

ПРЕЦИЗИЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ГАММА-ПЕРЕХОДІВ У ⁹⁹Tc

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

На γ-спектрометрі з високою точністю виміряно енергії опорних γ-переходів із розпаду ⁹⁹Mo. На основі цих даних з похибкою в декілька електрон-вольт визначено енергії рівнів 1/2⁺ 920,586 кеВ, 3/2⁻ 1004,050 кеВ та 3/2⁺ 1141,875 кеВ ⁹⁹Tc.

Ключові слова: радіоактивність, ⁹⁹Mo, γ-спектри, HPGe-детектори, енергії γ-променів, енергії рівнів.

Вступ

Переважає більшість γ-квантів, що збуджуються при розпаді ⁹⁹Mo (T_{1/2} = 65,9 год, I^π = 1/2⁺), мають інтенсивності в діапазоні (0,1 - 0,01) % на розпад. Визначити з високою точністю положення цих ліній в γ-спектрі практично неможливо, оскільки статистична складова похибки буде надто високою. Єдиною можливістю отримати прецизійні дані про їх енергії є застосування методу опорних переходів. Як опорні можна використати інтенсивні лінії γ40, γ140, γ181 γ367, γ739, γ778, γ822 та γ960 кеВ.

± 0,001) кеВ. З високою точністю відома також енергія конверсійного переходу з ізомерного стану 1/2⁻, 142 кеВ на перший збуджений рівень 7/2⁺, 140 кеВ ⁹⁹Tc [3, 4].

На рис. 1 наведено схему розташування опорних рівнів ⁹⁹Tc та опорних γ-квантів, що побудована за даними компіляції [5]. Метою наших досліджень було уточнення енергії переходів γ739, γ778, γ822 та γ960 кеВ, корекція на основі нових експериментальних даних енергії рівнів ⁹⁹Tc та розряджених їх γ-квантів.

Методика експерименту

Джерела випромінювання ⁹⁹Mo було отримано в реакції (n, γ) на дослідницькому реакторі ВВР-М ІЯД НАН України. Використовували молибденові мішені з природним вмістом ізотопів (табл. 1). Переріз активації ⁹⁸Mo становить 0,13 б [6], при нашому режимі опромінення (n, γ)-реакції на ⁹²Mo та ¹⁰⁰Mo не призводять до напрацювання скільки-небудь значимих сторонніх активностей.

Таблиця 1. Ізотопний склад природного молибдену, % [6]

⁹² Mo	⁹⁴ Mo	⁹⁵ Mo	⁹⁶ Mo	⁹⁷ Mo	⁹⁸ Mo	¹⁰⁰ Mo
14,8	9,3	15,9	16,7	9,6	24,1	9,6

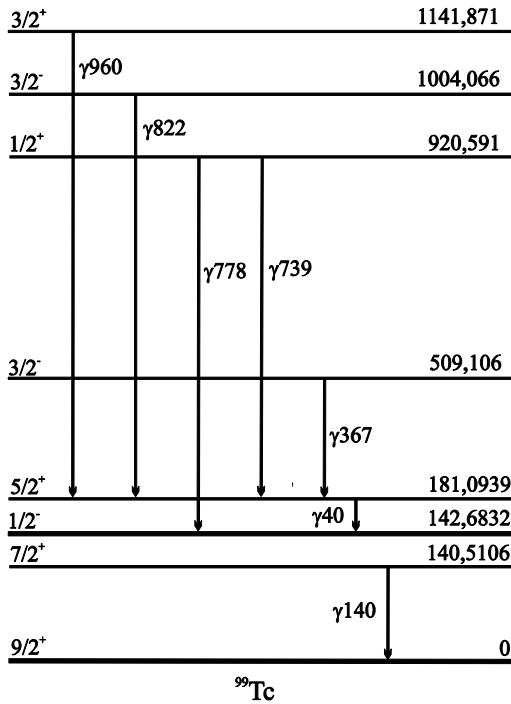


Рис. 1. Схема розташування опорних рівнів ⁹⁹Tc та опорних γ-квантів.

