

## РОЗПОДІЛ КАНАЛІВ РЕАКЦІЇ ПОДІЛУ U-233 ТЕПЛОВИМИ НЕЙТРОНАМИ

*У статті запропоновано методуку знаходження кількості вихідних каналів реакції поділу ядер U-233 тепловими нейтронами, в яких народжуються найімовірніші ізотопи і/або ізобари-уламки цієї реакції.*

*Досліджено кореляцію ізобаричного розподілу каналів із повним виходом уламків-ізобар.*

Реакція поділу важких ядер тепловими нейтронами сьогодні є основним джерелом енергії і, разом з тим, основним потенційним чинником екологічної небезпеки. Остання зумовлена високою радіоактивністю та хімічною токсичністю продуктів цієї реакції – уламків поділу важких ядер. Цим, зокрема, пояснюється **актуальність** вивчення фізико-хімічних властивостей цих уламків і їх розподілу за зарядовим  $Z$  та масовим  $A$  числами. Це дозволяє передбачити ізотопний та ізобарний інтервали, у які вкладаються, відповідно, уламки-ізотопи та уламки-ізобари, відносну кількість тих чи інших ізотопів (ізобар) серед продуктів реакції розпаду, зміну ізотопного складу з плином часу через бета-розпад уламків тощо. Все це має також незаперечний методичний інтерес: повноцінна підготовка сучасних учителів-фізиків неможлива без оволодіння ними ґрунтовними знаннями, що стосуються особливостей перебігу реакції поділу та всього, що супроводжує цю реакцію.

Однією з особливостей реакції поділу важких ядер є асиметрія уламків-продуктів реакції за масовим і зарядовим числами. Для найтипівіших ядер, що діляться під дією теплових нейтронів, а саме: U-235, Pu-239, U-233, розподіли уламків за масовими числами відомі – це так звані повні виходи продуктів поділу згаданих ядер в залежності від масового числа [1: 1094]. Ці розподіли мають характерний вид із двома максимумами і мінімумом між ними. Наприклад, для U-233 максимальні виходи мають ізобари з масовими числами, близькими до  $A_1 = 92$  і  $A_2 = 138$ , а мінімум – близько  $A_{\min} = 115$ .

Нагадаємо, що повний вихід – це сума незалежного виходу продуктів, що з'являються безпосередньо в момент розпаду, і тієї частки уламків, які з часом народжуються при наступних бета-перетвореннях нестабільних уламків. Оскільки в цих перетвореннях масові числа уламків не змінюються, то повний вихід уламків-ізобар не залежить від часу. Тому розподіл уламків за масами можна встановити в будь-який момент часу після припинення реакції поділу.

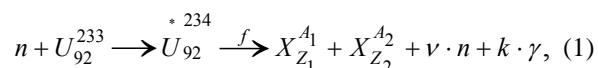
Інша ситуація з розподілом уламків-ізотопів, тобто за зарядовими числами. Незалежний розподіл уламків-ізотопів не можна встановити експериментально, оскільки він залежить від часу: уламки, що з'являються під час поділу ядра, перевантажені нейтронами, а тому відразу зазнають бета-електронних розпадів, започатковуючи своєрідні ланцюжки генетично пов'язаних уламків-ізобар, зарядові числа в яких зростають на одиницю при кожному розпаді. Завершуються такі ланцюжки стабільною ізобарою, що належить новому елементу, який зміщений у таблиці Менделєєва відносно початкового на число ланок у цьому ланцюжку.

Теоретично задачу про розподіл уламків за зарядовим числом у принципі можна було б розв'язати, якби були відомі або якимось чином змодельовані ймовірності появи кожного нукліда-уламка. Таким є підхід, що ґрунтується на використанні двовимірного (по зарядовому числу  $Z$  і числу нейтронів  $N$ ) розподілу Гауса з емпірично підібраними параметрами [2: 4].

Проте можна встановити деякі особливості розподілу уламків, а саме: положення його максимумів і мінімуму та інтервал зарядових чисел, на який поширюється цей розподіл, встановивши розподіл вихідних каналів реакції поділу за зарядовим числом і припустивши існування кореляції між ним і незалежним виходом нуклідів-уламків. Для випадків U-235 і Pu-239 відповідна кореляція підтверджується [3: 271].

**Метою** нашого дослідження є встановлення розподілу вихідних каналів реакції поділу ядер U-233 тепловими нейтронами за зарядовими числами. Це дозволить якісно передбачити ізотопний та ізобарний склади найімовірніших нуклідів-уламків, що з'являються безпосередньо при поділі, а також спрогнозувати ймовірне відносне розповсюдження ізотопів через деякий час після припинення реакції поділу.

