

Альфа-розпад природних ізотопів європію, що супроводжується вильотом гамма-квантів

Н.В. Сокур¹, П. Беллі^{2,3}, Р. Бернабей^{2,3}, Р.С. Бойко¹, Ф.А. Даневич^{1,2},
А. Інчікитті^{4,5}, Ф. Капелла^{4,5}, В. Карачіоло^{2,3}, Д.В. Касперович¹,
М. Лаубенштайн⁶, В.І. Третьак^{1,6}, Р. Черулі²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі "Тор Вергата", Рим, Італія

³ Римський університет "Тор Вергата", Рим, Італія

⁴ Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі, Рим, Італія

⁵ Римський університет "Ла Сапієнца", Рим, Італія

⁶ Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія

Ізотопи Європію

Існує два стабільних ізотопи Європію: ^{151}Eu і ^{153}Eu .

ізо́топ	поширеність (%) [1]	тип розпаду, Q (кеВ)	$T_{1/2}$ (експ), р	$T_{1/2}$ (теор), р
^{151}Eu	47.81(6)	α , 1964.0(1.1)	на о.р. $(7/2^+)$ ^{147}Pm : $= 5_{-3}^{+11} \times 10^{18}$ [2,3]	
			на 1-ий збуджений ^{147}Pm $(5/2^+$, 91.1 кеВ): $> 3.7 \times 10^{18}$ [4]	$7 \times 10^{18} - 1 \times 10^{20}$ [5-7]
^{153}Eu	52.19(6)	α , 272.5(2.0)	$> 5.5 \times 10^{17}$ [4]	$3 \times 10^{141} - 5 \times 10^{144}$ [5-7]
^{152}Eu	—	β^- , 1818.9(7)	13.517 (27.92 %)	
		ϵ , 1874.6(7)	13.517 (72.08 %)	
^{154}Eu	—	β^- , 1968.0(8)	8.592 (99.982 %)	
		ϵ , 717.2(1.1)	8.592 (0.018 %)	
^{155}Eu	—	β^- , 251.8(9)	4.753 (100 %)	

[1] J. Meija et al., Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem. 88(3) (2016) 293.

[2] P. Belli et al, Search for α decay of natural Europium, Nulc. Phys. A 789 (2007) 15.

[3] N. Casali et al., Discovery of the ^{151}Eu α decay, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 41 (2014) 075101.

[4] F.A. Danevich et al., Search for α decay of ^{151}Eu to the first excited level of ^{147}Pm using underground γ -ray spectrometry, Eur. Phys. J. A 48 (2012) 157.

[5] D.N. Poenaru, M. Ivascu, Estimations of the alpha decay half-lives, J.Phys. 44 (1983) 791.

[6] B. Buck, A.C. Merchant, S.M. Perez, J. Phys. G 18 (1992) 143.

[7] V.Yu. Denisov, A.A. Khudenko, At. Data Nucl. Data Tables 95 (2009) 815.

Дослідження

Загальна маса зразку $m(\text{Eu}_2\text{O}_3) = 313.8 \text{ г}$

Низькофонова HPGe-детекторна система розміщена під землею на глибині ~ 3600 м водного еквіваленту в підземній лабораторії Гран-Сассо Національного інституту ядерної фізики (Італія).

Пасивний захист:

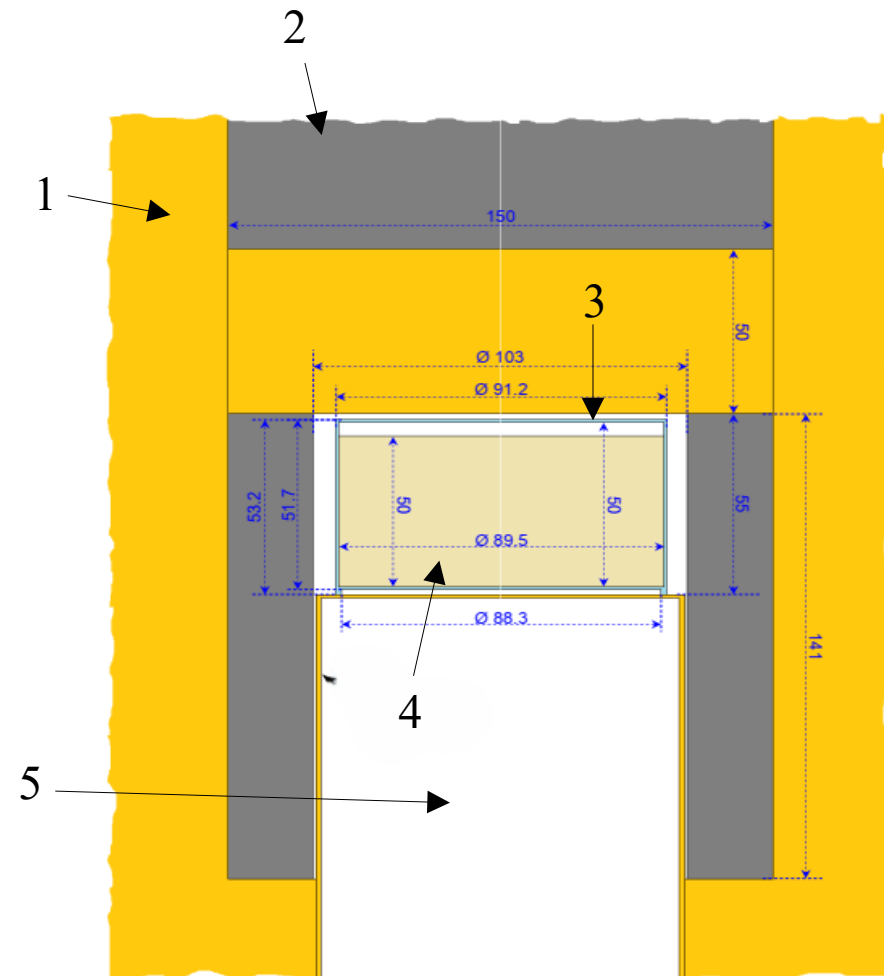
- 1) мідь
- 2) свинець
- 3) пластиковий контейнер
- 4) Eu_2O_3
- 5) BEGe детектор

