

А.П. ЛАШКО,¹ Т.М. ЛАШКО,¹ В.О. МАРТИНИШИН²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України

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

² Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

(Просп. Академіка Глушкова, 2, Київ 03022)

УДК 539.163

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПАДУ ^{175}Hf

За допомогою магнітного β -спектрометра типу $\pi\sqrt{2}$ та двох коаксіальних HPGe-детекторів виміряні інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії та γ -променів із розпаду ^{175}Hf ($T_{1/2} = 70$ днів). Грунтуючись на цих результатах, розраховані інтенсивності гілок електронного захвату та $\log ft$ β -переходів. Вперше отримані обмеження для $\log ft$ β -переходів на рівні $9/2^+$ 113,8 кеВ, $9/2^-$ 396,3 кеВ та $9/2^+$ 546,6 кеВ ^{175}Lu .

Ключові слова: радіоактивність, ^{175}Hf , γ -спектри, HPGe-детектори, внутрішня конверсія, магнітний спектрометр, інтенсивності γ -променів, інтенсивності ліній електронів внутрішньої конверсії, $\log ft$.

1. Вступ

Згідно з останніми експериментальними даними [1] розпад ^{175}Hf ($T_{1/2} = 70$ днів) відбувається шляхом електронного захвату на збуджені стани ^{175}Lu з енергією 514,6; 432,8; 353,3 та 343,4 кеВ (див. рис. 1). Як материнське, так і дочірнє ядро належать до деформованих ядер ($\beta_2 \cong 0,3$). Частина рівнів ^{175}Lu ідентифікована як одночастинкові і їм поставлені у відповідність певні значення квантових чисел $K^\pi[Nn_Z\Lambda]$, інші є членами ротаційних смуг. Це дозволяє класифікувати β -переходи не лише за правилами добору по спіну, а й правилами добору за асимптотичними квантовими числами. Розрахувавши $\log ft$ β -переходів, їх можна порівняти з відповідною систематикою.

Повна енергія електронного захвату становить $686,8 \pm 1,9$ кеВ, тому можливий розпад ^{175}Hf і на рівні 396,3 та 546,6 кеВ, перший з яких є одночастинковим станом $\pi 9/2^- 9/2$ [514], а другий – членом ротаційної смуги, побудованої на стані $\pi 5/2^+ 5/2$ [402]. В цьому випадку повинні спосте-

рігатися переходи з енергіями 203 та 396 кеВ. На рис. 1 вони показані пунктиром. Пошук цих переходів також був метою наших досліджень.

2. Методика експерименту

Оскільки ймовірності β -переходів залежно від їх типу відрізняються на кілька порядків, настільки ж відрізняються й інтенсивності переходів між рівнями дочірнього ядра. Ця обставина значно ускладнює проведення подібних вимірів, потребуючи використання спектрометрів з високою роздільною здатністю.

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

Виміри γ -спектрів проводили на γ -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}Co відповідно) та багатоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC. Було виконано ретельне градування де-

