

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПАДУ ^{99}Mo

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

За допомогою HPGe-детекторів досліджено спектри гамма-променів із розпаду ^{99}Mo . Отримано нові дані про відносні інтенсивності гамма-променів для області енергій вище 150 кеВ. Проаналізовано схему рівнів ^{99}Nb . Підтверджено існування збуджених станів ^{99}Nb з енергією 1004,06, 1072,21, 1129,14 та 1198,9 кеВ, а існування в схемі розпаду рівнів з енергіями 761,24 та 1171,96 кеВ не підтверджено.

1. Вступ

Розпаду ^{99}Mo на рівні ^{99}Nb присвячено багато робіт. Граничні енергії гілок β -розпаду з інтенсивностями більше 0.1 % поміряні на β -спектрометрі [1], енергії та інтенсивності γ -променів – на напівпровідникових спектрометрах як в одиночному спектрі, так і в спектрі $\gamma\gamma$ -збігів [2 - 4]. Енергії деяких γ -променів визначено з високою точністю на кристал-дифракційних спектрометрах, що дуже важливо для розміщення переходів у схемі розпаду ^{99}Nb [5, 6]. Але, незважаючи на це, вісім γ -переходів з 44 не розміщені в схемі розпаду, положення двох точно не встановлено, спіни й парності рівнів зі слабкими заселеннями (менше 0,01 %) не встановлено і, взагалі, саме введення деяких рівнів проблематичне. Оскільки в реакціях із зарядженими частинками дані рівні не збуджуються, то інформацію про збуджені стани ^{99}Nb у цій області енергій можна одержати тільки досліджуючи розпад ^{99}Mo . Метою нашої роботи було уточнення інтенсивностей γ -променів в області енергій вище 800 кеВ.

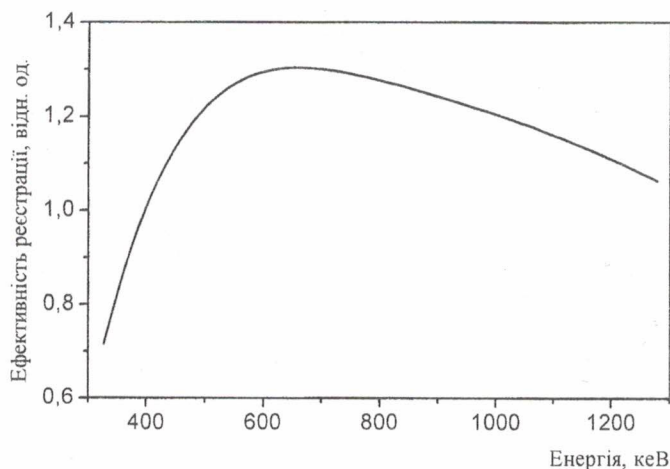
2. Методика експерименту

Джерела випромінювання ^{99}Mo отримано в реакції (n, γ) на дослідницькому реакторі ВВР-М ІЯД НАН України.

Для вимірювання γ -спектрів використовували γ -спектрометр, який складається з двох горизонтальних коаксіальних HPGe-детекторів GMX-30190 і GEM-40195 з роздільною здатністю 1,89 і 1,73 кеВ на γ -лінії 1,33 МеВ ^{60}Co і ефективністю реєстрації 33 і 43 % відповідно, планарного HPGe-детектора GLP-36360/13 з роздільною здатністю 580 еВ на

γ -лінії 122 кеВ ^{57}Co та багатоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC. При вивченні різних ділянок γ -спектра застосовували також різні комбінації поглиначів з кадмію і свинцю, що дало змогу сформувати оптимальну криву ефективності реєстрації γ -спектрометра в досліджуваній області енергій.

Як приклад на рисунку представлено криву ефективності реєстрації γ -променів HPGe-детектором GEM 40195, сформовану для дослідження γ -спектрів при енергіях вище 600 кеВ.



Залежність ефективності реєстрації γ -променів детектором GEM-40190, сформована поглиначем зі свинцю й кадмію товщиною 5.6 та 0.44 г/см² відповідно.

Щоб виключити можливі домішки радіонуклідів при визначенні інтенсивностей слабких ліній, спектри аналізували за періодом напіврозпаду.

3. Результати та обговорення

Обробку γ -спектрів проводили за розробленими нами програмами [7]. Результати, спільно зі зваженими даними за всіма експериментальними роботами до 1996 р. з компіляції [8], представлено в таблиці. Відносні інтенсивності γ -променів, отримані в нашій роботі, добре узгоджуються з даними інших авторів.

