

А. П. Лашко, Т. М. Лашко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ЕНЕРГІЇ ПЕРШИХ ЗБУДЖЕНИХ СТАНІВ  $2^+$  В  $^{122}\text{Sn}$  ТА  $^{122}\text{Te}$ 

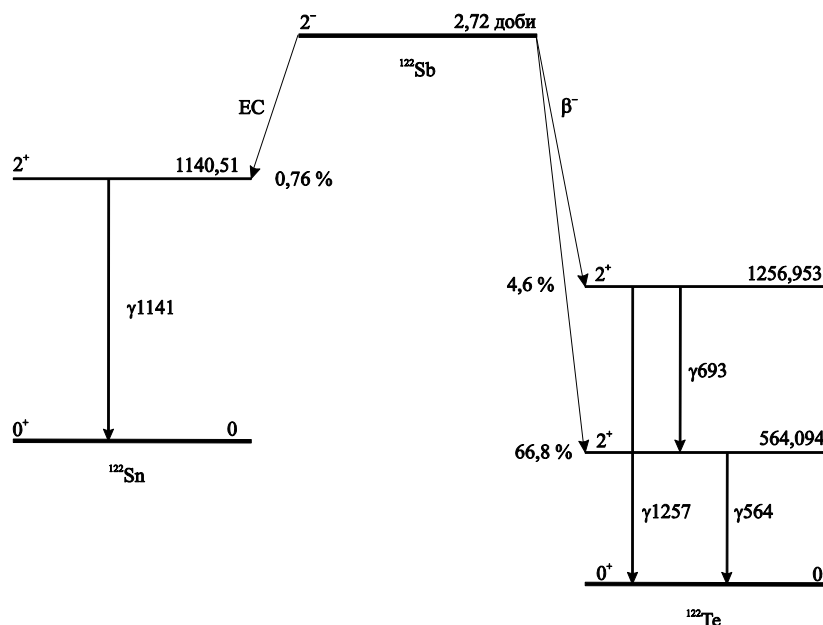
На  $\gamma$ -спектрометрі проведено прецизійні вимірювання енергії найбільш інтенсивних  $\gamma$ -переходів із розпаду  $^{122}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 2,72$  доби). Спираючись на ці результати, з високою точністю визначено енергії перших збуджених станів та розряджаючих їх  $\gamma$ -переходів у  $^{122}\text{Sn}$  та  $^{122}\text{Te}$ .

*Ключові слова:* радіоактивність,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $\gamma$ -спектри, HPGe-детектори, енергії  $\gamma$ -променів, енергії рівнів.

## Вступ

Розпад  $^{122}\text{Sb}$  ( $I^\pi = 2^-$ ,  $T_{1/2} = 2,72$  доби) відбувається електронним захватом і  $\beta^+$ -розпадом на рівні  $^{122}\text{Sn}$  та  $\beta^-$ -розпадом на збуджені стани  $^{122}\text{Te}$  (рис. 1). Як  $^{122}\text{Sn}$ , так і  $^{122}\text{Te}$  належать до сферичних ядер. При розпаді  $^{122}\text{Sb}$  в цих ядрах збуджуються однофоновні стани з  $I^\pi = 2^+$ , а в  $^{122}\text{Te}$ , крім того, також і рівні двофоновного триплету з  $I^\pi = 0^+$ ,  $2^+$  та  $4^+$  [1].

Найточніші значення енергії  $\gamma$ -переходів, які супроводжують розпад  $^{122}\text{Sb}$ , наведено в роботі [2]. Вимірювання високоенергетичної області  $\gamma$ -спектра автори проводили за допомогою Ge(Li)-детектора з роздільною здатністю 2,5 кеВ на лініях  $^{60}\text{Co}$ . Як джерела випромінювання реперних  $\gamma$ -квантів використовували  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  та  $^{160}\text{Tb}$ . Похибка у визначенні енергії найбільш інтенсивних  $\gamma$ -ліній із розпаду  $^{122}\text{Sb}$  становила 40 еВ.

