

# Застосування збагачених сцинтиляційних кристалів $^{116}\text{CdWO}_4$ для експериментального дослідження $2\beta$ -розпаду ізотопу $^{116}\text{Cd}$

Д.В. Касперович<sup>1</sup>, А.С. Барабаш<sup>2</sup>, П. Беллі<sup>3,4</sup>, Р. Бернабей<sup>3,4</sup>, Я.В. Васильєв<sup>5</sup>, Ф.А. Даневич<sup>1</sup>,  
С. Д'Анжелло<sup>3,4</sup>, А. Інчікітті<sup>6</sup>, Ф. Каппелла<sup>7</sup>, В. Караччіоло<sup>7</sup>, В.В. Кобичев<sup>1</sup>, С.І. Коновалов<sup>2</sup>,  
М. Лаубенштейн<sup>7</sup>, Д.В. Пода<sup>1,8</sup>, О.Г. Поліщук<sup>1</sup>, В.І. Третьяк<sup>1,6</sup>, В.І. Уматов<sup>2</sup>, Д.М. Черняк<sup>1</sup>,  
Р. Черулі<sup>7</sup>, В.М. Шлегель<sup>5</sup>

*1 Інститут ядерних досліджень, Київ, Україна*

*2 Інститут теоретичної та експериментальної фізики НДЦ "Курчатовський інститут", Москва, Росія*

*3 НІЯФ, відділення у Римі "Гор Вергата", Рим, Італія*

*4 Римський університет "Гор Вергата", Рим, Італія*

*5 Інститут неорганічної хімії ім. А.В. Ніколаєва, Новосибірськ, Росія*

*6 НІЯФ, відділення у Римі, Рим, Італія*

*7 Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія*

*8 Науковий центр з ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція*

*9 Інститут фізики та математики Всесвіту Кавлі, Університет Токіо, Японія*

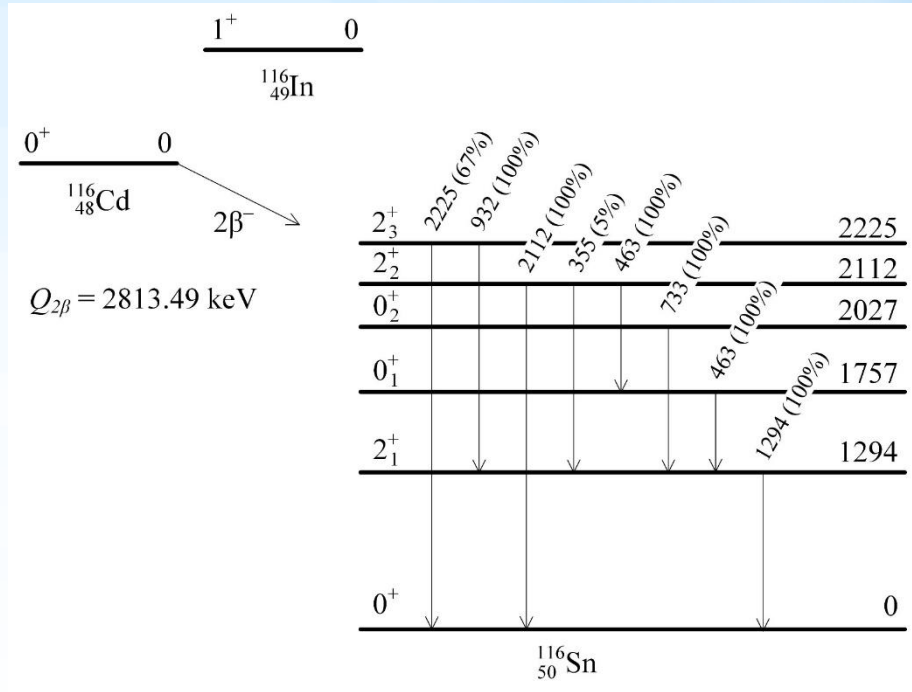
# 2β-процеси

$2\nu 2\beta^-$ :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^\pm + 2\nu$   
(дозволений у Стандартній моделі)

$0\nu 2\beta^-$ :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^\pm$   
(заборонений у СМ,  $\Delta L=2$ )

$2\nu 2\beta^-$ -розпад експериментально спостережений для 11 ядер  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{116}\text{Cd}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{150}\text{Nd}$ ,  $^{136}\text{Xe}$  and  $^{238}\text{U}$ .

$T_{1/2}(2\nu 2\beta^-) \sim 10^{18} - 10^{24}$  років.

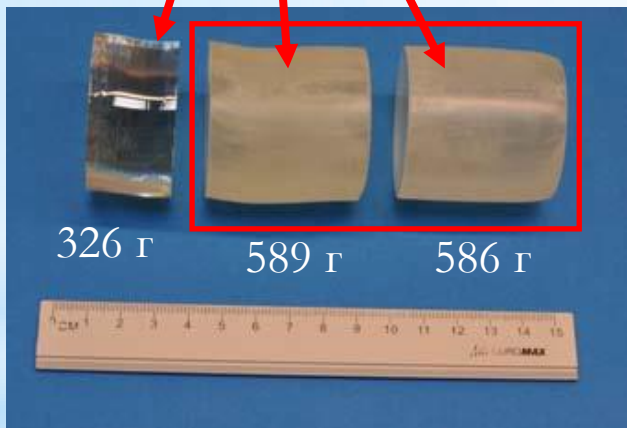
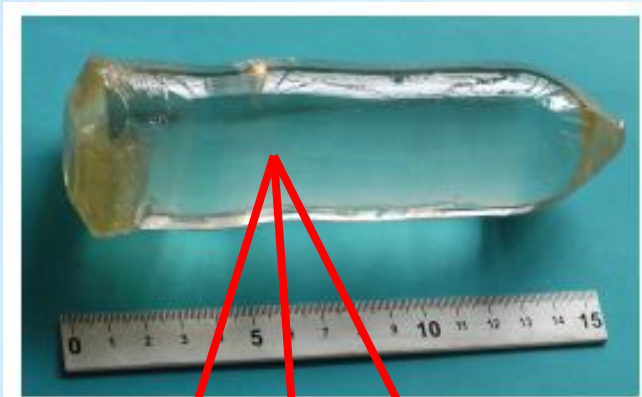


