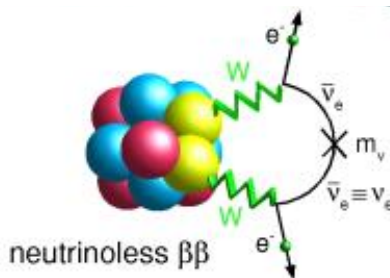


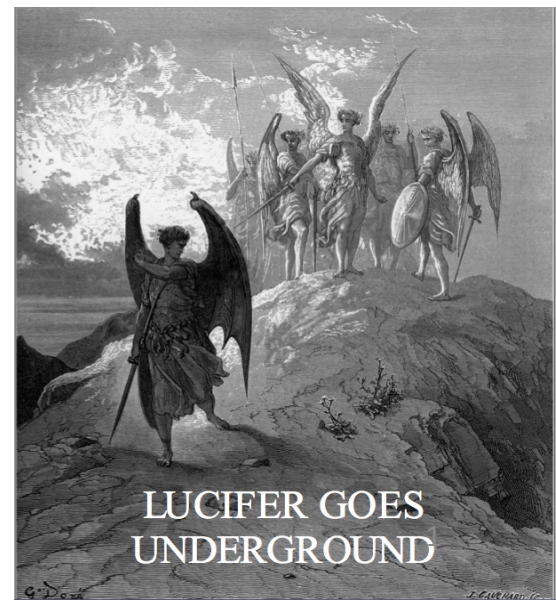
# ANALISI DATI DI CUORICINO E LA NUOVA FRONTIERA DEI BOLOMETRI SCINTILLANTI CON LUCIFER



di  
Giuliano Gustavino



A.A. 2011/12  
FNS II Carlo Dionisi



# SOMMARIO

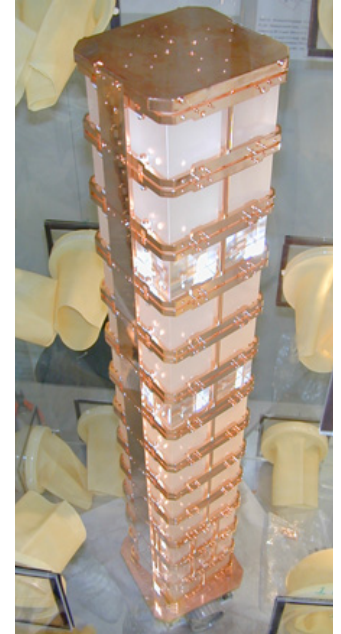
## ANALISI OFFLINE DI CUORICINO

**Analisi del segnale del rivelatore**  
(ampiezza impulso con il filtro ottimo, stabilizzazione del rivelatore, linearizzazione, studio dell'efficienza e soppressione del fondo)

→ Produzione di dati affidabili e spettro di energia

**Analisi multidimensionale**  
(fit, correzioni sistematiche e statistiche)

→ Risultati fisici ed identificazione dei fondi

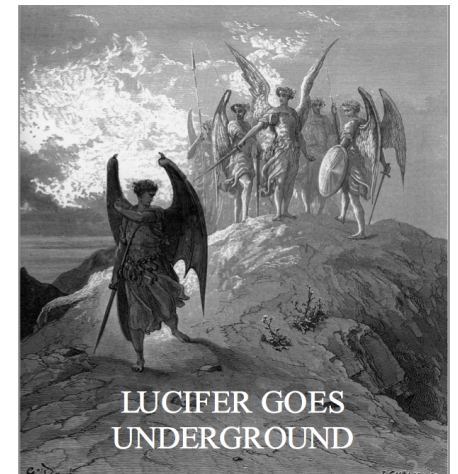


## RISULTATI FINALI DI CUORICINO

### BOLOMETRI SCINTILLANTI

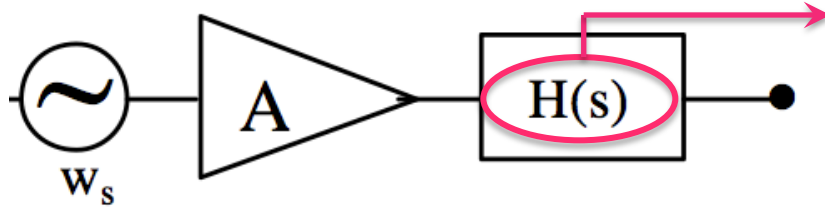


### LUCIFER



# FILTRO OTTIMO

É una tecnica usata per valutare l'ampiezza di un segnale con un rumore stocastico preimposto.



Funzione di trasferimento del filtro ottimo (pesa le frequenze del segnale in modo da massimizzare il rapporto segnale rumore)

$$H(j\omega) = k' \frac{S^*(\omega)}{N(\omega)} e^{-j\omega t_m}$$

Il segnale viene modellizzato come

segnale acquisito al tempo  $t_0$

guadagno

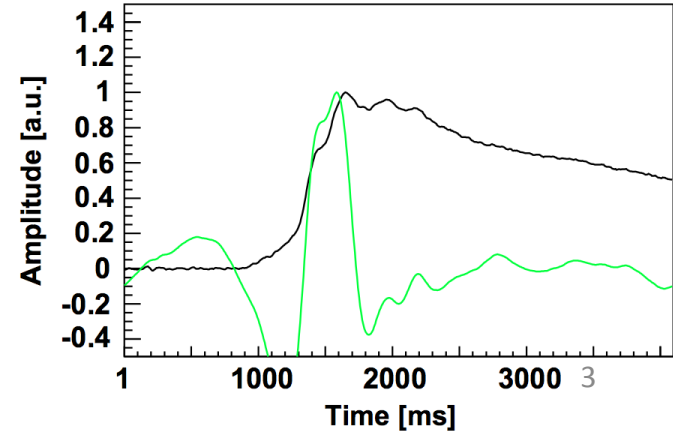
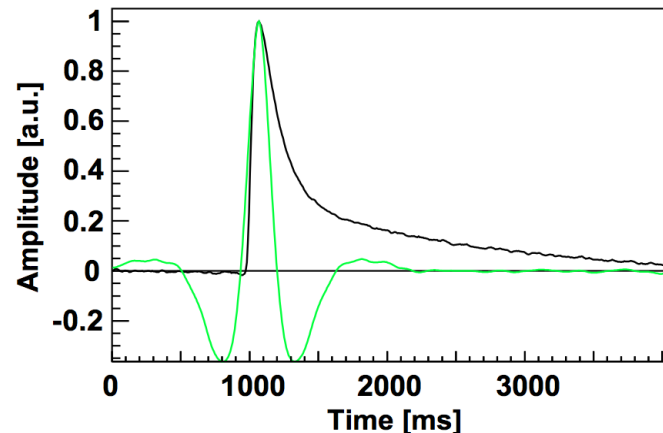
forma del segnale

$$\begin{cases} V(t) = V_0 \cdot s(t) + n(t) \\ V_0 = G(T) \cdot A(E) \end{cases}$$

rumore

ampiezza

**II FILTRO OTTIMO**  
massimizza il rapporto  
segnale/rumore



# CORREZIONE DI INSTABILITÀ

Le instabilità delle ampiezze del OF sono responsabili delle variazioni di  $\Delta V/E$  (tensione impulso/ampiezza depositata nel cristallo)