Рис. 1. Фрагмент схеми розпаду  $^{122}\text{Sb}$ .

Метою наших досліджень є уточнення енергії переходів  $\gamma 564$ ,  $\gamma 693$ ,  $\gamma 1141$  і  $\gamma 1257$  кеВ та визначення з більш високою точністю енергії перших збуджених рівнів  $2^+$  в  $^{122}\text{Sn}$  та  $^{122}\text{Te}$ .

## Методика експерименту

В останні роки для прецизійних вимірювань енергії  $\gamma$ -квантів, які випромінюються при розпаді радіоактивних ядер, поряд з кристал-дифракційними спектрометрами все більшого використання набувають напівпровідникові детектори. Вони простіші у використанні, але дають змогу визначати енергії переходів з точністю в кілька

електрон-вольт. У роботі [3] наведено 375 експериментальних результатів таких досліджень, виконаних як на Ge(Li)-, так і на HPGe-детекторах.

Методика подібних вимірювань полягає в наступному. Готують змішане джерело випромінювання такого складу, щоб поблизу  $\gamma$ -лінії, енергію якої хочуть визначити, зліва або справа по спектру знаходилася, принаймні, одна реперна лінія, енергія якої відома з високою точністю. Потім виміряють положення ліній у спектрі, будують за реперами градувальну криву і по ній визначають енергію шуканої  $\gamma$ -лінії [4].

Джерела випромінювання  $^{122}\text{Sb}$  та  $^{124}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 60,20$  діб) отримані в реакції  $(n, \gamma)$  на дослідницькому реакторі ІЯД НАН України при опроміненні тепловими нейтронами сурми, збагаченої ізотопом  $^{123}\text{Sb}$ .  $^{124}\text{Sb}$  має значну кількість  $\gamma$ -ліній у високоенергетичній частині спектра, тому виявилася найбільш зручною як джерело випромінювання реперних  $\gamma$ -квантів.

Вимірювання проводили на  $\gamma$ -спектрометрі, що складався з двох горизонтальних коаксіальних детекторів із надчистого германію (GEM-40195 та GMX-30190 з роздільною здатністю

1,73 кеВ і 1,89 кеВ на лінії  $\gamma 1332$   $^{60}\text{Co}$  відповідно) та багатоканального буфера 919 SPECTRUM MASTER фірми ORTEC. У цьому експерименті були поміряні різниці енергії між 4 парами  $\gamma$ -променів:  $\gamma 603(^{124}\text{Sb}) - \gamma 564(^{122}\text{Sb})$ ,  $\gamma 723(^{124}\text{Sb}) - \gamma 693(^{122}\text{Sb})$ ,  $\gamma 1141(^{122}\text{Sb}) - \gamma 1045(^{124}\text{Sb})$  та  $\gamma 1326(^{124}\text{Sb}) - \gamma 1257(^{122}\text{Sb})$ . Один  $\gamma$ -перехід із кожної пари збуджується при розпаді  $^{122}\text{Sb}$ , а другий, енергія якого відома з високою точністю, супроводжує розпад  $^{124}\text{Sb}$ . На рис. 2 та 3 показано ділянки  $\gamma$ -спектра суміші  $^{122}\text{Sb}$  та  $^{124}\text{Sb}$ , зняті на детекторі GEM-40195.

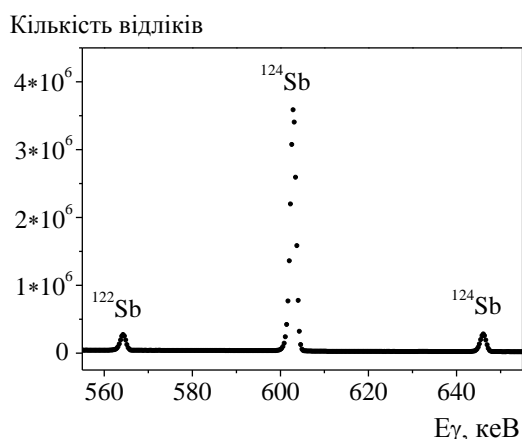


Рис. 2. Ділянка  $\gamma$ -спектра суміші  $^{122}\text{Sb}$  та  $^{124}\text{Sb}$  в діапазоні енергії (555 - 655) кеВ.

