

УДК: 539.162+53.088 + 519.245

PACS: 06.20.Jr, 23.90.+w

DOI: 10.24144/2415-8038.2018.44.109-118

О.М. Поп¹, К.С. Шарохін², В.Т. Маслюк¹, А.А. Саєнко²

¹Інститут електронної фізики НАН України, 88017, м. Ужгород, вул. Університетська, 21, e-mail: oksana_por@i.ua

²ДВНЗ «Ужгородський національний університет», вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород

ГАРМОНІЗАЦІЯ БАЗОВИХ ЯДЕРНИХ-ФІЗИЧНИХ КОНСТАНТ В МЕТОДІ ЯДЕРНОГО ДАТУВАННЯ: СТАНДАРТНІ МНОЖИНИ НУКЛІДІВ

Представлено схему гармонізації ядерно-фізичних констант нуклідів природних рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U використовуючи запропонований метод стандартних множин нуклідів та методику статистичного моделювання. Показано, що наявні бази даних таких констант можуть приводити до нефізичних, зокрема, від'ємних значень активностей генетично-пов'язаних нуклідів природних рядів. виправлення значень активностей можливе лише гармонізацією масивів ядерних констант, у межах, що забезпечують виправлення значень активностей нуклідів, періоди напіврозпаду яких змінюються від долей секунди до 10^{12} років. Тому особливістю запропонованого підходу є використання при розрахунках «довгої арифметики» та методу Монте-Карло, а також тернарної діаграми для представлення 3D даних як 2D масивів. Можливості розрахункової методики ілюструються на прикладі нуклідів природного ряду ^{232}Th , для яких аналізуються можливі джерела похибок їх ядерних констант.

Ключові слова: метод стандартних множин нуклідів, ядерні константи, нефізичні рішення, довга арифметика, гармонізація, розрахунковий код, WEB-дизайн.

Вступ

Дослідження особливостей перетворень атомних ядер, які відбуваються природним чином як спонтанні, чи стимульованих ззовні, становлять основу сучасної ядерної фізики. Ядерні перетворення як α -розпад, внаслідок випромінювання атомним ядром α -частинки; β -розпад – відповідно, електрона і антинейтрино, позитрона і нейтрино, чи поглинання ядром атомного електрона з випусканням нейтрино; γ -розпад – відповідно, γ -квантів, або ж розпад атомного ядра на два осколки порівнянної маси спричиняють явище радіоактивності. Важливою характеристикою радіоактивності, є швидкість / ймовірність радіоактивного розпаду, яку характеризують за допомогою 3-х взаємопов'язаних величин – постійної розпаду λ , середнього часу життя τ і періоду напіврозпаду $T_{1/2}$. Встановлення числових

значень цих ядерних констант має дуже важливе значення для розуміння фундаментальних проблем стійкості атомних ядер, а також для ряду прикладних застосувань: від ядерної енергетики, геології, мінералогії до геохронології, що встановлює абсолютний та відносний вік гірських порід, чи мінералів, а також Землі. Зрештою, точні визначення віку радіоізоотопів залежать від точних визначень констант розпаду або періоду напіврозпаду відповідних материнських радіоізоотопів. Проте, навіть невеликі зміни та невизначеності у значеннях періоду напіврозпаду призводять до великих коливань та невизначеностей у розрахунках віку для гірських порід [1-6].

Значення ядерних констант встановлюють експериментальним шляхом і хоч діапазон їх значень $T_{1/2}$ для кожного ізотопу надзвичайно широкий, – від мільярдів років до малих часток секунди,

вони фіксуються у різних базах ядерно-фізичних констант із певною точністю. Аналіз літературних даних показує, що значення цих констант можуть відрізнятися, що впливає, зокрема, на достовірність ядерного датування [7, 8]. Це обумовлено різними причинами, в тому числі і тим, що радіоактивний розпад це статистичний процес. Кожне радіоактивне ядро може розпастися в будь-який момент лише з певною ймовірністю, а закономірності розпаду атомних ядер спостерігаються тільки в середньому, і для великих масивів ядер.

При вирішенні задач ядерного датування фіксується активність, наприклад, дочірнього ізотопу природних рядів U та Th, який утворюється через ланцюжок радіоактивних розпадів від 3 до 7 нуклідів, для кожного із яких встановлені свої ядерні константи. Це пояснює високі вимоги до точності їх встановлення, оскільки помилка хоч для одного нукліда може привести до нефізичних значень активностей для проміжкового, чи кінцевого ізотопу цього ланцюжка.

В даній роботі запропоновано метод гармонізації значень ядерних констант, зокрема, тих, що виражаються через період напіврозпаду $T_{1/2}$, використовуючи метод стандартних множин нуклідів (СМН) для задач ядерного датування [9]. Особливістю запропонованого підходу є використання комп'ютерних можливостей «довгої арифметики» [10], лише яка і може бути застосована для такого роду задач, коли дослідження проводяться у часовому інтервалі $[0, 10^{12}]$ років. Причому, найбільш цікавим для гармонізації ядерних констант є інтервал, що знаходиться в інтервалі $[0, 1-2]$ років. Структура роботи включає огляд методів встановлення періодів напіврозпадів для довго- та короткоживучих ізотопів, основи методу СМН та особливостей розрахункових програм для їх гармонізації.