Енергії перших шести було виміряно на кристал-дифракційному спектрометрі Гардульські та Віденбеком [1]. Вони отримали наступні значення енергій γ-переходів: 40,5845 ± 0,0016, 140,508 ± ± 0,004, 181,063 ± 0,008, 366,426 ± 0,032 та 739,576 ± 0,062 кеВ. Енергії γ-квантів визначено з похибкою (30 - 90) ppm (parts per million). Пізніше [2] на напівпровідниковому γ-спектрометрі було уточнено енергію переходу E_γ(140) = (140,511 ±

В якості джерела випромінювання реперних γ-квантів найбільш зручним для цих цілей виявився ¹²⁴Sb (T_{1/2} = 60,2 діб), який має значну кількість γ-ліній у високоенергетичній частині спектра. ¹²⁴Sb був напрацьований в реакції (n, γ) з перерізом активації 4 б [6] при опроміненні тепловими нейтронами сурми, збагаченої ізотопом ¹²³Sb. Було виготовлено кілька різних джерел випромінювання, що склалися із суміші двох ізотопів (⁹⁹Mo + ¹²⁴Sb) з різними співвідношеннями активностей цих радіонуклідів.

Вимірювання проводили на γ-спектрометрі, який складався з двох горизонтальних коаксіальних детекторів з надчистого германію (GEM-40195 та GMX-30190 з роздільною здатністю 1,73 і 1,89 кеВ на лінії γ1332 ⁶⁰Co відповідно) та багатоканального буфера 919 SPECTRUM

MASTER фірми ORTEC. Було виміряно різниці енергії між чотирма парами γ -променів: $\gamma_{739} - \gamma_{722}$, $\gamma_{790} - \gamma_{778}$, $\gamma_{822} - \gamma_{790}$ та $\gamma_{968} - \gamma_{960}$. Один γ -перехід із кожної пари збуджується при розпаді ^{99}Mo , а другий, енергія якого відома з високою точністю [7, 8], супроводжує розпад ^{124}Sb .

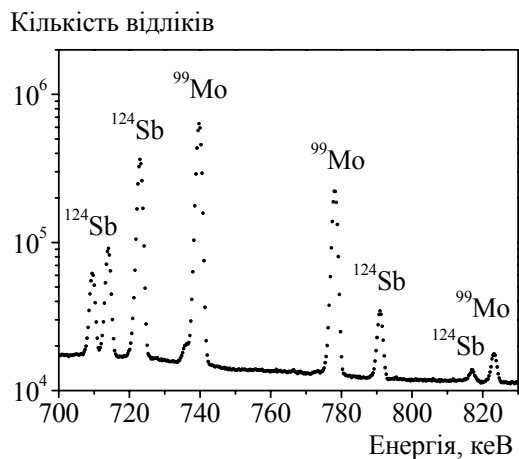


Рис. 2. Ділянка γ -спектра суміші ^{99}Mo та ^{124}Sb в діапазоні енергії 700 - 830 кеВ.

Детально було досліджено функціональну залежність градууювальної кривої γ -спектрометра від енергії. Установлено, що відхилення від лінійності не перевищує 50 ppm для області енергії від 600 до 1050 кеВ. Щоб звести до мінімуму можливі систематичні похибки, вимірювання проводили серіями на джерелах випромінювання з різними співвідношеннями питомих активностей ^{99}Mo і ^{124}Sb , при різних коефіцієнтах підсилення та різних ширинах каналу амплітудно-цифрового перетворювача (4096 і 8192 рівня квантування вхідного сигналу). Усього було виконано сім серій вимірювань, подібних наведеним на рисунках.

На рис. 2 та 3 показано ділянки γ -спектра в різних діапазонах енергії, зняті на детекторі GEM-40195. Для зменшення завантаження детектора м'якими γ -квантами використовували фільтр із свинцю товщиною $5,6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$.