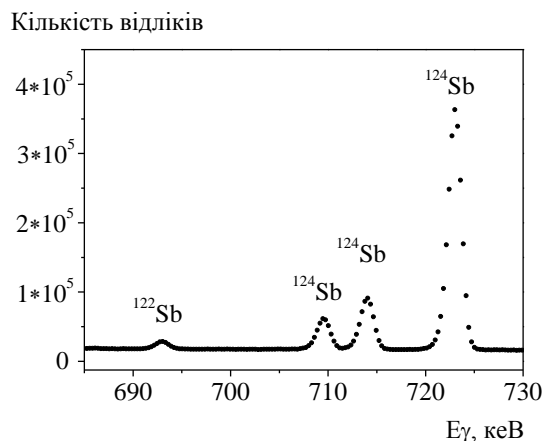


Рис. 3. Ділянка  $\gamma$ -спектра суміші  $^{122}\text{Sb}$  та  $^{124}\text{Sb}$  в діапазоні енергії (685 - 730) кеВ

Щоб звести до мінімуму можливі систематичні похибки, вимірювання проводили серіями при різних коефіцієнтах підсилення. Усього було виконано 5 серій вимірювань, подібних наведеним на рис. 2 та 3.

### Результати та обговорення

Обробку  $\gamma$ -спектрів проводили за програмою WinSpectrum [5]. Щоб виключити можливі впливи домішкових радіонуклідів, спектри були проаналізовані також за періодом напіврозпаду.

Спочатку визначили різниці енергій  $\gamma$ -ліній як зважене середнє за результатами всіх вимірювань, а потім і значення енергії  $\gamma$ -переходів. Результати вимірювань добре узгоджуються між собою. Експериментальні значення різниці енергій  $\gamma$ -ліній, енергії реперних  $\gamma$ -квантів з компіляцій [3, 6] та отримані значення енергії досліджуваних  $\gamma$ -переходів наведено в табл. 1. Тут же подано похибки вимірюваних величин, а також їхні складові.

Таблиця 1. Поміряні значення різниць енергій  $\gamma$ -ліній, енергії реперних  $\gamma$ -квантів та отримані значення енергії досліджуваних  $\gamma$ -переходів із розпаду  $^{122}\text{Sb}$

Вимірювана різниця енергій $\gamma$ -ліній	Значення різниці енергій, еВ	Енергія реперного $\gamma$ -кванта, еВ	Енергія шуканого $\gamma$ -кванта, еВ	Похибки визначення енергії $\gamma$ -переходу, еВ			
				статистична	калібровка	енергії репера	сумарна
$\gamma 603(^{124}\text{Sb}) - \gamma 564(^{122}\text{Sb})$	38622,1	602726,0	564103,9	10,3	1,9	2,3	10,7
$\gamma 723(^{124}\text{Sb}) - \gamma 693(^{122}\text{Sb})$	30014,6	722782,0	692767,4	6,6	1,5	3,0	7,4
$\gamma 1141(^{122}\text{Sb}) - \gamma 1045(^{124}\text{Sb})$	95411,7	1045125,0	1140536,7	30,3	4,8	4,0	30,9
$\gamma 1326(^{124}\text{Sb}) - \gamma 1257(^{122}\text{Sb})$	68596,9	1325504,0	1256907,1	36,1	3,4	4,0	36,5

В експерименті міряють енергії  $\gamma$ -променів. Щоб перейти до енергій переходів, які нас цікавлять, необхідно врахувати енергію ядра віддачі при випромінюванні  $\gamma$ -кванта [7].

