

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОЛЕЖАЧИХ ЗБУДЖЕНИХ СТАНІВ ^{175}Lu

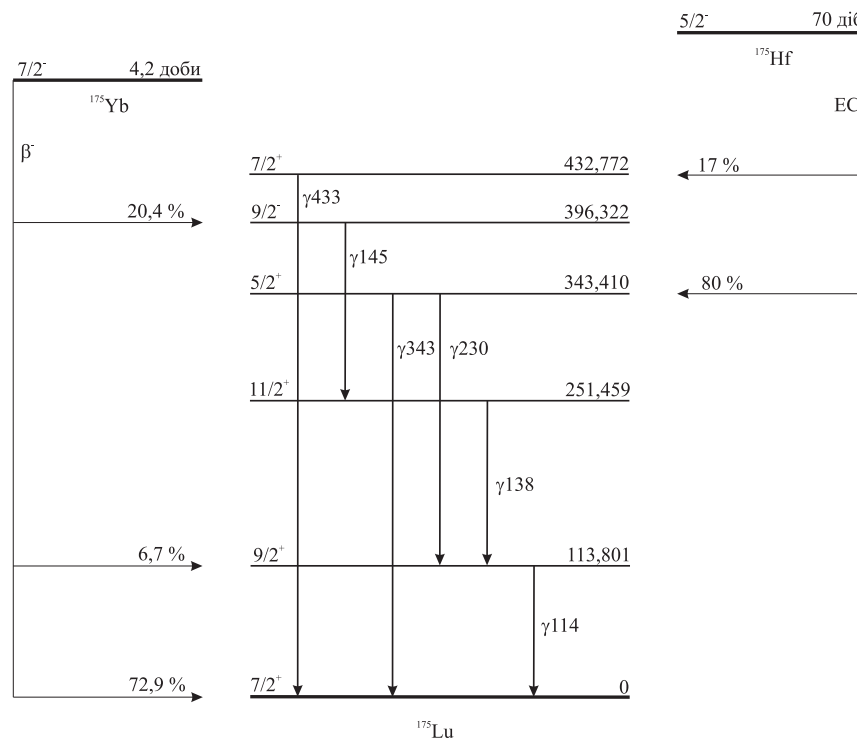
На γ -спектрометрі проведено прецизійні вимірювання енергії опорних γ -переходів із розпаду ^{175}Hf . Спираючись на ці результати, з похибкою в кілька електрон-вольт визначено енергії рівнів та розряджаючих їх γ -переходів в ^{175}Lu . Вони добре узгоджуються з даними інших експериментальних робіт, але перевершують їх по точності.

Ключові слова: радіоактивність, ^{175}Hf , γ -спектри, HPGe-детектори, енергії γ -променів, енергії рівнів.

Вступ

Характеристики рівнів ^{175}Lu можна досліджувати в радіоактивному розпаді як ^{175}Yb ($T_{1/2} = 4,2$ доби), так і ^{175}Hf ($T_{1/2} = 70$ діб) (рис. 1). При бета-розпаді ^{175}Yb ($I^\pi = 7/2^-$) заселяються рівні зі спінами $7/2$ та $9/2$, причому 73 % розпаду відбувається в основний стан ^{175}Lu . При електронному захопті ^{175}Hf ($I^\pi = 5/2^-$) збуджуються рівні зі спінами $1/2^- \div 7/2^-$ до енергії 515 кеВ включно. Таким чином, подібні дослідження гармонійно доповнюють одне одного.

Електронний захват ^{175}Hf вивчався багатьма авторами [1 - 5]. Проте і на сьогоднішній день енергії рівнів ^{175}Lu у верхній частині схеми розпаду та переходи між ними відомі з точністю лише в кілька десятків, а загалом сотень електрон-вольт. Значно краще визначено енергії рівнів у нижній частині схеми, що збуджуються при β -розпаді ^{175}Yb . Вимірювання енергії кількох переходів, які вдалося зробити на кристал-дифракційному спектрометрі, дали змогу зменшити похибку до $(2 \div 4) \cdot 10^{-5}$ [6].

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

Раніше [7, 8] нами з високою точністю визначено енергію лінії γ_{346} кеВ із розпаду ^{181}Hf , а також різницю енергій переходів γ_{346} ^{181}Hf - γ_{343} ^{175}Hf , що дало змогу суттєво уточнити енергію останнього. Метою наших теперішніх досліджень є уточнення енергії переходів γ_{230} та γ_{433} кеВ, корекція на основі нових експериментальних даних енергії рівнів ^{175}Lu та розряджаючих їх γ -квантів.