Методи встановлення ядерних констант

Період напіврозпаду $T_{1/2}$ – це час, за який розпадається половина атомів в зразку. Це поняття вводиться для опису швидкості, з якою розпадається

радіонуклід і приймається незмінність цієї константи для кожного радіонукліду. Інші ядерні константи є похідними від цього параметра: так постійна розпаду λ середній час життя дорівнює:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}; \quad \tau = \frac{1}{\lambda}$$

Основне припущення в теорії радіоактивного розпаду полягає у тому, що у будь-який момент часу t число розпадів в одиницю часу $-dN/dt$, або їх активність пропорційно числу наявних радіоактивних ядер $N(t)$, тобто:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t), \text{ або } N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

тут N_0 – початкова кількість у момент часу $t = 0$.

Діапазон значень, наприклад, $T_{1/2}$ надзвичайно широкий – від мільярдів років до малих часток секунди, тому і методи їх встановлення сильно відрізняються між собою.

Довгоживучі ізотопи. Для знаходження $T_{1/2}$ довгоживучого нукліда необхідний радіоактивний ізотоп масою m , вільний від сторонніх домішок або з відомою кількістю домішок. В цьому разі число їх атомів N визначається з умови

$$N = N_A \cdot m / \mu,$$

де μ – атомна маса відповідного хімічного елементу, N_A – число Авогадро.

В цьому разі справедливо:

$$\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = -N \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (2)$$

і завданням є встановлення експериментальним чином активності dN/dt , яка вважається незмінною за час спостереження. Для даного методу важливим є встановлення значення масою m та відсутність інших радіоактивних речовин, що можуть спотворювати dN/dt .

Ультра короткоживучі ізотопи. При вимірах над малих періодів напіврозпаду – до 10^{-11} с. використовують метод співпадінь. Так, для таких ізотопів важливим є встановлення каналів їх розпаду α - чи β -активності, що дозволяє не лише ідентифікувати дочірній ізотоп, але й енергії їх γ -квантів, які він випромінює при переході в основний стан. Суть методу полягає у фіксації акту розпаду нукліда

лише при співпадінні, наприклад, процесів коли одночасно реєструється як γ -квант, що випромінює материнський ізотоп та γ -квант іншої енергії, що випромінює дочірній нуклід. Знаходячи залежність зафіксованих співпадінь із часом вдається з достатньою точністю визначити його $T_{1/2}$.

Короткоживучі ізотопи: якщо ж величина $T_{1/2}$ для радіонуклідів у кілька хвилин, годин або днів, то зручно використовувати метод спостереження зміни інтенсивності ядерного випромінювання з часом. Відраховується число імпульсів N_0 за деякий проміжок часу Δt (наприклад, за одну хвилину). Через проміжок часу t_1 проводиться знову відлік імпульсів N_1 . Через проміжок часу t_2 отримуємо нове число N_2 і т.д. Фактично в цьому експерименті здійснюються відносні вимірювання активності ізотопу в різні моменти часу. В результаті виходить набір чисел N_0, N_1, \dots, N_n , який і використовується для визначення періоду напіврозпаду $T_{1/2}$ радіонукліда. Отримані експериментальні значення після врахування фону наносяться на графік, де по осі абсцис відкладається час, що минув від початку вимірювань, а по осі ординат логарифм числа $N - N_\phi$. Вимірювання $T_{1/2}$ в кілька місяців або років зручно проводити за допомогою диференціальної іонізаційної камери. Експериментально визначають $\Delta I, I_0$ і t . Визначається також λ_2 , тоді

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda_2 = I_0 \cdot t \cdot \ln(2) / \Delta I,$$

де I_0 – іонізаційний струм в початковий момент часу, ΔI – різниця струму. Вимірювані величини можуть бути визначені із задовільною точністю, а отже, з достатньою точністю може бути обчислене і значення $T_{1/2}$.

Метод стандартних множин нуклідів для задач ядерного датування

У методі стандартних множин нуклідів (СМН) [9] розглядаються впорядковані множини нуклідів природних рядів розпаду $^{232}\text{Th}, ^{235,238}\text{U}$ та проводиться чисельний розрахунок їх кількості ядер / активностей. Для отримання числових даних здійснюється моделювання радіоактивних перетворень та їх лінеаризація. Це приводить до множини

лінійних ланцюгів, які можна описати системою лінійних диференціальних рівнянь Бейтмана.

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t),$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t),$$

...

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1}(t) - \lambda_n N_n(t). \quad (3)$$

Результатом розв'язків (3) є наступний аналітичний вираз:

$$N_n(t) = N_0 (c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + c_n e^{-\lambda_n t}), \quad (4)$$

N_0 – початкова кількість ядер материнського нукліда N_1 в момент часу $t = 0$, а коефіцієнти C_i мають наступну структуру:

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)},$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)},$$

...