Час вимірювань — 4211 год.

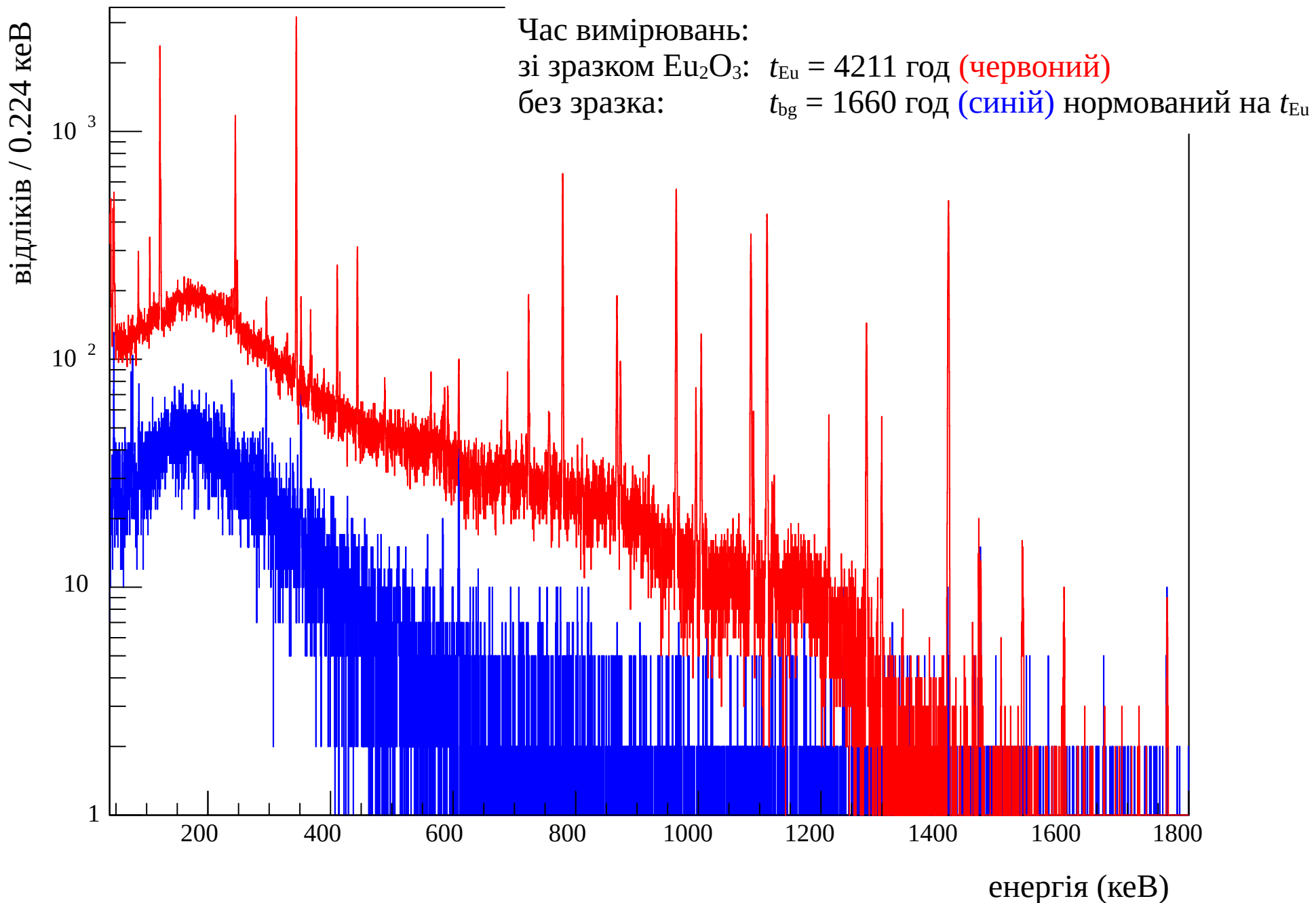
Розмір Eu_2O_3 зразка: $\varnothing 89.5 \times 50 \text{ мм}$.

