



Ricerca del decadimento α raro del ^{151}Eu

Collaborazione DAMA
Roma2, Roma, LNGS, IHEP/Beijing
& in some activities INR-Kiev

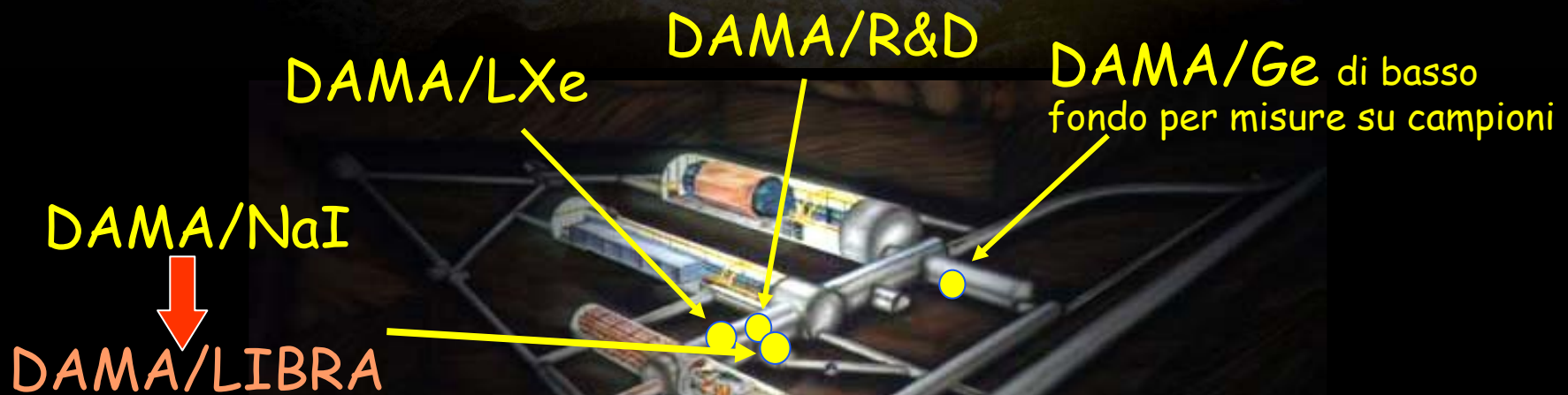
DAMA home page: www.lngs.infn.it

XCIII Congresso SIF
Pisa, 27 Settembre 2007

F. Cappella
Univ. La Sapienza
and INFN-Roma



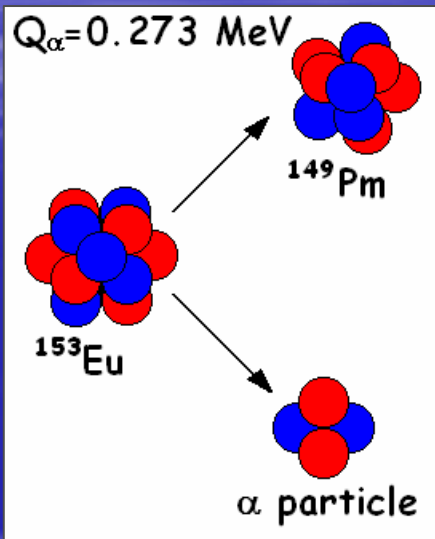
DAMA: un osservatorio per processi rari @LNGS



Ricerca del decadimento α raro dell'Europio

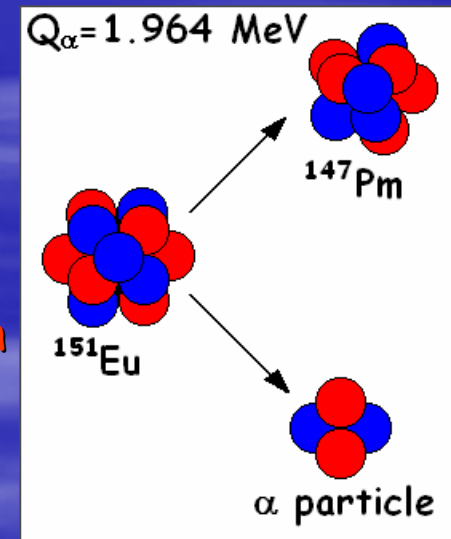
Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Per entrambi gli isotopi naturali dell'Europio, ^{151}Eu ($\delta = 47.81(6)\%$) e ^{153}Eu ($\delta = 52.19(6)\%$) è energeticamente possibile decadere α



Nel caso del ^{153}Eu , il basso valore di Q_α rende impossibile l'osservazione sperimentale di questo decadimento, dato l'elevato valore atteso per il $T_{1/2}$ del processo.

Nel caso del ^{151}Eu , le stime ottenute per il $T_{1/2}$ del processo sono dell'ordine di 10^{18} anni. Tale valore può essere esplorato con le tecniche sperimentali attuali.



