

CUORICINO: Bolometria ed elettronica, rumore e fondo

Autore: Edoardo Gorello

Tutor: Prof. Fabio Bellini

Introduzione

Scopo della presentazione sarà chiarire e spiegare:

- Il concetto di rivelatore bolometrico
- L'elettronica legata a tale rivelatore
- L'utilizzo di tutto ciò in CUORICINO
- L'analisi del rumore e del fondo

Cos'è un bolometro?

I bolometri sono rivelatori termici, in particolare criogenici.

Funzionamento:

- La particella colpisce il rivelatore venendo assorbita (completamente o parzialmente)
- L'assorbitore si riscalda a causa dell'energia persa dalla particella
- Conversione di tale calore in segnale elettrico (vedi dopo Circuito di lettura)

Il segnale risultante è quindi l'aumento della temperatura, misurato con un termistore (vedi dopo Termistore) $\rightarrow E_{cr} = C(T) \cdot \Delta T$ (vedi dopo Risoluzione)

Perchè il bolometro?

Abbiamo detto che essi sono rivelatori criogenici, sensibili ai fononi (modi di vibrazione degli atomi dei cristalli): \rightarrow sensibilità $\sim 100\%$ rispetto a E depositata nel cristallo, al contrario di rivelatori a:

- Ionizzazione $\rightarrow \sim 30\%$ E depositata
- Scintillazione $\rightarrow 5 \div 15\%$

Inoltre Sorgente \equiv Rivelatore:

- Grande massa rivelatore (compensa elevato τ sorgente) (OK)
- Buona ΔE ($0,2 \div 0,3\%$) (OK)
- No particle ID (NOT OK)

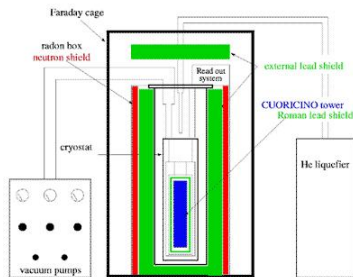
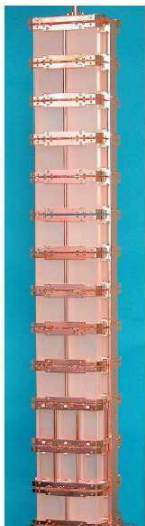
Com'è il bolometro?

CUORICINO: torre di cristalli cubici di TeO_2 di spigolo 5 cm connessi da giunzioni di Cu.

Inoltre rivelatore dotato di:

- Schermo Pb romano (~ 1 cm) \rightarrow assorbe γ
- Schermo riduzione neutroni \rightarrow PET Borato termalizza e assorbe neutroni
- Flusso N per ridurre presenza Rn
- Gabbia di Faraday (ridurre interferenze e.m.)
- Sistema di dumping (ridurre vibrazioni)

Sistema di schermaggio



Di cosa è fatto il bolometro?

Torre di cristalli cubici di TeO_2 con struttura di Cu. Scelto il ^{130}Te poiché:

- Alta abbondanza isotopica ($\sim 34\%$)
- Piccola $C(T) \rightarrow$ Alta θ_D
- Buona purezza intrinseca \rightarrow Minimizzo decadimenti al suo interno
- Ampio Q-value che non cade nello spettro dato da altri decadimenti o fondo

$\beta\beta$ Decay Reaction	Isotopic Abundance [atomic %]	Q-value [keV]
$^{48}Ca \rightarrow ^{48}Ti$	0.2	4274
$^{76}Ge \rightarrow ^{76}Se$	7.6	2039
$^{82}Se \rightarrow ^{82}Kr$	8.7	2996
$^{96}Zr \rightarrow ^{96}Mo$	2.8	3348
$^{100}Mo \rightarrow ^{100}Ru$	9.6	3034
$^{116}Cd \rightarrow ^{116}Sn$	7.5	2809
$^{124}Sn \rightarrow ^{124}Te$	5.8	2288
$^{128}Te \rightarrow ^{128}Xe$	31.8	866
$^{130}Te \rightarrow ^{130}Xe$	34.2	2528
$^{136}Xe \rightarrow ^{136}Ba$	8.9	2458
$^{150}Nd \rightarrow ^{150}Sm$	5.6	3368

Come funziona un bolometro?