$^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}^* \text{ (1-ий рівень, 91.1 кеВ, 5/2}^+)$

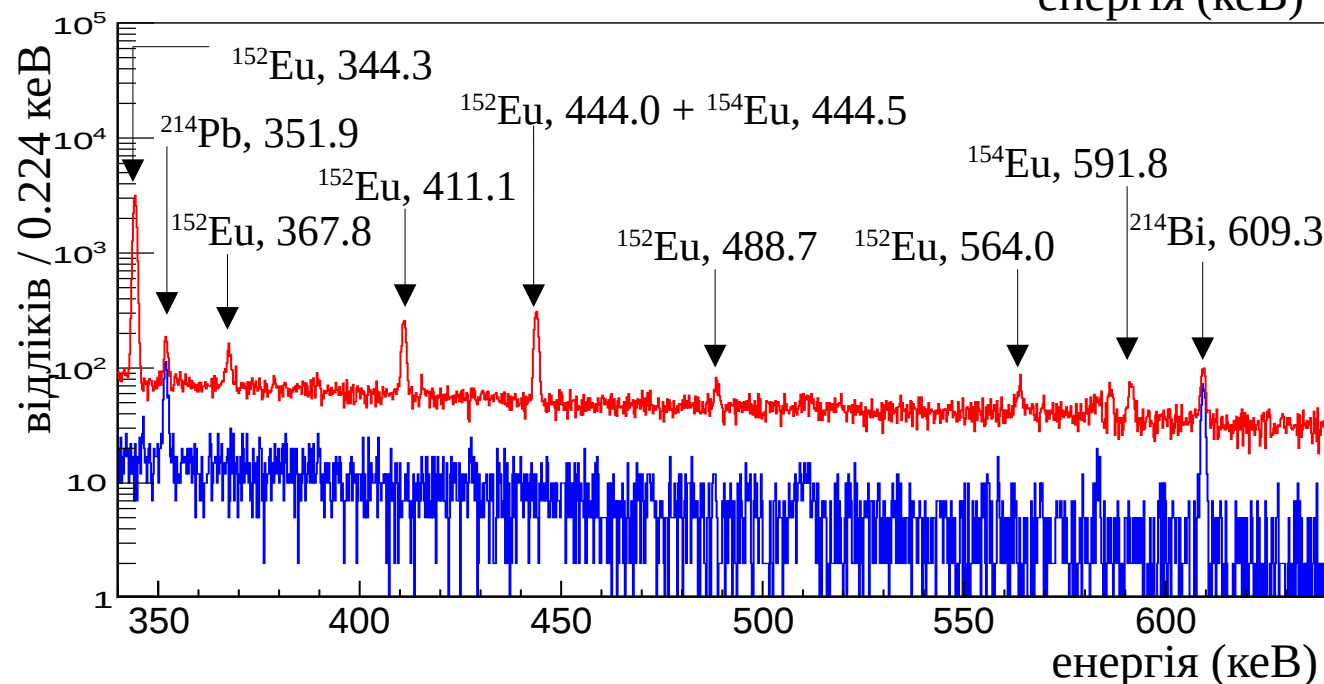
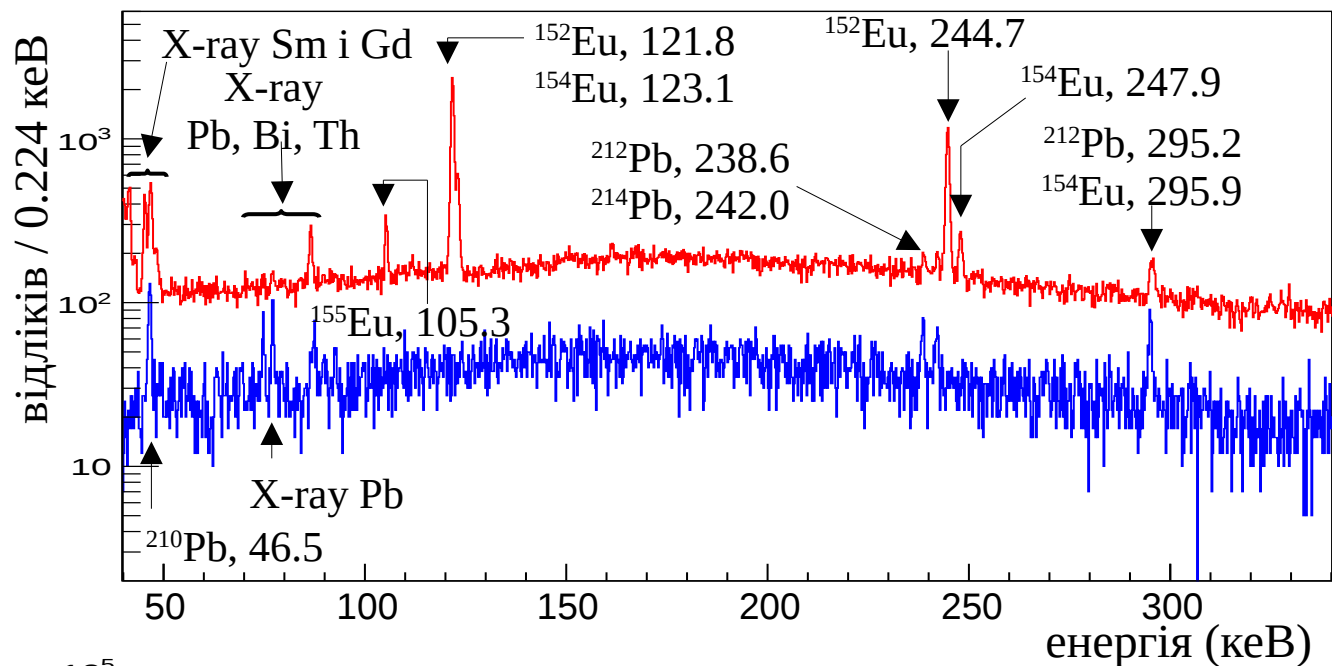
$^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{149}\text{Pm} \rightarrow ^{149}\text{Sm} \text{ (285.9 кеВ, 9/2}^+)$