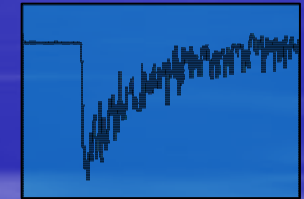
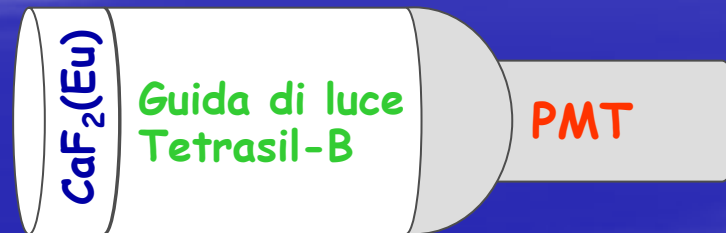
Populated level	Theoretical $T_{1/2}$, yr				
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
ground state	3.0×10^{17}	3.6×10^{18}	6.3×10^{17}	5.9×10^{17}	1.6×10^{18}
$5/2^+$, 91 keV	7.7×10^{18}	1.0×10^{20}	1.5×10^{19}	1.7×10^{19}	–

- [1] B. Buck et al., J. Phys. G 17 (1991) 1223; 18 (1992) 143.
 [2] D.N. Poenaru, M. Ivascu, J. Physique 44 (1983) 791.
 [3] G. Royer, J. Phys. G 26 (2000) 1149.
 [4] M. Fujiwara et al., J. Phys. G 28 (2002) 643.
 [5] D.N. Poenaru et al., Phys. Rev. C 32 (1985) 2198.

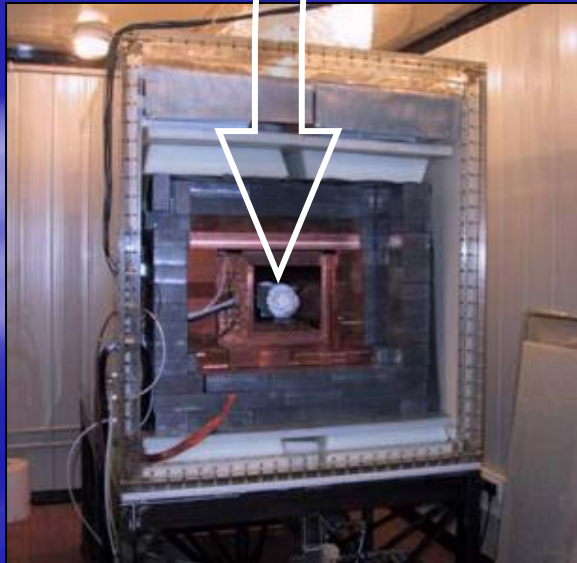
Apparato sperimentale

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

- Scintillatore $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ a basso fondo intrinseco, $3''\varnothing \times 1'' \rightarrow$ massa = 370 g
Concentrazione Eu: $(0.4 \pm 0.1)\%$ misurata con analisi ICP-MS
- Guida di luce in TETRASIL-B, lunghezza: 10 cm
- Fotomoltiplicatore (PMT) a basso fondo intrinseco EMI9265-B53/FL.



Segnali registrati da Transient Digitizer (160 MSa/s) su una finestra temporale di 3125 ns



DAMA/R&D set-up @ LNGS

Scatola in Cu di bassa radioattività mantenuta in atmosfera di HP N_2

Schermo passivo

- 10 cm di Cu di bassa radioattività
- 15 cm di Pb di bassa radioattività
- 1.5 mm Cd
- 4 - 10 cm di Polietilene/Paraffina

L'intero schermo è racchiuso in una scatola in Plexiglass mantenuta in atmosfera di HP N_2



Risposta del rivelatore a particelle α e γ

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Per i γ , scala e risoluzione energetica misurate con le sorgenti: ^{22}Na , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{228}Th and ^{241}Am .

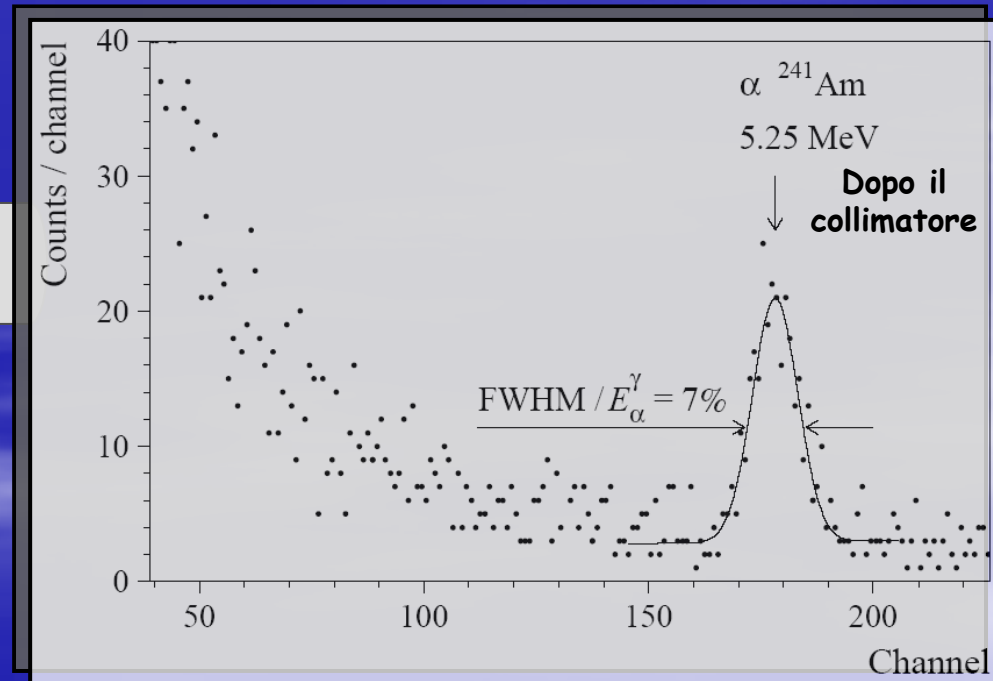
$$\text{FWHM}_\gamma (\text{keV}) = \sqrt{3.7(4) \cdot E_\gamma [\text{keV}]}$$

(esempio: 28% @ 60 keV; 11.4% @ 356 keV e 7.5% @ 662 keV)

Risposta a particelle α studiata con una sorgente α collimata di ^{241}Am .



