theta$  та  $d$ . Бреґівські кути вимірюють відносно легко, а ось

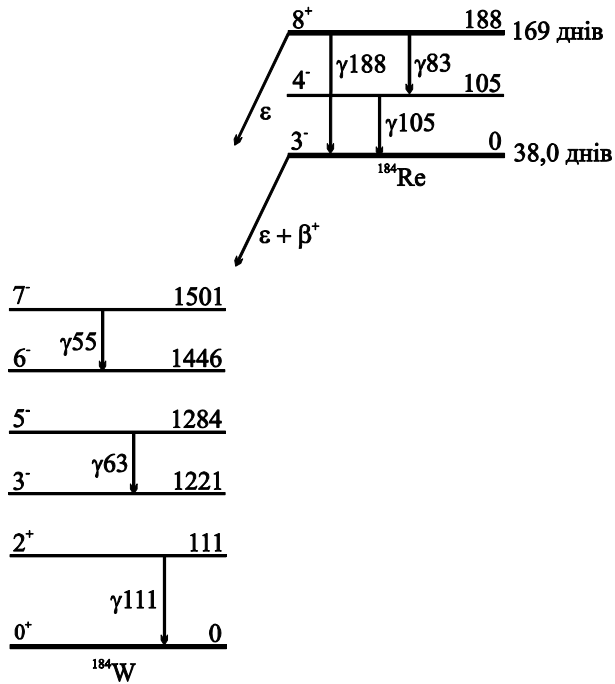
прецизійні вимірювання сталої ґратки дуже складні. Тому для вимірювань довжин хвиль  $\gamma$ -променів використовують лише синтетичні кристали германію та кремнію з високою геометричною досконалістю.

Для того щоб від довжини хвилі перейти до енергій  $\gamma$ -квантів, необхідно скористатися формулою  $E = hc/\lambda$ . Оскільки енергію прийнято виражати в електрон-вольтах, а не в абсолютних одиницях, то перевідний множник від довжини хвилі  $1/\lambda$  до енергії  $E$  містить  $hc/e$ . А значить, потрібні значення відповідних фундаментальних констант.

Після того як абсолютне значення довжини хвилі  $\gamma$ -лінії з енергією 412 кеВ із розпаду  $^{198}\text{Au}$  було визначено з високою точністю, довжини хвиль багатьох  $\gamma$ -переходів стали порівнювати з  $\gamma_{412}$  за допомогою різних кристал-дифракційних спектрометрів. Саме тому цю лінію використовують як опорну для побудови реперної сітки в ядерній спектроскопії. Але значення фундаментальних констант постійно уточнюються, уточнюється також і значення сталої ґратки кремнію, змінюється внаслідок цього і значення енергії  $\gamma_{412}$   $^{198}\text{Au}$ . Це призводить у свою чергу до необхідності внесення поправок і в усю реперну сітку та в енергії  $\gamma$ -променів, визначених відносно спектроскопічних нормалей.

### Визначення енергії $\gamma$ -переходів із розпаду $^{184m.g}\text{Re}$

У роботі [6] на магнітному  $\beta$ -спектрометрі високої роздільної здатності нами було поміряно окремі ділянки спектра електронів внутрішньої конверсії з розпаду  $^{183}\text{Re}$  та  $^{184m.g}\text{Re}$ . При цьому ділянки вибирали таким чином, щоб одна з ліній належала розпаду  $^{183}\text{Re}$ , в якому енергії  $\gamma$ -квантів відомі з високою точністю, а друга – розпаду  $^{184m.g}\text{Re}$ , для якого подібних вимірювань не проводили. Енергії переходів, що належать до розпаду  $^{183}\text{Re}$ , було поміряно з високою точністю на кристал-дифракційному спектрометрі в розпаді  $^{183}\text{Ta}$  [7]. Фрагменти схем розпаду  $^{184m.g}\text{Re}$ ,  $^{183}\text{Re}$  та  $^{183}\text{Ta}$  наведено на рис. 1 і 2.


 Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду  $^{184m,g}\text{Re}$ .