## Кристали $\text{CdWO}_4$

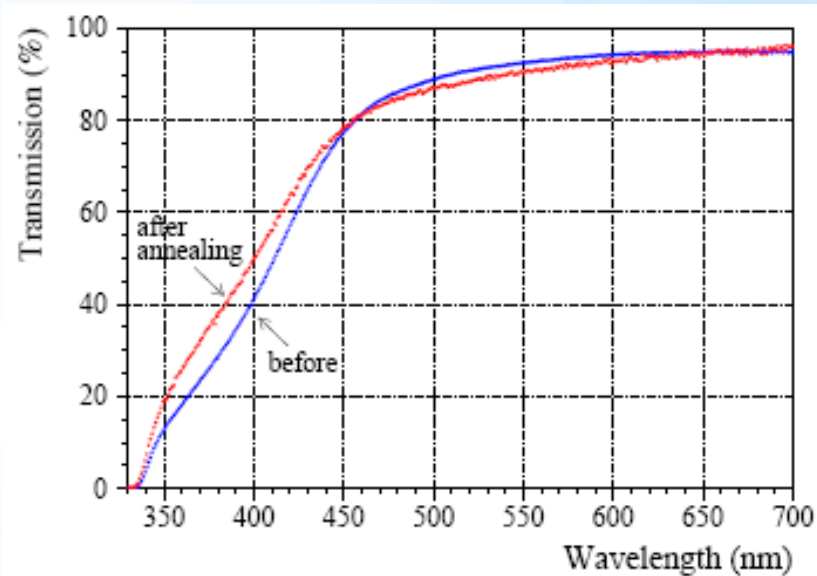
- гарні сцинтиляційні та оптичні властивості
- низький рівень внутрішнього забруднення
- source = detector
- можливість розділяти сигнали різних частинок за формою

$\text{CdWO}_4$  успішно застосовувались у низькофонових експериментах з пошуку  $2\beta^-$ -розпаду Cd та W, а також для дослідження рідкісних  $\alpha$ - та  $\beta$ -розпадів.

# Сцинтиляційний кристал $^{116}\text{CdWO}_4$



Кристали  $^{116}\text{CdWO}_4$  (82% of  $^{116}\text{Cd}$ ) вирощено методом Чохральського з низьким градієнтом температури [1].

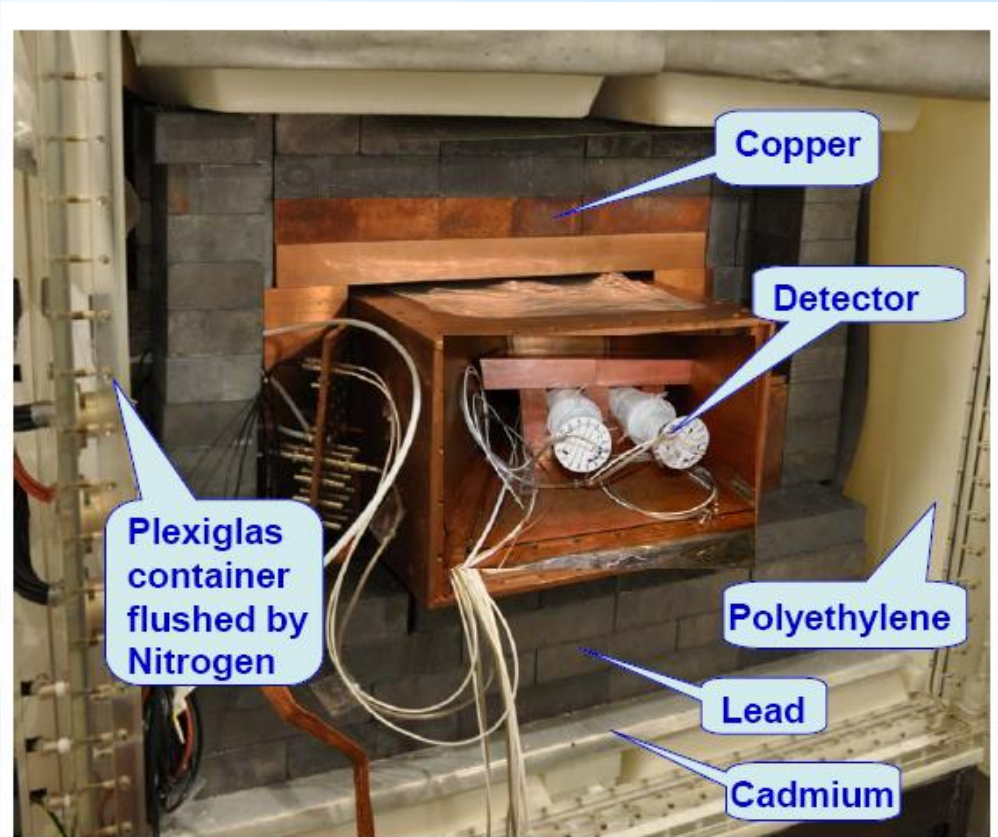
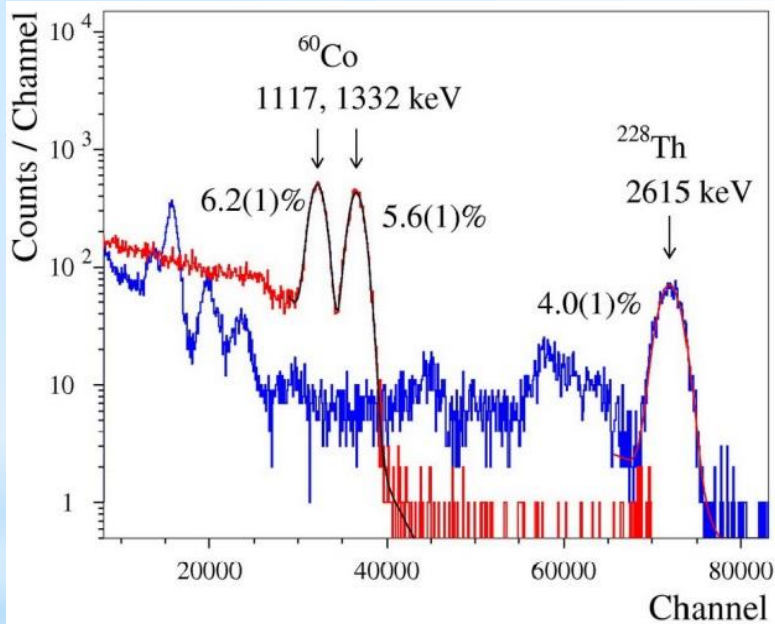
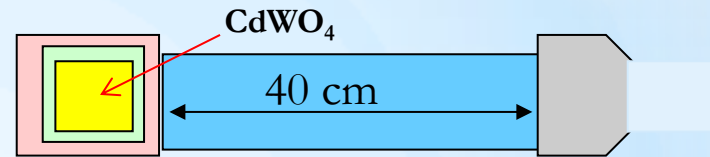