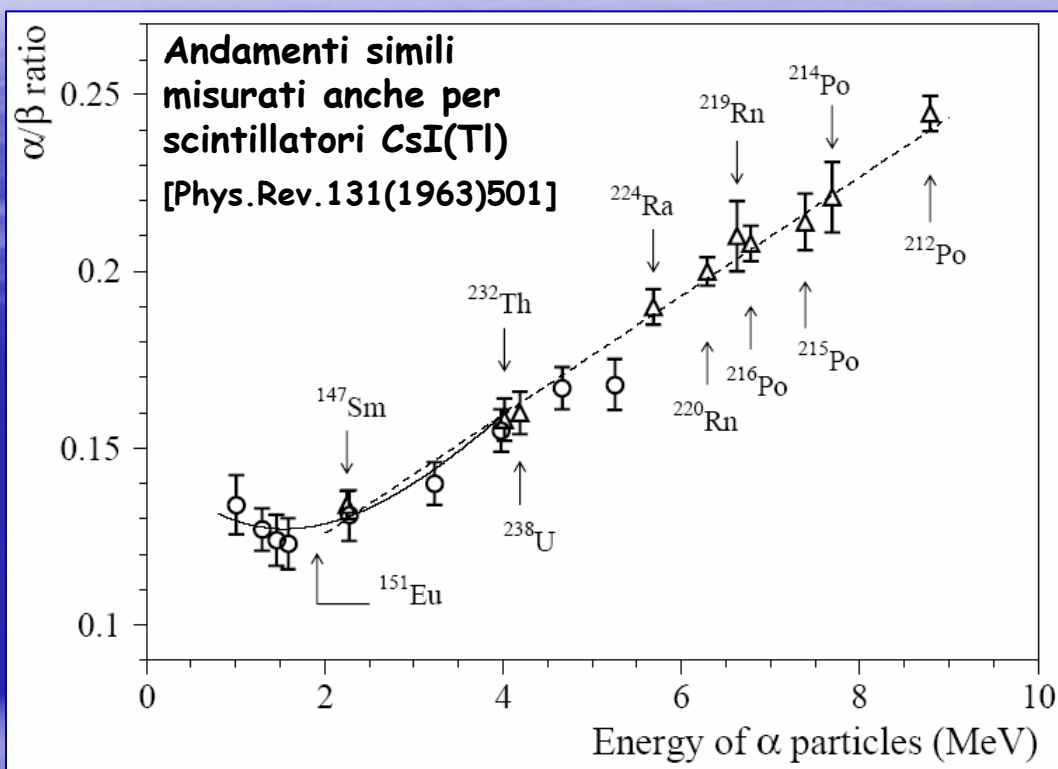
Energie specifiche per particelle α tra 1.00–5.25 MeV ottenute con un set di assorbitori calibrati (mylar 0.65 mg/cm², aria).



$$\text{FWHM}_\alpha / E_\alpha^\gamma = 7\%$$

Andamento energetico del rapporto di luce α/β

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29



o Punti determinati con la sorgente di ^{241}Am (1.00, 1.30, 1.45, 1.59, 2.27, 3.23, 3.98, 4.66, 5.25 MeV)

△ Picchi identificati nel fondo misurato

Se $E_\alpha > 2$ MeV (andamento lineare):
 $\alpha/\beta = 0.092(4) + 0.0168(7) \cdot E_\alpha [\text{MeV}]$

Andamento non lineare intorno a 2 MeV \Rightarrow fit con polinomio (linea continua)

$\alpha/\beta = 0.128(19)$ per la particella α emessa nel decadimento del ^{151}Eu

\Rightarrow Picco α del ^{151}Eu atteso a 245(36) keV (sulla scala calibrata con gamma)

Pulse-shape discrimination tra particelle α e $\gamma(\beta)$

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Distribuzione di SI per:
particelle α (≈ 4 MeV) e
 γ (≈ 0.6 MeV)

Shape Indicator (*SI*): parametro numerico calcolato per i segnali prodotti dal $\text{CaF}_2(\text{Eu})$

Per ogni impulso si calcola:

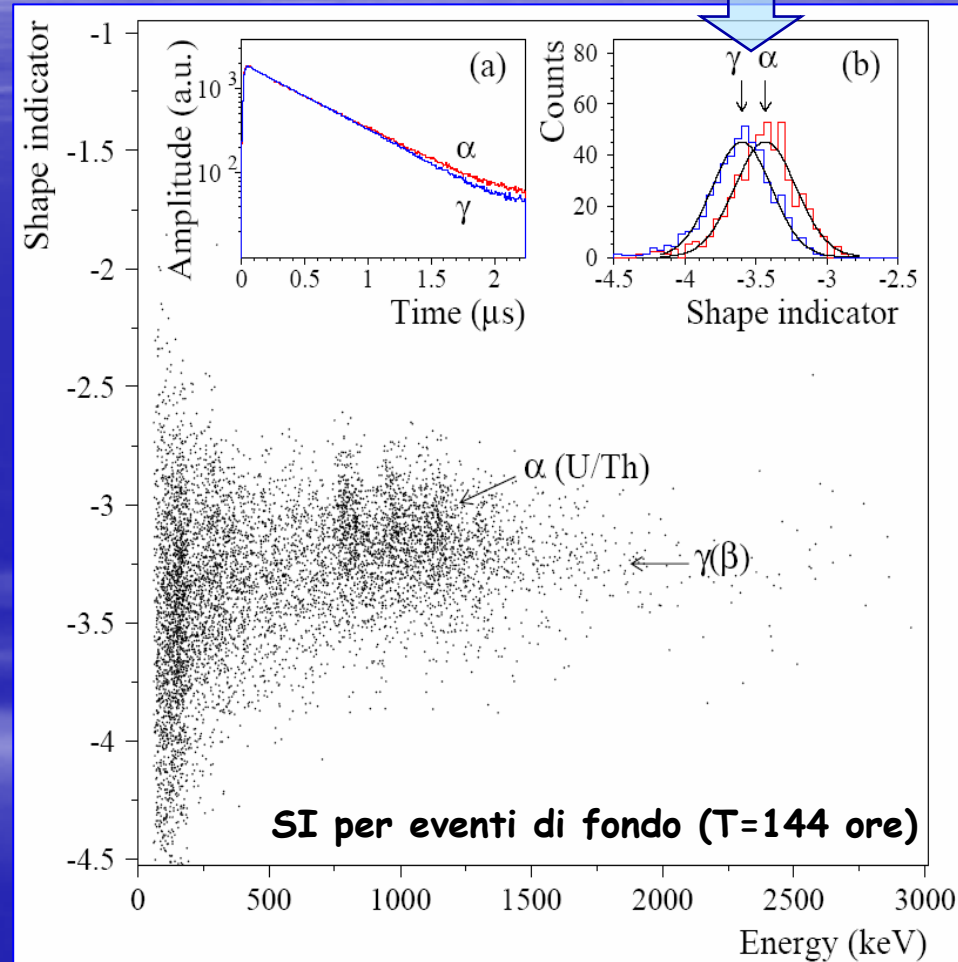
$$SI = \frac{\sum_k f(t_k)P(t_k)}{\sum_k f(t_k)} \quad [0, 2.25] \mu\text{s}$$

$$P(t) = \frac{f_\alpha(t) - f_\beta(t)}{f_\alpha(t) + f_\beta(t)}$$

$f(t_k)$ = ampiezza digit. del segnale

$P(t) = \{f_\alpha(t) - f_\gamma(t)\} / \{f_\alpha(t) + f_\gamma(t)\}$
(funzione peso)

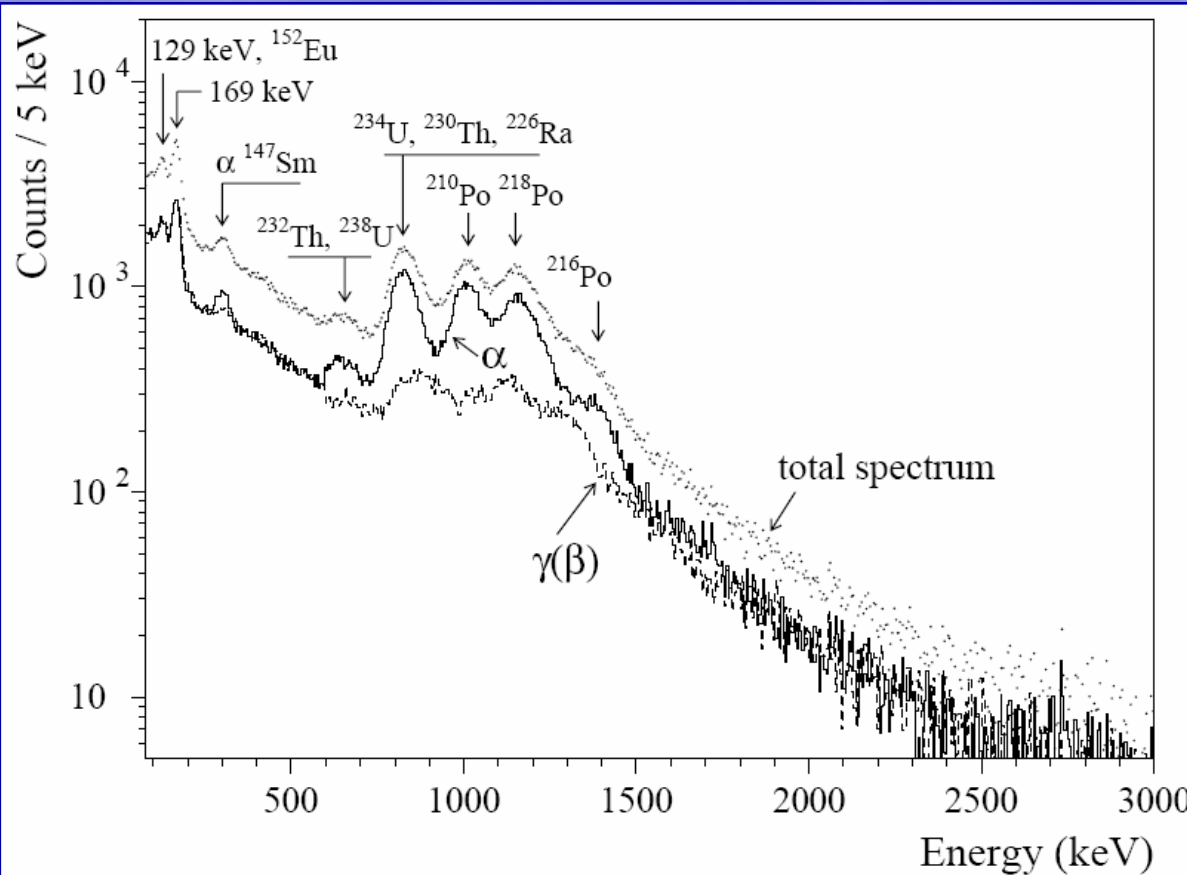
$f_\alpha(t), f_\gamma(t)$ = impulsi di riferimento