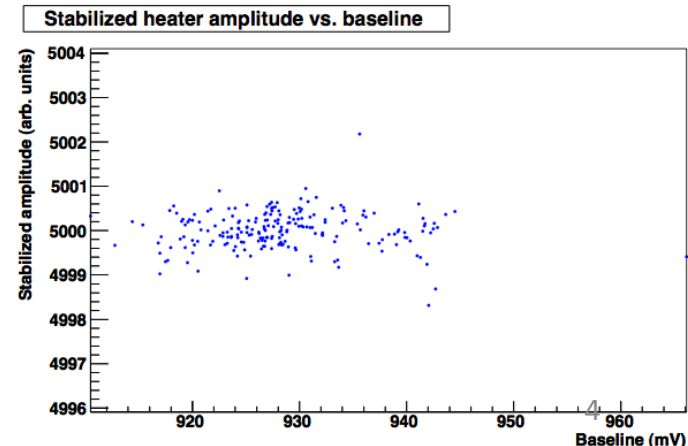
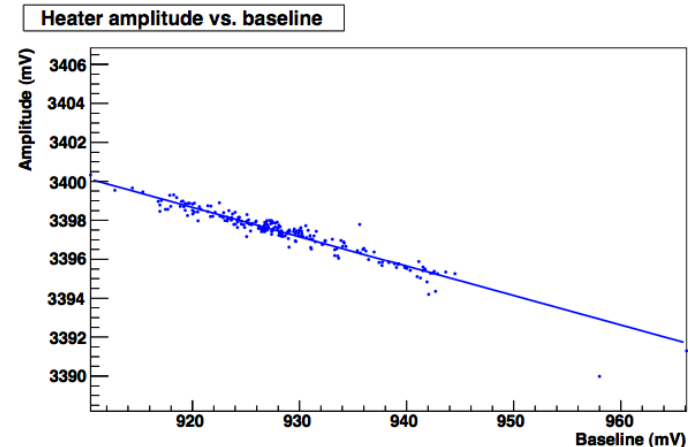
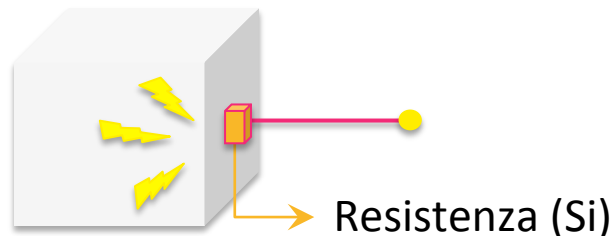


Peggioramento della risoluzione in energia e quindi “allargamento” del picco di energia dello spettro

Il sistema elettronico garantisce una stabilità di  $G$  entro lo 0.1%.

La difficoltà sta nel garantire la stabilità di  $T$  per lunghe scale di tempo.

Una volta stabilizzato il più possibile i parametri criogenici, viene misurato  $\Delta V/E$  dopo aver mandato un impulso monocromatico tramite una resistenza. Le variazioni di  $\Delta V/E$  sono dovute a  $G(T)$ . Trovando quindi  $\Delta V/E(T(t))$  si riesce a ridurre tale effetto di 10÷100 volte mentre la misura della *baseline* fornisce, allo stesso tempo, il valore di  $T$ .



# LINEARIZZAZIONE

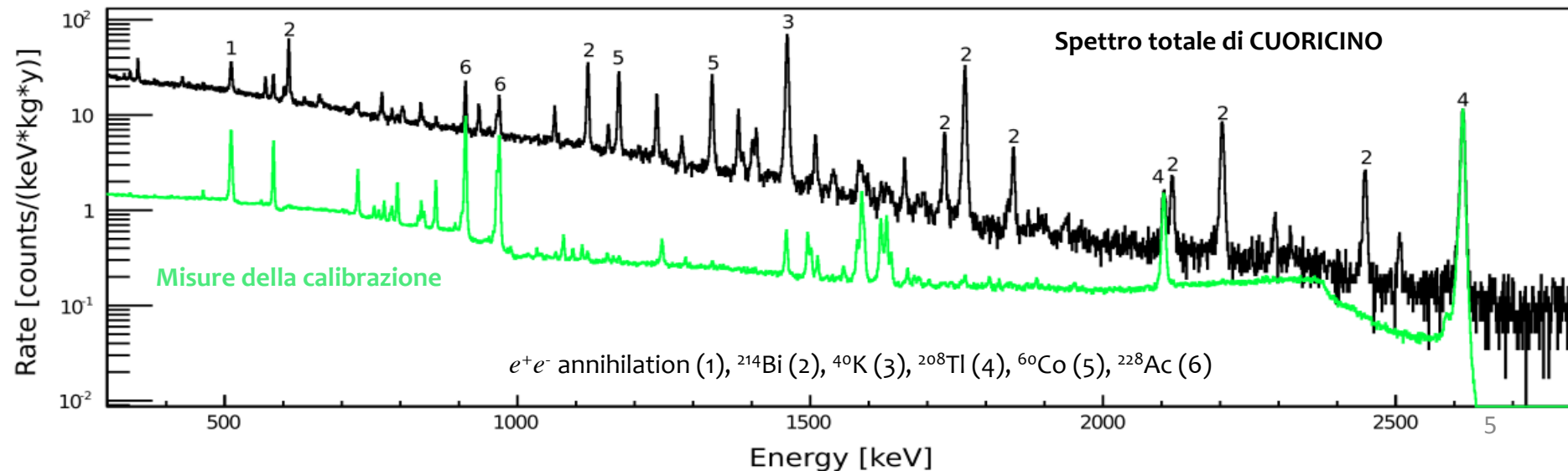
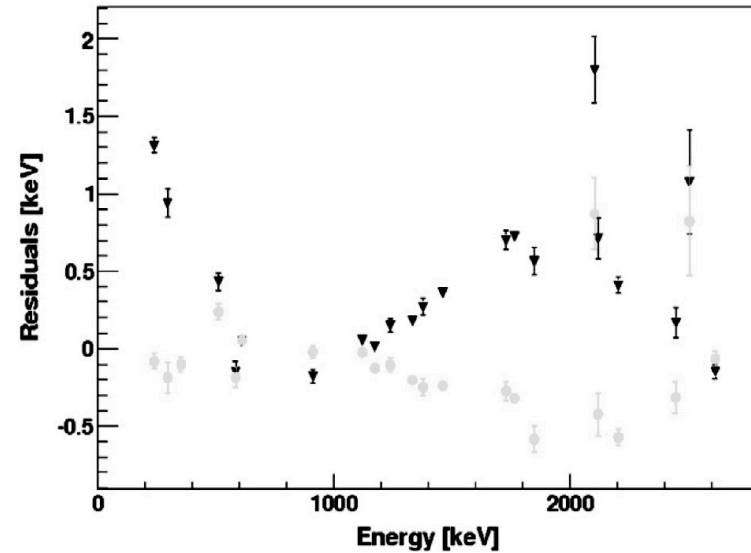
La LINEARIZZAZIONE è la fase cruciale della calibrazione.

