

BOLOMETRI ED ELETTRONICA CONNESSA IN CUORICINO

Daniele Mirarchi

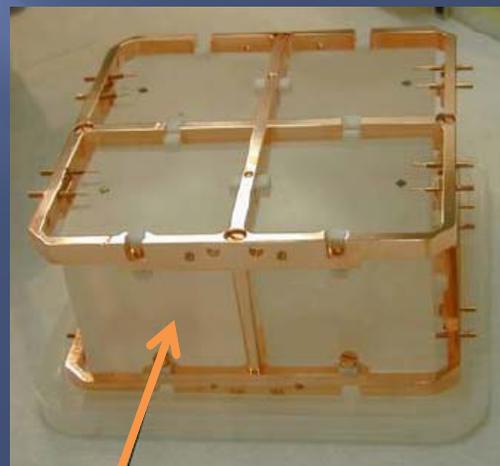
Bolometri

I Bolometri possono essere chiamati “I Calorimetri” per eccellenza, perché:

- Rivelatori a ionizzazione \Longrightarrow 30% dell'energia rilasciata dalla particella va in ionizzazione
- Scintillatori \Longrightarrow 5-15% dell'energia rilasciata dalla particella va in scintillazione

I Bolometri sono rivelatori termici \Longrightarrow misuro i *Fononi*

Posso misurare ~100%
dell'energia rilasciata dalla
particella!!! perché?



Bolometro

Principio di funzionamento

La misura dell'energia rilasciata si basa sull'innalzamento della temperatura del cristallo, dovuta all'urto della particella con gli atomi del reticolo.

Questo avviene in tutti i tipi di rivelatori, solo che in quelli "tradizionali" non ne siamo sensibili.

Al contrario però, quando avvengono processi che misuriamo con gli altri rivelatori

1. Ionizzazione
2. Scintillazione

Ne siamo ugualmente sensibili, perché l'energia rilasciata in questo modo, alla fine viene sempre convertita in fononi:

- I. Graduale rilascio dell'energia dell'e⁻ liberato
- II. Scattering dei γ emessi



Risoluzione

Essendo il numero di fononi “creati” dall’energia rilasciata dalla particella incidente dell’ordine di:

$$N = \frac{E}{\varepsilon}$$

Dove ε è l’energia che occorre per creare un fonone, quindi $\varepsilon = k_B T$

Assumendo che le fluttuazioni obbediscano alla statistica di Poisson:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Abbiamo che le fluttuazioni dell’energia rilasciata saranno:

$$\Delta E = \sqrt{E\varepsilon}$$

Da cui si vede che le fluttuazioni sono proporzionali al quanto che occorre per creare un fonone



Proporzionali a T

Risoluzione

Allo stesso modo, avremo che le fluttuazioni intrinseche del cristallo saranno:

$$\Delta E_{cr} = \sqrt{\varepsilon E_{cr}} = \sqrt{K_B T C_T T}$$

Quindi per riuscire ad essere sensibile ad un energia rilasciata E devo avere:

$$\Delta E_{cr} \ll E$$

Condizione impossibile a temperatura ambiente, in quanto per una mole si ha:

$$\Delta E_{cr} = 3.48 \cdot 10^{10} \text{ eV}$$

Quindi dobbiamo diminuire di molto la temperatura dei cristalli!

Inoltre, scendendo all'ordine dei mK, ci viene in soccorso anche la legge di Debye:

$$C_T = 1944 N_{moli} \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3$$

più vogliamo essere
sensibili a piccoli rilasci di
energia nel cristallo



più dobbiamo scendere in
temperatura, e scegliere
cristalli con una θ_D alta

Risoluzione

Tenendo conto di tutto questo, oltre che ad altri fattori (quali: contaminazioni, abbondanza isotopica, etc) si è scelto come cristallo:

Ossido di Tellurio (TeO₂)