Енергетичний спектр



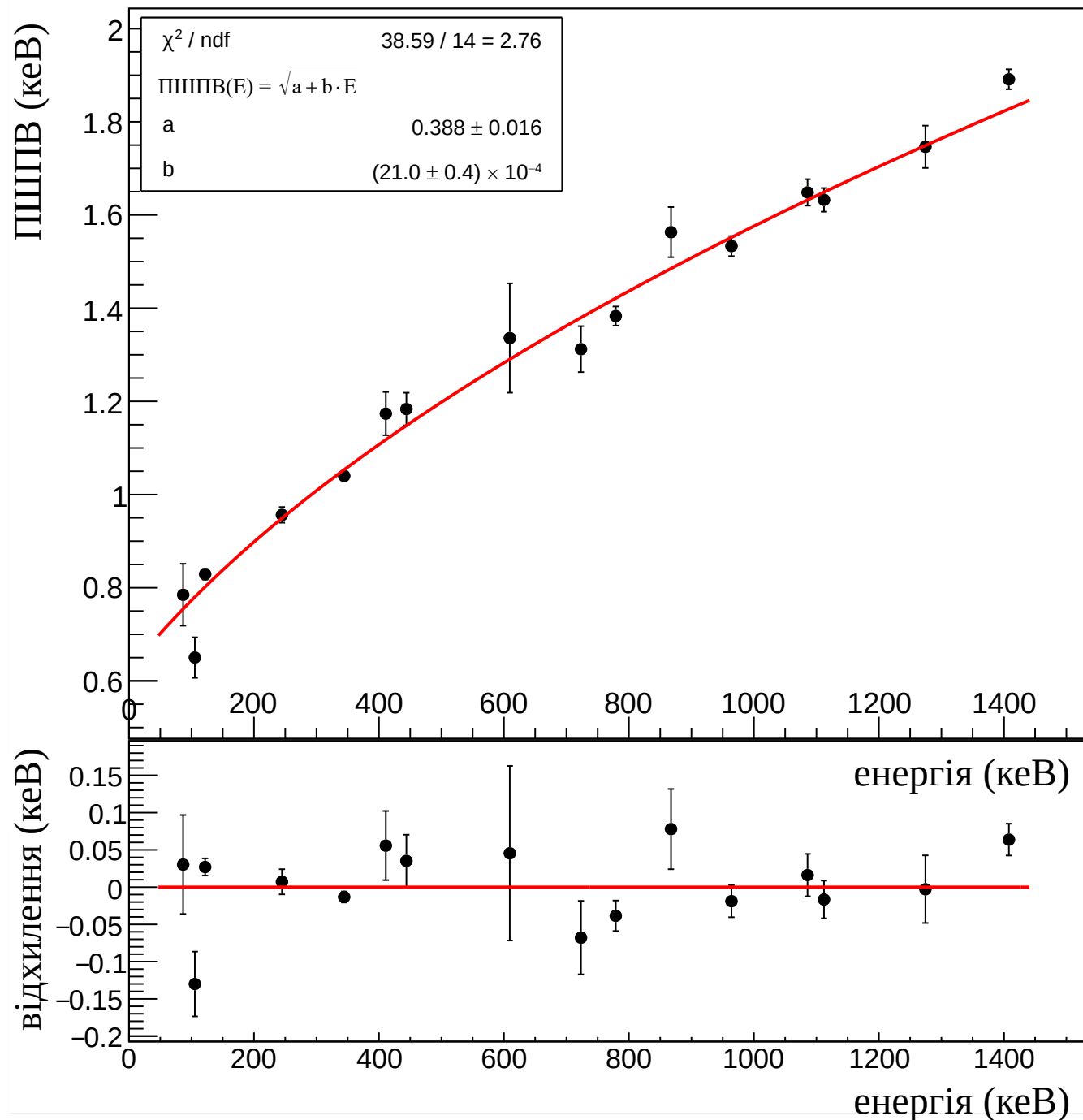
Радіоактивна забрудненість зразка



Радіоактивність у зразку Eu_2O_3 станом на 2019 рік.

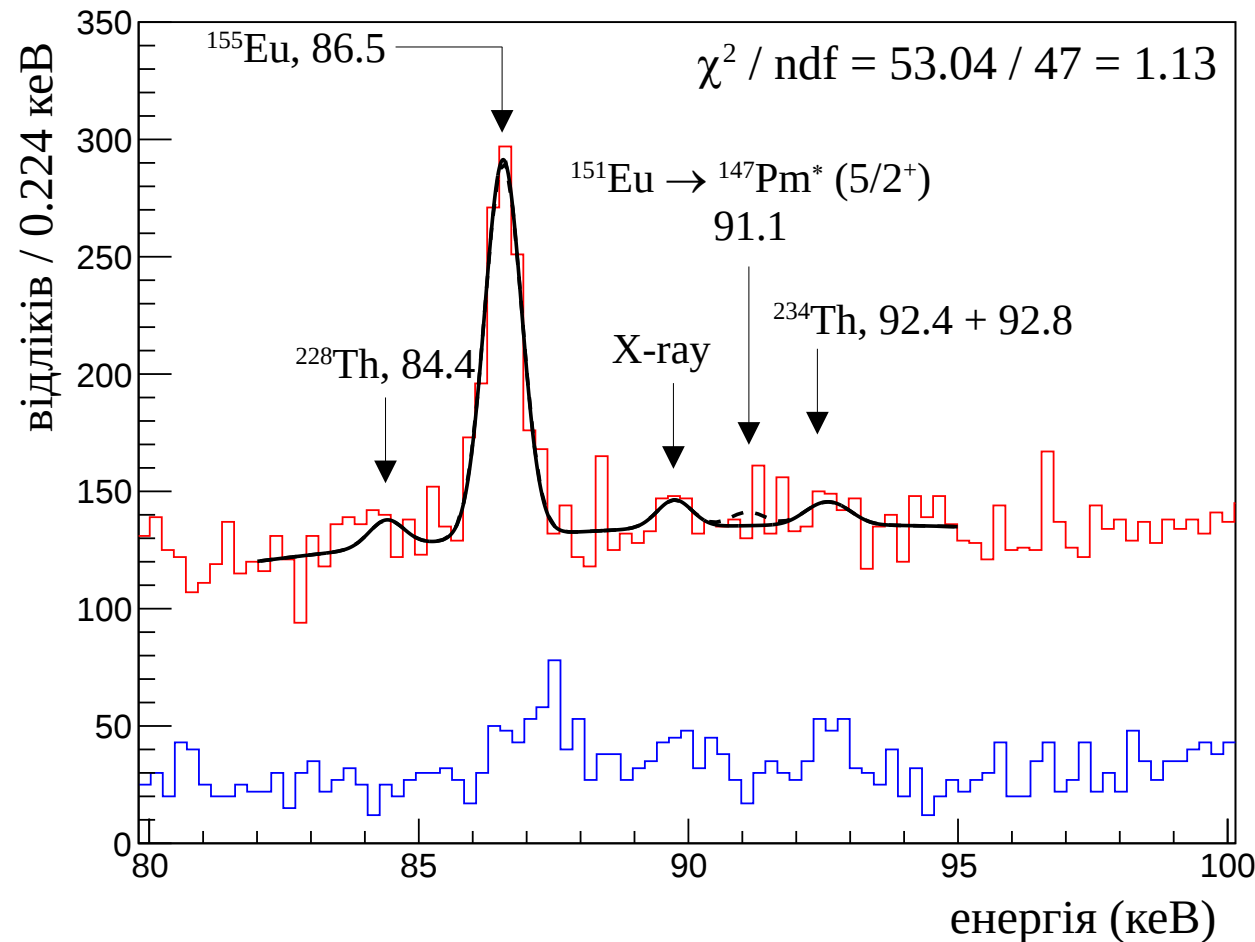
ланцюжок	радіо- нуклід	активність (мБк/кг)
	^{152}Eu	704(50)
	^{154}Eu	118(9)
	^{155}Eu	150(20)
	^{40}K	< 19
	^{137}Cs	1.5
^{232}Th	^{228}Ra	< 2.5
	^{228}Th	< 2.0
^{235}U	^{235}U	< 2.0
	^{231}Pa	< 21.0
^{238}U	^{234}Th	< 200
	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	< 48
	^{226}Ra	< 1.2