Le linee  $\gamma$  del  $^{232}\text{Th}$  vengono utilizzate per trovare  $A(E)$ , che è una funzione non lineare soprattutto a causa di  $T$ .  $A(E)$  viene parametrizzata con un polinomio del 3° ordine (in grigio nella fig. al lato).

La differenza tra l'energia nominale e quella misurata (RESIDUO) può essere usata come **incertezza sistematica** sulla posizione del picco  $\Delta E = 0.8 \text{ keV}$ .

Con polinomio di 3° ordine

Con polinomio di 2° ordine in plot logV-logE



# EFFICIENZE DEL SEGNALE E SOPPRESSIONE DEL RUMORE

Source	Signal efficiency (%)
Energy escape	87.4 ± 1.1 (big crystals) 84.2 ± 1.4 (small and <sup>130</sup> Te enriched crystals)
Pulse-shape cuts	98.5 ± 0.3
Anti-coincidence cut	99.3 ± 0.1
Noise	99.1 ± 0.1
Pile-up with reference pulses	97.7
<b>Total</b>	<b>82.8 ± 1.1 (big crystals)</b> <b>79.7 ± 1.4 (small and <sup>130</sup>Te enriched crystals)</b>

L'evento  $0\nu\beta\beta$  è caratterizzato da un picco centrato in  $Q_{value}$  se il decadimento è contenuto tutto nel cristallo.

È possibile simulare i possibili meccanismi di en. (uscita dal cristallo di un  $e^-$ , raggi X, o  $\gamma$  di Bremsstrahlung) → [geometria del cristallo](#)

# EFFICIENZE DEL SEGNALE E SOPPRESSIONE DEL RUMORE

Source	Signal efficiency (%)
Energy escape	87.4 ± 1.1 (big crystals) 84.2 ± 1.4 (small and <sup>130</sup> Te enriched crystals)
Pulse-shape cuts	98.5 ± 0.3
Anti-coincidence cut	99.3 ± 0.1
Noise	99.1 ± 0.1
Pile-up with reference pulses	97.7
<b>Total</b>	<b>82.8 ± 1.1 (big crystals)</b> <b>79.7 ± 1.4 (small and <sup>130</sup>Te enriched crystals)</b>

Sopprime il (36 ± 2)% del fondo dovuto ad eventi non fisici e di pile-up.

Si usa il segnale di 2615 KeV del <sup>208</sup>Tl (intenso e vicino al  $Q_{\text{value}}$ ).

Viene fatto un fit sullo spettro degli eventi accettati ed uno di quelli rifiutati.

$$A_{\text{picco}} = \epsilon_{\text{ps}} N_{\text{sig}}$$

$$A_{\text{picco}} = (1 - \epsilon_{\text{ps}}) N_{\text{sig}}$$

$$A_{\text{bkg}} = \epsilon_{\text{bkg}} N_{\text{bkg}}$$

$$A_{\text{bkg}} = (1 - \epsilon_{\text{bkg}}) N_{\text{bkg}}$$

nello spettro degli eventi accettati

nello spettro degli eventi rifiutati



# EFFICIENZE DEL SEGNALE E SOPPRESSIONE DEL RUMORE

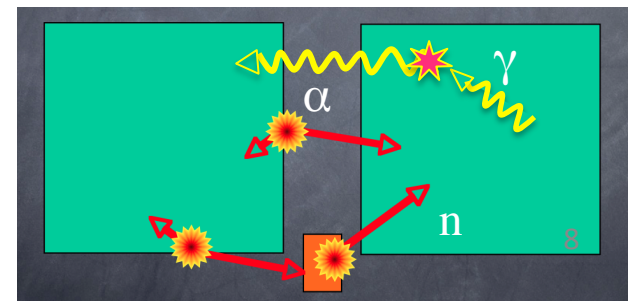
Source	Signal efficiency (%)
Energy escape	87.4 ± 1.1 (big crystals) 84.2 ± 1.4 (small and <sup>130</sup> Te enriched crystals)
Pulse-shape cuts	98.5 ± 0.3
Anti-coincidence cut	99.3 ± 0.1
Noise	99.1 ± 0.1
Pile-up with reference pulses	97.7
<b>Total</b>	<b>82.8 ± 1.1 (big crystals)</b> <b>79.7 ± 1.4 (small and <sup>130</sup>Te enriched crystals)</b>

## Riduzione del fondo nella zona di interesse.

Richiedono che solo un rivelatore si attivi in una finestra temporale di 100 ms.

Stessa tecnica del “pulse-shape cut” ma considerando come candela il segnale di 1460 keV della cattura elettronica del <sup>40</sup>K (poiché è un  $\gamma$  singolo al contrario del 2615 keV che è emesso sempre in coincidenza con altri  $\gamma$ ).

L'evidenza del  $0\nu\beta\beta$  aspettata è un singolo evento (solo un rivelatore viene coinvolto) mentre gli altri dovuti al fondo nel range di interesse sono “multi-eventi”.





# EFFICIENZE DEL SEGNALE E SOPPRESSIONE DEL RUMORE

Source	Signal efficiency (%)
Energy escape	87.4 ± 1.1 (big crystals) 84.2 ± 1.4 (small and <sup>130</sup> Te enriched crystals)
Pulse-shape cuts	98.5 ± 0.3
Anti-coincidence cut	99.3 ± 0.1
Noise	99.1 ± 0.1
Pile-up with reference pulses	97.7
<b>Total</b>	<b>82.8 ± 1.1 (big crystals)</b> <b>79.7 ± 1.4 (small and <sup>130</sup>Te enriched crystals)</b>

L'**eccessivo rumore** può distorcere la forma del segnale e introdurre un errore nella ricostruzione dell'energia.

Si applica un veto intorno ad un impulso di riferimento eliminando la possibilità di un **pile-up**.

