

# ПРО ЕНЕРГЕТИЧНУ ЗАЛЕЖНІСТЬ НЕЗАЛЕЖНОГО ВИХОДУ $^{97}\text{Nb}$ ПРИ ФОТОПОДІЛІ ТОРІЮ

М.В. Водячук, О.Г. Окунєв, А.П. Осипенко, В.А. Пилипченко,  
О.М. Фрадкін, І.В. Хіміч, О.В. Яценко

Ужгородський національний університет, кафедра ядерної фізики  
88000, Ужгород, вул. Капітульна, 9а  
e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

За допомогою гамма-спектрометричного методу виміряно відношення незалежного виходу  $^{97}\text{Nb}$  до кумулятивного виходу  $^{134}\text{Te}$  при фотоподілі ядра  $^{232}\text{Th}$  у діапазоні максимальних енергій гальмівних  $\gamma$ -квантів від 7,3 до 7,7 МеВ. Виявлено значне зростання цього відношення при  $E_{\gamma\text{max}}=7,5$  МеВ. Це підтверджує припущення про існування кластерної структури в ядрі, яке зазнає поділу.

## Вступ

Енергетичні залежності виходів уламків фотоподілу актинідних ядер у припороговій області енергій  $\gamma$ -квантів містять цінну інформацію про особливості перебігу реакції поділу. Зокрема, у кривій виходу фотоподілу  $^{232}\text{Th}$  спостерігається резонансоподібна структура у припороговій області енергій, тісно пов'язана з механізмом реакції [1]. У роботі [2] одержано докази існування резонансної структури енергетичних залежностей кумулятивних виходів ряду уламків. Одержані значення резонансних енергій корелювали з надлишковим над магічним числом нейтронів у досліджуваному уламкові.

У роботі [2] висловлено припущення, що незалежні виходи мають бути чутливішими до резонансних ефектів, ніж кумулятивні. З метою перевірки цього припущення у даній роботі проведено вимірювання незалежного виходу уламка  $^{97}\text{Nb}$  на мікротроні М-10 у діапазоні енергій гальмівних гамма-квантів від 7,3 до 7,7 МеВ. Кумулятивний вихід  $^{97}\text{Nb}$  проявляє п'ятикратне зростання при максимальній енергії гальмівних  $\gamma$ -квантів  $E_{\gamma\text{max}}=7,4$  МеВ (рис. 1, пунктир). Характер розпаду уламків ізобарного ланцюжка з масовим числом  $A = 97$  (рис. 1) дозволяє визначення незалежного виходу ніобію за інтенсивностями випромінювання  $\gamma$ -ліній 657 кеВ ( $^{97}\text{Nb}$ ) та 743 кеВ ( $^{97}\text{Zr}$ ).

Як видно з схеми розпадів, час життя

досліджуваних уламків достатній для проведення вимірювання інтенсивності ліній. Ядро  $^{97}\text{Zr}$  з періодом напіврозпаду 17 годин розпадається в ізомерний стан  $^{97\text{m}}\text{Nb}$  (коефіцієнт розгалуження 0,945) та прямо в основний стан  $^{97}\text{Nb}$  (0,055). Визначена інтенсивність лінії 743 кеВ дає можливість вирахувати з загальної інтенсивності лінії ніобію вклад від розпаду цирконію (попередника) та визначити ймовірність утворення ніобію (в основному та ізомерному станах) безпосередньо при поділі ядра торію.