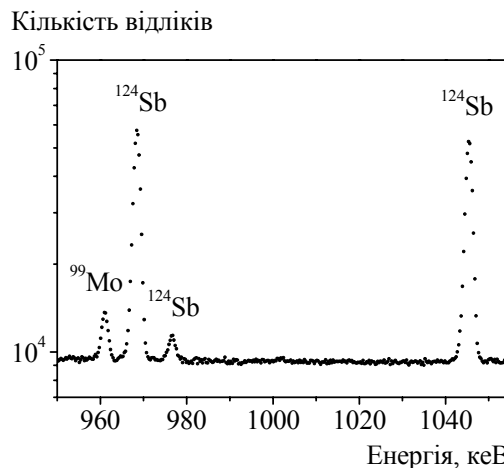


Рис. 3. Ділянка γ -спектра суміші ^{99}Mo та ^{124}Sb в діапазоні енергії 950 - 1055 кеВ.

Результати та обговорення

Обробку γ -спектрів проводили за розробленими нами програмами [9]. Спектри були проаналізовані також по періоду напіврозпаду, щоб виключити можливі домішки інших 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. 2. Тут же подано похибки вимірюваних величин, а також їх складові.

Таблиця 2. Виміряні значення різниць енергій γ -ліній, енергії реперних γ -квантів та отримані значення енергій досліджуваних γ -переходів із розпаду ^{99}Mo

Вимірювана різниця енергій γ -ліній	Значення різниці енергій, еВ	Енергія реперного γ -кванта, еВ	Енергія шуканого γ -кванта, еВ	Похибка визначення енергії γ -переходу, еВ			
				статистична	градування	енергії репера	сумарна
$\gamma_{739}(^{99}\text{Mo}) - \gamma_{722}(^{124}\text{Sb})$	16707,0	722782	739489	2,1	0,8	3	4
$\gamma_{790}(^{124}\text{Sb}) - \gamma_{778}(^{99}\text{Mo})$	12806	790706	777900	4	0,6	7	8
$\gamma_{822}(^{99}\text{Mo}) - \gamma_{790}(^{124}\text{Sb})$	32247	790706	822953	7	1,6	7	10
$\gamma_{968}(^{124}\text{Sb}) - \gamma_{960}(^{99}\text{Mo})$	7419	968195	960776	6	0,4	4	8
$\gamma_{645}(^{124}\text{Sb}) - \gamma_{602}(^{124}\text{Sb})$	43127,3			1,5	2,2	-	2,7
$\gamma_{722}(^{124}\text{Sb}) - \gamma_{713}(^{124}\text{Sb})$	9007,3			2,4	0,5	-	2,5

Для оцінки величини можливої систематичної похибки було виміряно також різниці енергії переходів $\gamma_{645} - \gamma_{602}$ та $\gamma_{722} - \gamma_{713}$ із розпаду ¹²⁴Sb. Ці дані також наведено в табл. 2.

Відхилення експериментальних значень різниці енергії переходів $\gamma_{645} - \gamma_{602}$ і $\gamma_{722} - \gamma_{713}$ від їх табличних значень із [8] ($\Delta E_{exp} - \Delta E_{tabl}$) становить $(1,3 \pm 4,0)$ еВ та $(1,3 \pm 5,6)$ еВ відповідно, зважене середнє за результатами двох вимірювань – $(1,3 \pm 3,3)$ еВ. Цей факт є прямим підтвердженням того, що систематичні похибки незначні, і в найгіршому випадку не перевищують кількох електрон-вольт.

Дані про енергії опорних переходів із табл. 2 та значення енергії рівнів $1/2^-$ 142 кеВ і $5/2^+$ 181 кеВ із [5] були використані нами для розрахунку енергії збуджених станів $1/2^+$ 920 кеВ, $3/2^-$ 1004 кеВ та $3/2^+$ 1141 кеВ ⁹⁹Tc. Слід зазначити, що енергія ядра віддачі становить від 5 до 3 еВ для переходів γ_{739} та γ_{960} кеВ відповідно, тому її врахування в даному випадку є обов'язковим.

Також потрібно відзначити, що енергію рівня $1/2^+$ 920 кеВ ⁹⁹Tc було визначено за енергією двох опорних переходів – γ_{739} та γ_{778} кеВ (див. рис. 1). Обидва значення (920586 ± 4) еВ та (920587 ± 8) еВ добре узгоджуються між собою, що також підтверджує відсутність суттєвих систематичних похибок.