Джерела випромінювання  $^{183,184m,184g}\text{Re}$  було отримано на циклотроні шляхом опромінення дейтронами з енергією 13,6 МеВ вольфрамової фольги з природним вмістом ізотопів у реакціях (d, n) та (d, 2n). Після опромінення ренієву фракцію виділяли радіохімічним методом і наносили електролізом на платинову основу розмірами  $0,4 \times 20 \text{ мм}^2$ . Методика вимірювань, апаратура та програми обробки спектрів детально описано в [8].

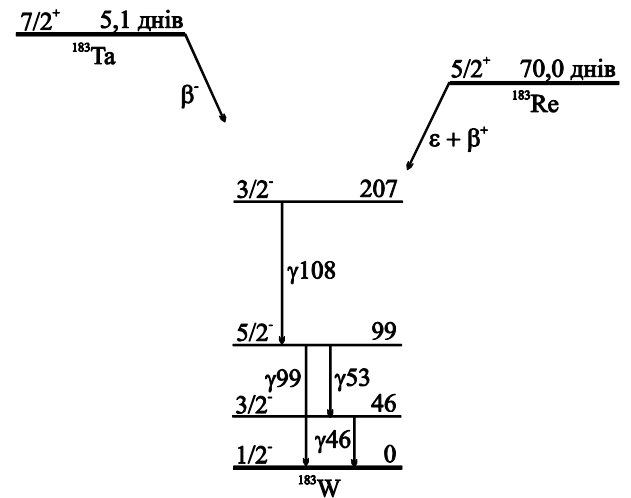
Оскільки енергії зв'язку електронів в атомі відомі з невеликими похибками (0,3 - 0,4 еВ [9, 10]), то з різниці енергій конверсійних ліній можна визначити точне значення різниці енергій відповідних  $\gamma$ -квантів, а потім і їх абсолютне значення.

Енергію  $\gamma$ -квантів визначають із співвідношення

$$E_i - E_j = \varepsilon_i - \varepsilon_j + \Delta_{ij}, \quad (3)$$

де  $E_i$  та  $E_j$  – енергії досліджуваного та реперного  $\gamma$ -квантів;  $\varepsilon_i$  та  $\varepsilon_j$  – їх енергії зв'язку на відповідних оболонках атома при внутрішній конверсії;  $\Delta_{ij}$  – вимірювана різниця енергій конверсійних ліній.

У 70-х роках минулого століття точність порівняння довжин хвиль за допомогою  $\gamma$ -спектрометрів із вигнутими кристалами досягла рівня  $10^{-6}$ . Але для того щоб визначити з такою ж точністю абсолютні значення довжин хвиль, потрібно було мати нормаль, для якої довжина хвилі відома з кращою точністю і яка була б зручна для порівнянь. Такою нормаллю


 Рис. 2. Фрагмент схеми розпаду  $^{183}\text{Re}$  та  $^{183}\text{Ta}$ .

була визнана  $\gamma 412$   $^{198}\text{Hg}$ . Проте ця  $\gamma$ -лінія мала два недоліки. По-перше, точність, з якою була відома її довжина хвилі та енергія, була нижчою за потрібну. По-друге, у правильності рекомендованого значення були сумніви [3]. Саме тому ряд авторів вирішили прийняти для енергії  $\gamma 412$   $^{198}\text{Hg}$  умовне значення без похибки. У майбутньому, коли енергію  $\gamma 412$   $^{198}\text{Hg}$  буде поміряно з високою точністю, усі результати можна буде уточнити.

Саме такі «золоті одиниці» й були використані Борхертом у своїй роботі [7], який приймав  $E(\gamma 412$   $^{198}\text{Hg}) = (411794 \pm 0) \text{ еВ}$ . На сьогодні уточнена енергія цієї лінії становить  $E(\gamma 412$   $^{198}\text{Hg}) = (411802,05 \pm 0,17) \text{ еВ}$  [4, 5]. Поправка для абсолютних значень енергій  $\gamma$ -квантів становить 2 ppm (parts per million), тоді як точність визначення відносних довжин хвиль на порядок вище (1 - 3 ppm). Ці перераховані значення енергій  $\gamma$ -квантів із розпаду  $^{183}\text{Ta}$  й було використано нами як репери для визначення енергій  $\gamma$ -переходів із розпаду  $^{184m,g}\text{Re}$ .