© А.П. ЛАШКО, Т.М. ЛАШКО,
В.О. МАРТИНИШИН, 2015

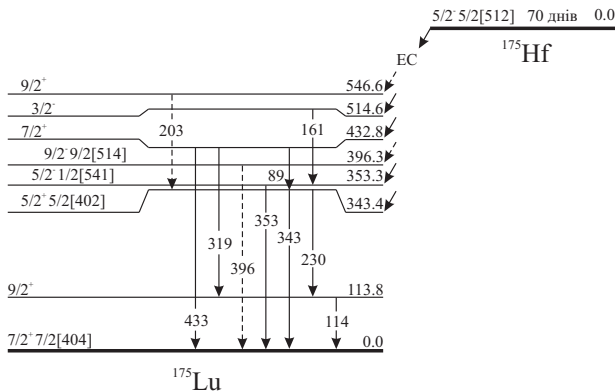


Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду ^{175}Hf

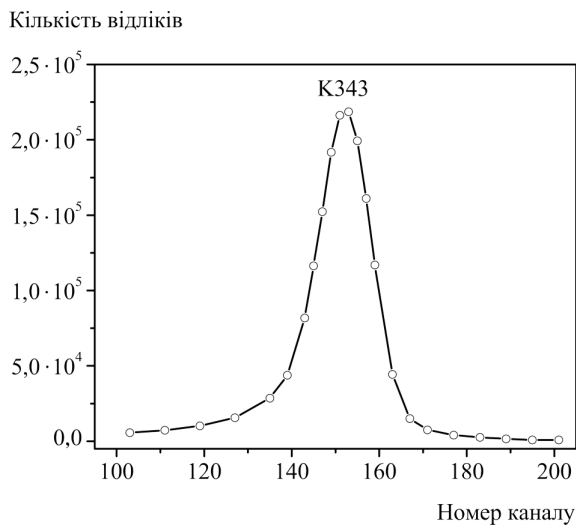


Рис. 2. Спектр ЕВК γ_{343} кеВ на К-оболонці ^{175}Lu . Приведено число відліків за 1520 с вимірів у кожній точці

текторів по ефективності реєстрації за допомогою еталонних спектрометричних джерел γ -випромінювання ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{228}Th та ^{241}Am в діапазоні енергій від 26 до 1620 кеВ. Форма кривої ефективності реєстрації добре описується функцією Кемпбела [2], похибка градування для обох детекторів не перевищує 2% в усьому діапазоні енергій.

Основна увага була приділена коректному визначенню інтенсивностей слабких γ -ліній. 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 електронів внутрішньої конверсії (ЕВК) на К- та L-оболонках ^{175}Lu вивчали за допомогою магнітного β -спектрометра типу $\pi\sqrt{2}$ з залізним ярмом і радіусом рівноважної орбіти 50 см. Знімали залежність швидкості лічби електронів від прикладеної напруги між джерелом випромінювання та камерою спектрометра. При цьому магнітне поле залишалось постійним і стабілізувалося в трьох точках вздовж радіуса методом ядерного магнітного резонансу. Система стабілізації забезпечувала стабільність поля спектрометра на рівні 10^{-5} протягом доби. Висока напруга, яка подається на джерело випромінювання, також стабілізувалася з відносною точністю $5 \cdot 10^{-5}$.

Система реєстрації спектрометра складається з двох лічильників Гейгера-Мюллера, розміщених вздовж електронних траєкторій на відстані 170 мм один від одного. Лічильники рознесені для зменшення фону спектрометра при роботі в режимі збігів. Перший лічильник має внутрішній діаметр 15 мм і розміщений вертикально, а другий – діаметром 46 мм, розміщений горизонтально. Власний фон лічильника №1 становить 10 відліків за хвилину, а в режимі збігів – в середньому 4 відліки за годину.

Роздільна здатність спектрометра дорівнює 0,03% по імпульсу при тілесному куті 0,07% від 4π . Характеристики спектрометра дозволяють виміряти відносні інтенсивності конверсійних ліній з точністю до 1% [3].

Краща роздільна здатність β -спектрометра та значно нижчий фон в районі можливого знаходження ліній ЕВК γ -переходів з енергіями 203 та 396 кеВ дозволили більш ніж на два порядки покращити обмеження на інтенсивності цих переходів в порівнянні з результатами γ -спектроскопії. Ділянки спектрів ЕВК переходів γ_{343} та γ_{203} кеВ на К-оболонці ^{175}Lu наведені на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

Усього було проведено дві серії вимірів подібних приведеним на рис. 3. Сумарна експозиція становить 16000 с у кожній точці спектра.

Настільки ж ретельно досліджували й спектр ЕВК в районі можливого знаходження лінії $L_1 396$ кеВ. Більш висока енергія електронів внутрішньої конверсії цього переходу дозволяє проводити вимі-