**TEMPO MORTO** (≈5%)

# EFFICIENZE DEL SEGNALE E SOPPRESSIONE DEL RUMORE

Source	Signal efficiency (%)
Energy escape	87.4 ± 1.1 (big crystals) 84.2 ± 1.4 (small and <sup>130</sup> Te enriched crystals)
Pulse-shape cuts	98.5 ± 0.3
Anti-coincidence cut	99.3 ± 0.1
Noise	99.1 ± 0.1
Pile-up with reference pulses	97.7
<b>Total</b>	<b>82.8 ± 1.1 (big crystals)</b> <b>79.7 ± 1.4 (small and <sup>130</sup>Te enriched crystals)</b>

# ANALISI DELLO $0\nu\beta\beta$

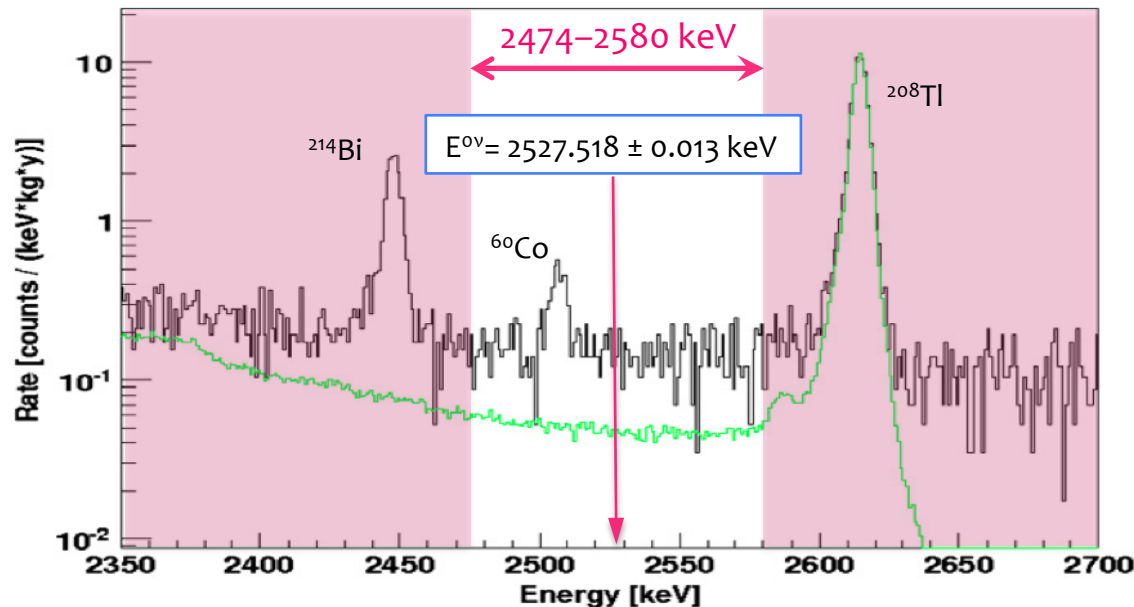
La definizione di range di en. da usare nel fit è una scelta molto importante perchè determina il numero di parametri da utilizzare per descrivere il fondo.

Il modello più semplice per la forma dello spettro (normalizzata a massa, vita, efficienza e abbondanza isotopica) di ogni singolo rivelatore  $i$  in ogni set di dati  $j$  è

$$f_{i,j}(E) = B_i + \Gamma_{i,j}^{60Co} g_{i,j}(E - E^{Co}) + \Gamma^{0\nu} g_{i,j}(E - E^{0\nu})$$

PARAMETRI LIBERI

fondo      attività del  $^{60}\text{Co}$  ( $t_{1/2}=5,27\text{y}$ )      attività assoluta per  $0\nu\beta\beta$  ( $\text{c}/(\text{kg}\cdot\text{y})$ )      funzione che descrive la linea monocromatica



## INCERTEZZA SISTEMATICA

Variando il modello del fit del fondo (costante, lineare e parabolico) in 4 diversi intervalli di en. centrati in  $Q_{value}$  si stima una variazione media di  $\Gamma^{0\nu}$  di  $3 \cdot 10^{-26} \text{y}^{-1}$ .

# APPROCCI STATISTICI

Possono essere scelti 3 approcci per l'analisi

1) Trattare i rivelatori separatamente ognuno con la sua  $f_{i,j}$

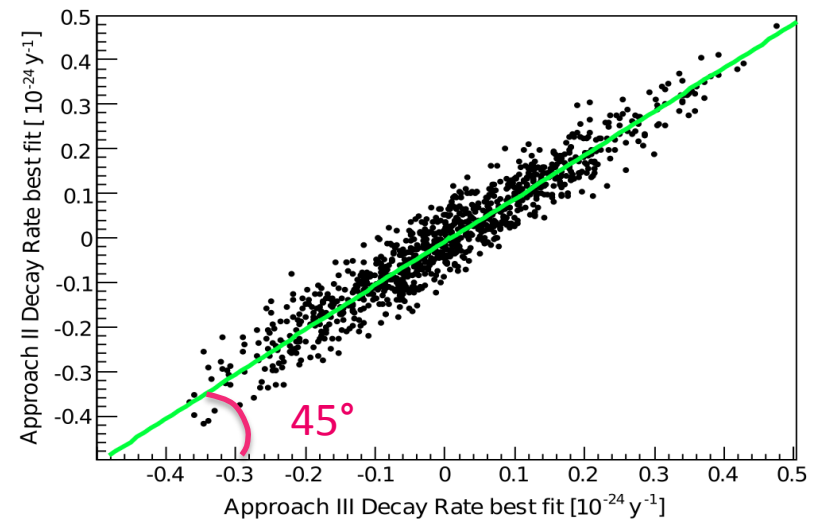


Troppo complicato anche se più corretto (~100 parametri)

2) Trattare i rivelatori separatamente ognuno con la sua  $f_{i,j}$  ma assumendo il fondo identico per i rivelatori appartenenti allo stesso gruppo e lo stesso  $\Gamma_{i,j}^{60Co}$

3) Sommare gli spettri dei rivelatori appartenenti allo stesso gruppo.

	Method II	Method III
Best fit [ $y^{-1}$ ]	$(0.2 \pm 1.5) \times 10^{-25}$	$(0.3 \pm 1.5) \times 10^{-25}$
Half-life limit [y]	$2.5 \times 10^{24}$	$2.4 \times 10^{24}$