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \quad (5)$$

Оскільки, досліджуваний нуклід може брати участь у різних лінійних ланцюгах радіоактивних перетворень із різними номерами розгалужень s , тому загальна кількість ядер $N_n^{th}(t)$ однойменного нукліда буде – сумою кількості ядер $N_n^{th}(t)$ у кожному ланцюгу:

$$N_n^{th}(t) = \frac{N_0}{\lambda_n} \cdot \sum_{s=0}^p \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=i+1 \\ j=i+2}}^n \dots \sum_{\substack{j=i+1 \\ j=i+2}}^{s=p} \prod_{\langle i,j \rangle} b_{i,j}^s \lambda_i C_i e^{-\lambda_i t} \quad (6)$$

тут: N_0 – початкове значення активності материнського ядра, C_i – коефіцієнти, що залежать від сталих розпаду λ_i :

$$C_i = \prod_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i},$$

p – число брэнчінгів радіоактивного ряду. Коефіцієнти $b_{i,j}^s \leq 1$ враховують брэнчінги радіоактивних рядів, при їх відсутності, $s = 0, j = i-1, b_{i-1,i}^0 = 1$, при $s \neq 0$ добуток

$$\prod_{\langle i,j \rangle} b_{i,j}^s \text{ буде містити члени } \dots b_{k,k+2}^s, b_{k,k+1}^s,$$

де $b_{k,k+2}^s + b_{k,k+1}^s = 1, k < i-3$, що дають вклади

в кількість ядер із різних лінійних ланцюгів, t – час. З виразу (6) слідує, що його розв'язок залежить від всієї сукупності значень констант розпаду λ_i , які суттєво (в 10^{15} разів) відрізняються по величині. Це пояснює, чому результати числового моделювання активностей деяких нуклідів природних рядів демонструють наявність нефізичних (від'ємних) розв'язків, наприклад, в околі початку відліку часу. В подальшому, обмежимося розглядом радіонуклідів природного ряду ^{232}Th , рис. 1, постійні розпаду яких приведені в таблиці 1.

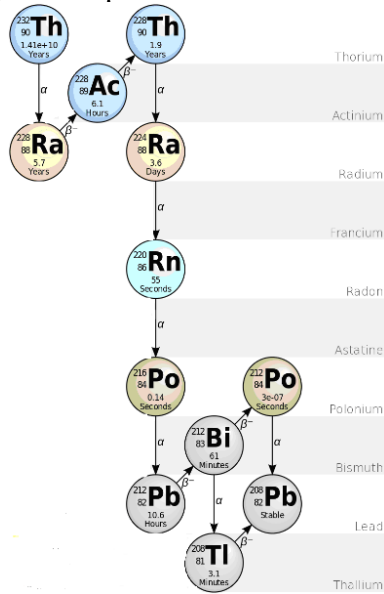


Рис. 1. Схема розпаду природного ряду ^{232}Th [18, 19], де years – роки; days – дні; hours – години; minutes – хвилини; seconds – секунди.

В цьому разі вираз, що відповідає за часову залежність активності, наприклад, ^{212}Po , див. формули (5) та (6) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 F = & \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_4 / (\lambda_2 - \lambda_4) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \\
 & + \lambda_2 / \lambda_3 \cdot \lambda_4 / \lambda_3 \cdot \lambda_5 / (\lambda_5 - \lambda_3) \cdot \lambda_8 / (\lambda_8 - \lambda_3) \cdot \lambda_9 / (\lambda_9 - \lambda_3) \cdot \exp(-\lambda_3 t) + \lambda_2 / (\lambda_4 - \lambda_2) \cdot \exp(-\lambda_4 t) \\
 & + \lambda_2 / \lambda_5 \cdot \lambda_3 / (\lambda_3 - \lambda_5) \cdot \lambda_4 / \lambda_5 \cdot \lambda_8 / (\lambda_5 - \lambda_8) \cdot \exp(-\lambda_5 t) + \\
 & \lambda_2 / \lambda_6 \cdot \lambda_3 / \lambda_6 \cdot \lambda_4 / \lambda_6 \cdot \lambda_5 / \lambda_6 \cdot \lambda_8 / \lambda_6 \cdot (-\lambda_9 / \lambda_6) \cdot \exp(-\lambda_6 t) \\
 & + \lambda_2 / \lambda_7 \cdot \lambda_3 / \lambda_7 \cdot \lambda_4 / \lambda_7 \cdot \lambda_5 / \lambda_7 \cdot \lambda_6 / \lambda_7 \cdot \lambda_8 / \lambda_7 \cdot \lambda_9 / \lambda_7 \cdot \exp(-\lambda_7 t) + \lambda_2 / \lambda_8 \cdot \lambda_3 / (\lambda_3 - \lambda_8) \cdot \lambda_4 / \lambda_8 \cdot \lambda_5 / (\lambda_8 - \lambda_5) \cdot \lambda_9 / (\lambda_9 - \lambda_8) \cdot \exp(-\lambda_8 t) + \lambda_2 / \lambda_9 \cdot \lambda_3 / (\lambda_3 - \lambda_9) \cdot \lambda_4 / \lambda_9 \cdot \lambda_5 / \lambda_9 \cdot \lambda_8 / (\lambda_8 - \lambda_9) \cdot \exp(-\lambda_9 t) + \\
 & (-\lambda_2 / \lambda_{10}) \cdot \lambda_3 / \lambda_{10} \cdot \lambda_4 / \lambda_{10} \cdot \lambda_5 / \lambda_{10} \cdot \lambda_6 / \lambda_{10} \cdot \lambda_7 / \lambda_{10} \cdot \lambda_8 / \lambda_{10} \cdot \lambda_9 / \lambda_{10} \cdot \exp(-\lambda_{10} t),
 \end{aligned}$$