Методика експерименту

У даній роботі використано новий експериментальний підхід до визначення енергії збуджених станів атомних ядер, який полягає у вимірюваннях енергії опорних переходів методами прецизійної ядерної спектроскопії з подальшим розрахунком енергії рівнів та енергії усіх γ -квантів, що супроводжують розпад материнського ядра, за розробленим нами алгоритмом [9]. Завдяки цьому підходу вдається отримати прецизійні дані про енергії рівнів та розряджених їх γ -переходів із точністю в кілька електрон-вольт [10].

Джерела випромінювання ^{175}Hf були отримані в реакції (n, γ) на дослідницькому реакторі ІЯД НАН України. Використовували гафнієві мішені з природним вмістом ізотопів. В якості джерел випромінювання реперних γ -квантів найбільш зручними для цих цілей виявилися ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,5$ років) і ^{192}Ir ($T_{1/2} = 73,8$ доби), що були напрацьовані в реакції (n, γ) при опроміненні

тепловими нейтронами європію та іридію, збагачених ізотопами ^{151}Eu та ^{191}Ir відповідно. Були виготовлені кілька різних джерел випромінювання із суміші двох ізотопів ($^{175}\text{Hf} + ^{152}\text{Eu}$ та $^{175}\text{Hf} + ^{192}\text{Ir}$) з різними співвідношеннями активностей цих радіонуклідів.

Вимірювання 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 γ 1332 ^{60}Co відповідно) та багатоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC. Були поміряні різниці енергії між 4 парами γ -променів: γ 245 - γ 230, γ 230 - γ 205, γ 433 - γ 411 та γ 468 - γ 433. Один γ -перехід із кожної пари збуджується при розпаді ^{175}Hf , а другий, енергія якого відома з високою точністю, супроводжує розпад ^{152}Eu або ^{192}Ir . На рис. 2 та 3 показано ділянки γ -спектра суміші ^{175}Hf і ^{192}Ir та ^{175}Hf і ^{152}Eu , зняті на детекторі GEM-40195.

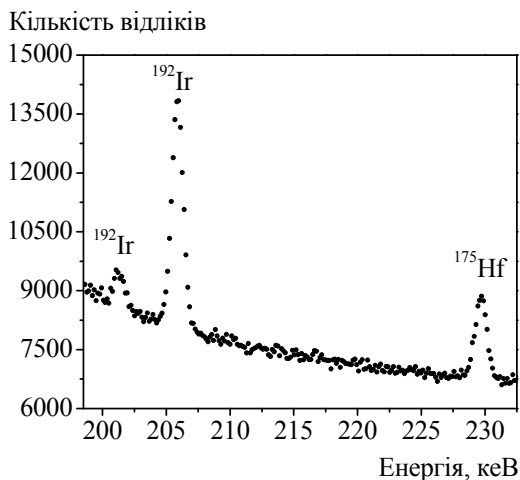


Рис. 2. Ділянка γ -спектра суміші ^{175}Hf і ^{192}Ir в діапазоні енергії 195 - 235 кеВ.

Щоб звести до мінімуму можливі систематичні похибки, вимірювання проводили серіями на джерелах випромінювання з різними співвідношеннями питомих активностей ^{175}Hf та ^{152}Eu і ^{192}Ir , при різних коефіцієнтах підсилення та різних ширинах каналу амплітудно-цифрового перетворювача (8192 і 16384 рівня квантування вхідного сигналу). Усього було виконано 36 серій вимірювань, подібних наведеним на рис. 2 та 3. Така велика кількість серій вимірювань була зумовлена також необхідністю досягти бажаної статистичної точності визначення положень ліній у спектрі, оскільки інтенсивності ліній γ 230 та γ 433 дуже малі й становлять усього 0,7 та 1,4 % на розпад ^{175}Hf відповідно.

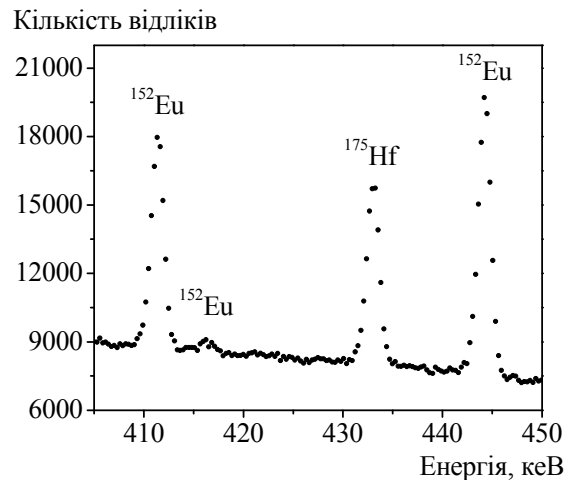


Рис. 3. Ділянка γ -спектра суміші ^{175}Hf і ^{152}Eu в діапазоні енергії 405 - 450 кеВ.