Lo *SI* permette comunque di studiare la natura del fondo misurato

Distribuzione energetica misurata (7426 ore)

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29



Dati separati in 2 parti:

$\gamma(\beta)$: imponendo $SI < SI_\gamma$
(50% degli eventi $\gamma(\beta)$)

α : imponendo $SI > SI_\gamma$
(50% degli eventi $\gamma(\beta)$ ma
un numero maggiore di α
rispetto al precedente)

Differenza apprezzabile tra
le due distribuzioni

Pulse-shape discrimination utile per identificare contaminanti α del cristallo.

Identificazione del fondo: analisi Time-amplitude

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Il tempo di arrivo e l'energia di ogni evento sono utilizzati per selezionare delle sequenze di decadimenti veloci presenti nelle catene di ^{232}Th e ^{235}U .

Famiglia del ^{232}Th

^{224}Ra ($Q_\alpha=5.789$ MeV, $T_{1/2}=3.66$ d)

→ ^{220}Rn ($Q_\alpha=6.405$ MeV, $T_{1/2}=55.6$ s)

→ ^{216}Po ($Q_\alpha=6.907$ MeV, $T_{1/2}=0.145$ s)

→ ^{212}Pb

→ Attività $^{228}\text{Th} = 0.134(17)$ mBq/kg

Famiglia del ^{235}U

^{223}Ra ($Q_\alpha=5.98$ MeV, $T_{1/2}=11.44$ d)

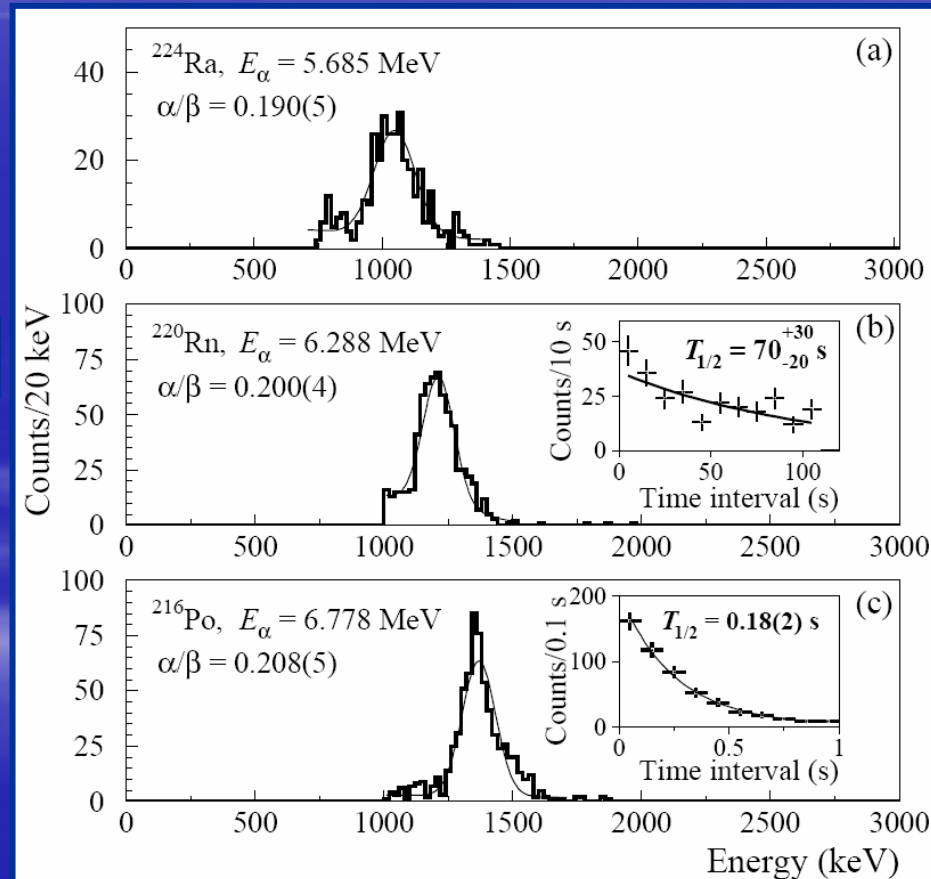
→ ^{219}Rn ($Q_\alpha=6.95$ MeV, $T_{1/2}=3.96$ s)