Крива оптичного пропускання  $^{116}\text{CdWO}_4$  до і після прожарювання кристалу.

# Експеримент

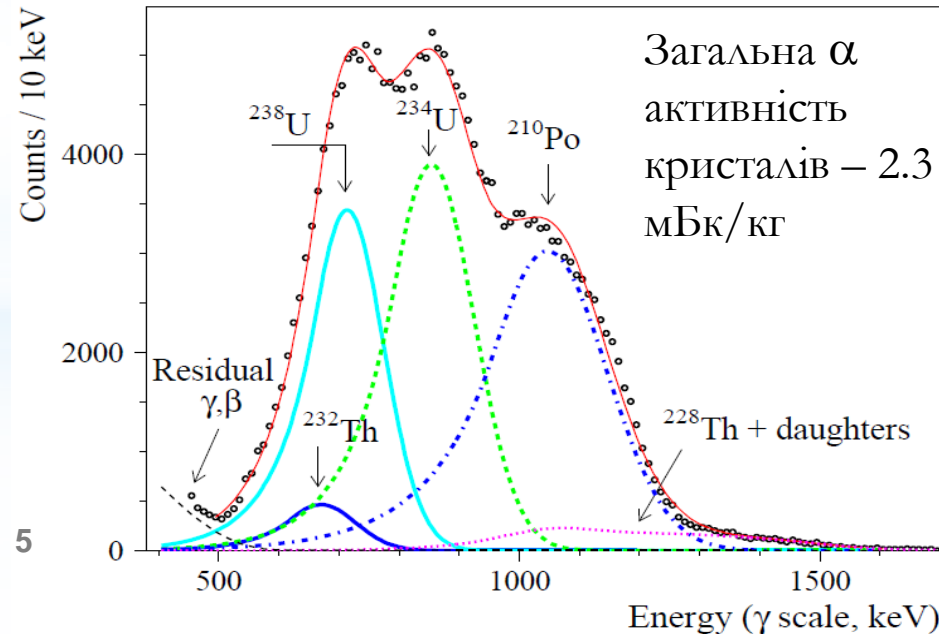
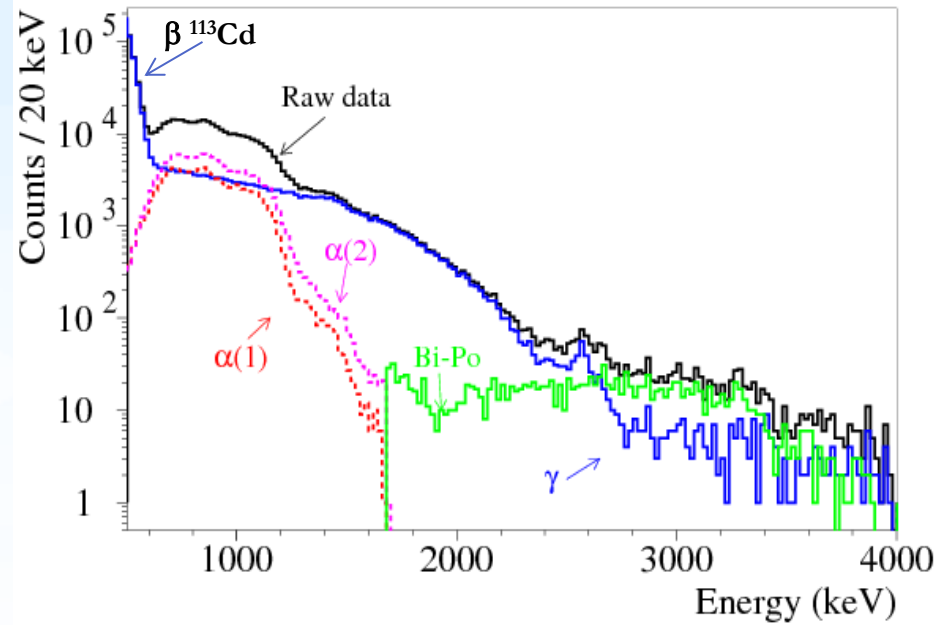
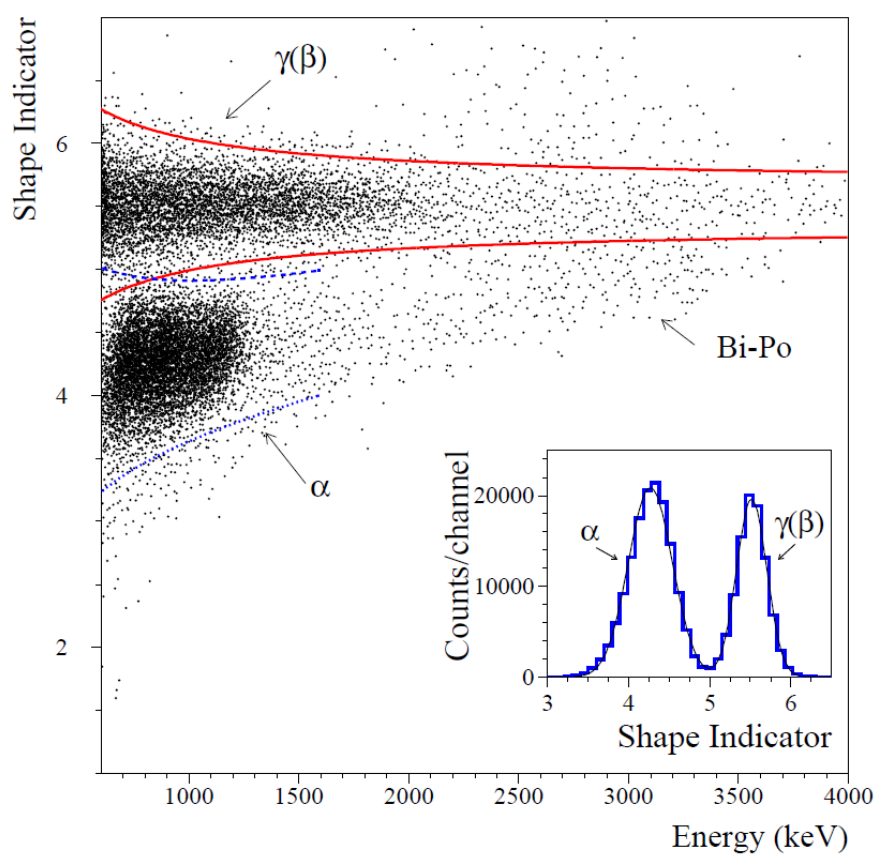
Два кристали  $^{116}\text{CdWO}_4$  (загальна маса 1162 г) у низькофоновій установці DAMA/R&D