Таблиця 1. Інтенсивності γ -променів із розпаду ^{175}Hf

| E_γ , кеВ | Інтенсивності, відн. од. | | | | | | |
|------------------|--------------------------|------------------|---------------|-----------------|---------------|------|------|
| | Наша робота | [6] | [7] | [8] | [9] | [10] | [11] |
| 89,362 | $34,5 \pm 1,5$ | $28,86 \pm 0,22$ | – | $26,1 \pm 3,4$ | 29 ± 5 | – | 40 |
| 113,801 | $3,46 \pm 0,20$ | $3,52 \pm 0,32$ | – | $3,6 \pm 0,5$ | $3,5 \pm 0,6$ | – | 3,6 |
| 161,20 | $0,45 \pm 0,14$ | – | – | $0,27 \pm 0,10$ | – | – | 0,3 |
| 229,609 | $8,29 \pm 0,19$ | $8,13 \pm 0,20$ | – | $8,9 \pm 1,8$ | $8,8 \pm 1,8$ | – | 7,3 |
| 318,971 | $1,57 \pm 0,23$ | – | – | $2,1 \pm 0,5$ | – | – | – |
| 343,410 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 353,3 | $2,66 \pm 0,18$ | $2,72 \pm 0,20$ | $2,1 \pm 0,2$ | $2,7 \pm 0,5$ | – | 2 | – |
| 432,771 | $17,5 \pm 0,4$ | $17,09 \pm 0,31$ | – | $17,1 \pm 2,3$ | 19 ± 4 | – | 16,0 |

ри в режимі збігів, що значно зменшує величину фону. Сумарна експозиція цих вимірів становить 8960 с у кожній точці спектра.

3. Результати та їх обговорення

Обробку γ -спектрів проводили по програмі WinSpectrum [4]. Спектри були проаналізовані також за періодом напіврозпаду, щоб виключити можливі впливи домішкових радіонуклідів. Остаточні значення інтенсивностей γ -ліній визначали як зважене середнє з 38 серій вимірів. В ролі невизначеності експериментальних значень використана або вагова похибка, або похибка розкиду, залежно від того, яка з них була більшою. Результати вимірів разом з даними кращих робіт наведені в табл. 1. Енергії γ -переходов взяті з роботи [5].

Як видно з таблиці, отримані нами дані добре узгоджуються з результатами інших експериментальних робіт. Застосування різних типів детекторів дозволило покращити точність визначення відносних інтенсивностей γ -променів.

Обробку спектрів ЕВК проводили за розробленими нами програмами [3]. Як і в γ -спектрі ^{175}Hf , ми не спостерігали ліній ЕВК, які могли б належати переходам з енергіями 203 та 396 кеВ. Були отримані лише граничні значення інтенсивностей ліній K203 та L₁396 кеВ:

$$I(\text{K}203)/I(\text{K}343) \leq 4,6 \cdot 10^{-5};$$

$$I(\text{L}_1396)/I(\text{K}343) \leq 3,7 \cdot 10^{-6}.$$

Інтенсивності гілок електронного захвату ^{175}Hf (I_ϵ^k) були знайдені як розв'язок системи рівнянь, кожне з яких описує баланс інтенсивностей пере-

Кількість відліків

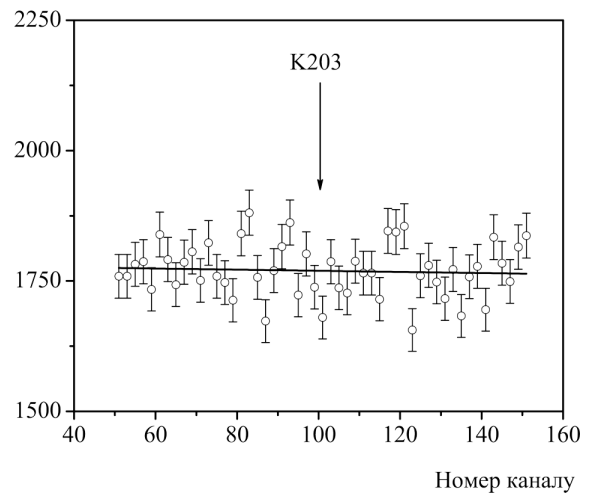


Рис. 3. Спектр ЕВК в області можливого знаходження лінії K203 кеВ. Приведено число відліків за 3200 с вимірів у кожній точці. Суцільною лінією показано фон для цієї ділянки спектра

ходів для певного k -го збудженого стану ^{175}Lu :

$$I_\epsilon^k + \sum_i I_\gamma^i (1 + \alpha_i) = \sum_j I_\gamma^j (1 + \alpha_j), \quad (1)$$

де I_γ^i і α_i – інтенсивності та повні коефіцієнти конверсії γ -переходів, які заселяють даний рівень; I_γ^j і α_j – те саме для γ -переходів, які розряджають даний рівень.

Висновки щодо мультипольного складу переходів були зроблені після детального аналізу експериментальних даних з внутрішньої конверсії [8, 9, 11–15] та кутових кореляцій [16]. Після цього коефіцієнти конверсії були розраховані за допомогою програми BrIcc [17, 18].