Енергетична роздільна здатність



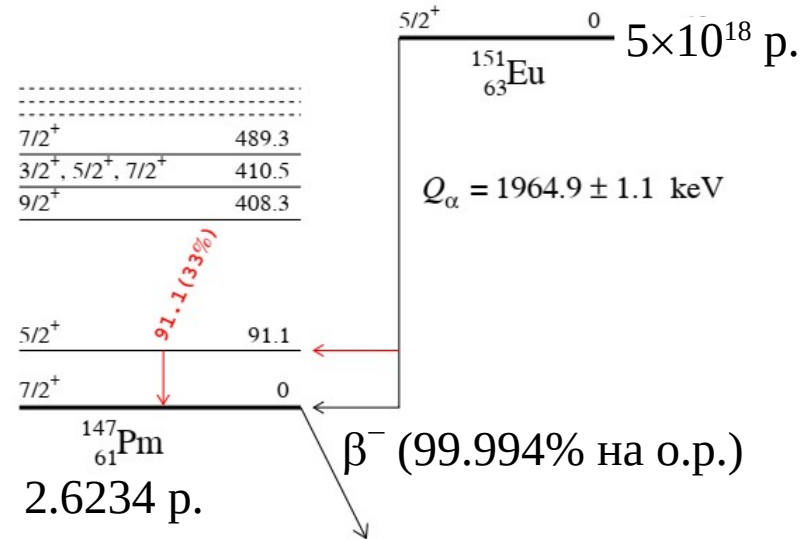
ізоТОП	енергія (кеВ)	ПШПВ (кеВ)
^{155}Eu	86.5	0.78
^{155}Eu	105.3	0.65
^{152}Eu	121.8	0.83
^{152}Eu	244.7	0.96
^{152}Eu	344.3	1.04
^{152}Eu	411.1	1.17
^{152}Eu	444.0	1.18
^{214}Bi	609.3	1.34
^{154}Eu	723.3	1.31
^{152}Eu	778.9	1.38
^{152}Eu	867.4	1.56
^{152}Eu	964.1	1.53
^{152}Eu	1085.8	1.65
^{152}Eu	1112.1	1.63
^{154}Eu	1274.4	1.75
^{152}Eu	1408.0	1.89