Avevamo visto principio funzionamento: particella colpisce assorbitore \rightarrow mezzo si riscalda \rightarrow conversione calore in energia.

Per fare l'ultimo step abbiamo bisogno di due elementi: un termistore ed un circuito di lettura adeguato.

Termistore (costituito di Ge molto drogato al limite della transizione isolante - metallo) permette la conversione di una T in un valore di R misurabile tramite la legge:

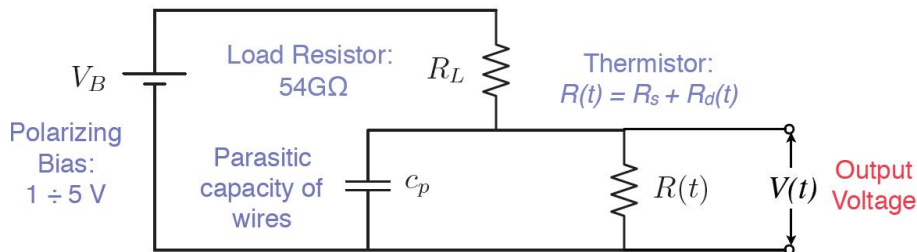
$$R(T) = R_0 e^{\sqrt{\frac{T_0}{T}}}$$

essendo $R_0 \sim 0,9 \div 1,2 \Omega$ e $T_0 \sim 3 \div 4 K \rightarrow R(T) \sim 100 M\Omega$.

Si usa termistore poichè attraverso la $V(T)$ misurata ai suoi capi possiamo risalire alla ΔE della particella.

Circuito di lettura

Il circuito in cui si inserisce il termistore è il seguente:



Poichè T molto basse ($\sim \text{mK}$), $R(T) \sim 100 \text{ M}\Omega$, mentre $R_L \sim 54 \text{ G}\Omega$ per avere I costanti nel termistore. Risolvendo il circuito si ottiene:

$$V(T) = \frac{R(T)}{R(T) + R_L} V_B \rightarrow \Delta V(T) = \frac{R_L}{R(T) + R_L} A \frac{E}{CT_{\text{term}}} \sqrt{PR(T)}$$

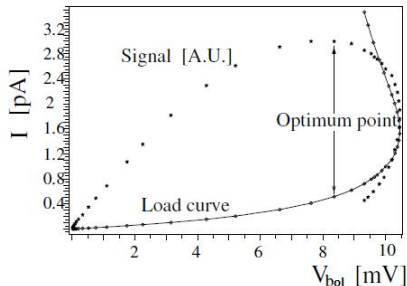
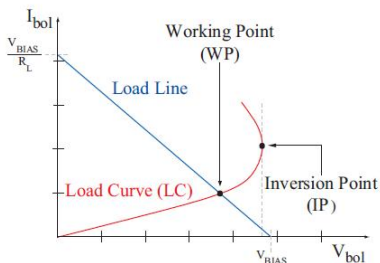
dove $A = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$ è la sensibilità ($\sim 2,5 \cdot 10^{-2}$), C la capacità, E l'energia rilasciata nel bolometro e P la potenza dissipata ($E \sim 1 \text{ MeV} \rightarrow \Delta V(T) \sim 100 \mu\text{V}$).

Circuito dinamico

Il circuito discusso sopra è dinamico, infatti si ha il seguente ciclo:

E rilasciata nel bolometro \rightarrow varia T cristallo \rightarrow varia $R(T)$ \rightarrow varia P dissipata
 \rightarrow varia T cristallo \rightarrow ...