Результати та обговорення

Обробку γ -спектрів проводили за розробленими нами програмами [11]. Спектри були проаналізовані також за періодом напіврозпаду, щоб виключити можливі впливи домішкових радіонуклідів. Спочатку визначили різниці енергій γ -ліній як зважене середнє за результатами всіх вимірювань, а потім і значення енергії переходів. Результати вимірювань добре узгоджуються між собою. Експериментальні значення різниці енергій γ -ліній, енергії реперних γ -квантів та отримані значення енергії досліджуваних γ -переходів наведено в табл. 1. Тут же подано похибки вимірюваних величин, а також їхні складові.

Таблиця 1. Поміряні значення різниць енергій γ -ліній, енергії реперних γ -квантів та отримані значення енергій досліджуваних γ -переходів із розпаду ^{175}Hf

Вимірювана різниця енергій γ -ліній	Значення різниці енергій, eВ	Енергія реперного γ -кванта, eВ	Енергія шуканого γ -кванта, eВ	Похибки визначення енергії γ -переходу, eВ			
				статистична	калібровки	енергії репера	сумарна
$\gamma 230(^{175}\text{Hf}) - \gamma 205(^{192}\text{Ir})$	23816,0	205794,30	229610,3	5,7	0,7	0,09	5,7
$\gamma 245(^{152}\text{Eu}) - \gamma 230(^{175}\text{Hf})$	15076,5	244697,4	229620,9	5,6	0,5	0,8	5,7
Середнє зважене			229615,6				5,3
$\gamma 346(^{181}\text{Hf}) - \gamma 343(^{175}\text{Hf})$	2530,6	345939,4	343408,8	0,9	-	1,8	2,0
$\gamma 468(^{192}\text{Ir}) - \gamma 433(^{175}\text{Hf})$	35292,6	468068,85	432776,3	3,0	1,1	0,26	3,2
$\gamma 433(^{175}\text{Hf}) - \gamma 411(^{152}\text{Eu})$	21649,3	411116,5	432765,8	3,2	0,7	1,2	3,5
Середнє зважене			432771,5				5,2

Як видно з таблиці, енергії ліній як $\gamma 230$, так і $\gamma 433$ кеВ ^{175}Hf було визначено відносно двох різних реперних γ -променів. Отримані значення добре узгоджуються між собою, що підтверджує відсутність суттєвих систематичних похибок.

У табл. 1 наведено також результати вимірювань різниці енергій переходів $\gamma 346$ ^{181}Hf - $\gamma 343$ ^{175}Hf та значення енергії лінії $\gamma 343$ кеВ ^{175}Hf із наших більш ранніх робіт [7, 8].

Усі дані про енергії опорних переходів із табл. 1 та значення енергії трьох переходів – $\gamma 114$, $\gamma 138$ і $\gamma 145$) з [6] – були використані нами для розрахунку енергії збуджених станів ^{175}Lu . Оскільки автори [6] для градування кристал-

дифракційного спектрометра приймали $E(\gamma 412$ $^{198}\text{Hg}) = (411795 \pm 9)$ eВ, а на сьогодні уточнена енергія цієї лінії становить $E(\gamma 412$ $^{198}\text{Hg}) = (411802,05 \pm 0,17)$ eВ [12, 13], нами було зроблено перерахунок їхніх результатів й отримано такі величини:

$$E(\gamma 114$$
 $^{175}\text{Yb}) = (113805 \pm 4)$ eВ,

$$E(\gamma 138$$
 $^{175}\text{Yb}) = (137658 \pm 6)$ eВ,

$$E(\gamma 145$$
 $^{175}\text{Yb}) = (144863 \pm 5)$ eВ.

Після визначення енергії рівнів ядра стало можливим розрахувати й енергії γ -переходів між ними. Результати розрахунків спільно зі зваженими середніми значеннями з компіляції [14] представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Уточнені значення енергії рівнів ^{175}Lu і γ -променів, що збуджуються в розпаді ^{175}Hf

Наші дані		Компіляція [14]	
Енергія, eВ		Енергія, eВ	
рівнів	γ -променів	рівнів	γ -променів
$113800,8 \pm 2,8$	$113800,8 \pm 2,8$	113806 ± 4	113805 ± 4
251459 ± 4	137658 ± 5	251465 ± 7	137658 ± 6
	251459 ± 4		251474 ± 17
$343410,2 \pm 1,9$	$229609,2 \pm 3,4$	343380 ± 80	229600 ± 600
	$343409,8 \pm 1,9$		343400 ± 80
396322 ± 5	144863 ± 6	396328 ± 7	144863 ± 5
	282521 ± 6		282522 ± 14
	396322 ± 5		396329 ± 20
432772 ± 5	89362 ± 5	432740 ± 80	89360 ± 10
	318971 ± 6		318900 ± 600
	432771 ± 5		433000 ± 500