Таблиця 2. Інтенсивності гілок та $\log ft$ β -переходів ^{175}Hf

| E_ε , кеВ | E (рівня), кеВ | I_ε , % | $\text{Log } ft$ | Тип бета-переходу | Додаткова класифікація |
|-----------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|------------------------|
| 140,2 | 546,6 | $\leq 0,014$ | $\geq 8,6$ | Заборонений 1-го порядку унікальний | Непригнічений |
| 172,2 | 514,6 | $0,076 \pm 0,024$ | $9,24 \pm 0,14$ | Дозволений | Пригнічений |
| 254,0 | 432,8 | $20,1 \pm 0,8$ | $7,27 \pm 0,02$ | Заборонений 1-го порядку | Непригнічений |
| 290,5 | 396,3 | $\leq 0,010$ | $\geq 10,7$ | Заборонений 2-го порядку | " |
| 333,5 | 353,3 | $0,155 \pm 0,028$ | $9,66 \pm 0,09$ | Дозволений | Пригнічений |
| 343,4 | 343,4 | $79,6 \pm 1,2$ | $6,99 \pm 0,02$ | Заборонений 1-го порядку | Непригнічений |
| 573,0 | 113,8 | $\leq 0,017$ | $\geq 11,2$ | Заборонений 1-го порядку унікальний | " |
| 686,8 | 0,0 | $\leq 7^*$ | $\geq 8,7^*$ | Заборонений 1-го порядку | " |

* Дані роботи [1].

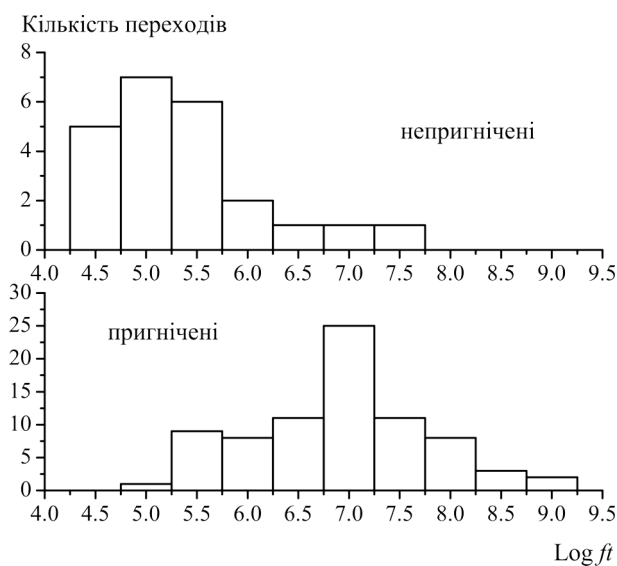


Рис. 4. Розподіл експериментальних значень $\log ft$ дозволених β -переходів

Отримані значення інтенсивностей гілок електронного захопту ^{175}Hf наведені в табл. 2. Вони були використані для розрахунків $\log ft$ β -переходів. Для цього ми скористалися програмою LOGFT [19]. Пораховані дані також наведені в таблиці. Слід зауважити, що обмеження на $\log ft$ β -переходів на рівні $9/2^+ 113,8$ кеВ, $9/2^- 396,3$ кеВ та $9/2^+ 546,6$ кеВ ^{175}Lu отримані вперше.

В останньому стовпчику табл. 2 приведена класифікація β -переходів не лише за правилами добору по спіну та парності [20], а й за правилами добору по асимптотичних квантових числах [21]. Розпади, для яких виконуються ці правила добору, називаються непригніченими (unhindered), а для яких не виконуються – пригніченими (hindered).