Нагадаємо, що реакція поділу ядер U-233 тепловими нейтронами відбувається через збуджене проміжне ядро U-234 за такою схемою:



де  $X_{Z_1}^{A_1}, X_{Z_2}^{A_2}$  – уламки поділу проміжного ядра U-234,  $\nu$  – число миттєвих вторинних нейтронів  $n$ ,  $k$  – число миттєвих  $\gamma$ -квантів. При цьому виконуються закони збереження заряду і числа нуклонів:

$$Z_1 + Z_2 = 92, \quad A_1 + A_2 + \nu = 234. \quad (2)$$

Крім того, існує експериментально встановлене обмеження на число вторинних нейтронів  $\nu$ . У випадку поділу ядер U-235 воно не може бути більше п'яти:  $\nu \leq 5$ , а середнє число вторинних нейтронів при цьому рівне  $\nu = 2,47$  [4: 484]. Враховуючи той факт, що середнє число нейтронів при поділі ядер U-233 близьке за величиною до попереднього, а саме:  $\langle \nu \rangle = 2,48$ , [1: 1092], можна припустити, що і у цьому випадку існує таке ж обмеження, тобто ймовірними каналами поділу ядер U-234 є ті, при яких число вторинних нейтронів не перевершує п'яти:

$$\nu_{U-234} = 0, 1, 2, 3, 4, 5. \quad (3)$$

Уламки-нукліди із зарядовими числами  $Z_1$ , що змінюються від деякого  $Z_{1min}$  до 46, називають легкими, а уламки із зарядовими числами  $Z_2$  від 46 до деякого  $Z_{2max}=92-Z_{1min}$  – важкими. Відповідно, масові числа уламків мають змінюватися у певних інтервалах  $[A_{1min}, A_{1max}]$  та  $[A_{2min}, A_{2max}]$ .

Серед уламків реакції поділу ядер  $U^{233}$  тепловими нейтронами виявлені уламки-ізобари із масовими числами, що змінюються в межах  $70 \leq A \leq 160$  [1: 6]. Враховуючи те, що для елементів середини таблиці Менделєєва відношення  $(A/Z)$  змінюється, приблизно, у межах від 2,4 (для легких уламків) до 2,5 (для важких), можна очікувати, що зарядові числа ймовірних уламків будуть перебувати у межах  $28 \leq Z \leq 64$ . Іншими словами, серед продуктів реакції поділу  $U^{233}$  тепловими нейтронами можна очікувати елементи від Нікелю  $Ni_{28}^{A_1}$  до Гадолінію  $Gd_{64}^{A_2}$  включно. Наступною парою елементів будуть Мідь  $Cu_{29}^{A_1}$  та Європій  $Eu_{63}^{A_2}$ , і так аж до пари уламків Паладію  $Pa_{46}^{A_1} - Pa_{46}^{A_2}$ . Сума зарядових чисел у кожній із пар у відповідності з законом збереження заряду рівна 92, а масові числа цих пар зв'язані такими співвідношеннями:

$$A_{1min} + A_{2max} + v_{max} = 234, A_{1max} + A_{2min} + v_{max} = 234. (4)$$

У цих співвідношеннях  $v_{max}=5$ , а максимальні значення масових чисел уламків  $A_{1max}, A_{2max}$  наведені у відповідних таблицях [1: 999-1020]. Знаючи останні, можна знайти найменші масові числа можливих уламків, тобто ті, які відповідають максимальній кількості миттєвих вторинних нейтронів ( $v_{max} = 5$ ):

$$A_{1min} = 229 - A_{2max}, A_{2min} = 229 - A_{1max} (5)$$

Так, для пари **Нікель-Гадоліній** знаходимо:  $A_{1max} = 67, A_{2max} = 162$ . Тоді згідно з (5)  $A_{1min} = 67, A_{2min} = 162$ , тобто у цьому випадку може з'явитися лише одна пара нуклідів-уламків  $Ni^{67} - Gd^{162}$  (рис. 1), що супроводжується п'ятьма миттєвими нейтронами.

Знайдемо для наступної пари елементів **Мідь – Європій** число можливих пар уламків (рис. 2). Із таблиць фізичних величин одержуємо:  $A_{1max}=70, A_{2max}=160$ , сума цих чисел –  $A_{1max} + A_{2max} = 230$ , а відповідні мінімальні масові числа –  $A_{1min}=69, A_{2min}=159$ . Тому, в принципі, можуть народжуватися два ізотопи міді  $Cu_{29}^{69}, Cu_{29}^{70}$  і стільки ж ізотопів Європію  $Eu_{63}^{159}, Eu_{63}^{160}$ . Їх можна згрупувати в чотири пари:  $Cu^{69}-Eu^{159}, Cu^{69}-Eu^{160}, Cu^{70}-Eu^{159}, Cu^{70}-Eu^{160}$ . Щоб встановити, які з цих пар імовірні, треба врахувати обмеження на число вторинних нейтронів:

$$v_{min} \leq v = (234 - A_1 - A_2) \leq 5. (6)$$

Тобто, масові числа уламків повинні відповідати умові:

$$A_1 + A_2 \geq 229. (7)$$

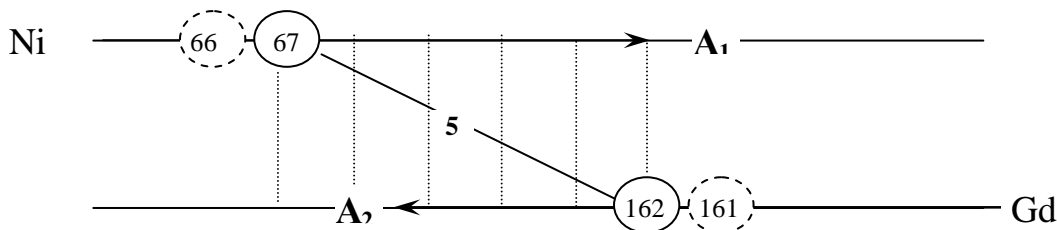
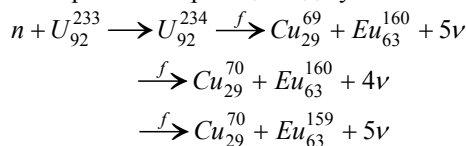


Рис. 1.

Легко побачити, що перша пара уламків не відповідає цій умові ( $69 + 159 = 228$ ), а тому поява цієї пари мало імовірна, бо вона мала б супроводжуватися шістьма вторинними нейтронами ( $v = 234 - 69 - 159 = 6$ ). Решта три пари можливі. Дійсно, появу другої та третьої пари супроводжують п'ять нейтронів ( $v = 234 - 69 - 160 = 234 - 70 - 159 = 5$ ), а появу четвертої пари – чотири ( $v = 234 - 70 - 160 = 4$ ), тобто число миттєвих нейтронів може бути таким:  $v = 4; 5$ . Отже, можливі такі три канали реакції поділу:



Встановимо формулу, за якою можна знайти кількість каналів, у яких народжуються пари ізотопів

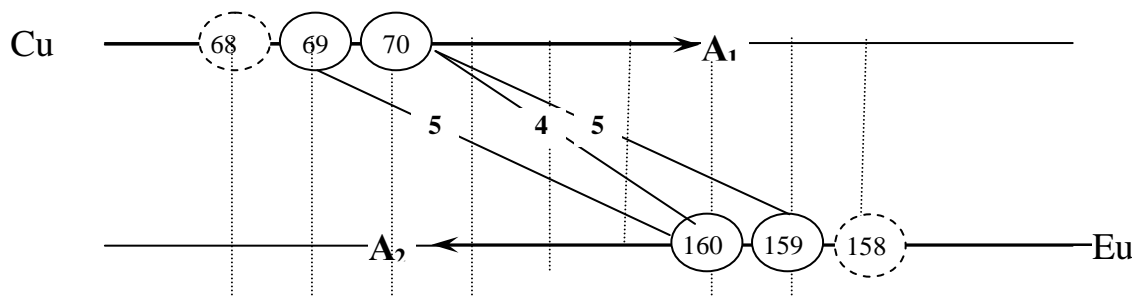


Рис. 2.

$(X_{Z_1}^{A_1} - X_{Z_2}^{A_2})$  з фіксованими зарядовими числами  $Z_1=const$ ,  $Z_2=92-Z_1=const$ , але різними масовими числами легшого  $A_1 = var$  і важчого  $A_2 = var$  ізотопів-уламків. При цьому обмежимося спочатку випадком, коли  $A_{1max} + A_{2max} \leq 234$ . Тоді число вторинних нейтронів буде змінюватися в діапазоні  $v_{min} \leq v \leq 5$ , де, за формулою (6),  $v_{min} = 234 - A_{1max} - A_{2max}$  (у попередньому прикладі  $v_{min} = 234 - 70 - 160 = 4$ ). У випадку, коли  $A_{1max} + A_{2max} = 234$ , уламки народжуються без вторинних нейтронів ( $v_{min} = 0$ ) Зауважимо ще таке. Так як зарядові числа досліджуваної нами групи уламків не міняються, то пари останніх ми будемо позначати лише відповідними масовими числами. Поряд будемо вказувати число миттєвих нейтронів. Так, у випадку, коли  $A_{1max} + A_{2max} = 231$ ;  $v_{min} = 3$ ;  $v = 3; 4; 5$ , одержимо канали, у яких з'являються такі пари уламків:

$$\left. \begin{aligned} [A_{1max}] - [A_{2max}] &\Leftrightarrow v = 3 \\ [A_{1max}] - [A_{2max} - 1] &\Leftrightarrow v = 4 \\ [A_{1max}] - [A_{2max} - 2] &\Leftrightarrow v = 5 \end{aligned} \right\} 3 \text{ канали}$$

$$\left. \begin{aligned} [A_{1max} - 1] - [A_{1max}] &\Leftrightarrow v = 4 \\ [A_{1max} - 1] - [A_{2max} - 1] &\Leftrightarrow v = 5 \end{aligned} \right\} 2 \text{ канали}$$

$$[A_{1max} - 2] - [A_{2max}] \Leftrightarrow v = 5 \quad 1 \text{ канал}$$

Тобто маємо всього  $1 + 2 + 3 = 6$  каналів.

У випадку, коли  $A_{1max} + A_{2max} = 232$ ;  $v_{min} = 2$ ;  $v = 2; 3; 4; 5$ , можлива поява таких пар уламків:

$$\left. \begin{aligned} [A_{1max}] - [A_{2max}] &\Leftrightarrow v = 2 \\ [A_{1max}] - [A_{2max} - 1] &\Leftrightarrow v = 3 \\ [A_{1max}] - [A_{2max} - 2] &\Leftrightarrow v = 4 \\ [A_{1max}] - [A_{2max} - 3] &\Leftrightarrow v = 5 \end{aligned} \right\} 4 \text{ канали}$$

$$\left. \begin{aligned} [A_{1max} - 1] - [A_{2max}] &\Leftrightarrow v = 3 \\ [A_{1max} - 1] - [A_{2max} - 1] &\Leftrightarrow v = 4 \\ [A_{1max} - 1] - [A_{2max} - 2] &\Leftrightarrow v = 5 \end{aligned} \right\} 3 \text{ канали}$$

$$\left. \begin{aligned} [A_{1max} - 2] - [A_{2max}] &\Leftrightarrow v = 4 \\ [A_{1max} - 2] - [A_{2max} - 1] &\Leftrightarrow v = 5 \end{aligned} \right\} 2 \text{ канали}$$

$$[A_{1max} - 3] - [A_{2max}] \Leftrightarrow v = 5 \quad 1 \text{ канал}$$

Тобто у цьому випадку має місце  $1 + 2 + 3 + 4 = 10$  каналів.

Аналогічно можна проаналізувати й інші випадки. З попередніх прикладів видно, що число можливих каналів реакції поділу рівне сумі натуральних чисел від 1 до  $(v_{max} + 1 - v_{min} = 6 - v_{min}) = (A_{1max} + A_{2max} - 228)$ . Тому число ізотопних пар  $[X_{Z_1}^{A_1}] - [X_{Z_2}^{A_2}]$  з фіксованими зарядовими числами, але змінними масовими, що приймають значення від  $A_{min} = 229 - A_{max}$  до  $A_{max}$ , рівне:

$$P[Z_1, Z_2] = \frac{(6 - v_{min}) + 1}{2} (6 - v_{min}) = \frac{A_{1max} + A_{2max} - 227}{2} (A_{1max} + A_{2max} - 228) \quad (8).$$

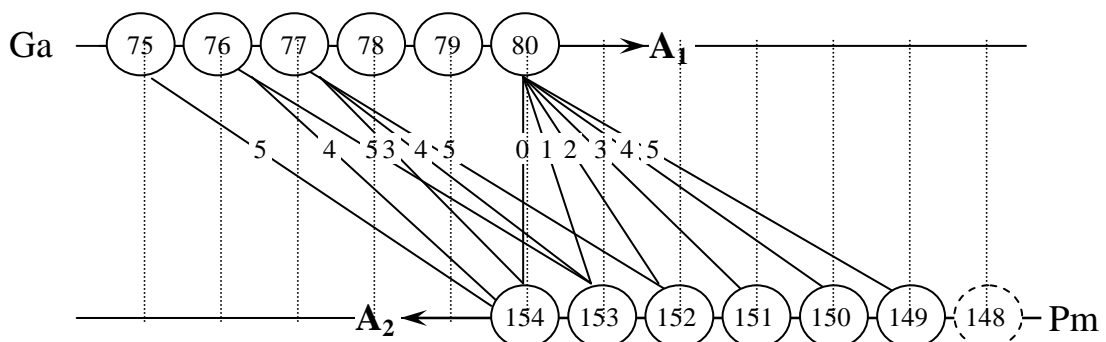


Рис. 3.