## Методика визначення незалежного виходу

Як видно з рис. 1, час життя попередників  $^{97}\text{Zr}$  в ізобарному ланцюгу значно менший за час життя ядер  $^{97}\text{Zr}$ , тому накопичення ядер  $^{97}\text{Zr}$  можна описувати так, ніби вони утворюються у момент поділу ядер. При цьому значення суми імпульсів у відповідному максимумі  $S_p$ , зареєстроване в інтервалі часу між  $t_1$  і  $t_2$  ( $t=0$  відповідає моменту припинення опромінення) виразиться формулою:

$$S_p = n_f Y_p \varepsilon_p \omega_p \cdot \frac{1}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p t_{op}}) \cdot (e^{-\lambda_p t_1} - e^{-\lambda_p t_2}). \quad (1)$$

Тут  $n_f$  – число актів поділу за 1 сек.,  $Y_p$  – кумулятивний вихід попередника,  $\varepsilon_p$  і  $\omega_p$  – відповідно ефективність реєстрації  $\gamma$ -квантів  $^{97}\text{Zr}$  та ефективність

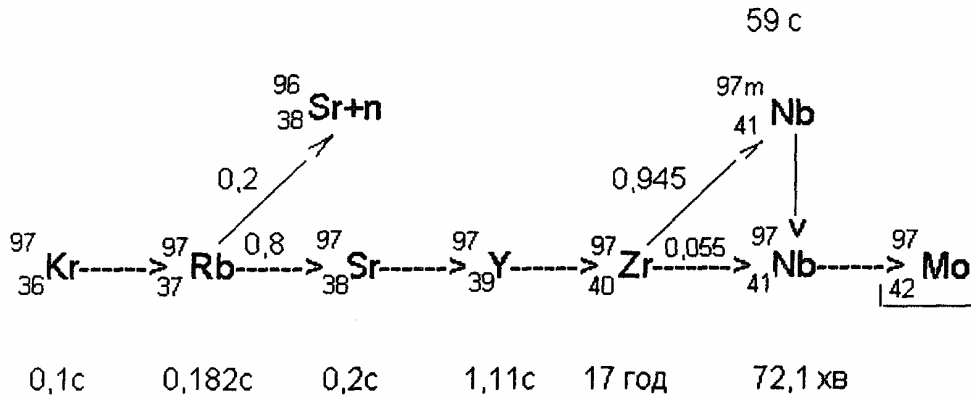


Рис. 1. Ізобарний ланцюг розпаду уламків поділу з масовим числом 97.

Табл. 1. Орієнтовні основні вклади уламків в максимуми, близько 657 і 743 кеВ.  
а) лінія 657 кеВ:

Уламок: Час охладження	Rb-89 $T_{\text{ноп}}=3.26$ хв $T=15.6$ хв	Sr-91 $T_{\text{ноп}}=1.13$ хв $T=568.8$ хв	Nb-97 $T_{\text{ноп}}=1021$ хв $T=72.1$ хв	Ce-143 $T_{\text{ноп}}=14.26$ хв $T=1980$ хв	Сума імпульсів у максимумі
30	0,318	0,173	0,484	0,0254	262
60	0,096	0,191	0,683	0,0298	228
90	0,025	0,182	0,764	0,0293	232
120	0,006	0,169	0,796	0,028	240

б) лінія 743 кеВ:

20	0,19	0,482	0,31	0,0060	250
80	0,214	0,56	0,204	0,0066	207
140	0,232	0,625	0,118	0,0068	178
250	0,24	0,69	0,04	0,0050	150

Примітка: Дані таблиці відповідають часові вимірювання 30 хв. і часу опромінення 60 хв.

накопичення ядер цирконію на колекторі.  $^{97}\text{Nb}$  утворюється як у момент поділу ядра, так і при розпаді  $^{97}\text{Zr}$  переважно через ізомерний стан  $^{97\text{m}}\text{Nb}$ . Період напіврозпаду цього стану значно менший за відповідний період основного стану, тому накопичення  $^{97}\text{Nb}$  можна розглядати, як простий розпад цирконію в основний стан ніобію.

При цьому число ядер  $^{97}\text{Nb}$  на колекторі на момент часу  $t$  дається формулою:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + \frac{\lambda_p}{\lambda - \lambda_p} \cdot N_{p0} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda t}), \quad (2)$$

де  $N_{p0} = n_f Y_p \omega_p \cdot \frac{1}{\lambda_p} (1 - e^{-\lambda_p t_{op}})$ ,

а  $N_0 = n_f Y \omega \cdot \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{op}})$ .