Визначивши енергії рівнів ядра, було зовсім нескладно розрахувати й енергії γ -переходів між ними. Результати розрахунків спільно зі зваженими середніми значеннями з компіляції [5] представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Уточнені значення енергії рівнів ⁹⁹Tc і γ -променів, що збуджуються в розпаді ⁹⁹Mo

Наша робота		Компіляція [5]	
Енергія, еВ		Енергія, еВ	
рівнів	γ -променів	рівнів	γ -променів
920586 ± 4	411479 ± 12	920591 ± 11	411491 ± 15
	739489 ± 4		739500 ± 17
	777900 ± 8		777921 ± 20
1004050 ± 10	822953 ± 10	1004066 ± 15	822972 ± 15
1141875 ± 8	1001339 ± 8	1141871 ± 14	1001343 ± 18
	960776 ± 8		960754 ± 20

Отримані значення енергії рівнів ⁹⁹Tc та γ -променів, що збуджуються при розпаді ⁹⁹Mo, добре узгоджуються з даними інших експериментальних робіт і перевершують їх по точності. Відзначимо також, що енергії трьох інтенсивних γ -переходів визначено нами з похибкою не гіршою за 10 ppm. Така точність відповідає вимогам щодо ліній, які можуть бути використані як енергетичні стандарти для ядерної спектроскопії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Gardulski P. L., Wiedenbeck M. L. Precision energy measurements of high energy gamma rays occurring in the decays of ⁴⁶Sc, ⁸²Br, ⁹⁹Mo and ¹¹⁰Ag^m // Nucl. Instr. Methods. - 1972. - Vol. 105. - P. 169 - 170.
- Helmer R. G., Cafferey A. J., Gehrke R. J., Greenwood R. C. γ -ray energies from the decay of ⁹⁹Mo, ¹³³Ba and ²¹⁰Pb // Nucl. Instr. Methods. - 1981. - Vol. 188. - P. 671 - 672.
- Lacasse W.M., Hamilton J.H. The M and N subshell ratios of the 2,17 keV transition in ^{99m}Tc // Nucl. Phys. - 1971. - Vol. A171. - P. 641 - 646.
- Герасимов В.Н., Зеленков А.Г., Кулаков В.М. и др. Исследование спектра конверсионных электронов перехода 2,1726 кэВ в ^{99m}Tc, помещенном в матрицу металлического технеция // Ядерная физика. - 1981. - Т. 34. - С. 3 - 12.
- Tuli J.K., Reed G., Singh B. Nuclear data sheets for ⁹⁹Tc // Nucl. Data Sheets. - 2001. - Vol. 93. - P. 1 - 32.
- Lederer C.M., Shirley V.S. Table of Isotopes. - N.Y.: J. Wiley, 1978. - 1632 p.
- 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.
- 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.
- Булгаков В.В., Гаврилюк В.И., Лашко А.П. и др. Магнитный бета-спектрометр высокого разрешения ИЯИ АН УССР. - Киев, 1986. - 48 с. - (Препр. / АН УССР. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-86-33).

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ ГАММА-ПЕРЕХОДОВ В ⁹⁹Tc

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

На γ -спектрометре с высокой точностью измерены энергии опорных γ -переходов из распада ⁹⁹Mo. На основании этих данных с погрешностью в несколько электрон-вольт определены энергии уровней $1/2^+$ 920,586 кэВ, $3/2^-$ 1004,050 кэВ и $3/2^+$ 1141,875 кэВ ⁹⁹Tc.

Ключевые слова: радиоактивность, ⁹⁹Mo, γ -спектры, HPGe-детекторы, энергии γ -лучей, энергии уровней.

PRECISE MEASUREMENTS OF THE ENERGY OF GAMMA-TRANSITIONS IN ^{99}Tc

A. P. Lashko, T. N. Lashko

High-precision measurements of the energies of reference γ -rays from the decay of ^{99}Mo have been performed with γ -spectrometer. Using these data, the energies of levels $1/2^+$ 920,586 keV, $3/2^-$ 1004,050 keV and $3/2^+$ 1141,875 keV of ^{99}Tc were determined with the accuracy up to a few electron-volts.

Keywords: radioactivity, ^{99}Mo , γ -spectra, HPGe-detectors, measurements $E(\gamma)$, energy of levels.

Надійшла до редакції 20.05.09,
після доопрацювання – 15.07.09.