Загальний час вимірювань  $\sim 35324$  годин.



Індекс фону  $\approx 0.1$  відліки/(рік $\times$ кг $\times$ кеВ)  
(енергетичний інтервал 2,7 – 2,9 кеВ)

# Аналіз сигналів за формою, 26831 год



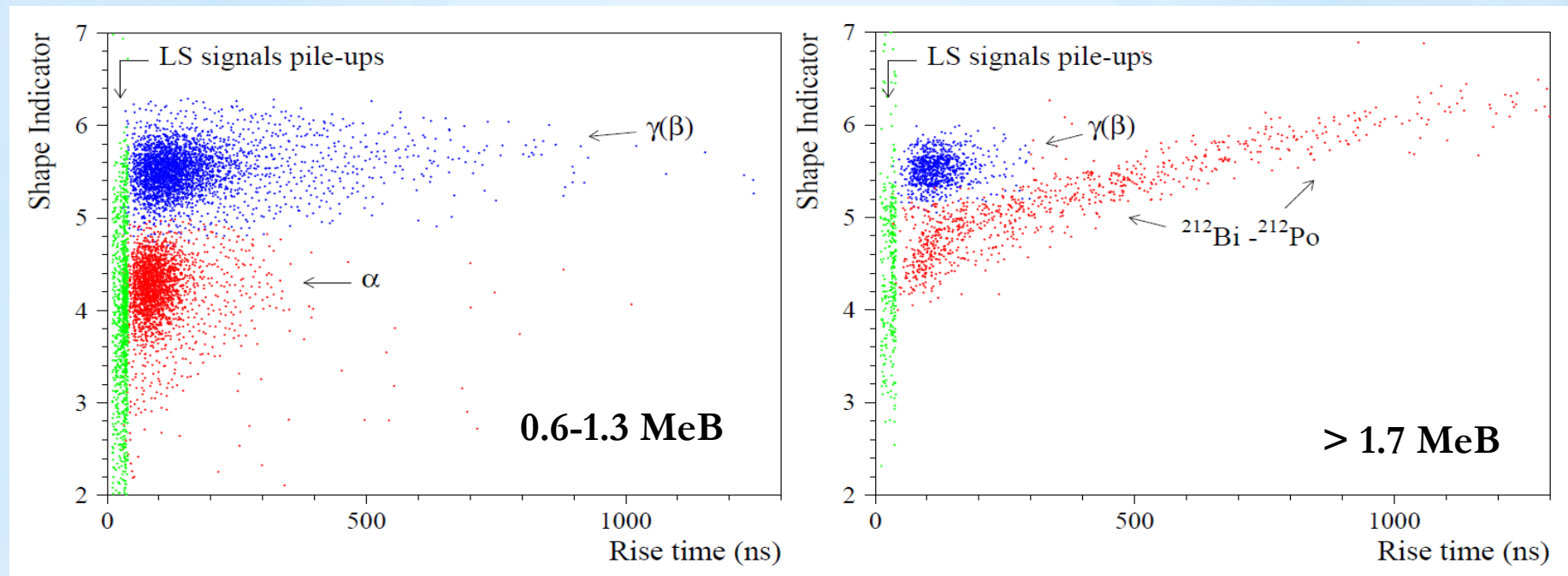
$$SI = \sum f(t_k) \times P(t_k) / \sum f(t_k)$$