Різниці енергій конверсійних ліній  $\Delta_{ij}$ , енергій реперних  $\gamma$ -квантів  $E_j$  та отримані енергії досліджуваних  $\gamma$ -квантів  $E_i$  наведено в табл. 1. Як видно з таблиці, енергію  $\gamma$ -переходу 111 кеВ ( $2^+ \rightarrow 0^+$   $^{184}\text{W}$ ) визначили з вимірювань різниці енергій двох різних пар конверсійних ліній. Результати добре узгоджуються в межах наведених похибок. Це і є прямим підтвердженням того, що систематичні похибки незначні і за нашим оцінками не перевищують 1 еВ.

Із схеми розпаду  $^{184m}\text{Re}$  (див. рис. 1) видно, що за даними табл. 1 можна визначити, застосувавши правило Рітца і врахувавши поправки, пов'язані з енергією ядра віддачі, енергію ще одного переходу:

$$E(188) = E(83) + E(105). \quad (4)$$

Таблиця 1. Різниця енергій конверсійних ліній  $\Delta_{ij}$ , енергії реперних  $\gamma$ -квантів  $E_j$  та отримані енергії досліджуваних  $\gamma$ -квантів  $E_i$

Дублет	Різниця енергій конверсійних ліній $\Delta_{ij}$ , еВ	Енергія реперного $\gamma$ -кванта $E_j$ , еВ	Енергія досліджуваного $\gamma$ -кванта $E_i$ , еВ
L <sub>1</sub> 55 - M <sub>1</sub> 46	-(486,2 ± 0,6)	46484,75 ± 0,16	55278,8 ± 0,8
L <sub>2</sub> 63 - N <sub>1</sub> 53	143,7 ± 1,3	52596,18 ± 0,12	63688,9 ± 1,4
M <sub>3</sub> 83 - L <sub>2</sub> 99	-(6598,4 ± 0,8)	99081,26 ± 0,10	83306,2 ± 0,9
K105 - K99	3506,3 ± 1,3	99081,26 ± 0,10	104739,0 ± 1,4
K111 - K108	3283,7 ± 0,3	107933,07 ± 0,12	111216,8 ± 0,5
L <sub>2</sub> 111 - L <sub>1</sub> 108	3839,3 ± 1,0	107933,07 ± 0,12	111216,6 ± 1,1

Примітка. Наведено статистичні похибки вимірювань.

Таблиця 2. Енергії  $\gamma$ -променів із розпаду  $^{184m,g}\text{Re}$

Енергія, еВ			
Наші дані	Компіляція [11]	Наші дані	Компіляція [11]
55278,8 ± 0,8	55279 ± 5	83306,2 ± 0,9	83280 ± 40
63688,9 ± 1,4	63697 ± 10	104739,0 ± 1,4	104729 ± 7
111216,8 ± 0,5	111208 ± 4	188045,2 ± 1,7	188010 ± 40

**Різниця енергій переходів із розпаду  $^{177m,g}\text{Lu}$**

Вимоги, що пред'являються до точності визначення енергії спектроскопічних нормалей, постійно змінюються з удосконаленням методів вимірювань. Згідно з останнім оглядом [4, 5] у список рекомендованих енергетичних стандартів для ядерної спектроскопії ввійшли тільки ті  $\gamma$ -лінії, відносна похибка у визначенні енергії яких не перевищує 10 ppm. Така точність досягнута авторами роботи [12]. Енергії  $\gamma$ -променів і збуджених станів  $^{177}\text{Lu}$  та  $^{177}\text{Hf}$  було поміряно з високою точністю за допомогою напівпровідникового  $\gamma$ -спектрометра. Для вивчення детального ходу калібрувальної кривої на всій ділянці спектра було розроблено оригінальну методику, основу на застосуванні генератора калібрувальних імпульсів, а потім уведено поправки на нелінійність для кожної  $\gamma$ -лінії.

Ізомер  $^{177m}\text{Lu}$  ( $I^\pi = 23/2^-$ ,  $T_{1/2} = 160$  днів) є перспективним ядром для використання його як калібрувального джерела випромінювання для потреб ядерної спектроскопії. Зручний період напіврозпаду, простота напрацювання ізотопу в (n,  $\gamma$ )-реакції та більше 40 досить інтенсивних  $\gamma$ -ліній у діапазоні енергій від 70 до 470 кеВ роблять його придатним для цих цілей. Але для того щоб рекомендувати ці  $\gamma$ -переходи як енерге-

Енергія рівня  $8^+$  становить  $E(188) = (188045,3 \pm 1,7)$  еВ, а енергія  $\gamma$ -переходу  $8^+ \rightarrow 3^-$  у  $^{184}\text{Re} - E_\gamma(188) = (188045,2 \pm 1,7)$  еВ.