→ ^{215}Po ($Q_\alpha=7.526$ MeV, $T_{1/2}=1.78$ ms)

→ ^{211}Pb

→ Attività $^{227}\text{Ac} = 0.011(7)$ mBq/kg

$T = 7426$ ore



Identificazione del fondo: eventi Bi-Po

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Selezione di impulsi doppi nella finestra del TD, prodotti da due decadimenti in rapida sequenza (eventi Bi-Po)

Ridotto di un fattore ≈ 110
a causa della finestra temp.
utilizzata nel TD

$T = 7426$ ore

Famiglia ^{232}Th

^{212}Bi ($Q_\beta = 2.254$ MeV)

\rightarrow ^{212}Po ($Q_\alpha = 8.954$ MeV, $T_{1/2} = 0.299$ μs)

\rightarrow ^{208}Pb

Attività $^{228}\text{Th} = 0.124(5)$ mBq/kg

(in accordo con la precedente analisi)

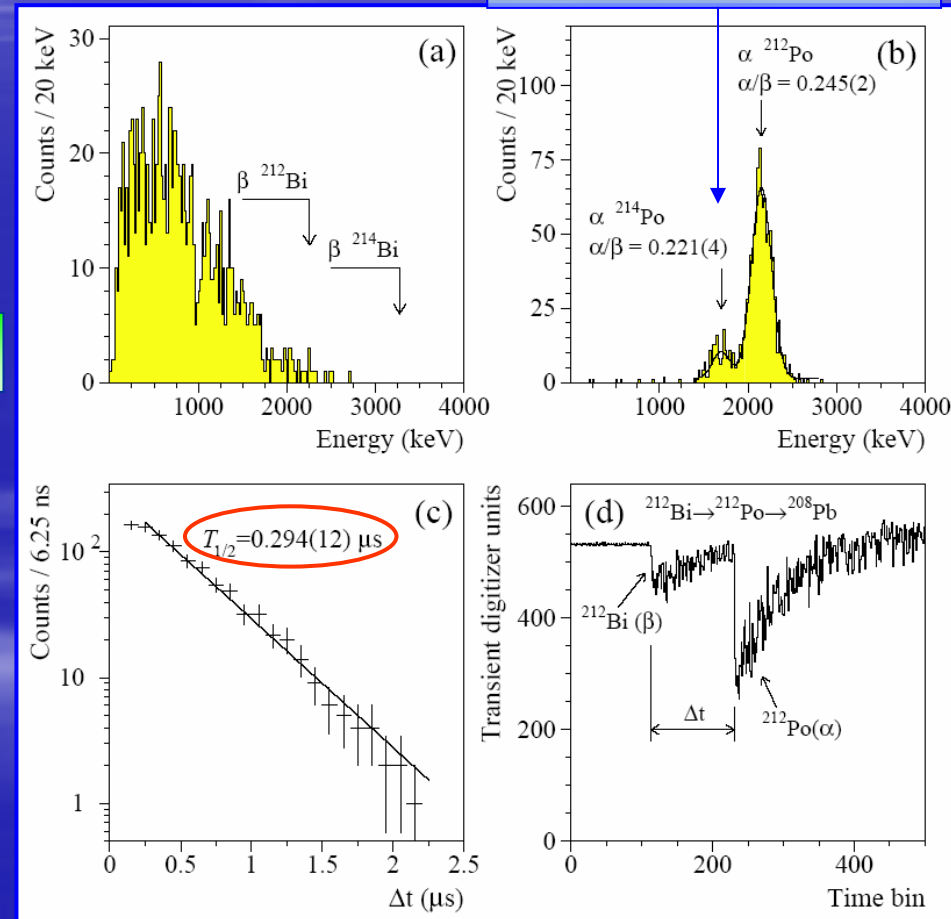
Famiglia ^{238}U

^{214}Bi ($Q_\beta = 3.272$ MeV)

\rightarrow ^{214}Po ($Q_\alpha = 7.833$ MeV, $T_{1/2} = 164$ μs)

\rightarrow ^{210}Pb

Attività $^{226}\text{Ra} = 1.3(2)$ mBq/kg

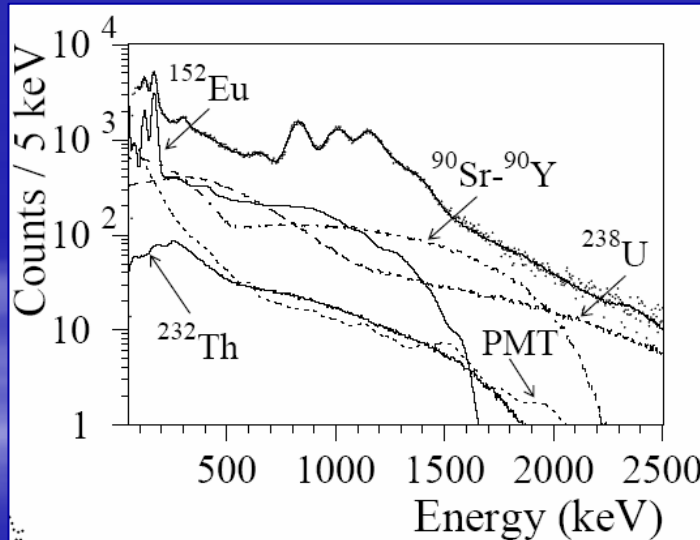


Contaminanti radioattivi nel CaF₂(Eu)