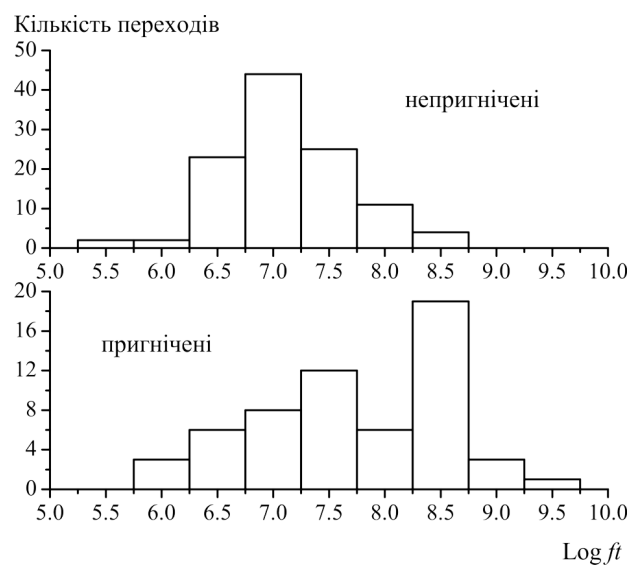


Рис. 5. Розподіл експериментальних значень $\log ft$ заборонених 1-го порядку β -переходів

Вважається, що невиконання правил добору за асимптотичними квантовими числами при розпаді деформованих ядер призводить до зменшення ймовірності β -переходів на 1–3 порядки. Так це чи ні спробуємо встановити, порівнюючи наші результати з величинам $\log ft$ β -переходів подібного типу для цієї області ядер.

З багатьох робіт по систематиці ймовірностей β -переходів в залежності від їх типу можна виділити роботи Л.М. Зирянової [22], К.Я. Громова [23] та Б. Сінгха зі співавторами [24]. В монографії [22] приведені відомі на той час експериментальні значення $\log ft$ унікальних β -переходів. Проте цих даних виявилось замало для класифікації ще й за правилами добору по асимптотичних квантових числах. Такий аналіз для дозволених β -переходів

було зроблено, зокрема, в роботі [23]. Встановлено, що всі відомі на той час експериментальні значення $\log ft$ таких переходів (всього 28 значень) знаходяться в таких межах:

- дозволені непригнічені переходи $4,6 < \log ft < 4,8$;
- дозволені пригнічені переходи $5,5 < \log ft < 8,0$.

Для класифікації переходів інших типів експериментальних даних виявилось замало.

В компіляції [24] приведено близько 3900 експериментальних значень $\log ft$ β -переходів, згрупованих в залежності від їх типів та величини $\log ft$, розраховані параметри таких розподілів. Але класифікації за правилами добору по асимптотичних квантових числах не було зроблено. Ми проаналізували всі доступні на сьогоднішній день дані [25] по дозволених, заборонених 1-го порядку та заборонених 1-го порядку унікальних β -переходах в непарних деформованих ядрах рідкоземельної групи ($151 < A < 193$) з [24] і поставили, де це було можливо, їм у відповідність значення квантових чисел $K^\pi[Nn_Z\Lambda]$. Загалом вдалося ідентифікувати 287 переходів. На рис. 4–6 наведені розподіли експериментальних значень $\log ft$ переходів різних типів, окремо для непригнічених (верхня гістограма) та пригнічених (нижня гістограма) β -розпадів.

Експериментальні значення $\log ft$ β -переходів знаходяться в таких межах:

- дозволені непригнічені переходи $4,5 \leq \log ft \leq 7,7$; середнє значення 5,3;
- дозволені пригнічені переходи $5,2 \leq \log ft \leq 9,1$; середнє значення 6,9;
- заборонені 1-го порядку непригнічені переходи $5,6 \leq \log ft \leq 8,5$; середнє значення 7,1;
- заборонені 1-го порядку пригнічені переходи $5,9 \leq \log ft \leq 9,5$; середнє значення 7,7;
- заборонені 1-го порядку унікальні непригнічені переходи $8,5 \leq \log ft \leq 10,3$; середнє значення 9,1;
- заборонені 1-го порядку унікальні пригнічені переходи $8,7 \leq \log ft \leq 11,3$; середнє значення 9,5.

З проведеного дослідження випливає, що різниця в ймовірностях непригнічених та пригнічених β -розпадів більш суттєва для дозволених переходів. Наскільки нам відомо, такий аналіз для заборонених 1-го порядку та заборонених 1-го порядку унікальних β -переходів виконано вперше.