α-розпад ^{151}Eu на $^{147}\text{Pm}^*$



$$\text{ПШПВ}(E_\gamma = 91.1 \text{ кеВ}) = 0.761 \text{ кеВ}$$

$$S = 21.16 \pm 31.21 \rightarrow \lim S = 72.34$$



$$\lim T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \eta}{\lim S}$$

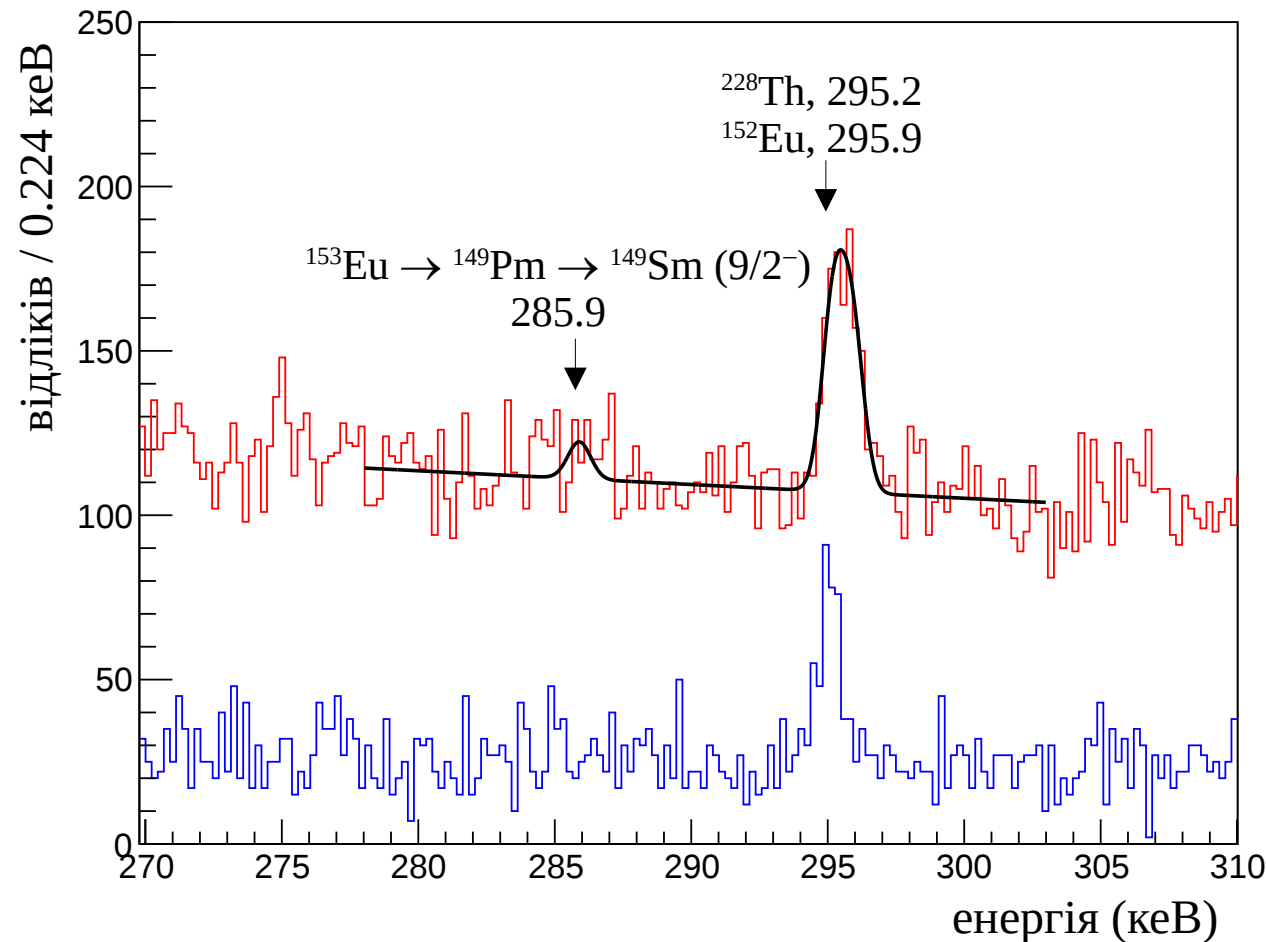
$$N(^{151}\text{Eu}) = 5.12 \cdot 10^{23} \text{ р.}$$

$$\varepsilon = 7.1 \times 10^{-3}$$

$$\eta = 0.33$$

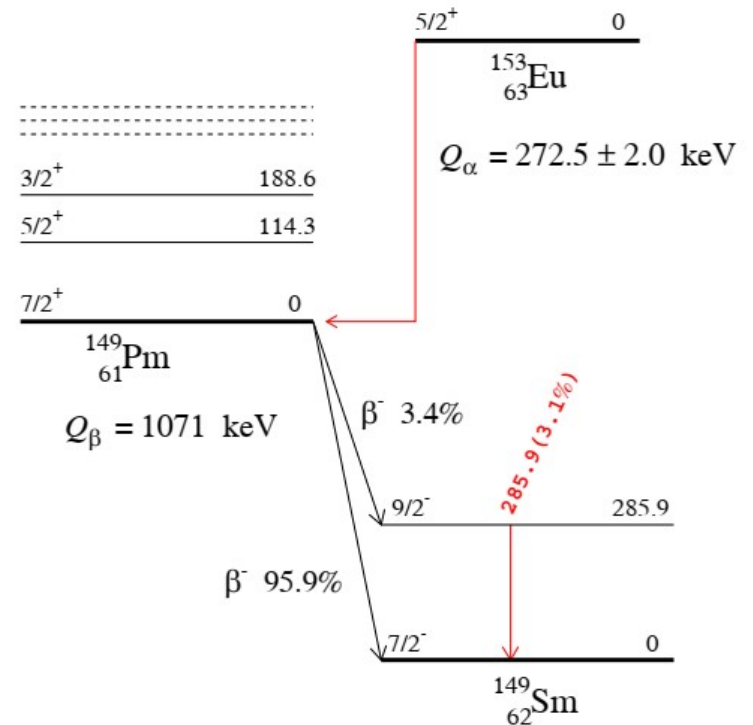
$$\lim T_{1/2} [^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}^* (5/2^+, 91.1 \text{ кеВ})] = 5.5 \times 10^{18} \text{ р. (90 \% довірча ймовірність)}$$

α -розпад ^{153}Eu на ^{149}Pm



$$\text{ПШПВ}(E_\gamma = 285.9 \text{ кеВ}) = 0.980 \text{ кеВ}$$

$$S = 52.60 \pm 29.37 \rightarrow \lim S = 100.77$$



$$\lim T_{1/2} = \frac{\ln 2 \cdot N \cdot t \cdot \varepsilon \cdot \eta}{\lim S}$$