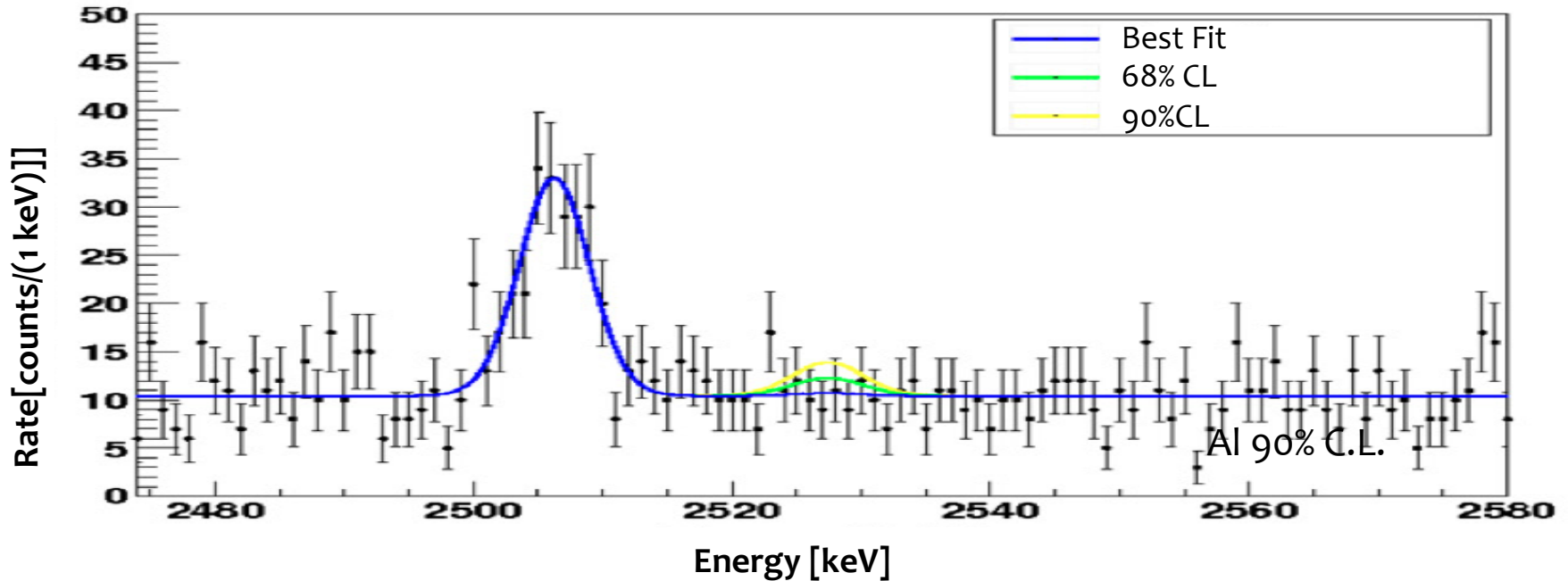
➔ Approccio 3

$$f_k(E) = B_k + \Gamma_k^{60Co} G_k(E - E^{Co}) + \Gamma_k^{0\nu} G_k(E - E^{0\nu}) \quad k = 1, 2, 3$$

$$G_k(E) = \frac{1}{\sum_{i,j} A_{i,j}} \sum_{i,j} \frac{A_{i,j}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{i,j}} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma_{i,j}^2}\right)$$

$A_{i,j}$  e  $\sigma_{i,j}$  sono ampiezza del fondo e risoluzione di en. misurati durante la calibrazione

# RISULTATI FINALI DI CUORICINO



Unendo i dati raccolti nel RUN1 e RUN2 (tra Aprile 2003 e Giugno 2008) si ottiene dal best fit

$$\Gamma_{Best}^{0\nu} = (-0.25 \pm 1.44(stat) \pm 0.3(syst)) \cdot 10^{-25} y^{-1}$$

Il risultato è **compatibile con zero** ed il limite inferiore dell'emivita  $\tau_{1/2}^{0\nu} \geq 2.8 \cdot 10^{24} y$  al 90% C.L.

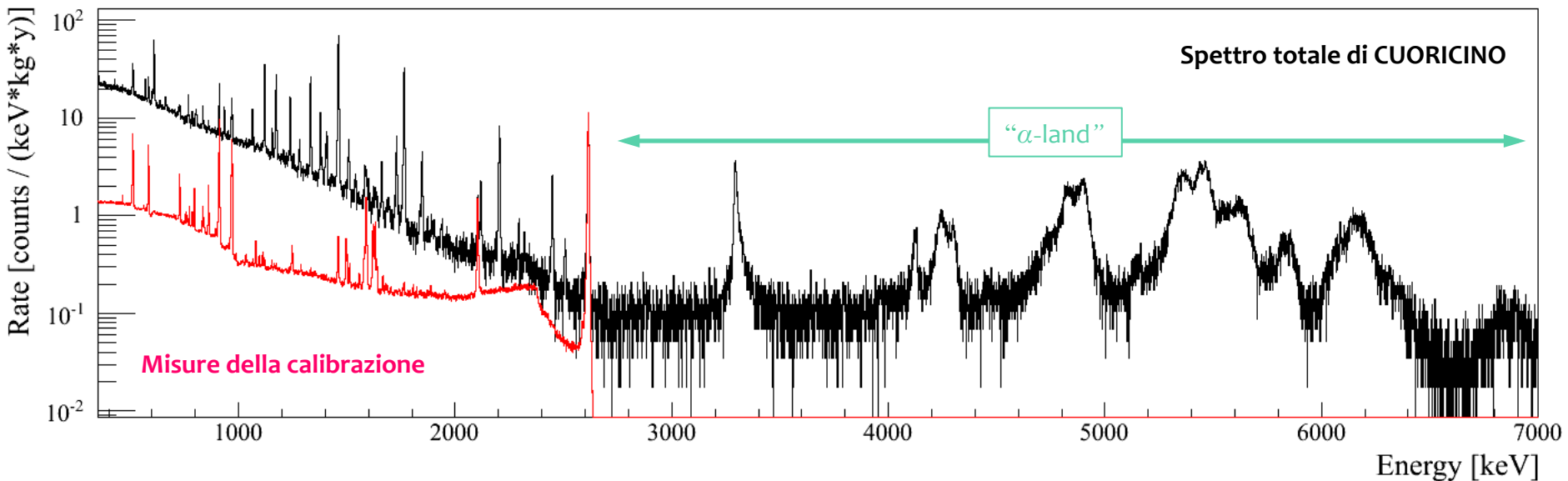
Dai valori di NME teorici si ottiene al 90% C.L.

$$m_{ee} \leq 300 \div 710 meV$$

$$\left( \text{da } \frac{1}{\tau_{1/2}^{0\nu}} = m_{ee}^2 F_N = m_{ee}^2 G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \right)$$

# ALLA RICERCA DELLA “ZERO BACKGROUND CONDITION”

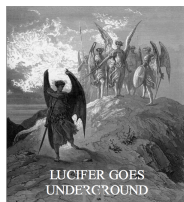
I risultati di CUORICINO dimostrano la potenza della tecnica bolometrica per la ricerca dello  $0\nu\beta\beta$  e che la principale fonte di background sono le contaminazioni di elementi emettitori di  $\alpha$  sulla superficie dei cristalli.