Кількість переходів

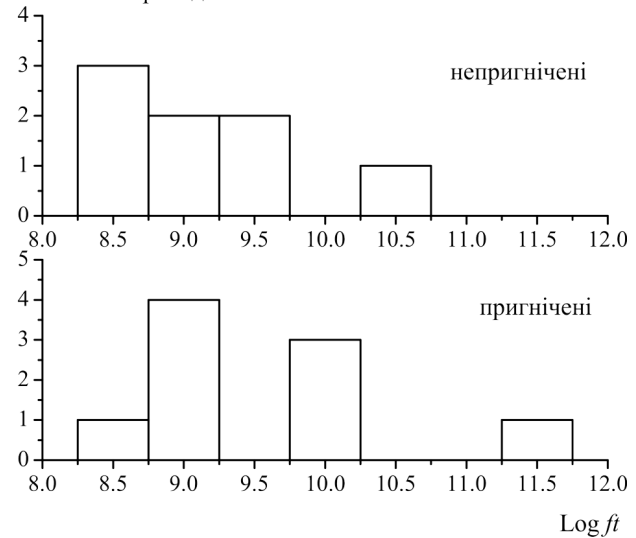


Рис. 6. Розподіл експериментальних значень $\log ft$ заборонених 1-го порядку унікальних β -переходів

Експериментальні значення $\log ft$ заборонених 1-го порядку непригнічених β -переходів з табл. 2 дуже добре узгоджуються з нашою систематикою. $\log ft$ дозволених пригнічених β -переходів знаходяться на верхній межі значень для розпадів такого типу. Це пояснюється тим, що вони відбуваються із зміною квантового числа K на дві одиниці – тобто такі переходи є K -забороненими.

Для заборонених 1-го порядку унікальних непригнічених переходів на рівні $9/2^+$ 113,8 кеВ та $9/2^+$ 546,6 кеВ ^{175}Lu отримані лише граничні значення $\log ft$. За умови підвищення точності експерименту на порядок можна сподіватися на їх надійне спостереження. Оцінене граничне значення $\log ft$ подвійно забороненого β -переходу на рівень $9/2^-$ 396,3 кеВ ^{175}Lu не протирічить експериментальним даним для цієї області ядер (див., наприклад, [26]).

4. Висновки

Завдяки застосуванню комплексного підходу до вимірювань, обробки та аналізу даних, а також використанню різних типів напівпровідникових детекторів вдалося покращити точність визначення відносних інтенсивностей γ -променів із розпаду ^{175}Hf . Із вимірів спектрів електронів внутрішньої конверсії вперше отримані граничні значення інтенсивностей переходів з енергіями 203 та 396 кеВ.

Розраховані інтенсивності та $\log ft$ для семи гілок електронного захвату ^{175}Hf . Вперше отримані обмеження на $\log ft$ β -переходів на рівні $9/2^+$ 113,8 кеВ, $9/2^-$ 396,3 кеВ та $9/2^+$ 546,6 кеВ ^{175}Lu .

Систематизовані експериментальні значення $\log ft$ по дозволених, заборонених 1-го порядку та заборонених 1-го порядку унікальних β -переходах в непарних деформованих ядрах рідкоземельної групи ($151 < A < 193$) за правилами добору по асимптотичних квантових числах. Побудовані статистичні розподіли та розраховані середні значення $\log ft$ для переходів різних типів. Встановлено, що різниця в ймовірностях непригнічених та пригнічених β -переходів спостерігається для всіх типів переходів. Найбільш суттєва вона для дозволених розпадів (в 40 разів) і дещо менша для заборонених 1-го порядку (в 4 рази) та заборонених 1-го порядку унікальних (в 2,5 рази) β -переходів. Такий аналіз для заборонених 1-го порядку та заборонених 1-го порядку унікальних β -переходів виконано вперше. Систематика буде корисною як при аналізі щойно отриманих значень $\log ft$, так і при оцінці ймовірностей ще незареєстрованих гілок розпаду в деформованих ядрах.

Всі отримані нами значення $\log ft$ β -переходів із розпаду ^{175}Hf узгоджуються з приведеною систематикою і не протирічають іншим експериментальним даним для цієї області ядер. Це дозволяє зробити висновок, що ідентифікація рівнів ^{175}Lu і поставлені їм у відповідність значення асимптотичних квантових чисел відповідають дійсності.