тут $F = A / \lambda_7$, в.о., A – активність ^{212}Po , $\lambda_n t$; t – час, роки.

Таблиця 1. Постійні розпаду нуклідів природного ряду ^{232}Th

	ГАН	λ (роки)
1	^{232}Th	$4,92 \cdot 10^{-11}$
2	^{228}Ra	$1,21 \cdot 10^{-1}$
3	^{228}Ac	$9,87 \cdot 10^2$
4	^{228}Th	0,363
5	^{224}Ra	69,3
6	^{220}Rn	$3,93 \cdot 10^5$
7	^{216}Po	$1,51 \cdot 10^8$
8	^{212}Pb	$5,73 \cdot 10^2$
9	^{212}Bi	$5,98 \cdot 10^3$
10	^{212}Po	$7,29 \cdot 10^7$
11	^{208}Tl	$1,19 \cdot 10^5$

Після нескладних перетворень, враховуючи значення констант $\lambda_1 - \lambda_{10}$, табл.1 можна записати у вигляді:

$$F = \exp(-\lambda_1 t) - 1.497 \cdot \exp(-\lambda_2 t) + 0.497 \cdot \exp(-\lambda_4 t) \quad (7)$$

На рис. 2 приведено результати розрахунку часової залежності активності ^{212}Po .

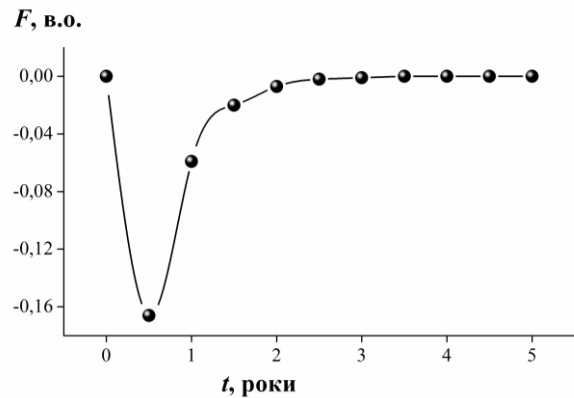


Рис. 2. Часова залежність активності ^{212}Po .

Довга математика

Як вказано вище, складності розрахунків обумовлено тим, що ядерно-фізичні константи, такі як періоди напіврозпаду – $T_{1/2}$ ізотопів природних рядів, суттєво відрізняються, що потребує розробки нових методик розрахунків. Останні були реалізовані в рамках арифметики довільної точності («довга математика»), що дозволяє проводити розрахунки із числами практично довільної розмірності.

В обчислювальній техніці операції над числами, розрядність яких перевищує довжину машинного слова даної обчислювальної машини, називаються довгою арифметикою. По суті арифметика з великими числами являє собою набір алгоритмів виконання базових операцій (додавання, множення, зведення в степінь...) над числами, реалізованими не апаратно, а програмно, використовуючи більш базові апаратні засоби роботи з числами менших порядків. Окремий випадок – арифметика довільної точності (англ. Arbitrary – precision arithmetic) – відноситься до арифметики, в якій довжина чисел обмежена тільки об'ємом доступної пам'яті.

Організація роботи з «довгими числами» багато в чому залежить від того, як ці числа подаються у комп'ютері. "Довге" число можна записати, наприклад, за допомогою масиву десяткових цифр, кількість елементів у такому масиві дорівнює кількості значущих цифр у "довгому" числі. Але якщо слід реалізовувати арифметичні операції над цим числом, то розмір масиву повинен бути достатнім, щоб розмістити в ньому і результат, наприклад, множення.