Gli obiettivi principali per i prossimi esperimenti sono:

- $\uparrow$  la massa attiva  $M$
- $\downarrow$  il fondo  $b$
- $\uparrow$  la risoluzione di energia  $\Delta E$
- $\uparrow$  il periodo di accumulazione dati  $t$

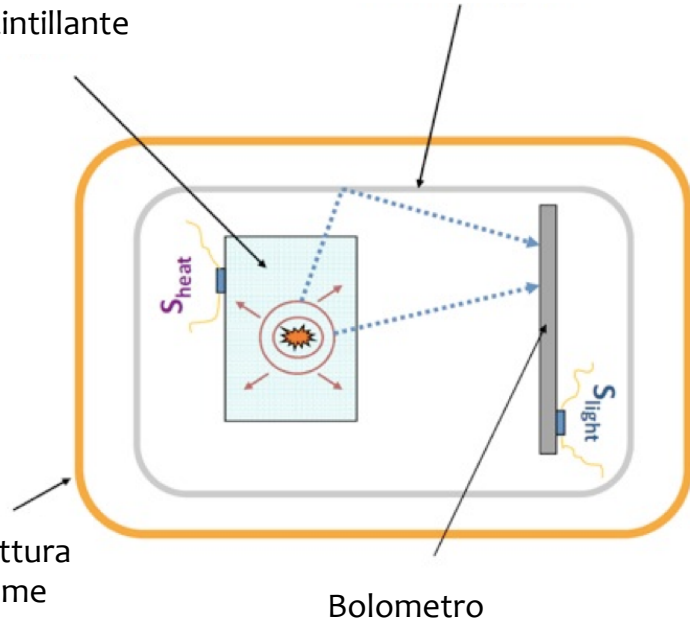
$$S^{0\nu} \propto \varepsilon \frac{i.a.}{A} \sqrt{\frac{M t}{b \Delta E}}$$



# BOLOMETRI SCINTILLANTI

Bolometro scintillante

Foglio riflettente

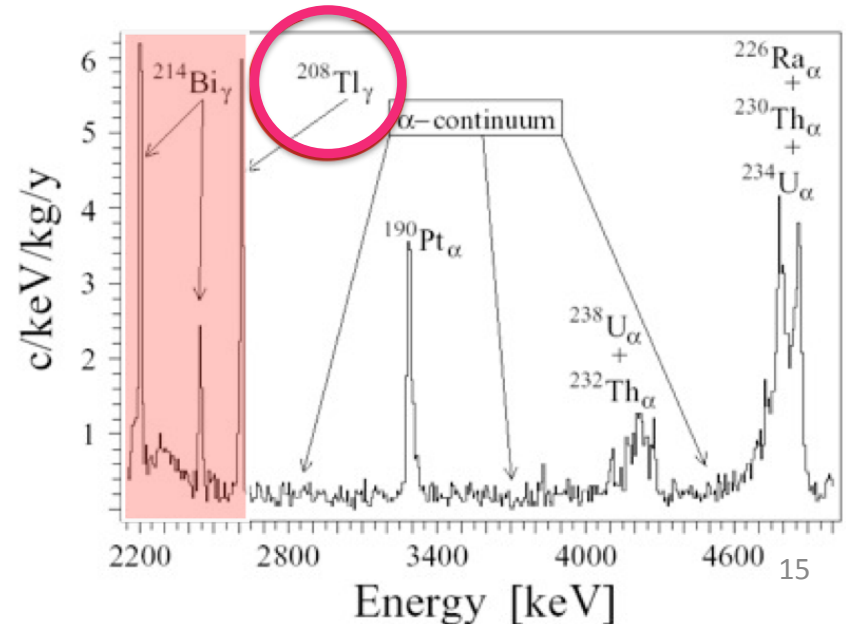


In tale dispositivo la simultanea e indipendente lettura di calore e luce di scintillazione permette di distinguere eventi dovuti all'interazione di  $\beta$  e  $\gamma$  da  $\alpha$ .

$e^-$  e  $\alpha$  con stessa en. producono

stesso calore nel bolometro

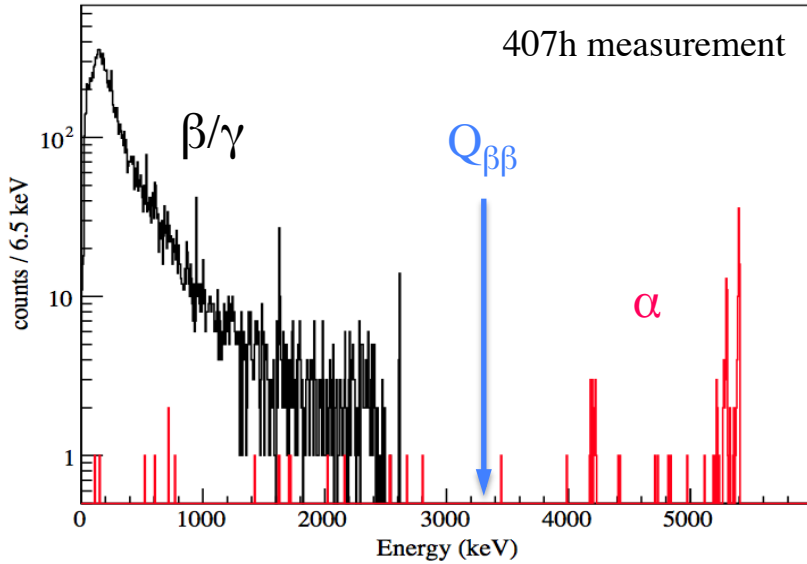
una diversa quantità di luce



Sono interessanti i cristalli che decadono  $\beta\beta$  con energie di transizione superiore alla linea  $\gamma$  del  $^{208}\text{Tl}$  poichè il fondo  $\gamma$  decresce bruscamente.  
(  $E \geq 2615$  keV è la “terra degli  $\alpha$ ”)



# ZnMoO<sub>4</sub>



$^{100}\text{Mo}$  ha  $Q_{\beta\beta}=3034.4 \text{ keV}$  e ha una *i.a.*=9.67%.



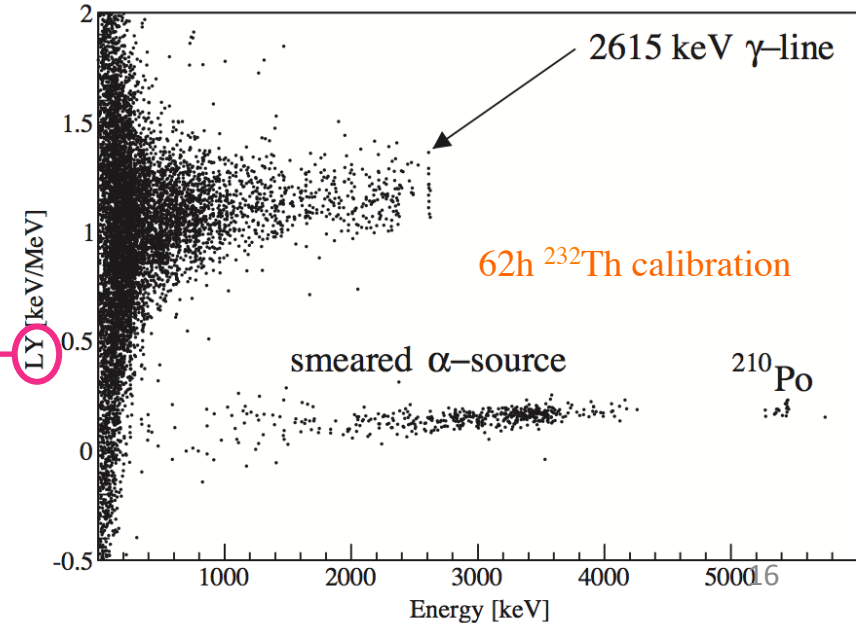
È un cristallo radiopuro!