Наприклад, у випадку  $A_{1max} + A_{2max} = 234$ , який відповідає появі ізотопних пар Галій ( $A_{1max} = 80$ ) – Прометій ( $A_{2max} = 154$ ) (рис. 3), число можливих каналів буде:

$$P[Z_1, Z_2] = \frac{234 - 227}{2} (234 - 228) = 21.$$

Проте значно частіше трапляються випадки, коли  $A_{1max} + A_{2max} > 234$ . Прикладом можуть бути канали, що утворюються при розпаді проміжного ядра U-234 на пару уламків As – Pr (Арсеній – Празеодим; рис. 4).

Найважчому ізотопу легшого уламка відповідає масове число  $A_{1max} = 87$ , відповідно найважчому ізотопу важчого уламка –  $A_{2max} = 151$ . Тоді мінімальні масові числа уламків за формулою (5) будуть, відповідно,

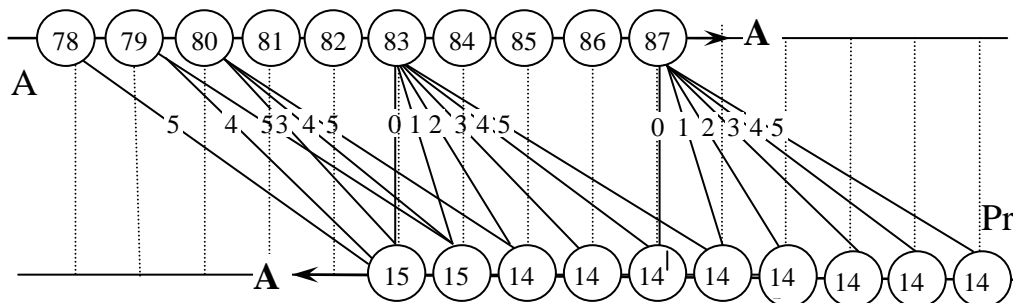


Рис. 4

$A_{1min} = 229 - 151 = 78$ , і  $A_{2min} = 229 - 87 = 142$ . Без вторинних нейтронів з'являються уламки, сума масових чисел яких рівна 234 (див. формулу (4)). Тобто такі пари уламків, у яких масові числа легших уламків змінюються від  $A_1^* = 234 - A_{2max} = 234 - 151 = 83$ , до  $A_{1max} = 87$ , а важчих, відповідно, від  $A_2^* = 234 - A_{1max} = 234 - 87 = 147$  до  $A_{2max} = 151$ . Такими парами є: ( $As^{83} - Pr^{151}$ ), ( $As^{84} - Pr^{150}$ ), ( $As^{85} - Pr^{149}$ ), ( $As^{86} - Pr^{148}$ ), ( $As^{87} - Pr^{147}$ ). Крім того, кожний із уламків цих пар може з'явитися в парі з іншими уламками, але вже в супроводі 1-го, 2-х, 3-х, 4-х або 5-и нейтронів, тобто всього в 6-х каналах.

Встановимо формулу, за якою можна підрахувати число можливих каналів у цьому випадку. Число каналів, у яких з'являються ізотопи легшого уламка з масовими числами від  $A_{1min}$  до  $A_1^*$  можна підрахувати за формулою (8), замінивши в ній  $A_{1max}$  на  $A_1^* = 234 - A_{2max}$ . При цьому одержуємо:

$$P^*(Z_1, Z_2) = ((A_1^* + A_{2max} - 227) / 2) (A_1^* + A_{2max} - 228) = ((234 - 227) / 2) (234 - 228) = 21.$$

До цієї кількості треба додати ще кількість каналів, пари уламків у яких супроводжуються вильотом будь-якого числа нейтронів, але не більшого 5-ти. Таких каналів буде, очевидно,  $6 (A_{1max} - A_1^*) = 6 (A_{1max} + A_{2max} - 234)$ . Для нашого прикладу це дає ще 24 канали:  $6 (87 + 151 - 234) = 24$ .

Отже, загальна формула, що охоплює також випадки, описані формулою (8), для підрахунку числа можливих каналів має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(Z_1, Z_2) = \frac{A_{1max} + A_{2max} - 227}{2} (A_{1max} + A_{2max} - 228), \text{ коли } A_{1max} + A_{2max} < 234, \\ = 21, \text{ коли } A_{1max} + A_{2max} = 234, \\ = 21 + 6 \cdot (A_{1max} + A_{2max} - 234), \text{ коли } A_{1max} + A_{2max} > 234. \end{array} \right. \quad (9)$$