Перед початком розробки програми потрібно було визначитись із мовою програмування, потрібною бібліотекою для проведення розрахунків із підвищеною точністю. Всі початкові і вихідні числа відносяться до дійсного типу. Стандартний 32-бітний тип даних для чисел з плаваючою комою дозволяє зберігати числа в діапазоні $3,4e-38 < |x| < 3,4e38$ з точністю 7-8 цифр (тип float в мові C++, single в мові Pascal). Існують типи даних із подвоєною точністю, які займають 8-12 байт, точність яких складає 18-20 цифр (long double в мові C++, extended в мові Pascal). Однак, цієї точності не достатньо для забезпечення необхідної точності розрахунків характеристик радіоактивного розпаду. Деякі константи мають настільки різні порядки, що для виконання над ними точних арифметичних дій потрібно тип даних, точність якого складає як мінімум 34 цифри. Це завдання з розділу алгоритмічних задач «довга арифметика».

З цією метою був створений власний клас (тип даних) на мові C++, який дозволяв зберігати дійсні числа із довільною точністю і проводити над ними операції додавання, віднімання, а також множення. Кожне число представлялось масивом символів, арифметичні операції реалізовувались у стовпчик. Однак, після проведеного тестування були виявлені помилки при арифметичних операціях, що свідчило про недосконалість алгоритму реалізації цього класу. Налагодження такого серйозного класу могло зайняти забагато часу, до того ж не факт, що після завершення цього процесу всі помилки були б виправлені і всі виняткові ситуації була б передбачені в алгоритмі. Тому було прийнято рішення знайти бібліотеку, що містить клас чисел із підвищеною точністю.

Вибором став клас десяткових дійсних значкових чисел із довільною точністю BigDecimal бібліотеки java.math, створеної на мові програмування Java. BigDecimal складається з цілочисельної мантиси довільної точності і 32-бітового цілого числа (діапазон значень – 2,147,483,648...2,147,483,647), що відповідає за масштаб (експонента). Якщо це число додатне або нуль, то воно означає кількість цифр справа від десяткової точки, якщо від'ємне, то кількість цифр зліва. Тобто значення, представлене класом BigDecimal виглядає наступним чином: мантиса $\times 10^{\text{масштаб}}$.

Клас BigDecimal дає можливість здійснювати арифметичні операції, маніпуляції з масштабом, округлення, порівняння, хешування і перетворення форматів. Метод toString() дозволяє отримати число в звичному вигляді (конвертування у рядковий тип даних). Є можливість вибирати один з восьми режимів округлення, а також встановлювати точність при кожній арифметичній операції. Ці параметри не завжди є обов'язковими, однак при діленні їх краще завжди вказувати, тому що може виникнути помилка внаслідок неможливості представлення точного результату. Це може трапитись, наприклад, коли поділити число 1 на 3. Алгоритм ділення в BigDecimal побудовано таким

чином, що він буде розраховувати всі цифри після коми, а в даному випадку їх безліч (0,333...), тому і виникає помилка. Якщо ж, наприклад, задати точність 5 і режим округлення HALF_UP для цієї операції, то результатом буде число 0,33333.

Оскільки у рівняннях радіоактивного розпаду окрім арифметичних операцій ще присутня функція експонента, то виникла потреба у її реалізації саме для класу BigDecimal. У стандартних бібліотеках Java дану функцію не було реалізовано. Тому було знайдено і удосконалено алгоритм знаходження експоненти, що не відноситься до стандартних бібліотек. Він складається із формули знаходження експоненти за допомогою ряду Тейлора з деякими модифікаціями.

Веб-додаток для представлення модифікованих ядерних констант

Для більш детального дослідження та усунення цих ефектів та гармонізації різних масивів ядерно-фізичних констант, був розроблений алгоритм та запропонована програма Nuclear Dating, що дозволяє виконувати розрахунки ланцюгів радіоактивного розпаду з підвищеною точністю (більше 100 десяткових розрядів). Інший етап таких розрахунків – встановлення допустимої області значень ядерно-фізичних констант, яка виключає отримання нефізичних рішень виразів (1). Візуалізація результатів роботи здійснюється шляхом представлення 3D масивів через 2D платформи. В результаті отриманні перші результати гармонізації ядерно-фізичних констант.

Було створене також програмне забезпечення у вигляді веб-додатку за сучасними веб-стандартами для зручної взаємодії з програмою з будь-якого пристрою, що має доступ до мережі Інтернет та засоби вводу даних. Програма надає функціональні можливості для поставлених задач з візуалізацією. Розробка виконана в середовищі Visual Studio Code 1.29 мовою програмування ECMAScript. Використовувались сторонні бібліотеки з відкритим вихідним кодом JS: D3 (для побудовування тернарного графіку), Math (для оптимізації математичних розрахунків виразу), Big.js (для підвищення точності розрахунків), JQuery (для оптимізації коду програми), FileSaver (дозволяє виконувати збереження файлів на локальному пристрої – як залежність для TableExport), XLSX (дозволяє будувати таблиці в форматі xls – як залежність для TableExport), TableExport (дозволяє експорт даних з таблиць html у вигляді файлів xlsx, csv та txt). Програмна логіка спроектована за патерном «Модуль». Для дизайну використовувались лише каскадні таблиці стилів CSS3. Зборка відбувалася за допомогою пакувальника WebPack, що дозволило оптимізувати кінцевий розмір програми.