Per avere sistema equilibrio: all'aumentare di T diminuisce $R(T)$ \rightarrow Necessario trovare accordo tra potenza dissipata e temperatura di lavoro \rightarrow relazione $I - V$ non più lineare (regime non Ohmico).



Soluzione: i termistori a semiconduttore permettono di raggiungere l'equilibrio della T di lavoro nel regime lineare, dove l'ampiezza del segnale è massima!

Ordini di grandezza

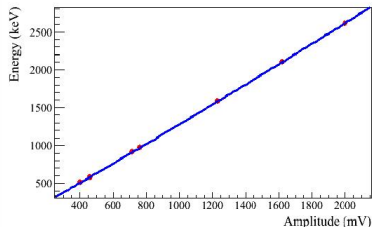
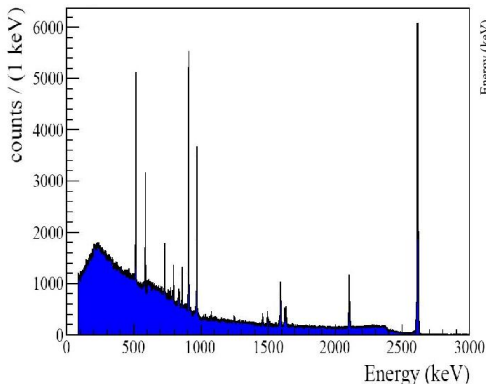
Diamo un po' i numeri:

- $C(T)_{TeO_2} \simeq 2nJ/K$
- $\Delta T_{crist} \simeq 0,1mK/MeV$
- $\Delta T_{term} \simeq 0,03mK/MeV$
- $\Delta V(T) \simeq 0,3mV/MeV$
- $\Delta R(T) \simeq 3M\Omega/MeV$

Tutto ciò porta ad una risoluzione in energia di circa 1 keV.

Calibrazione detector

Performance detector monitorate periodicamente \rightarrow la calibrazione avviene tramite l'energia dei raggi γ proveniente da una sorgente nota (^{232}Th). Per calibrare il detector devo trovare la relazione funzionale tra l'ampiezza del segnale ADC (in V) dato dal filtro ottimo e l'energia rilasciata nel cristallo:
 $E = E(A)$. Come possiamo vedere dall'immagine la relazione è praticamente lineare (risoluzione al per mille come la calibrazione).



Risoluzione

Sia N il numero di fononi creati da particella incidente di energia E : $N = \frac{E}{k_B T}$

Assumiamo distribuzione di Poisson per le incertezze: $\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{N}} \rightarrow$

$$\Delta E = \sqrt{k_B T E}$$

Abbiamo dunque fluttuazioni proporzionali a \sqrt{T} , quelle del cristallo a T :

$$\Delta E_{cr} = \sqrt{k_B T E_{cr}} = \sqrt{k_B C(T) T^2}$$

Ovviamente per misurare E si deve avere $\Delta E_{cr} \ll E \rightarrow$ dipende tutto da T !

Importanza criogenia

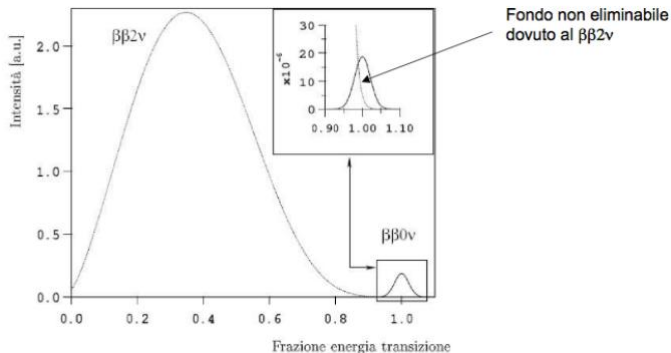
Se $T \sim 300K$ si ha $\Delta E_{cr} \sim 10^4 MeV$, mentre $E \sim MeV$... CRIOGENIA!