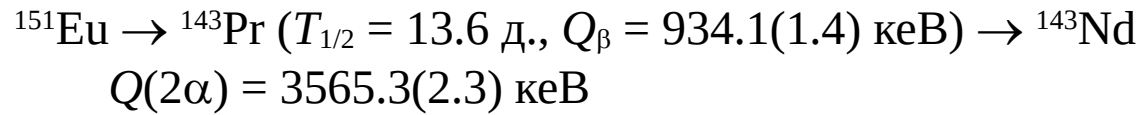
$$N(^{153}\text{Eu}) = 5.60 \times 10^{23} \text{ р.}$$

$$\varepsilon = 2.86 \times 10^{-2}$$

$$\eta = 0.031$$

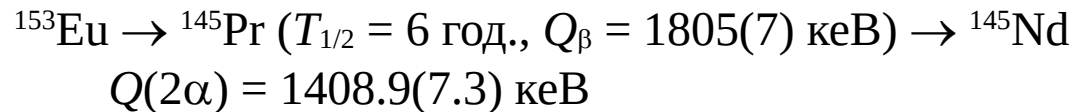
$$\lim T_{1/2} [^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{149}\text{Pm}] = 1.7 \times 10^{18} \text{ р. (90 \% довірча ймовірність)}$$

2 α -розпад



$$E_{\gamma} = 742.1 \text{ кеВ} (\eta = 1.2 \times 10^{-6})$$

Теоретична оцінка $T_{1/2} = 1.5 \times 10^{66} \text{ р.}$



$$E_{\gamma} = 675.8 \text{ кеВ} (\eta = 0.514)$$

$$E_{\gamma} = 748.3 \text{ кеВ} (\eta = 0.525)$$

$$E_{\gamma} = 920.7 \text{ кеВ} (\eta = 0.146)$$

$$E_{\gamma} = 979.0 \text{ кеВ} (\eta = 0.256)$$

$$E_{\gamma} = 1051.4 \text{ кеВ} (\eta = 0.175)$$

$$E_{\gamma} = 1150.3 \text{ кеВ} (\eta = 0.194)$$

Підсумки

Розпад Q_α ($Q_{2\alpha}$) [1,2]	Перехід	Експериментальне $T_{1/2}$ (90% Д.Й.)		теор. оцінка $T_{1/2}$, р [4-6, 2]
		попереднє обмеження	поточні результати (попередньо)	
α -розпад				
$^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}$ 1964.0(1.1) кеВ	$5/2^+ \rightarrow 7/2^+ (1^{\text{ий}}, 91.1 \text{ кеВ})$	$> 2.5 \times 10^{18}$ р. [3]	$> 5.5 \times 10^{18}$	$7.4 \times 10^{18} \text{ — } 9.7 \times 10^{19}$
$^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{149}\text{Pm}$ 272.5(2.0) кеВ	$5/2^+ \rightarrow 7/2^+ (\text{о.р.})$	$> 4.3 \times 10^{17}$ р. [3]	$> 1.7 \times 10^{18}$	$2.8 \times 10^{141} \text{ — } 5.2 \times 10^{144}$
2α -розпад				
$^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{143}\text{Pr}$ 3565.3(2.3) кеВ		—		1.5×10^{66}
$^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{145}\text{Pr}$ 1408.9(7.3) кеВ		—		

- [1] M. Weng et al., The AME 2000 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references, Chinese Phys. C 45 (2021) 030003
- [2] V.I. Tretyak. Spontaneous double alpha decay: first experimental limit and prospects of investigation, Nucl. Phys. At. Energy 22 (2021) 121-126.
- [3] F.A. Danevich et al., Search for α decay of ^{151}Eu to the first excited level of ^{147}Pm using underground γ -ray spectrometry, Eur. Phys. J. A 48 (2012) 157.
- [4] D.N. Poenaru, M. Ivascu, Estimations of the alpha decay half-lives, J.Phys. 44 (1983) 791.
- [5] B. Buck, A.C. Merchant, S.M. Perez, Favoured alpha decays of odd-mass nuclei, J. Phys. G 18 (1992) 143.
- [6] V.Yu. Denisov, A.A. Khudenko, α decay haf-lives, α capture and α nucleus potential, At. Data Nucl. Data Tables 95 (2009) 815.

- 1) Проведено аналіз із пошуку альфа-розпадів природних ізотопів європію зі зразком Eu_2O_3 масою 313.8 г.
- 2) Отримані попередні обмеження на $T_{1/2}$ α -розпаду ядер ^{151}Eu , ^{153}Eu :
$$\lim T_{1/2} [^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}^*] = 5.5 \times 10^{18} \text{ р. (90 \% Д.Й.)}$$
$$\lim T_{1/2} [^{153}\text{Eu} \rightarrow ^{149}\text{Pm}] = 1.7 \times 10^{18} \text{ р. (90 \% Д.Й.)}$$
- 3) Проводиться подальший аналіз спектру з метою покращити попередні обмеження та вперше встановити обмеження на подвійний альфа-розпад ^{151}Eu і ^{153}Eu .