Сама програма розміщена в домені GitHub — найбільшого веб-сервісу для хостингу ІТ проєктів і їх спільної розробки — і доступна в будь-який момент за адресою <https://konstantin-sharohin.github.io/>.

При початковому завантаженні програми інтерфейс користувача виглядає наступним чином (рис. 3).

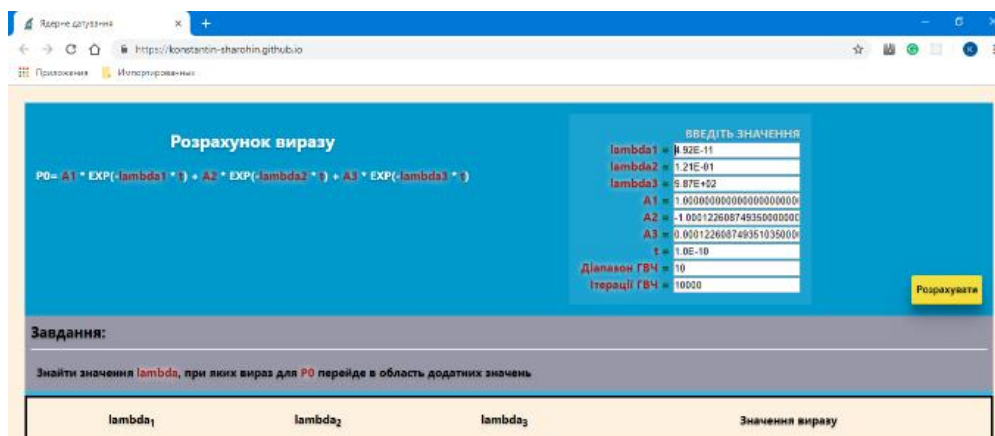


Рис. 3. Інтерфейс користувача програми Nuclear Dating.

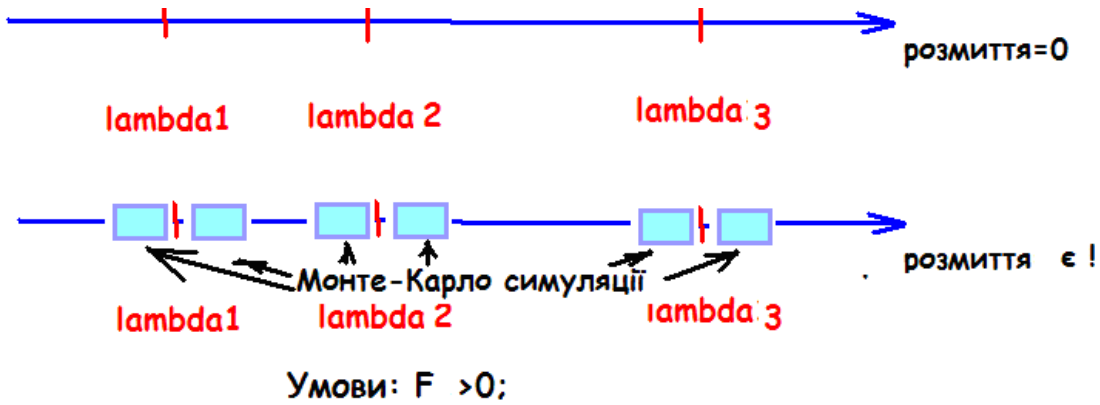


Рис. 4. Ілюстрація алгоритму розрахунків.

В цій версії програми вираз попередньо закодований, однак в полях справа можна ввести довільні значення для його складових (за замовчуванням дані вже введені).

Алгоритм розрахунків ілюструється на рис. 4. В околі ядерних констант $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ вводиться розмиття в межах заданої похибки. Інший етап – використання методу статистичних випробувань, або методу Монте-Карло для цього діапазону і фіксуються значення при яких активності досліджуваних нуклідів будуть мати додатне значення.

Після натиснення кнопки «Розрахувати» під сірим блоком із

завданням буде згенеровано тернарний графік, на якому у вигляді точок зображений розподіл значень «лямбда» згідно умовам (рис. 5).

Висновки

Таким чином, показана можливість гармонізації ядерних констант для генетично пов'язаних нуклідів природних рядів урану-торію. Встановлено, що розв'язок системи диференціальних рівнянь Бейтмена залежить від сукупності значень констант розпаду λ_i , які суттєво відрізняються по величині. Обґрунтовано використання комп'ютерних можливостей «довгої арифметики» для гармонізації ядерно-фізичних констант.