Відносні інтенсивності γ -променів з розпаду ^{99}Mo

E_γ , кеВ	Інтенсивність, відн. од.	
	Наша робота	Компіляція [8]
158,8(?)	$0,146 \pm 0,005$	$0,139 \pm 0,007$
162,4	$0,110 \pm 0,005$	$0,097 \pm 0,004$
181,1	$49,5 \pm 1,5$	$50,1 \pm 0,7$
242,3	-	$0,012 \pm 0,002$
249,0	-	$0,024 \pm 0,003$
319,8(u)	-	$0,052 \pm 0,002$
321,0(u)	$0,074 \pm 0,004$	$0,056 \pm 0,009$
352,9	-	0,0209
366,4	$9,8 \pm 0,3$	$9,9 \pm 0,3$
380,1	$0,069 \pm 0,005$	$0,075 \pm 0,003$
391,7	-	$0,016 \pm 0,004$
410,3+411,5	$0,130 \pm 0,007$	$0,136 \pm 0,006$
455,8(u)	-	$0,011 \pm 0,005$
457,6	$0,057 \pm 0,005$	$0,056 \pm 0,004$
469,6	$0,044 \pm 0,007$	$0,022 \pm 0,004$
490,5(u)	-	$0,009 \pm 0,003$
528,8	$0,411 \pm 0,010$	$0,446 \pm 0,009$
537,8	-	$0,013 \pm 0,005$
580,5+581,3	$0,040 \pm 0,004$	$0,044 \pm 0,004$
599,6(u)	-	$0,017 \pm 0,008$
620,0+621,8	$0,222 \pm 0,010$	$0,232 \pm 0,011$
689,6	-	$0,0035 \pm 0,0015$
727,1(u)	-	$0,059 \pm 0,003$
739,5	100 ± 3	100 ± 3
761,8	-	$0,0092 \pm 0,0008$
777,9	$35,3 \pm 0,6$	$35,3 \pm 0,8$
823,0	$1,12 \pm 0,03$	$1,06 \pm 0,03$
861,2	$0,006 \pm 0,003$	$0,005 \pm 0,003$
940,0(u)	-	$0,0008 \pm 0,0003$
960,8	$0,768 \pm 0,013$	$0,76 \pm 0,02$
986,4	$0,0109 \pm 0,0009$	$0,011 \pm 0,001$
1001,3	$0,0333 \pm 0,0019$	$0,033 \pm 0,001$
1017,0	-	$0,006 \pm 0,003$
1056,2	$0,0064 \pm 0,0006$	$0,0083 \pm 0,0008$
1071,9	$0,0029 \pm 0,0010$	$0,0010 \pm 0,0004$
1082,0(u)	$0,0022 \pm 0,0009$	$0,0005 \pm 0,0002$

Примітка: (?) – можливе розміщення γ -переходу в схемі розпаду; (u) – γ -переходи, не розміщені в схемі розпаду.

Деякі слабкі γ -лінії спостерігали в одних роботах [2] і не бачили в інших [3], однак отримані обмеження на інтенсивності цих переходів не дають змоги зробити однозначних висновків про наявність або відсутність їх у γ -спектрі. Більш докладно на цьому питанні зупинимося нижче.

Нині прийнята схема розпаду містить 15 збуджених станів ^{99}Tc . Шість рівнів – 762,24, 1004,06, 1072,21, 1129,14, 1171,96 і 1198,88 кеВ – не збуджуються в реакціях із зарядженими частинками і введені тільки на підставі даних, отриманих при дослідженні розпаду ^{99}Mo . Заселення цих рівнів у β -розпаді, розраховані на підставі балансу інтенсивностей γ -променів, складають від 0.1 до 0.002 %. Зупинимося більш детально на аналізі їхньої розрядки.

Рівень 762,24 кеВ введено у схему розпаду на підставі спостереження слабких переходів $\gamma_{319,8}$ і $\gamma_{599,6}$ в одиночному спектрі [4], яких не виявили ні ми, ні в роботах [2, 3]. У той же час досягнута точність визначення верхньої межі інтенсивностей цих γ -променів не дає змоги категорично спростувати дані роботи [4].

За іншою версією рівень 762,24 кеВ розряджається переходами $\gamma_{581,3}$ і $\gamma_{621,8}$, які бачили в γ -спектрі майже всі автори, але вони розміщували їх у різних місцях схеми розпаду.

Існування γ -каскаду 823,0 – 181,1 кеВ є підставою введення рівня 1004,06 кеВ. Каскад 242,3 – 621,8 кеВ, який спостерігали в роботі [3], підтримує цю гіпотезу. У простому спектрі було виявлено також інші γ -лінії, що розряджають цей рівень – $\gamma_{469,6}$ та $\gamma_{861,2}$, як нами, так і іншими групами дослідників. Їх також ідентифікували і в спектрі збігів, тому існування рівня 1004,06 кеВ не викликає сумнівів.

Рівень 1072,21 кеВ введено в роботу [3] на підставі існування γ -каскаду 537,8 – 391,7 кеВ. Ці γ -промені в одиночному спектрі ми не бачили, як і в [2]. Перехід $\gamma_{537,8}$ спостерігали в роботі [4]. Ми, як і вони, в одиночному спектрі ідентифікували перехід $\gamma_{1071,9}$, наявність якого підтверджує існування цього рівня.

Рівень 1129,14 кеВ ґрунтується на γ -каскадах 620,0 – 366,4 і 457,6 – 528,8 кеВ. У нашій роботі, як і в усіх інших роботах [2 - 4], спостерігається також слабка лінія $\gamma_{986,4}$, що розряджає цей рівень в ізомерний стан 142,7 кеВ. Існування рівня не викликає сумнівів.