Le  $\alpha$  e  $\beta/\gamma$  con stessa en. hanno una differenza della produzione di luce!

$\frac{\text{Luce misurata}}{\text{Energia nominale}}$



MA C'È DI PIÙ!!!



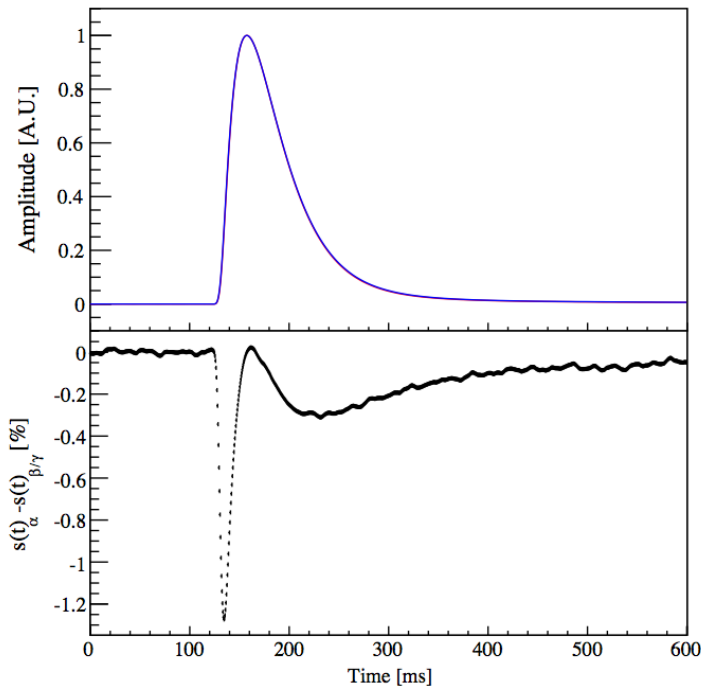
# ZnMoO<sub>4</sub>

Questo cristallo può fornire una discriminazione, anche in assenza della lettura di luce, usando solo la leggera differenza della forma del segnale di  $\alpha$  e  $\beta/\gamma$ .

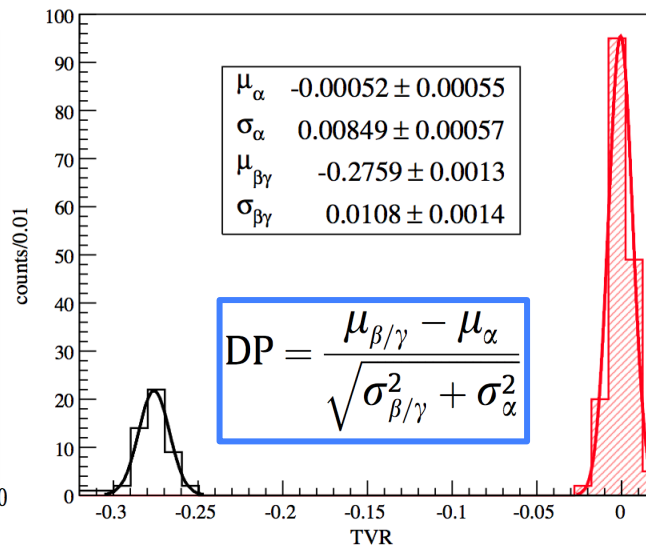
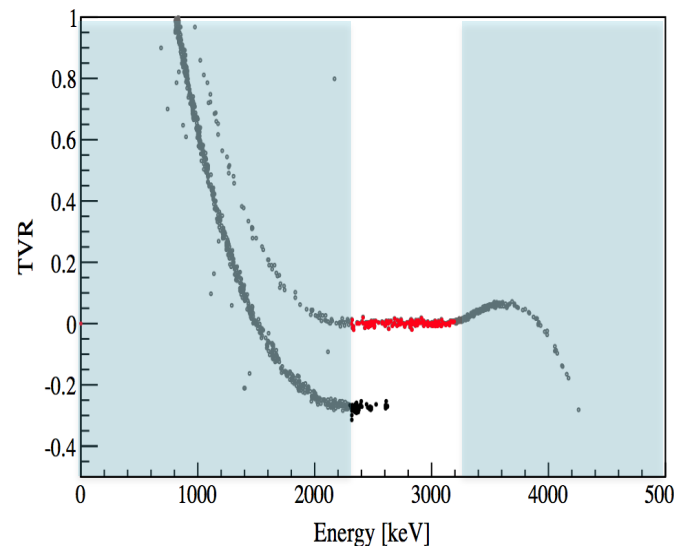
Per studiare al meglio tale caratteristica si introduce la variabile

$$\text{TVR} = \frac{1}{A \cdot w_r} \sqrt{\sum_{i=i_M}^{i_M+w_r} (y_i - A s_i)^2}$$