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Attività dei nuclidi attivi α nel CaF₂(Eu) stimata con l'analisi dei picchi α identificati nel fondo

Contributi al fondo di nuclidi attivi β nel CaF₂(Eu) (U/Th families, ⁴⁰K, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr-⁹⁰Y, ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Eu) e raggi γ esterni simulati con GEANT4



A bassa energia il fondo misurato è dovuto essenzialmente al decadimento β del ¹⁵²Eu

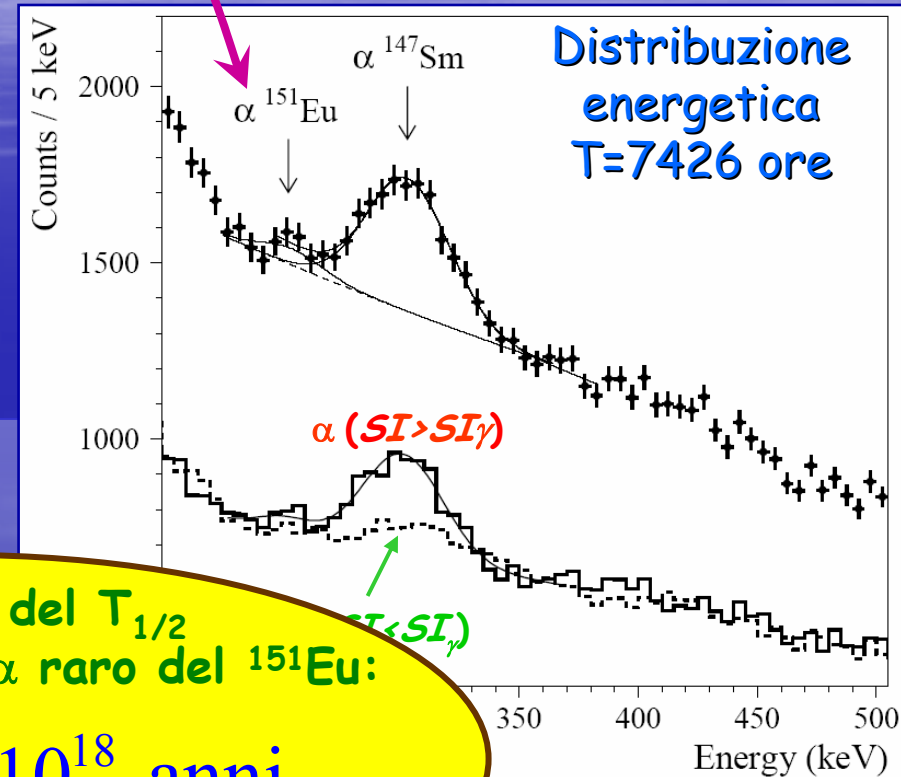
Chain	Nuclide	Activity mBq/kg
²³² Th	²³² Th	0.05(1)
	²²⁸ Ra	≤ 0.6
	²²⁸ Th	0.13(2)
²³⁵ U	²²⁷ Ac	0.011(7)
²³⁸ U	²³⁸ U	0.06(1)
	²²⁶ Ra	1.3(2)
	²¹⁰ Po	0.9(2)
	Total U/Th α activity	8(2)
	⁴⁰ K	≤ 7
	⁶⁰ Co	≤ 3
	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	≤ 4
	¹³⁷ Cs	≤ 0.3
	¹⁴⁷ Sm	0.34(4)
	¹⁵² Eu	10(2)
	¹⁵⁴ Eu	≤ 0.5

Decadimento α $^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}$

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Struttura attribuibile
al decadimento α del ^{151}Eu
(picco atteso a 245 ± 36 keV)

Fit della distribuzione energetica con:
2 gaussiane (decadimenti α di ^{151}Eu e ^{147}Sm)
+ funzione esponenziale (fondo)



1. Distribuzione totale [225,365 keV]:

$$S = (302 \pm 232) \text{ conteggi } (\chi^2/\text{ndf}=0.42)$$

$$E_{\text{picco}} = (255 \pm 7) \text{ keV}$$

$$T_{1/2} = 5.4^{+11.4}_{-2.4} \text{ (stat)} \times 10^{18} \text{ anni}$$

Prima stima del $T_{1/2}$
per il decadimento α raro del ^{151}Eu :

$$T_{1/2} = 5^{+11}_{-3} \times 10^{18} \text{ anni}$$

o in modo più cautelativo: $T_{1/2} \geq 1.7 \times 10^{18} \text{ anni}$
(68% C.L.)