Переходи  $\gamma 564$  та  $\gamma 693$  кеВ в  $^{122}\text{Te}$  є каскадними (див. рис. 1). Нами поміряна також енергія прямого переходу  $\gamma 1257$  кеВ. Для розрахунку енергії рівнів ми склали систему лінійних рів-

нянь, скориставшись правилом Рітца для каскадних переходів ( $E_1 + E_2 = E_3$ , де  $E_3$  – енергія прямого переходу між крайніми рівнями). У результаті отримали систему неточних рівнянь різної ваги [8], розв’язками якої і були енергії збуджених станів  $^{122}\text{Te}$ .

При відомих енергіях рівнів  $^{122}\text{Te}$  нескладно

розрахувати й енергії  $\gamma$ -переходів між ними. Так ми отримуємо узгоджені між собою дані, позбавлені систематичних похибок вимірювань. Результати розрахунків спільно зі зваженими середніми значеннями з компіляції [1] представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Уточнені значення енергії рівнів  $^{122}\text{Sn}$  і  $^{122}\text{Te}$  та  $\gamma$ -променів у розпаді  $^{122}\text{Sb}$

Наші дані		Компіляція [1]	
Енергія, еВ		Енергія, еВ	
рівнів	$\gamma$ -променів	рівнів	$\gamma$ -променів
$^{122}\text{Sn}$			
1140542 $\pm$ 31	1140537 $\pm$ 31	1140510 $\pm$ 30	1140520 $\pm$ 40
$^{122}\text{Te}$			
564108 $\pm$ 6	564107 $\pm$ 6	564094 $\pm$ 16	564130 $\pm$ 21
1256879 $\pm$ 7	692769 $\pm$ 10	1256953 $\pm$ 16	692770 $\pm$ 30
	1256872 $\pm$ 7		1256890 $\pm$ 20

Отримані значення енергії  $\gamma$ -променів, що супроводжують розпад  $^{122}\text{Sb}$ , добре узгоджуються з даними інших експериментальних робіт та перевершують їх по точності. Відзначимо також, що енергія найбільш інтенсивного переходу  $\gamma$ 1257 кеВ визначена нами з похибкою кращою за  $1 \cdot 10^{-5}$ . 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 нормалі четвертого порядку.

Наведене в компіляції [1] значення енергії другого збудженого рівня 2<sup>+</sup> у  $^{122}\text{Te}$  відрізняється від

нашого на чотири середньоквадратичні похибки, у той час як енергії каскадних переходів та енергія прямого переходу узгоджуються дуже добре. Енергії рівнів  $^{122}\text{Te}$  в [1] є середнім зваженим усіх доступних експериментальних даних, отриманих при вивченні  $\beta^-$ -розпаду  $^{122}\text{Sb}$ , електронного захвату  $^{122}\text{I}$ , реакцій із швидкими нейтронами  $^{122}\text{Te}(n, n'\gamma)$  та зарядженими частинками  $^{116}\text{Cd}(^9\text{Be}, 3n\gamma)$  і  $^{120}\text{Sn}(\alpha, 2n\gamma)$ . На нашу думку, величина похибки енергії другого збудженого рівня 2<sup>+</sup>, отримана внаслідок такої процедури, виявилася заниженою, тому й маємо розходження.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Tamura T.* Nuclear Data Sheets for A = 122 // Nucl. Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 455 - 632.
2. *Сергиенко В.А., Днепровский И.С., Катыхин Г.С.* Исследование распада  $^{122}\text{Sb}$  // Программа и тезисы докладов XXV Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ленинград, 28 - 31 января 1975 г.). - Л.: Наука, 1975. - С. 85 - 87.
3. *Helmer R.G., Van der Leun C.* Recommended standards for  $\gamma$ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. - 2000. - Vol. 450. - P. 35 - 70.
4. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* Анализ погрешностей измерений энергии гамма-лучей на полупроводниковых спектрометрах // Ядерная физика та енергетика. - 2007. - № 2(20). - С. 121 - 125.
5. *Хоменков В.П.* Дослідження атомно-ядерних ефектів у процесі внутрішньої конверсії гамма-променів: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / ІЯД. - К., 2003. - 19 с.
6. *Bé M.-M., Chechev V.P.* Recommended standards for gamma ray intensities // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. - 2013. - Vol. 728. - P. 157 - 172.
7. *Джелепов Б.С., Шестопалова С.А.* Ядерно-спектроскопические нормалі. - М.: Атомиздат, 1980. - 232 с.
8. *Лашко А.П., Лашко Т.Н.* Высокоточные измерения энергии ядерных состояний, возбуждающихся в радиоактивном распаде // Ядерная физика та енергетика. - 2006. - № 2(18). - С. 131 - 134.