Залишається модернізувати цю формулу для ще одного специфічного випадку, а саме: коли серед найважчих ізотопів легких або важких уламків, а інколи одночасно й у перших, й у других, відсутні ізотопи, масові числа яких попадають в інтервали, відповідно,  $[A_1^*, A_{1max}]$  і  $[A_{2max}, A_2^*]$ . Прикладом такої ситуації є поділ проміжного ядра U<sup>234</sup> на уламки ізотопної пари Селен – Церій (Se – Ce). Із таблиць знаходимо:  $A_{1max} = 91$ ,  $A_{2max} = 151$ , тобто  $A_{1max} + A_{2max} > 234$ . Нижні границі означених вище інтервалів масових чисел рівні  $A_1^* = 234 - 151 = 83$ ,  $A_2^* = 234 - 91 = 143$ , а самі інтервали, відповідно, будуть:

$$[A_1^*, A_{1max}] = 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 0, 91,$$

$$[A_{2max}, A_2^*] = 151, 0, 0, 148, 147, 146, 145, 144, 143.$$

Звідси видно, що серед легких уламків відсутній ізотоп Se<sup>90</sup>, а серед важких – два ізотопи: Ce<sup>150</sup> і Ce<sup>149</sup>. Кожен із цих ізотопів міг би з'явитися в 6-ти каналах разом із відповідним уламком-напарником. Отже, у дійсності їх з'явиться на 18 пар менше ( $6 \cdot 3 = 18$ ). Тоді у формулі (9) (третій випадок) треба зробити відповідну поправку:

$$P(Z_1, Z_2) = 21 + 6 (A_{1max} + A_{2max} - 234 - \delta). \quad (10)$$

Тут  $\delta$  – сумарна кількість відсутніх ізотопів як серед легких  $\delta_1$ , так і серед важких  $\delta_2$  уламків даної ізотопної пари:  $\delta = \delta_1 + \delta_2$ . (рис. 5). У нашому випадку  $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 1 + 2 = 3$ , а формула (10) дає:

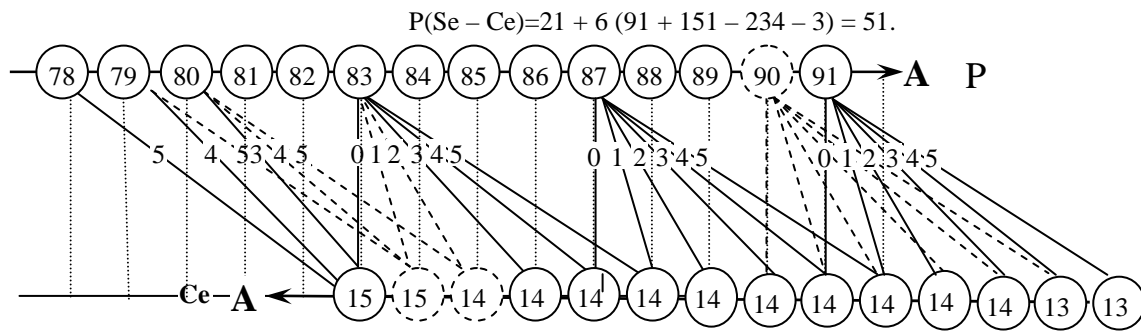


Рис. 5.

Розглянемо, нарешті, випадок, коли серед не існуючих ізотопів легких і важких уламків трапляються пари, масові числа яких  $A_1^0$  і  $A_2^0$  в сумі могли б дати 234. Кожен з нуклідів такої пари міг би з'явитися вже не в шістьох, а не більше ніж у 5-х каналах разом із відповідними уламками. Позначимо кількість таких пар через  $\delta_{12}$ . Число реальних каналів у цьому випадку буде на  $6 \cdot (\delta_1 + \delta_2 - \delta_{12}) + 5 \cdot \delta_{12}$  менше, ніж підраховане за формулою (9) (третій випадок). А остаточна формула для підрахунку числа можливих каналів, у яких народжуються ізотопні пари  $((Z_1, Z_2))$  набуває такого виду:

$$P(Z_1, Z_2) = 21 + 6 \cdot (A_{1\max} + A_{2\max} - 234 - \delta_1 - \delta_2) + \delta_{12}. \quad (11)$$

Прикладом такої ситуації може бути поява серед уламків нуклідів ізотопної пари  $Nb_{41} - Sb_{51}$  (Ніобій – Сурьма; див. рис. 6).