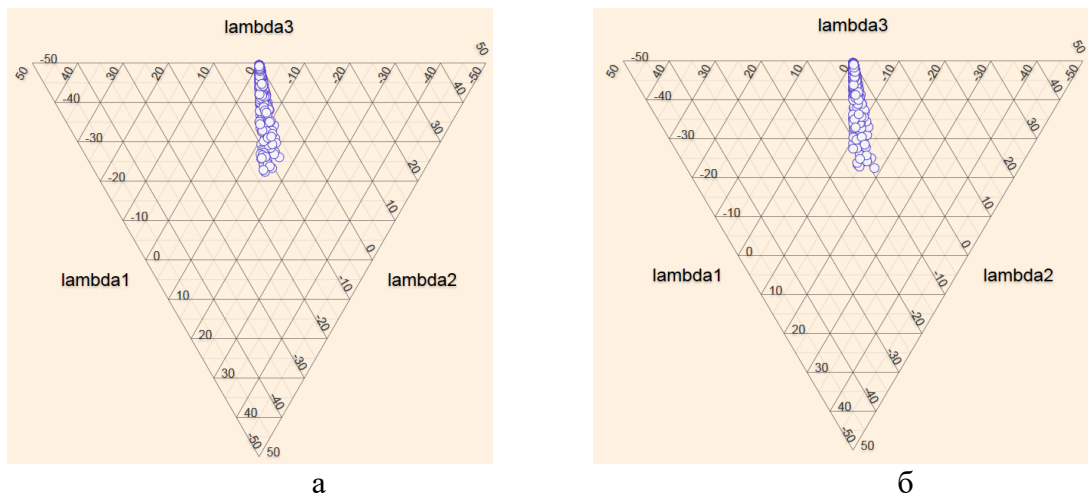


Рис. 5. Тернарний графік, на якому приведені результати розрахунку кількості ядер нуклідів, де а) – $T_{1/2}^{232\text{Th}} = 1,41 \cdot 10^{10}$ років; б) – $T_{1/2}^{232\text{Th}} = 14 \cdot 10^9$ років.

Приведено результати розрахунку часової залежності активності ^{212}Po . Створене також програмне забезпечення у вигляді веб-додатку за сучасними веб-стандартами з можливістю візуалізації

результатів роботи через представлення 3D масивів. Отриманні перші результати гармонізації ядерно-фізичних констант.

Автори вдячні **Стецю М.В.** за ідею розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Collé R., Fitzgerald R.P., Laureano-Perez L. A new determination of the ^{209}Po half-life // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* – 2014. – 41. – 105103 (12pp) (doi:10.1088/0954-3899/41/10/105103).
2. Begemann F., Ludwig K.R., Lugmair G.W., Min K., Nyquist L.E., Patchett P.J., Renne P.R., Shih C.-Y., Villa I.M., Walker R.J. Call for an improved set of decay constants for geochronological use // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2001. – Vol. 65, No. 1. – pp. 111–121.
3. Mattinson James M. Analysis of the relative decay constants of ^{235}U and ^{238}U by multi-step CA-TIMS measurements of closed-system natural zircon samples // *Chemical Geology.* – 2010. – V. 275. – pp. 186–198 (doi:10.1016/j.chemgeo.2010.05.007).
4. Parsons-Davis Tashi, Wimpenny Josh, Keller C. Brenhin, Thomas Keenan, Samperton Kyle M., Renne Paul R., Mundil Roland, Moody Ken, Knight Kim, Kristo Michael J., Williams Ross New measurement of the ^{238}U decay constant with inductively coupled plasma mass spectrometry // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.* – 2018. – V. 318. – pp. 711–721 (<https://doi.org/10.1007/s10967-018-6148-y>).
5. Varga Zsolt, Nicholl Adrian, Mayer Klaus Determination of the ^{229}Th half-life // *Physical Review C.* – 2014. – 89. – 064310 (DOI: 10.1103/PhysRevC.89.064310).
6. Snelling Andrew A. Determination of the Radioisotope Decay Constants and Half-lives: Potassium-40 (^{40}K) // *Answers Research Journal.* – 2016. – 9. – pp. 171–196.
7. NuDat 2 ver. 2.7. On-line data base of National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory.
8. Гусев Н.С., Дмитриев П.П. Радиоактивные цепочки: справочник. – М., Атомиздат, 1978. – 88 с.
9. Pop O., Maslyuk V. Applications of the uranium's set of isotopes for nuclear dating: the Monte-Carlo method // *Radiochimica Acta.* – 2018 (<https://doi.org/10.1515/ract-2018-3001>).
10. https://uk.wikipedia.org/wiki/Довга_арифметика.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2018.

О.М. Поп¹, К.С. Шарохин², В.Т. Маслюк¹, А.А. Саенко²

¹Інститут електронної фізики НАН України

²ГВУЗ «Ужгородський національний університет»

ГАРМОНИЗАЦІЯ БАЗОВИХ ЯДЕРНО-ФІЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ В МЕТОДЕ ЯДЕРНОГО ДАТИРОВАНИЯ: СТАНДАРТНЫЕ МНОЖЕСТВА НУКЛИДОВ

Представлена схема гармонизации ядерно-физических констант нуклидов природных рядов ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U используя предложенный метод стандартных множеств нуклидов и методику статистического моделирования. Показано, что существующие базы данных таких констант могут приводить к нефизическим, в частности, отрицательных значений активностей генетически-связанных нуклидов природных рядов. Исправление значений активностей возможно лишь гармонизацией массивов ядерных констант, в пределах, обеспечивающих исправление значений активностей нуклидов, периоды полураспада которых изменяются от долей секунды до 10^{12} лет. Поэтому особенностью предложенного подхода является использование при расчетах «длинной

арифметики» и метода Монте-Карло, а также тернарной диаграммы для представления 3D данных как 2D массивов. Возможности расчетной методики иллюстрируются на примере нуклидов природного ряда ^{232}Th , для которых анализируются возможные источники погрешностей их ядерных констант.