Infatti diminuendo drasticamente T miglio la mia sensibilità, e mi giovo della legge di Debye (valida a basse T) secondo cui $C(T) \propto \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \rightarrow$ maggiore sensibilità ad E , maggiore θ_D del mio cristallo $\rightarrow {}^{130}Te!$

Dunque, per $T \sim 10mK$ ed $E \sim 1keV$ si ha: $\Delta E \sim 20meV$, $\Delta E_{cr} = 0,5eV \ll E$

\rightarrow fluttuazioni energia del cristallo sono molto maggiori di quelle sull'energia delle particella \rightarrow RISOLUZIONE INDIPENDENTE (O QUASI) DA E !

Spettro eventi



Come possiamo notare il segnale del decadimento senza neutrini (che in realtà dovrebbe essere delta di Dirac centrata sulla differenza di massa dei due isotopi ma che si allarga per la risoluzione) è coperto dal fondo di eventi a due $\nu \rightarrow$ importanza della risoluzione per poter separare questi due eventi e vedere segnale desiderato!

Rumore

Naturalmente non tutto è così bello e perfetto → bisogna considerare effetti indesiderati!

Effetti collaterali (ma inevitabili) che peggiorano la nostra misura → rumore (elettronico + strumentazione)!

Il rumore è dovuto all'elettronica che si utilizza, ma la parte dominante è dovuta al rivelatore stesso, infatti:

Vibrazioni apparato criogenico → trasmissione vibrazioni ai cristalli e ai fili di lettura → due rumori!

- Rumore termofonico (ΔE_{vibr} ha spettro simile al segnale)
- Rumore microfónico (Varia capacità linea trasmissione)

Analisi Rumore

Rumore da vibrazioni difficile da trattare perchè aumenta all'aumentare della massa e perchè:

Supporto lento:

- Cattiva conduttanza termica \rightarrow perdo poco calore
- Molte vibrazioni \rightarrow molti falsi segnali

Supporto stretto:

- Buona conduttanza termica \rightarrow perdo molto calore
- Poche vibrazioni \rightarrow pochi falsi segnali

Rumore elettronico deriva da:

- Effetto Johnson (ogni $R(T)$ genera rumore) $\rightarrow \sim 200$ eV per il termistore
- Preamplificatore $\rightarrow \sim 250$ eV

\implies Risoluzione in energia degradata fino all'ordine del keV!

Fondo

Il fondo è un insieme di eventi di fisica non interessante ai fini delle misure. Nel nostro caso:

Fondo radioattivo:

- Radioattività naturale dei materiali (soprattutto particelle α)
- Emissione neutroni (dalla roccia e materiale circostante) $\rightarrow 0 \div 10$ MeV
- Raggi cosmici (attenuati dal Gran Sasso)

Fondo ineliminabile: segnale eventi $2\nu\beta\beta$ coprono picco evento $0\nu\beta\beta$ (vedi figura precedente)

\implies Fondo medio nella regione di interesse (2528 ± 50 keV):

$0,16 \pm 0,01 \text{ count/keV/kg/y}$

Analisi fondo

Tra gli effetti che possono aumentare il fondo possono esserci:

- Scattering multi-Compton di $\gamma \rightarrow$ scartato se rilasciano energia in cristalli diversi ($\sim 40\%$ del fondo medio)
- Eventi α che rilasciano solo una parte di energia nel cristallo (in genere $E > 3\text{MeV}$ cioè regione interesse, ma se colpiscono solo parte superficiale del bolometro o il rame energia rilasciata potrebbe essere nel range di eventi cercati) \rightarrow un solo segnale come nel $0\nu\beta\beta$
- Presenza due segnali se dopo aver colpito superficie particella scappa in un secondo cristallo \rightarrow se sommando ho $E_{tot} > 3\text{MeV}$ posso comunque scartarli (assieme al punto sopra: $\sim 60\%$ del fondo medio).