Тут  $\lambda_p$  і  $\lambda$  – сталі розпаду попередника та

досліджуваного ізотопу,  $t_{op}$  – час опромінення.  $Y$  – шуканий незалежний вихід,  $\omega$  – ефективність накопичення ядер ніобію в колекторі (припускається  $\omega \approx \omega_p$ ). Сума в максимумі досліджуваного ізотопу, виміряна в інтервалі від  $t_1$  до  $t_2$  одержується як

$$S = \varepsilon \int_{t_1}^{t_2} N(t) dt. \quad (3)$$

При заданому кумулятивному виході попередника незалежний вихід досліджуваного уламка знаходиться шляхом розв'язання системи рівнянь (1-3). Експериментально визначались інтенсивності  $\gamma$ -ліній з енергіями 657 та 743 кеВ. Методика проведення вимірів аналогічна процедурам роботи [2]. Стопка мішеней окису торію упереміж з алюмінієвими колекто-

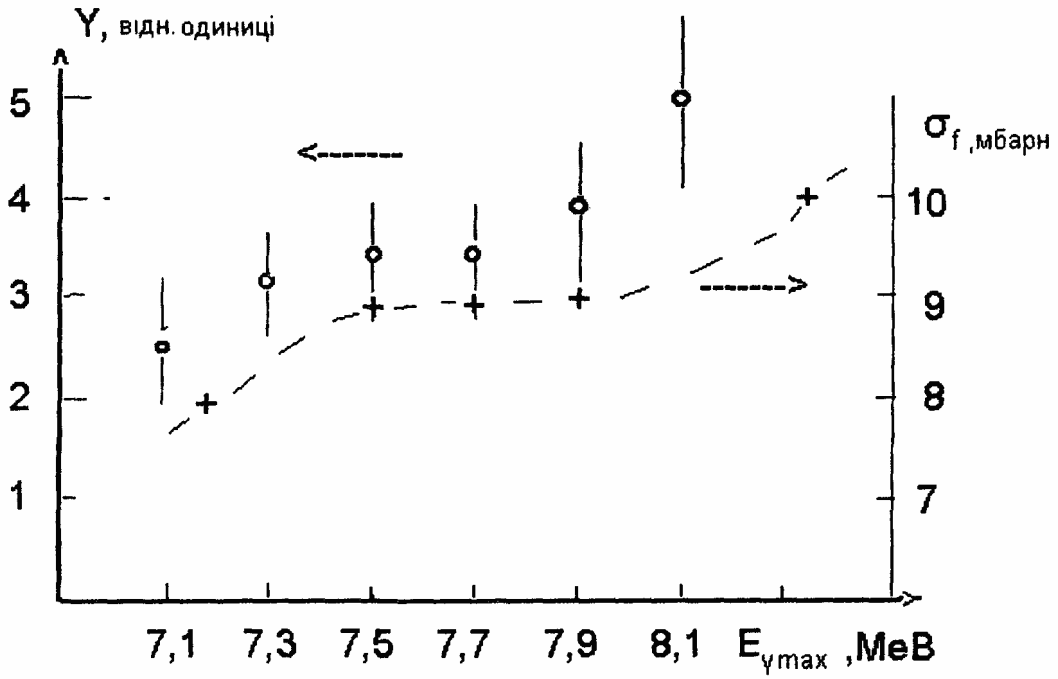


Рис. 2. Енергетична залежність кумулятивного виходу уламка  $^{134}\text{Te}$  (o) при фотоподілі  $^{232}\text{Th}$  та перерізу фотоподілу  $^{232}\text{Th}$  (+, ліва шкала).