Ключевые слова: метод стандартных множеств нуклидов, ядерные константы, нефизические решения, длинная арифметика, гармонизация, расчетный код WEB-дизайн.

O.M. Pop¹, K.S. Sharokhin², V.T. Maslyuk¹, A.A. Saenko²

¹Institute of Electron Physics, Nat. Acad. Sci. of Ukraine

²Uzhhorod National University

HARMONIZATION OF BASIC NUCLEAR-PHYSICAL CONSTANTS IN THE NUCLEAR DATING METHOD: STANDARD SETS OF NUCLIDE

Background. The important characteristic of radioactive decay is the half-life period. For various radioactive isotopes the half-life period can lie in very wide ranges - from nanoseconds to millions years. It is shown that the existing databases of such constants can lead to non-physical, in particular, negative values of the activities of genetically related nuclides of natural series.

Methods: The scheme of harmonization of the nuclear-physical constants of nuclides of natural series ^{232}Th , ^{235}U , and ^{238}U is presented, using the method of standard sets of nuclides and the method of statistical modeling. A feature of the approach is the use at calculations of "long arithmetics» and the Monte-Carlo method, in a time interval $[0, 10^{12}]$ years. The most interesting for harmonization of nuclear constants is the interval $[0, 1-2]$ years.

Results: It is shown that the solution of the system of differential equations of Bateman depends on all set of values of the decay constants λ_i , which significantly (in 10^{15} times) differ in magnitude. It explains why the results of numerical modelling of the activities of some nuclides of natural series show the presence of non-physical (negative) solutions, for example, in the vicinity of the start time of the time. Possibilities of the calculation technique are illustrated on an example of nuclides of the natural series ^{232}Th . The first results of harmonization of nuclear-physical constants are obtained.

Conclusions: The created software in the form of the web application with modern web standards. The program gives functionality for tasks in view by representation 3D files

Keywords: a method of standard sets of nuclide, nuclear constants, non-physical solutions, long arithmetics, harmonization, calculation code WEB-design.

REFERENCES

1. Collé R., Fitzgerald R.P., Laureano-Perez L. (2014) "A new determination of the ^{209}Po half-life", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 41, 105103 (12pp) (doi:10.1088/0954-3899/41/10/105103).
2. Begemann F., Ludwig K.R., Lugmair G.W., Min K., Nyquist L.E., Patchett P.J., Renne P.R., Shih C.-Y., Villa I.M., Walker R.J. (2001) "Call for an improved set of decay constants for geochronological use", Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 65, No. 1, pp. 111–121.
3. Mattinson James M. (2010) "Analysis of the relative decay constants of ^{235}U and ^{238}U by multi-step CA-TIMS measurements of closed-system natural zircon samples", Chemical Geology, V. 275, pp. 186–198 (doi:10.1016/j.chemgeo.2010.05.007).
4. Parsons-Davis Tashi, Wimpenny Josh, Keller C. Brenhin, Thomas Keenan, Samperton Kyle M., Renne Paul R.,

- Mundil Roland, Moody Ken, Knight Kim, Kristo Michael J., Williams Ross (2018) “New measurement of the ^{238}U decay constant with inductively coupled plasma mass spectrometry”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, V. 318, pp. 711–721 (<https://doi.org/10.1007/s10967-018-6148-y>).
- Varga Zsolt, Nicholl Adrian, Mayer Klaus (2014) “Determination of the ^{229}Th half-life”, *Physical Review C*, 89, 064310 (DOI: 10.1103/PhysRevC.89.064310).
 - Snelling Andrew A. (2016) “Determination of the Radioisotope Decay Constants and Half-lives: Potassium-40 (^{40}K)”, *Answers Research Journal*, 9, pp. 171-196.
 - NuDat 2 ver. 2.7. On-line data base of National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory.
 - Gusev N.S., Dmitriev P.P. (1978), *Radioactive Chains: A Handbook [Radyoaktyvnye tsepochky. M.: Atomyzdat]*, Moscow: Atomizdat, 88 p.
 - Pop O., Maslyuk V. (2018) “Applications of the uranium’s set of isotopes for nuclear dating: the Monte-Carlo method”, *Radiochimica Acta*. (<https://doi.org/10.1515/ract-2018-3001>).
 - https://uk.wikipedia.org/wiki/Long_arithmetic.

© Ужгородський національний університет