Отримані значення енергії рівнів ^{175}Lu та γ -променів, що супроводжують розпад ^{175}Hf , добре узгоджуються з даними інших експериментальних робіт але перевершують їх по точності. Відзначимо також, що енергія найбільш інтенсивного переходу $\gamma 343$ кеВ визначена нами з по-

хибною, кращою за 10^{-5} . Така точність відповідає вимогам щодо ліній, які можуть бути використані як енергетичні стандарти для ядерної спектроскопії. Зважаючи на це, ми рекомендуємо використовувати її в якості енергетичної нормали четвертого порядку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hatch E.N., Boehm F., Marmier P., DuMond J.W.M. Rotational and intrinsic levels in Tm^{169} and Lu^{175} // Phys. Rev. - 1956. - Vol. 104. - P. 745 - 752.
2. Harmatz B., Handley T.H. Nuclear spectroscopy of neutron-deficient hafnium and rare earth activities // Nucl. Phys. - 1966. - Vol. 81. - P. 481 - 522.

3. *Johansen K.H., Bengtson B., Hansen P.G., Hornshoj P.* The $1/2^- [514]$ rotational band in ^{175}Lu and the Q-value of the electron-capture decay // *Nucl. Phys. A.* - 1969. - Vol. 133. - P. 213 - 221.
4. *Pratt W.W.* Low-intensity transition in the decay of ^{175}Hf // *Phys. Rev. C.* - 1976. - Vol. 13. - P. 2591 - 2592.
5. *Singh K., Gill T.S., Singh K.* K-capture probabilities in the decay of ^{175}Hf // *J. Phys. Soc. Jpn.* - 1988. - Vol. 57. - P. 3762 - 3765.
6. *Reiersen J.D., Nelson G.C., Hatch E.N.* Gamma-ray measurements with a bent-crystal spectrometer // *Nucl. Phys. A.* - 1970. - Vol. 153. - P. 109 - 120.
7. *Lashko A.P., Lashko T.M.* Precise measurement of the energy of gamma-rays from the decay of ^{181}Hf // *Ukr. J. Phys.* - 2009. - Vol. 54. - P. 678 - 681.
8. *Лашко А.П., Лашко Т.М.* Визначення магнітних моментів ядерних станів за надтонким зсувом конверсійних ліній // *УФЖ.* - 2009. - Т. 54. - С. 337 - 342.
9. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* Высокоточные измерения энергии ядерных состояний, возбуждающихся в радиоактивном распаде // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2006. - № 2(18). - С. 131 - 134.
10. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* Анализ погрешностей измерений энергии гамма-лучей на полупроводниковых спектрометрах // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2007. - № 2(20). - С. 121 - 125.
11. *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).
12. *Helmer R.G., Van der Leun C.* Recommended standards for γ -ray energy calibration (1999) // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* - 1999. - Vol. A422. - P. 525 - 531.
13. *Helmer R.G., Van der Leun C.* Recommended standards for γ -ray energy calibration (1999) // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* - 2000. - Vol. A450. - P. 35 - 70.
14. *Basunia M. Shamsuzzoha.* Nuclear data sheets for $A = 175$ // *Nucl. Data Sheets.* - 2004. - Vol. 102. - P. 719 - 900.

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

ЭНЕРГИИ НИЗКОЛЕЖАЩИХ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ^{175}Lu

На γ -спектрометре выполнены прецизионные измерения энергии опорных γ -переходов из распада ^{175}Hf . На основании этих данных, с погрешностью в несколько электрон-вольт, определены энергии уровней и разряжающих их γ -переходов в ^{175}Lu . Они хорошо согласуются с данными других экспериментальных работ, но превосходят их по точности.

Ключевые слова: радиоактивность, ^{175}Hf , γ -спектры, HPGe-детекторы, энергии γ -лучей, энергии уровней.

A. P. Lashko, T. N. Lashko

THE ENERGIES OF LOW-LYING EXCITED STATES IN ^{175}Lu

High-precision measurements of the energies of reference γ -transitions from the decay of ^{175}Hf have been performed with the γ -spectrometer. Using this data, the energies of levels and corresponding deexciting γ -rays in ^{175}Lu were determined with the precision up to a few electron-volts. To a great extent they are in a good agreement with other experimental data but is more precise.

Keywords: radioactivity, ^{175}Hf , γ -spectra, HPGe-detectors, measurements $E(\gamma)$, energy of levels.

Надійшла до редакції 20.01.2012.