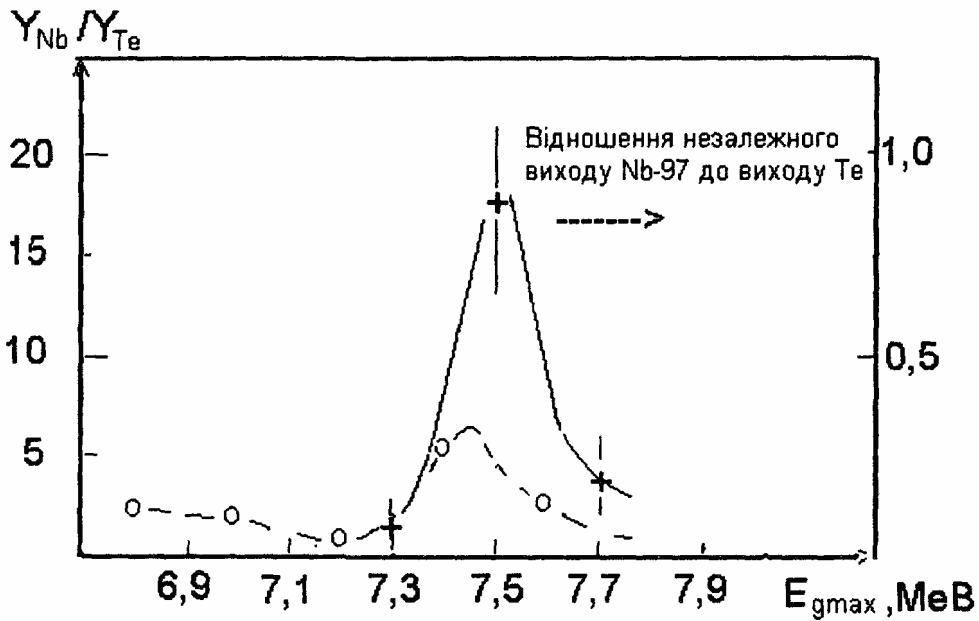


Рис. 3. Залежність відношення суми незалежних виходів  $^{97}\text{Nb}$  та  $^{97\text{m}}\text{Nb}$  до кумулятивного виходу  $^{134}\text{Te}$  від максимальної енергії гальмівного пучка.

рами (фольга товщиною  $4,8 \text{ мг/см}^2$ ) опромінювалась у пучку  $\gamma$ -квантів мікротрона М-10 протягом 35-60 хв.

$\gamma$ -спектри вимірювались напівпровідниковим спектрометром з роздільністю близько 6 кеВ. Число імпульсів у максимумі визначалось як різниця суми імпульсів у каналах, охоплених максимумом, і суми імпульсів фону у тих же каналах. Значення фону визначалось за числом імпульсів у 5-7 каналах поза максимумом. Крім досліджуваних ізотопів, у згадані максимуми можуть давати вклад інші нукліди (табл. 1).

Визначення вкладу  $^{97}\text{Nb}$  і  $^{97}\text{Zr}$  здійснювалось шляхом розкладу часової залежності інтенсивності максимумів на компоненти [2]. Результати вимірювань подаються у вигляді відношень виходів досліджуваних ліній до кумулятивного виходу лінії 767 кеВ, яка випромінюється  $^{134}\text{Te}$ . Вимірювана залежність виходу  $^{134}\text{Te}$  від  $E_{\gamma\text{max}}$  у цьому діапазоні енергій має плавний характер і корелює з залежністю перерізу реакції поділу від енергії (рис. 2). Відношення виходів менш чутливе до неточності визначення дози гальмівного пучка при опроміненні, ніж самі виходи.

#### Результати та аналіз вимірювань

На рис. 3 представлені експериментальні відношення незалежного виходу  $^{97}\text{Nb}$  до виходу  $^{134}\text{Te}$  при енергіях  $E_{\gamma\text{max}}=7,3-7,7 \text{ MeV}$  (точки у вигляді хрестиків, шкала відношень справа). Там же наведені аналогічні дані для кумулятивного виходу  $^{97}\text{Nb}$  з роботи [1] (кружки, шкала відношень зліва). Можна бачити, що в обох залежностях спостерігається максимум практично при однаковому значенні енергії. Це вказує на те, що максимум відношення кумулятивного виходу зумовлений саме поведінкою незалежного виходу  $^{97}\text{Nb}$ .