Рівень 1171,96 кеВ оснований на переході $\gamma_{410,3}$, який було виявлено в роботах [2, 4], у той час як у роботі [3] дають верхню межу інтенсивності для нього на порядок нижче. Ми не розділяємо в спектрі переходи $\gamma_{410,3}$ і $\gamma_{411,5}$, оскільки інтенсивність $\gamma_{410,3}$ майже на порядок нижча за $\gamma_{411,5}$ і перехід $\gamma_{410,3}$ знаходиться на комптонівському фоні від $\gamma_{411,5}$. Введення цього рівня в схему розпаду залишається під сумнівом.

Рівень 1198,9 кеВ введено в роботу [2] на базі спостереження γ -каскаду 1017 - 181,1 кеВ. У роботі [3] ідентифікували також γ -каскад 689,6 - 366,4 кеВ і перехід $\gamma_{1056,2}$, що розряджає рівень в ізомерний стан 142,7 кеВ. В одиночному спектрі перехід $\gamma_{1056,2}$ бачили ми і в роботі [4]. Існування рівня не викликає сумнівів.

У роботі [4] було введено ще два рівні в схему розпаду ^{99}Mo – 163,42 і 726,7 кеВ, щоб спробувати якось розмістити й інші γ -лінії. Однак наші дані, як і дані інших робіт, поки що не підтверджують ці припущення.

4. Висновки

Таким чином, на основі аналізу отриманих нами даних про відносні інтенсивності γ -променів із розпаду ^{99}Mo , а також даних інших робіт підтверджено існування збуджених станів ^{99}Nb з енергією 1004,06, 1072,21, 1129,14 та 1198,9 кеВ. У той же час введення до схеми розпаду рівнів з енергією 762,24 та 1171,96 кеВ викликає певні сумніви, оскільки наші дослідження не підтверджують цю гіпотезу.

Відмітимо, що гранична енергія β -спектра при розпаді ^{99}Mo на ізомерний стан 142,6 кеВ ^{99}Nb становить 1214 ± 1 кеВ, так що можливості введення нових рівнів у верхній

частині схеми розпаду практично вичерпані й розміщення нерозміщених γ -переходів дуже проблематичне без нових експериментальних даних. Можливо, ситуацію прояснили б $\gamma\gamma$ -збіги з HPGe-детекторами (а не з NaJ(Tl)-сцинтиляторами), а також більш точні визначення енергій слабоінтенсивних γ -ліній.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nagarajan T., Ravindranath M., Reddy K.V. β -Decay and Nuclear Structure in $A = 99$ Nuclei // Phys. Rev. – 1971. – Vol. C3. – P. 247 - 254.
2. Van Eijk C. W. E., Van Nooijen B., Schutte F. et al. The Decay of ^{99}Mo // Nucl. Phys. – 1968. – Vol. A121. – P. 440 - 462.
3. Cook W. B., Schellenberg L., Johns M. W. The Decay of 67 Hour ^{99}Mo // Nucl. Phys. – 1969. – Vol. A139. – P. 277 - 288.
4. Singh K., Sahota H. S. The Decay of ^{99}Mo // J. Phys. Soc. Jpn. – 1982. – Vol. 51. – P. 3766 - 3773.
5. Gardulski P. L., Wiedenbeck M. L. Precision Energy Measurements of High Energy Gamma Rays Occurring in the Decays of ^{46}Sc , ^{82}Br , ^{99}Mo and $^{110}\text{Ag}^m$ // Nucl. Instrum. Methods. – 1972. – Vol. 105. – P. 169 - 170.
6. Helmer R. G., Cafferey A. J., Gehrke R. J., Greenwood R. C. γ -Ray Energies from the Decay of ^{99}Mo , ^{133}Ba and ^{210}Pb . // Nucl. Instrum. Methods. – 1981. – Vol. 188. – P. 671 - 672.
7. 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).
8. Firestone R. B., Shirley V. S. Table of Isotopes. CD ROM Edition. – Wiley Interscience, 1996.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ^{99}Mo

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

При помощи HPGe-детекторов исследованы спектры гамма-лучей из распада ^{99}Mo . Получены новые данные об относительных интенсивностях гамма-лучей для области энергий выше 150 кэВ. Проанализирована схема уровней ^{99}Nb . Подтверждено существование возбужденных состояний ^{99}Nb с энергией 1004,06, 1072,21, 1129,14 та 1198,9 кэВ, а существование в схеме распада уровней с энергией 761,24 и 1171,96 кэВ не подтверждено.

THE INVESTIGATION OF ^{99}Mo DECAY

A. P. Lashko, T. N. Lashko

Spectra of gamma rays from the ^{99}Mo decay have been investigated by means of HPGe-detectors. The new data on relative intensities of gamma rays were obtained for region of energy above 150 keV. The level scheme of ^{99}Nb was discussed. The existence of excited states 1004,06, 1072,21, 1129,14 and 1198,9 keV of ^{99}Nb was confirmed. The existence of 761,24 and 1171,96 keV energy levels in the decay scheme was not verified.

Надійшла до редакції 19.02.02,
після доопрацювання – 11.04.02.