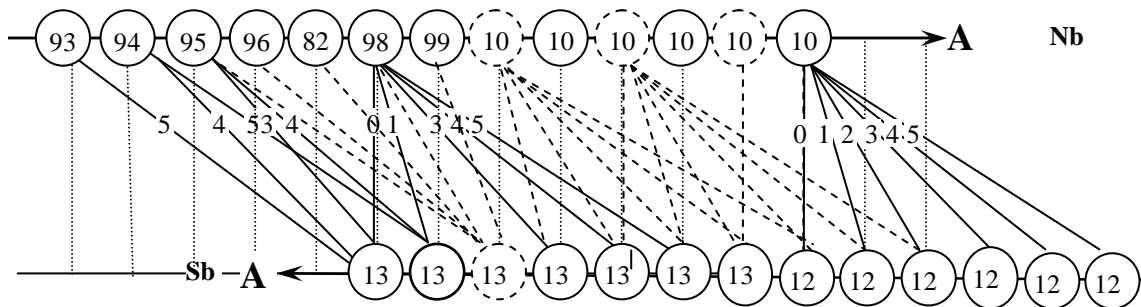


Рис. 6

Масові числа цих уламків належать таким інтервалам:  $A_1 \in [93, 105]$ ,  $A_2 \in [124, 136]$ . При цьому серед легких уламків відсутні нукліди з масовими числами  $A_1^0 = 100, 102, 104$ , а серед важчих – один нуклід з масовим числом  $A_2^0 = 134$ . Можна побачити, що у 5-х каналах міг би з'явитися кожен із уламків такої пари:  $Nb^{100} - Sb^{134}$ . Тому в цьому випадку треба користуватися формулою (11), у якій поправочні коефіцієнти мають такі значення:  $\delta_1 = 3$ ,  $\delta_2 = 1$ ,  $\delta_{12} = 1$ :

$$P(41, 51) = 21 + 6 \cdot (105 + 136 - 234 - 3 - 1) + 1 = 40.$$

Таким чином, для того, щоб підрахувати число можливих каналів, у яких з'являються уламки тієї чи іншої ізобарної пари, досить скористатися формулою (11), взявши з таблиць такі дані: 1) максимальні масові числа ізотопів певної ізобарної пари  $A_{1\max}, A_{2\max}$ ; 2) масові числа відсутніх ізотопів цієї ізобарної пари  $A_1^0, A_2^0$  та їх кількість  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , у тому числі кількість пар  $\delta_{12}$ , обидва уламки яких відсутні. Усі необхідні дані та результати виконаних на їх основі розрахунків за формулою (11) подано у таблиці.

№ пп	Символи пар	Максимальні масові числа		Масові числа відсутніх ізотопів та їх кількість					Кількість каналів	
		$A_{1\max}$	$A_{2\max}$	$A_1^0$	$A_2^0$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{12}$	$P(Z_1, Z_2)$	%
1.	Ni <sub>29</sub> – Gd <sub>63</sub>	67	162						1	
2.	Cu <sub>29</sub> – Eu <sub>63</sub>	70	160						3	
3.	Zn <sub>30</sub> – Sm <sub>62</sub>	79	158						39	
4.	Ga <sub>31</sub> – Pm <sub>61</sub>	80	154						21	
5.	Ge <sub>32</sub> – Nd <sub>60</sub>	84	154		153		1		39	
6.	As <sub>33</sub> – Pr <sub>59</sub>	87	151						45	
7.	Se <sub>34</sub> – Ce <sub>58</sub>	91	151	90	149,150	1	2		51	
8.	Br <sub>35</sub> – La <sub>57</sub>	92	148						57	
9.	Kr <sub>36</sub> – Ba <sub>56</sub>	97	148	96	147	1	1		75	
10.	Rb <sub>37</sub> – Cs <sub>55</sub>	99	146						87	
11.	Sr <sub>38</sub> – Xe <sub>54</sub>	98	145		143		1		69	
12.	Y <sub>39</sub> – J <sub>53</sub>	102	141	100,101		2			63	
13.	Zr <sub>40</sub> – Te <sub>52</sub>	102	138	100,101		2			45	
14.	Nb <sub>41</sub> – Sb <sub>51</sub>	105	136	100,102,104	134	3	1	1	40	
15.	Mo <sub>42</sub> – Sn <sub>50</sub>	108	134	107	133	1	1		57	
16.	Tc <sub>43</sub> – In <sub>49</sub>	110	130						57	
17.	Ru <sub>44</sub> – Cd <sub>48</sub>	112	128		122,3,4,5,7	5			27	
18.	Rh <sub>45</sub> – Ag <sub>43</sub>	114	123		122		1		27	
19.	Pd <sub>46</sub> – Pd <sub>46</sub>	117	117						21	

Результати останнього стовпчика цієї таблиці дозволяють побудувати розподіл вихідних каналів реакції поділу ядер Урану-233 під дією теплових нейтронів за зарядовим числом (див. гістограму на рис. 7).

Порівнюючи цю гістограму з тією, що задає аналогічний розподіл для реакції поділу U-235 [3: 270], можна помітити наступне.

1) Обидва розподіли симетричні відносно значення зарядового числа  $Z_1 = Z_2 = 46$  і мають мінімуми при цьому значенні, тобто на каналі (Pd<sub>46</sub> – Pd<sub>46</sub>). При цьому цей мінімум сильніше виражений для U-235.