де  $f(t_k)$  – амплітуда сигналу в час  $t_k$

$$P(t) = [f_{\alpha}(t) - f_{\gamma}(t)] / [f_{\alpha}(t) + f_{\gamma}(t)],$$

де  $f_{\alpha}(t), f_{\gamma}(t)$  – форми сигналів

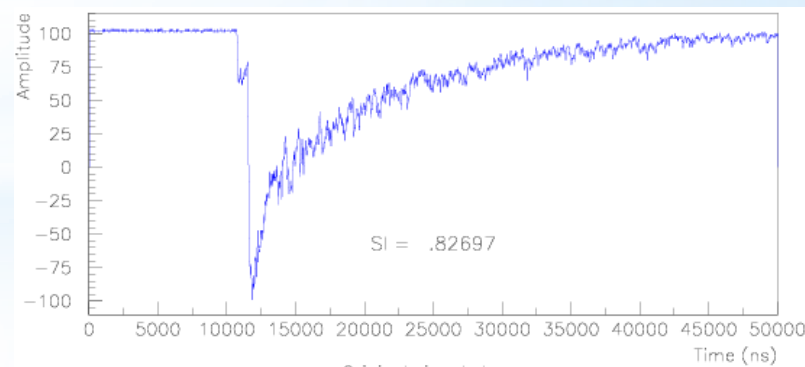
# Відбір подій $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ за фронтом і формою сигналу



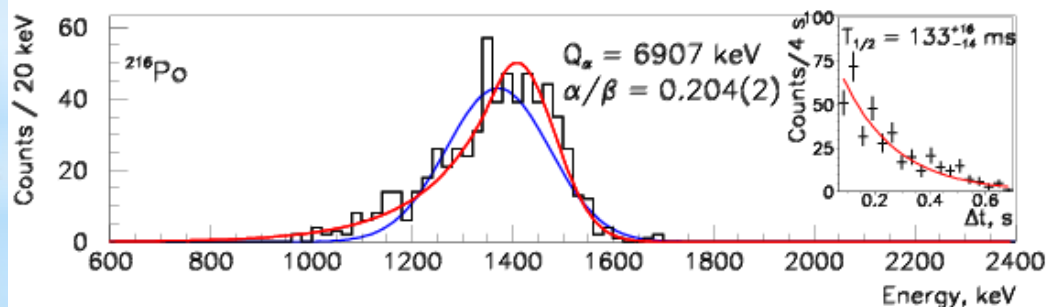
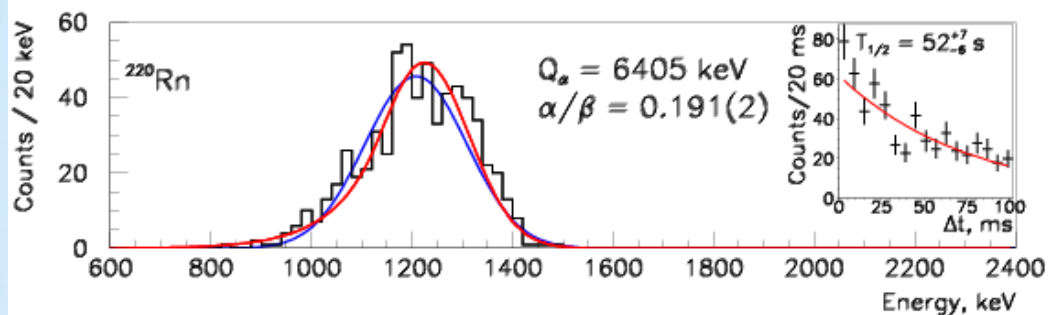
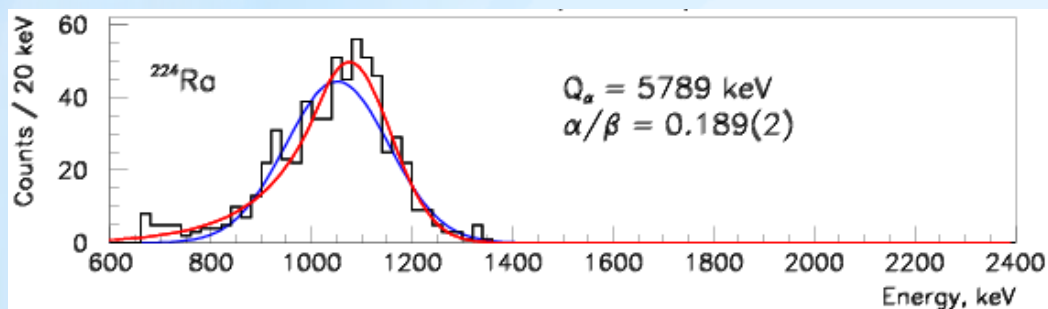
Активність  $^{228}\text{Th}$  (в  $\mu\text{Бк}/\text{кг}$ )

No.1 17(2)

No.2 26(2)