А. П. Лашко, Т. Н. Лашко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

#### ЭНЕРГИИ ПЕРВЫХ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ 2<sup>+</sup> В $^{122}\text{Sn}$ И $^{122}\text{Te}$

На  $\gamma$ -спектрометре выполнены прецизионные измерения энергии наиболее интенсивных  $\gamma$ -переходов из распада  $^{122}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 2,72$  сут). На основании этих данных с высокой точностью определены энергии первых возбужденных состояний и разряжающих их  $\gamma$ -переходов в  $^{122}\text{Sn}$  и  $^{122}\text{Te}$ .

Ключевые слова: радиоактивность,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $\gamma$ -спектры, HPGe-детекторы, энергии  $\gamma$ -лучей, энергии уровней.

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

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**ENERGIES OF THE FIRST EXCITED  $2^+$  STATES IN  $^{122}\text{Sn}$  AND  $^{122}\text{Te}$**

High-precision energy measurements of the most intense  $\gamma$ -transitions from the decay of  $^{122}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 2,72$  days) have been performed with a  $\gamma$ -spectrometer. Using this data, the energies of the first excited states and corresponding deexciting  $\gamma$ -rays in  $^{122}\text{Sn}$  and  $^{122}\text{Te}$  were determined with precision up to a few electron volts.

*Keywords:* radioactivity,  $^{122}\text{Sb}$ ,  $\gamma$ -spectra, HPGe-detectors, measurements  $E(\gamma)$ , energy of levels.

REFERENCES

1. *Tamura T.* Nuclear Data Sheets for  $A = 122$  // Nucl. Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 455 - 632.
2. *Sergienko V.A., Dneprovskij I.S., Katykhin G.S.* Research of  $^{122}\text{Sb}$  decay // Program and Abstracts of the XXV Conf. on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure (Leningrad, 28 - 31 Jan. 1975). - Leningrad: Nauka, 1975. - P. 85 - 87. (Rus)
3. *Helmer R.G., Van der Leun C.* Recommended standards for  $\gamma$ -ray energy calibration (1999) // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. - 2000. - Vol. 450. - P. 35 - 70.
4. *Lashko A.P., Lashko T.N.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2007. - No. 2(20). - P. 121 - 125. (Rus)
5. *Khomenkov V.P.* Investigation of atomic and nuclear effects in the internal conversion of gamma rays: Abstract of thesis ... Candidate of Sciences in Physics and Mathematics / INR. - Kyiv, 2003. - 19 p. (Ukr)
6. *Bé M.-M., Chechev V.P.* Recommended standards for gamma ray intensities // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. - 2013. - Vol. 728. - P. 157 - 172.
7. *Dzhelepov B.S., Shestopalova S.A.* Atomic spectroscopy normal. - Moskva: Atomizdat, 1980. - 232 p. (Rus)
8. *Lashko A.P., Lashko T.N.* // Nucl. Phys. At. Energy. - 2006. - No. 2(18). - P. 131 - 134. (Rus)

Надійшла 05.11.2015

Received 05.11.2015