У табл. 2 наведено визначені нами енергії  $\gamma$ -променів із розпаду  $^{184m,g}\text{Re}$  в порівнянні з даними компіляції [11]. Слід відзначити, що наші результати в кілька разів точніші відомих дотепер значень.

тичні реperi для ядерної спектроскопії, необхідні незалежні вимірювання енергій  $\gamma$ -променів іншою групою авторів (і, бажано, іншим методом) для з'ясування величини систематичної похибки вимірювань.

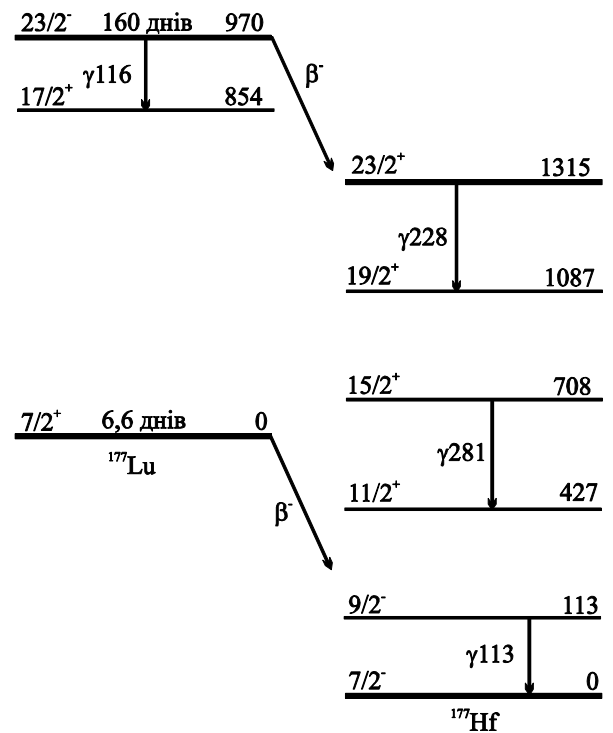


Рис. 3. Фрагмент схеми розпаду  $^{177m,g}\text{Lu}$ .

Нами розроблено методику [8], що дає змогу визначати енергії переходів з точністю краще ніж 1 еВ шляхом вимірювань різниці енергій конверсійних ліній на магнітному β-спектрометрі типу  $\pi\sqrt{2}$ . Ми скористалися нею для визначення різниць енергій переходів  $\Delta E(\gamma_{116} - \gamma_{113})$  та  $\Delta E(\gamma_{281} - \gamma_{228})$ . Розміщення переходів у схемі розпаду показано на рис. 3.  $^{177m}\text{Lu}$  отримали при опроміненні на реакторі мішеней із збагаченого  $^{176}\text{Lu}$  в реакції (n,  $\gamma$ ).

$$E_{\gamma}(116) - E_{\gamma}(113) = E(L_3(116)) - E(L_3(113)) + E(L_3(Lu)) - E(L_3(Hf)), \quad (5)$$

$$E_{\gamma}(281) - E_{\gamma}(228) = E(K(281)) - E(L_1(228)) + E(K(Hf)) - E(L_1(Lu)). \quad (6)$$

Таблиця 3. Різниці енергій деяких  $\gamma$ -переходів із розпаду  $^{177m}\text{Lu}$

Дублет	$\Delta E_{\gamma}$ , еВ		Відхилення експериментальних значень, еВ
	Наша робота	Робота [12]	
$\gamma_{116} - \gamma_{113}$	$2925,2 \pm 1,5$	$2918,4 \pm 2,4$	$6,8 \pm 2,8$
$\gamma_{281} - \gamma_{228}$	$53309,8 \pm 5,3$	$53303,5 \pm 1,1$	$6,3 \pm 5,4$

Результати розрахунків представлено в табл. 3. Тут же наведено різниці енергій відповідних переходів із роботи [12], а також величину відхилення експериментальних значень, отриманих нами та авторами [12]. Як видно з табл. 3, результати узгоджуються в межах двох експери-