# Часово-амплітудний аналіз (t-A)

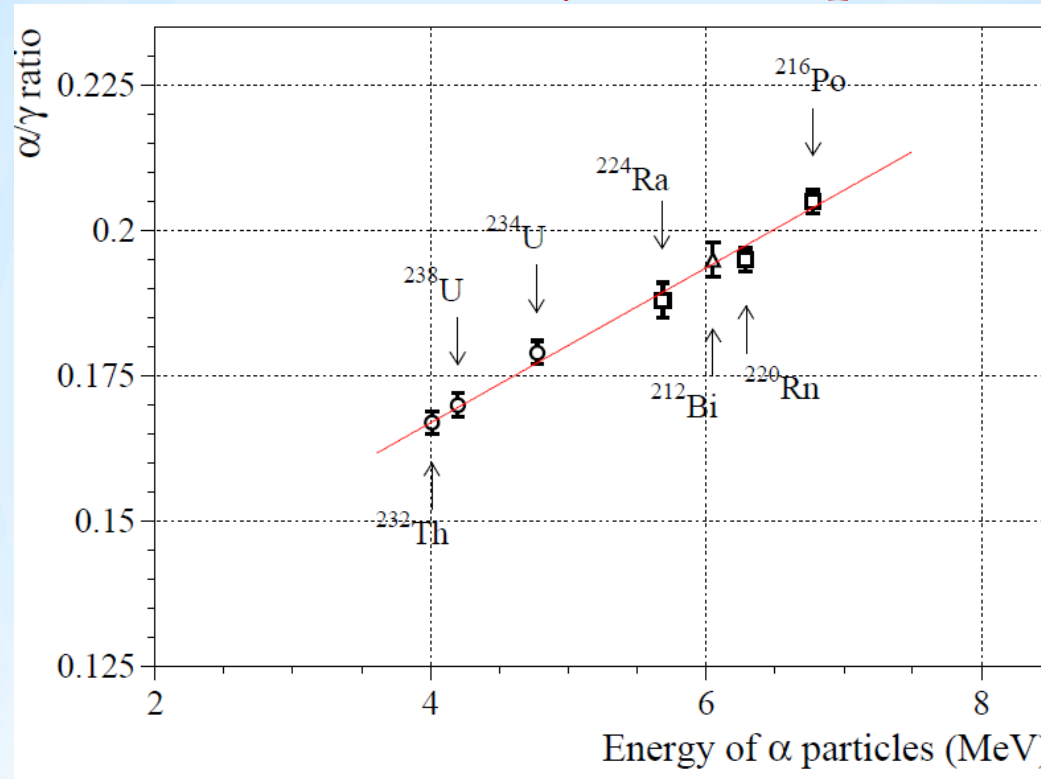


Відібрані альфа-піки  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{216}\text{Po}$  (26831 години).  
 Визначені значення  $T_{1/2}$  для  $^{220}\text{Rn}$  та  $^{216}\text{Po}$  добре узгоджуються з таблицними:

Ізотоп	$T_{1/2}, \text{с}$	
	t-A	таблиця
$^{220}\text{Rn}$	$52_{-6}^{+7}$	55,6
$^{216}\text{Po}$	$0,133_{-0,014}^{+0,016}$	0,145

Активність  $^{228}\text{Th}$ , мкБк/кг:  
 Кристал 2                      17(1)  
 Кристал 1                      27(1)

# Залежність $\alpha/\gamma$ від енергії



$\alpha/\gamma$  співвідношення визначає залежність  $E = 0.114(7) + 0.0133(12) \times E_{\alpha}$  в інтервалі енергій 4.0 – 6.8 MeV отримано з використанням позиції  $\alpha$  піків:

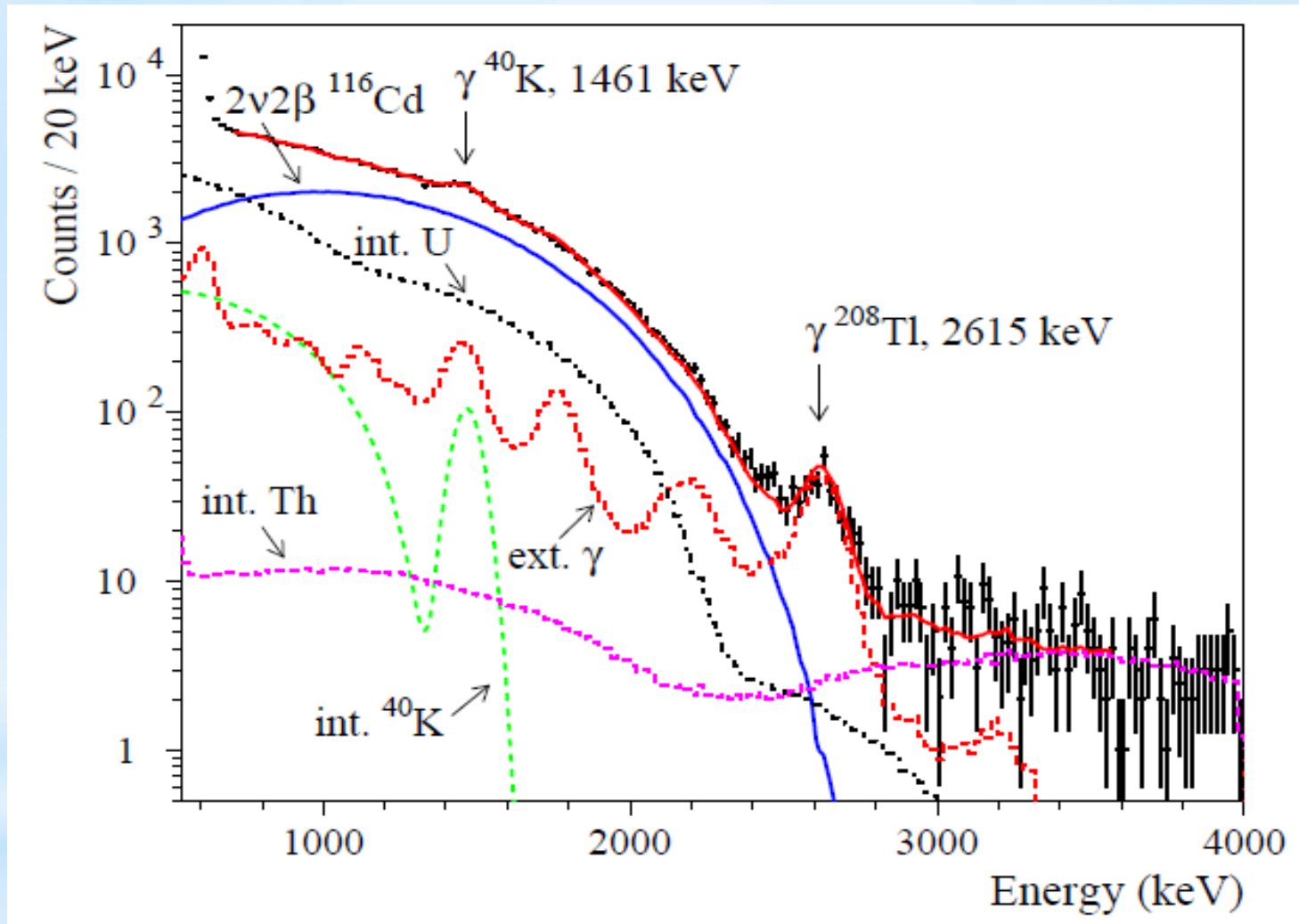
- 1)  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  та  $^{216}\text{Po}$  (часово-амплітудний аналіз);
- 2)  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  та  $^{234}\text{U}$  (аналіз за форми сигналу);
- 3)  $^{212}\text{Bi}$  (аналіз подій  $^{212}\text{Bi}/^{208}\text{Tl}$ ).