2. Distribuzione α (efficienza $\approx 10\%$) [225,365 keV]:

$$S = (374 \pm 329) \text{ conteggi} \longrightarrow T_{1/2} = 4.4^{+11.3}_{-2.1} \text{ (stat)} \times 10^{18} \text{ anni}$$

$$E_{\text{picco}} = (253 \pm 5) \text{ keV}$$

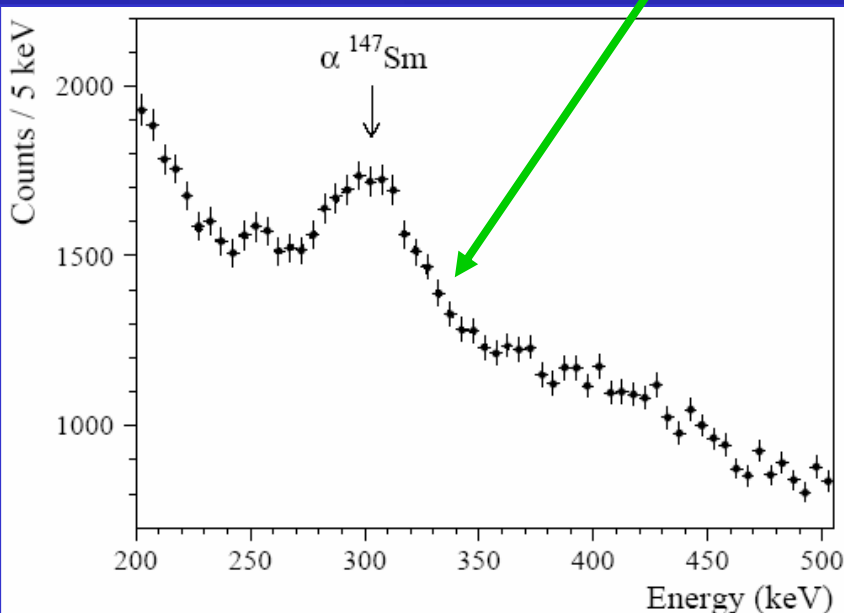
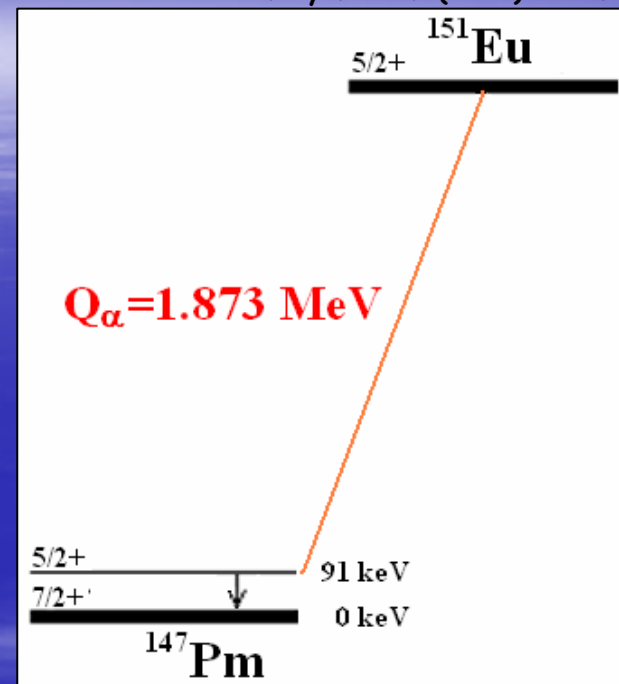
Decadimento α del ^{151}Eu al primo livello eccitato del ^{147}Pm

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

$E_\alpha = 1.823 \text{ MeV}$ corrispondente a 234 keV sulla scala energetica del $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ calibrata con sorgenti γ .

I 91 keV emessi nella successiva diseccitazione (γ : 33%, X rays/elettroni Auger: 67%) sono assorbiti dal rivelatore con efficienza ≈ 1 .

\Rightarrow Picco atteso a $(325 \pm 33) \text{ keV}$



Modello per il fit:

2 picchi gaussiani (decadim. α di ^{151}Eu e ^{147}Sm)
+ funzione esponenziale (fondo)

Nessuna evidenza:

$T_{1/2}(g.s. \rightarrow 5/2^+) \geq 6 \times 10^{17} \text{ anni}$
(68% C.L.)

Conclusioni

Nucl.Phys.A 789 (2007) 15-29

Ricerca del decadimento α raro del ^{151}Eu con rivelatore $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ a basso fondo intrinseco @ LNGS:

- Studio della risposta del rivelatore a particelle α con energie tra 1-9 MeV e determinazione del rapporto di luce α/β ;
- Studio della possibilità di PSD tra particelle α e γ/β ;
- Analisi del fondo misurato e identificazione dei contaminanti radioattivi del $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ utilizzato.

⇒ Prima indicazione sperimentale del decadimento α raro del ^{151}Eu :

$$T_{1/2} = 5_{-3}^{+11} \times 10^{18} \text{ anni}$$

⇒ Ricerca del decadimento α del ^{151}Eu al primo livello eccitato del ^{147}Pm :
 $T_{1/2} \geq 6 \times 10^{17} \text{ anni (68\% C.L.)}$

Curiosità: Il decadimento α osservato $^{151}\text{Eu} \rightarrow ^{147}\text{Pm}$ fornisce un ulteriore canale di produzione di Promezio (uno degli elementi più rari in natura) nella crosta terrestre (da fissione spontanea ^{238}U : ~560 g; da decadimento ^{151}Eu : ~12 g)