ментальних похибок. Це свідчить про відсутність суттєвих систематичних похибок у визначенні енергій переходів. Отже, їх можна рекомендувати для використання в якості енергетичних стандартів для ядерної спектроскопії.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Каршенбойм С.Г. Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. - 2005. - Т. 175, №3. - С. 271 - 298.
2. Козлов М.Г. Метрология и стандартизация: Учебник. - М., СПб.: Петербургский ин-т печати, 2001. - 372 с.
3. Джелелев Б.С., Шестопалова С.А. Ядерно-спектроскопические нормалы. - М.: Атомиздат, 1980. - 232 с.
4. Helmer R.G., Van der Leun C. Recommended standards for  $\gamma$ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 1999. - Vol. A422. - P. 525 - 531.
5. Helmer R.G., Van der Leun C. Recommended standards for  $\gamma$ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 2000. - Vol. A450. - P. 35 - 70.
6. Булгаков В.В., Лашко А.П., Сидоренко Л.П. и др. Прецизионные измерения энергии некоторых переходов в распаде  $^{184,184m}\text{Re}$  // Вопросы точности ядерной спектроскопии. - Вильнюс: Ин-т физики АН Лит. ССР, 1988. - С. 15 - 18.
7. Borchert G.L., Scheck W., Schult Q.W.B. Curved crystal spectrometer for precise energy measurement of gamma-rays from 30 to 1500 keV // Nucl. Instrum. and Methods. - 1975. - Vol. 124. - P. 107 - 117.
8. Kupryashkin V.T., Lashko A.P., Lashko T.N. et al. Determination of the energy standards by precision beta-spectroscopy methods // Problems of atomic science and technology. - 2004. - № 5. Series: Nuclear physics investigation (44). - P. 67 - 71.
9. Bearden J.A. X-ray wavelengths // Revs. Mod. Phys. - 1967. - Vol. 39, No. 1. - P. 78 - 124.
10. Bearden J.A., Burr A.F. Reevaluation of X-ray atomic energy levels // Revs. Mod. Phys. - 1967. - Vol. 39, No. 1. - P. 125 - 142.
11. Firestone R.B. Nuclear Data Sheets for A = 184 // Nucl. Data Sheets. - 1989. - Vol. 58. - P. 243 - 349.
12. Matsui S., Inoue H., Yoshizawa Y. Gamma-ray energy measurement for  $^{177m}\text{Lu}$  with a precision pulser // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. - 1989. - Vol. A281. - P. 568 - 576.

#### ЕНЕРГІЇ НЕКОТОРИХ ГАММА-ПЕРЕХОДІВ ІЗ РАСПАДА $^{184m,g}\text{Re}$ І $^{177m,g}\text{Lu}$

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

На магнітному β-спектрометрі типу  $\pi\sqrt{2}$  виміряно різниці енергій між парами деяких ліній електронів внутрішньої конверсії із розпаду  $^{183}\text{Re}$ ,  $^{184m,g}\text{Re}$  і  $^{177m}\text{Lu}$ . Опіраючись на експериментальні результати і значення енергій ядерно-спектроскопічних нормалей, визначено з високою точністю енергії переходів в  $^{184}\text{Re}$  і  $^{184}\text{W}$ . Проведено аналіз на сумісність даних по енергіям переходів в  $^{177}\text{Lu}$  і  $^{177}\text{Hf}$ .

**ENERGIES OF SEVERAL GAMMA-TRANSITIONS  
FROM THE  $^{184m,g}\text{Re}$  AND  $^{177m,g}\text{Lu}$  DECAY**

**A. P. Lashko, T. N. Lashko**

The differences energies for some internal-conversion electron line pairs from the  $^{184m,g}\text{Re}$  and  $^{177m,g}\text{Lu}$  decay were measured by means of  $\pi\sqrt{2}$  magnetic  $\beta$ -spectrometer. The energies in  $^{184}\text{Re}$  and  $^{184}\text{W}$  transitions were determined with high precision on the basis of experimental results and values of the reference  $\gamma$ -ray energies. The data on the energies in  $^{177}\text{Lu}$  and  $^{177}\text{Hf}$  transitions compatibility analysis was performed.

Надійшла до редакції 28.11.08,  
після доопрацювання – 12.03.09.