Test value right



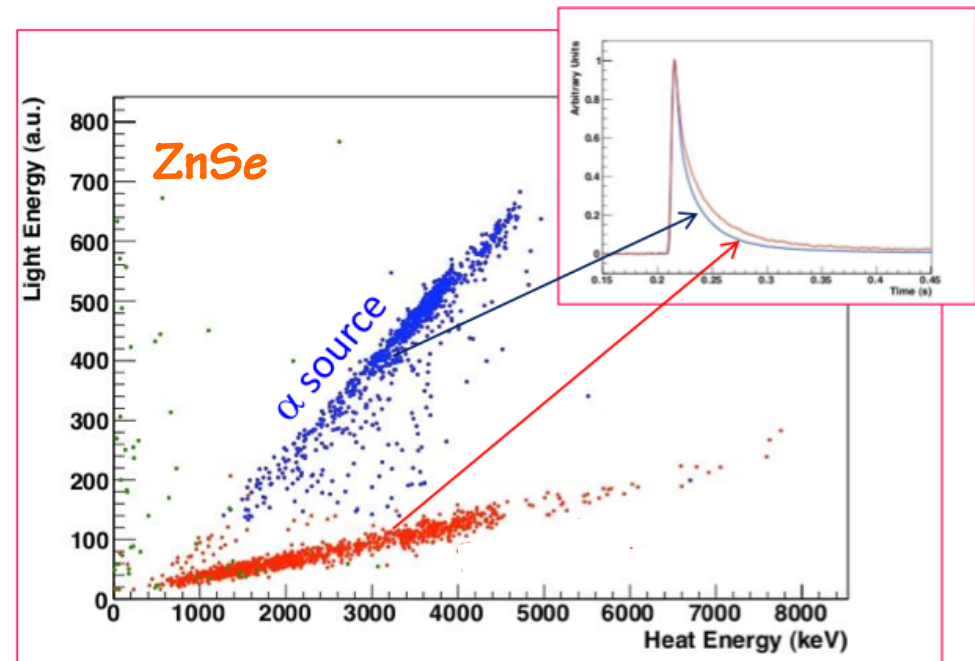
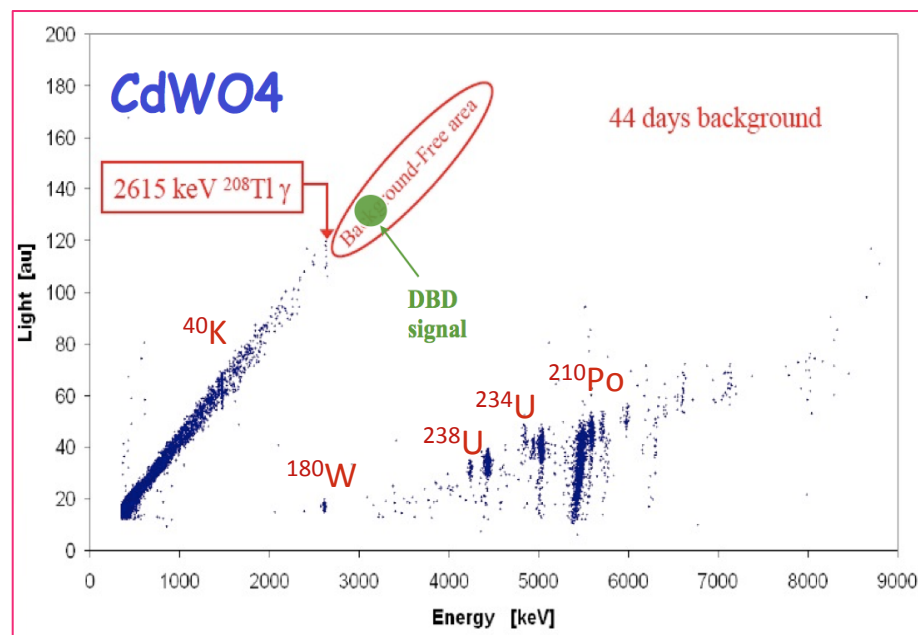
$y_i$  è l'impulso filtrato ottimamente,  $A$  e  $i_M$  l'ampiezza e posizione del massimo,  $s_i$  è l'impulso ideale scalato ad ampiezza unitaria allineato a  $y_i$  e  $w_r$  la larghezza dx corrispondente alla metà del massimo di  $s_i$



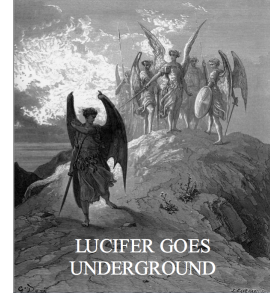
Shape variable	DP
$\tau_R$	4.9
$\tau_D$	4.6
TVL	4.2
TVR	20.0

# I 3 PIÙ PROMETTENTI

	Q-value [keV]	Useful material	LY [keV/MeV]	QF	Enrichment [€/g]
<b>CdWO<sub>4</sub></b>	2809	32%	17.6	0.19	>150 - 200
<b>ZnMoO<sub>4</sub></b>	3034	44%	1.1	0.16	50 - 80
<b>ZnSe</b>	2995	56%	7.4	4.2	50 - 80



# LUCIFER

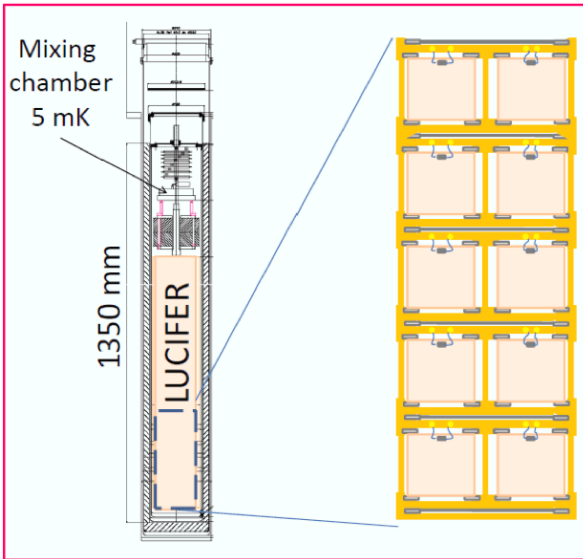
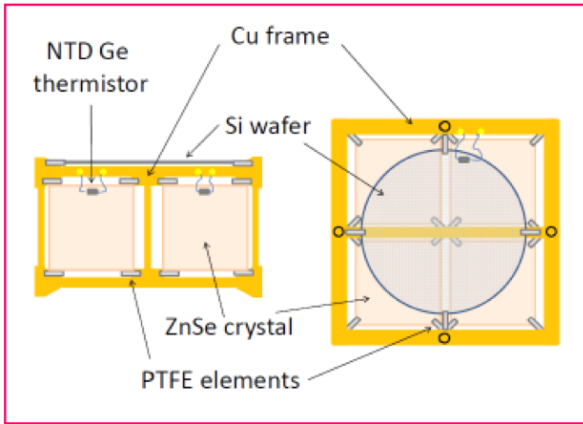
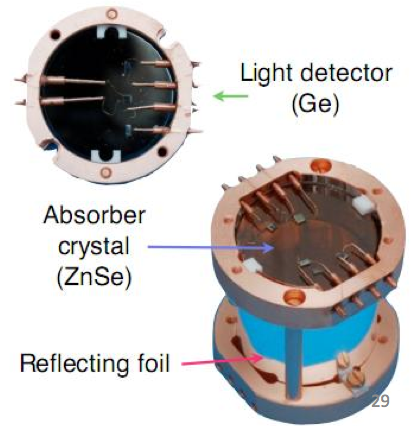


Il progetto LUCIFER utilizzerà il cristallo di ZnSe (*i.a.* 8,73%  $^{82}\text{Se}$ )

La risoluzione energetica dei Light Detector (bolometri di Si e Ge) è  $\sigma \approx 140 \text{ eV}$

Può essere raggiunta una buona sensibilità.

Assumendo:  
 $B = 10^{-3} \text{ counts/keV/kg/y}$   
 $\Delta E = 5 \text{ keV}$   
*i.a.* = 95%  
 Live time = 5 y



Option	Isotope weight	Half life limit ( $\times 10^{26} \text{ y}$ )	Sensitivity to $m_{\beta\beta}$ [meV]
ZnSe baseline	17.6 kg	2.31	52-65
Improvement 1	20.5 kg	2.59	49-61
Improvement 2	27.8 kg	3.20	44-55

L'obiettivo di LUCIFER è dimostrare la capacità di utilizzare questa tecnica in un esperimento di grande massa.

# Aspettiamo l'avvio degli esperimenti LUCIFER e CUORE nel 2014 per risposte più definitive.