Збільшення відношення у максимумі для незалежного виходу в кілька разів більше, ніж для кумулятивного, тобто, як і передбачалося в [1], незалежні виходи чу-

тливіші до резонансних ефектів при поділі.

Ширина максимуму відповідає резонансному утворенню з середнім часом життя порядку  $10^{-19}-10^{-20}$  сек. Такий час життя не суперечить припущенню, що взаємодія резонуючої системи нуклонів з гаммаквантом має місце на початковій стадії поділу (стадії деформування ядра), у якій час життя ядра складає приблизно  $10^{-16}-10^{-17}$  сек. [3]. Це у певній мірі суперечить результатам роботи [1], у якій одержано однакову структуру кривих збудження реакції поділу ядер торію для різних входних каналів, що може бути пояснено переважанням каналів реакції з утворенням складеного ядра. Результати нашої роботи можна також розглядати, як підтвердження більшої чутливості характеристик окремих каналів поділу до особливостей перебігу реакції поділу порівняно з інтегральним перерізом цього процесу. Звернемо увагу, що автори роботи [4], успішно описують процес злиття важких іонів з наступним поділом, не використовуючи концепції формування складеного ядра.

Відношення незалежного виходу ніобію до кумулятивного виходу  $^{97}\text{Zr}$  при  $E_{\gamma\text{max}}=7,3 \text{ MeV}$  узгоджується з розрахованим за формулою розподілу ізобарних уламків поділу за їх зарядом [3]. Зростання відношення при  $E_{\gamma\text{max}}=7,5 \text{ MeV}$  проявляє механізм процесу, пов'язаному з формуванням у ядрі нуклонних кластерів. Таким чином результати даної роботи підтверджують наявність резонансної структури в енергетичній залежності виходів конкретних уламків, яка більш чітко виражається в при вимірюванні незалежних виходів.

Це вказує на доцільність зусиль для систематичних вимірів незалежних виходів уламків поблизу ефективного порогу поділу.

1. Солдатов А.С., Смиренин Г.Н. // Ядерная физика. - 1995.- 58, № 2.- С.224.
2. Бохінюк В.С., Осипенко А.П., Пилипченко В.А., Пилипченко Ю.В., Хіміч І.В. // Науковий вісник Ужг. унів. Сер. фізика.- 1998.- №3.- С.30.
3. Гангрский Ю.П., Далхсурэн Б., Марков Б.Н. Осколки деления ядер.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 136 с.
4. Косенко Г.И., Иванюк Ф.А., Пашкевич В.В. // Ядерная физика.- 2002.- 65, №9.- С.1629.

## ABOUT ENERGY DEPENDENCE OF $^{97}\text{Nb}$ INDEPENDENT YIELD OF $^{232}\text{Th}$ PHOTOFISSION

**M.V. Vodyanchuk, A.G. Okunev, A.P. Osipenko, V.A. Pylypchenko,  
O.M. Fradkin, I.V. Khimich, A.V. Yazenko**

Uzhgorod National University, Department of Nuclear Physics  
9a, Kapitulna str., Uzhgorod 88000  
e-mail: nphys@univ.uzhgorod.ua

The ratio of the  $^{97}\text{Nb}$  independent yield to the  $^{134}\text{Te}$  cumulative yield of the  $^{232}\text{Th}$  photofission at maximal energy of bremsstrahlung from 7,3 to 7,7 MeV by  $\gamma$ -spectroscopy method was measured. The strong increase of measured ratio at  $E_{\gamma\text{max}}=7,5$  MeV was found. This confirm the assumption, that there is a nucleon cluster structure in nucleus, which the near threshold photofission undergo.