# Радіоактивна забрудненість кристалів $^{116}\text{CdWO}_4$

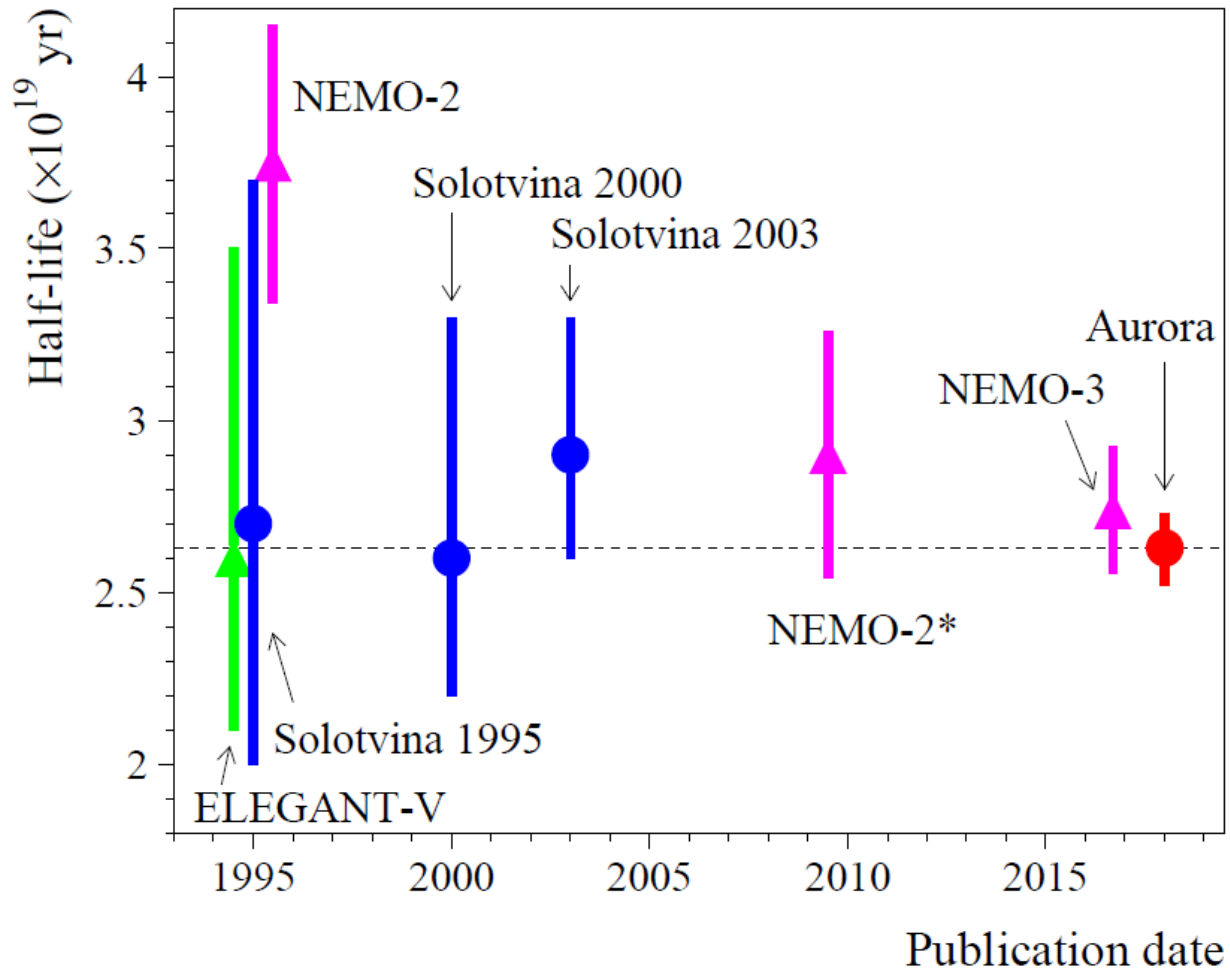
Chain	Nuclide	Activity (mBq/kg)
	$^{40}\text{K}$	0.22(9)
	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	$\leq 0.02$
	$^{110m}\text{Ag}$	$\leq 0.007$
	$^{116}\text{Cd}$	1.138(5)
$^{232}\text{Th}$	$^{232}\text{Th}$	0.07(2)
	$^{228}\text{Ra}$	$\leq 0.005$
	$^{228}\text{Th}$	0.020(1)
$^{235}\text{U}$	$^{227}\text{Ac}$	$\leq 0.002$
$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	0.58(4)
	$^{234}\text{U}$	0.6(1)
	$^{230}\text{Th}$	$\leq 0.13$
	$^{226}\text{Ra}$	$\leq 0.006$
	$^{210}\text{Pb}$	0.70(4)
Total $\alpha$		2.14(2)