1. M. Shamsuzzoha Basunia, Nucl. Data Sheets **102**, 719 (2004).
2. L.A. McNelles and J.L. Campbell, Nucl. Instrum. Methods **109**, 241 (1973).
3. В.В. Булгаков, В.И. Гаврилюк, А.П. Лашко и др., Препр. КИЯИ-86-33 (Киев, 1986).
4. В.П. Хоменков, Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук (Ін-т ядерних досліджень, Київ, 2003).
5. А.П. Лашко, Т.М. Лашко, Ядерна фізика та енергетика **13**, № 1, 7 (2012).
6. K. Singh, T.S. Gill, and K. Singh, J. Phys. Soc. Jpn. **57**, 3762 (1988).
7. W.W. Pratt, Phys. Rev. C **13**, 2591 (1976).
8. K.H. Johansen, B. Bengtson, P.G. Hansen, and P. Hornshoj, Nucl. Phys. A **133**, 213 (1969).
9. A. Jasinski and C.J. Herrlander, Ark. Fys. **37**, 585 (1968).
10. L. Funke, H. Graber, K.H. Kaun *et al.*, Nucl. Phys. **70**, 347 (1965).
11. E.N. Hatch, F. Boehm, P. Marmier, and J.W.M. DuMond, Phys. Rev. **104**, 745 (1956).

12. E. Bashandy, M.S. El-Neser, and T. Sundström, Ark. Fys. **21**, 49 (1962).
13. B. Harmatzn and T.H. Handley, Nucl. Phys. **81**, 481 (1966).
14. А.Г. Троицкая, В.М. Карташов, Г.А. Шевелев, Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат. **4**, 8 (1977).
15. В.В. Булгаков, В.И. Киришук, А.П. Лашко и др., Изв. АН СССР. Сер. физ. **53**, 855 (1989).
16. K.S. Krane, Atomic Data and Nuclear Data Tables **18**, 137 (1976).
17. *BrIcc v.2.3S Conversion Coefficient Calculator* [http://www.bricc.anu.edu.au].
18. T. Kibédi, T.W. Burrows, M.B. Trzhaskovskaya *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **589**, 202 (2008).
19. *ENSDF analysis programs – LOGFT* [http://www.nndc.bnl.gov].
20. Е. Конопинский, М. Роуз, в *Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия*, под ред. К. Зигбана (Атомиздат, Москва, 1969), с. 18.
21. G. Alaga, Nucl. Phys. **4**, 625 (1957).
22. Л.Н. Зырянова, *Уникальные бета-переходы* (АН СССР, Ленинград, 1960).
23. К.Я. Громов, в *Структура сложных ядер*, под ред. Н.Н. Боголюбова (Атомиздат, Москва, 1966), с. 299.
24. B. Singh, J.L. Rodriguez, S.S.M. Wong, and J.K. Tuli, Nucl. Data Sheets **84**, 487 (1998).
25. *Evaluated Nuclear Structure Data File* (National Nuclear Data Center, Brookhaven Nat. Lab.) [http://www.nndc.bnl.gov].
26. А.П. Лашко, Т.М. Лашко, УФЖ **52**, 826 (2007).

Одержано 15.05.14

А.П. Лашко, Т.М. Лашко, В.А. Мартинишин

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ^{175}Hf

Резюме

Интенсивности линий электронов внутренней конверсии и γ -лучей из распада ^{175}Hf ($T_{1/2} = 70$ суток) измерены при помощи магнитного β -спектрометра типа $\pi\sqrt{2}$ и двух коаксиальных HPGe-детекторов. На основании этих данных рассчитаны интенсивности ветвей электронного захвата и $\log ft$ β -переходов. Впервые получены ограничения для $\log ft$ β -переходов на уровни $9/2^+$ 113,8 кеВ, $9/2^-$ 396,3 кеВ и $9/2^+$ 546,6 кеВ ^{175}Lu .

A.P. Lashko, T.N. Lashko, V.A. Martinishin

THE STUDY OF ^{175}Hf DECAY

Summary

The intensities of lines of the internal conversion electron and γ -rays emitted at the decay of ^{175}Hf nucleus ($T_{1/2} = 70$ days) have been measured with the help of a $\pi\sqrt{2}$ magnetic β -spectrometer and two coaxial HPGe-detectors. On the basis of those data, the β -ray branching ratios and the $\log ft$ values for β -transitions are calculated. The limits on the $\log ft$ values for β -transitions to ^{175}Lu levels $9/2^+$ at 113.8 keV, $9/2^-$ at 396.3 keV, and $9/2^+$ at 546.6 keV have been found for the first time.