2) Максимуми в обох розподілах теж співпадають, але сильніше виражені вони тепер уже на гістограмі для U-233. Справді, максимальне число каналів припадає на такі ізотопні пари:

(Kr – Ba) – 75 каналів поділу U-233 проти 69 каналів в U-235;

(Rb – Cs) – 87 каналів проти 75;

(Sr – Ba) – 69 каналів проти 62.

3) Гістограми мають також локальні максимуми, знову таки сильніше виражені для U-233, які припадають на такі ізотопні пари:

(Mo – Sn), і (Te – In) – по 57 каналів проти 45.

Це дає підстави стверджувати, що і розподіли каналів повного виходу уламків-ізотопів реакції поділу буде подібним до того, який представлений відповідною гістограмою для U-235 [3: 270].

Тобто, максимальне число каналів повного виходу матимуть такі ізотопи: Zr<sub>40</sub>, Mo<sub>42</sub>, і Nd<sub>60</sub>.

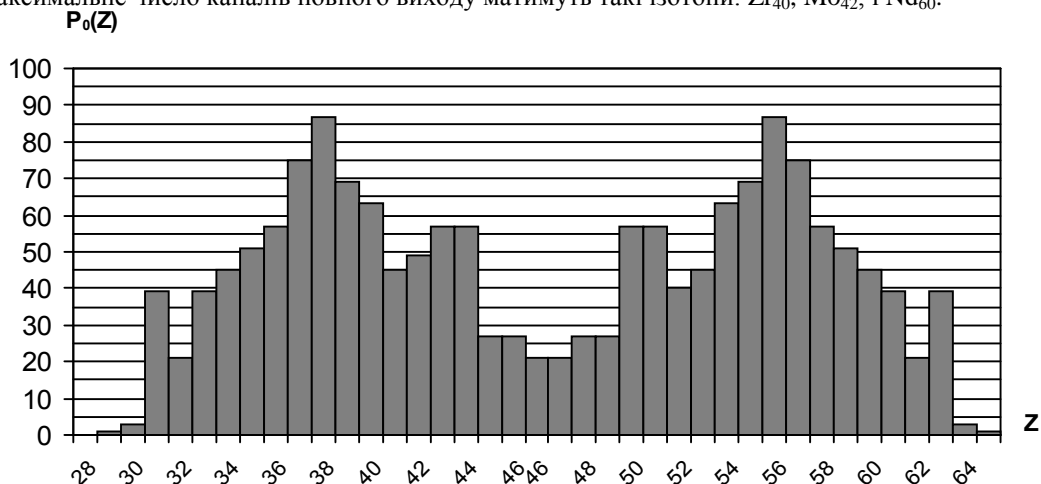


Рис. 7. Розподіл числа каналів незалежного виходу нуклідів-ізотопів реакції-поділу U-233 під дією теплових нейтронів за зарядовим числом.

Тобто, максимальне число каналів повного виходу матимуть такі ізотопи: Zr<sub>40</sub>, Mo<sub>42</sub> і Nd<sub>60</sub>. Враховуючи кореляцію між числом можливих каналів народження уламків-ізотопів та безпосереднім виходом цих уламків, можна очікувати, що процентний вміст саме Цирконію, Молібдену та Неодиму в породах, забруднених продуктами реакції поділу Урану-233, буде вищий, ніж у чистих породах у певній місцевості.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 1232 с.
2. Кибкало В.Ю. Феноменологическое описание независимых выходов осколков при делении U<sup>235</sup> тепловыми нейтронами // Препринт Института ядерных исследований АН УССР. – К., 1987. – 16 с.
3. Мордовець М.Т. Діаграми осколків реакції поділу важких ядер тепловими нейтронами // Вісник Житомирського державного педагогічного університету. – 2004. – Вип. 14. – С. 265-274.
4. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – М.: Атомиздат, 1974. – Т. 1. – 584 с.

Матеріал надійшов до редакції 03.09.2007 р.

#### *Гришук В.В., Мордовець Н.Т. Распределение каналов реакции деления U-233 тепловыми нейтронами.*

*В статье предлагается методика нахождения количества выходных каналов реакции деления ядер U-233 тепловыми нейтронами, в которых рождаются наиболее вероятные изотопы и/или изобары-осколки этой реакции. Исследуется корреляция изобарического распределения каналов с полным выходом осколков-изобар.*

#### *Gryshchuk V.V., Mordovets M.T. Channel Distribution of U-233 Division Reaction with the Help of Thermal Neutrons.*

*The article offers the method of finding the quantity of outgoing channels in the reaction of nuclei division with the help of U-233 thermal neutrons in which appear the most probable isotopes and/or isobars-fragments of this reaction. The correlation of the isobaric distribution of channels with whole yield fragments-isobars is indicated.*