# $2\nu 2\beta$ -розпад $^{116}\text{Cd}$



$$T_{1/2} = [2.63 \pm 0.011(\text{стат.}) \pm 0.091(\text{сист.})] \times 10^{19} \text{ років}$$

## 2ν2β: порівняння з попередніми експериментами



# Висновки

- \* У Національній лабораторії Гран Сассо (Італія) завершився експеримент з радіоактивно чистими кристалами  $^{116}\text{CdWO}_4$  ( $m = 1.16$  кг), зі збагаченого  $^{116}\text{Cd}$  (82%)
- \* Кристали  $^{116}\text{CdWO}_4$  мають гарні сцинтиляційні та оптичні властивості (роздільна здатність 4-5% для лінії 2615 кеВ на протязі всього експерименту).
- \* Використання методів розділення сигналів за формою та фронтом, а також часово-амплітудного аналізу дозволяє визначити внутрішню та поверхневу забрудненість кристалів альфа-радіоактивними ізотопами уран-торієвих рядів
- \*  $T_{1/2}(2\nu 2\beta) = [2.63 \pm 0.011(\text{стат.}) \pm 0.091(\text{сист.})] \times 10^{19}$  років (найбільш точне значення)
- \*  $T_{1/2}(0\nu 2\beta) \geq 2.2 \times 10^{23}$  років  $\rightarrow \langle m_\nu \rangle < (1.0 - 1.7)$  еВ
- \* Нові межі для  $0\nu 2\beta$  розпадів  $^{116}\text{Cd}$  на збуджені рівні  $^{116}\text{Sn}$ :  
 $\lim T_{1/2} \sim (2.9-22) \times 10^{22}$  років

Decay mode	Transition, level of $^{116}\text{Sn}$ (keV)	$T_{1/2}$ (yr)	Best previous limits (yr) Reference
$2\nu$	g.s.	$(2.63^{+0.11}_{-0.12}) \times 10^{19}$ yr	see Table 1 and Fig. 12
$2\nu$	$2^+$ (1294)	$\geq 9.8 \times 10^{20}$	$\geq 2.3 \times 10^{21}$ [48]
$2\nu$	$0^+$ (1757)	$\geq 5.9 \times 10^{20}$	$\geq 2.0 \times 10^{21}$ [48]
$2\nu$	$0^+$ (2027)	$\geq 1.1 \times 10^{21}$	$\geq 2.0 \times 10^{21}$ [48]
$2\nu$	$2^+$ (2112)	$\geq 2.5 \times 10^{21}$	$\geq 1.7 \times 10^{20}$ [47]
$2\nu$	$2^+$ (2225)	$\geq 7.5 \times 10^{21}$	$\geq 1.0 \times 10^{20}$ [47]
$0\nu$	g.s.	$\geq 2.2 \times 10^{23}$	$\geq 1.7 \times 10^{23}$ [32]
$0\nu$	$2^+$ (1294)	$\geq 7.1 \times 10^{22}$	$\geq 2.9 \times 10^{22}$ [32]
$0\nu$	$0^+$ (1757)	$\geq 4.5 \times 10^{22}$	$\geq 1.4 \times 10^{22}$ [32]
$0\nu$	$0^+$ (2027)	$\geq 3.1 \times 10^{22}$	$\geq 0.6 \times 10^{22}$ [32]
$0\nu$	$2^+$ (2112)	$\geq 3.7 \times 10^{22}$	$\geq 1.7 \times 10^{20}$ [47]
$0\nu$	$2^+$ (2225)	$\geq 3.4 \times 10^{22}$	$\geq 1.0 \times 10^{20}$ [47]
$0\nu\chi^0$ $n = 1$	g.s.	$\geq 8.2 \times 10^{21}$	$\geq 8.5 \times 10^{21}$ [45]
$0\nu\chi^0$ $n = 2$	g.s.	$\geq 4.1 \times 10^{21}$	$\geq 1.7 \times 10^{21}$ [32]
$0\nu\chi^0$ $n = 3$	g.s.	$\geq 2.6 \times 10^{21}$	$\geq 0.8 \times 10^{21}$ [32]
$0\nu\chi^0\chi^0$ $n = 3$	g.s.	$\geq 2.6 \times 10^{21}$	$\geq 0.8 \times 10^{21}$ [32]
$2\nu LV$ $n = 4$	g.s.	$\geq 1.2 \times 10^{21}$	–
$0\nu\chi^0\chi^0$ $n = 7$	g.s.	$\geq 8.9 \times 10^{20}$	$\geq 4.1 \times 10^{19}$ [77]