A differenza che in un rivelatore al Si, dove ora ε è l'energia necessaria a creare una coppia elettrone-lacuna, pari a ~ 3.6 eV; avremo:

$$\Delta E = \sqrt{F} \sqrt{\varepsilon E} = 27 \text{ eV}$$

Mentre quelle sull'energia rilasciata da una particella di 1 KeV, all'interno del bolometro, saranno:

$$\Delta E = \sqrt{K_B T E} = 20 \text{ meV}$$

Per le fluttuazioni intrinseche avremo che, tenendolo a $T=5$ mK, e avendo $\theta_D \approx 230$ K, per una mole saranno:

$$\Delta E_{cr} = T \sqrt{C_T K_B} \approx 0.52 \text{ eV}$$

Le fluttuazioni dell'energia interna del rivelatore, sono maggiori di quelle che avremmo sull'energia rilasciata dalla particella



RISOLUZIONE
INDIPENDENTE
DALL'ENERGIA

Il Termistore

Semiconduttore in Ge con livello di drogaggio vicino a quello della transizione metallo-isolate (10^{15} - 10^{16} atomi/cm³).

Drogaggio di tipo NTD, ossia tramite irradiazione con neutroni



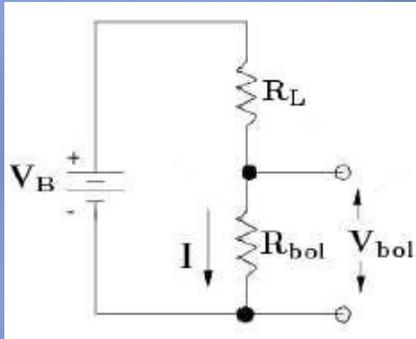
A temperature di ~ 10 mK la resistività v come: $\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^\gamma$

Con ρ_0 e T_0 dipendenti dal livello di drogaggio, mentre γ dalla concentrazione dei portatori minoritari

Quindi attraverso la misura della variazione della tensione ai sui capi, possiamo risalire alla variazione di temperatura del cristallo

Il Termistore

Per poter misurare una variazione di tensione, lo dobbiamo polarizzare!



Dove:

$$R_L = 54 \text{ G}\Omega$$

$$R_{bol} \sim 100 \text{ M}\Omega$$

$$V_B \sim V$$



correnti piccole e costanti che scorrono nel termistore

Andremo a misurare quindi:

$$V_{bol} = \frac{R_{bol}}{R_{bol} + R_L} V_B$$

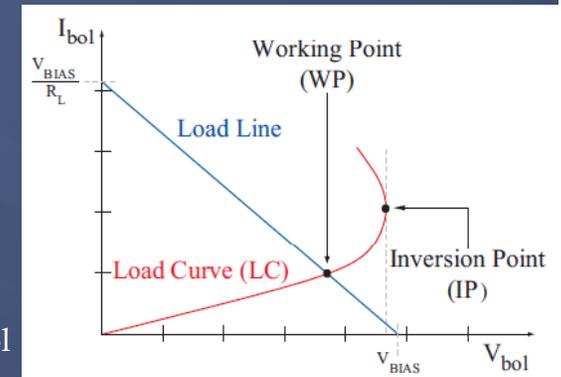
Da cui:

$$\Delta V_{bol} = \frac{R_L}{(R_{bol} + R_L)^2} V_B \Delta R_{bol} = \frac{R_L}{R_{bol} + R_L} A \frac{E}{CT_{bol}} \sqrt{P R_{bol}}$$

Dove $A = \gamma \left(\frac{T}{T_0} \right)^\gamma$ è la sensibilità, C la capacità termica, E l'energia rilasciata nel bolometro e P la potenza dissipata ($E \sim 1 \text{ MeV} \rightarrow \Delta V_{bol} \sim 100 \mu\text{V}$)

Il Termistore

La polarizzazione non è così banale come può sembrare, perché:



Quindi se R_{bol} aumentasse all'aumentare di T , questa aumenterebbe a sua volta a causa della maggiore potenza dissipata!

Nel caso dei termistori a semiconduttore R_{bol} diminuisce all'aumentare di T !



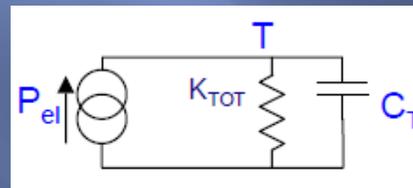
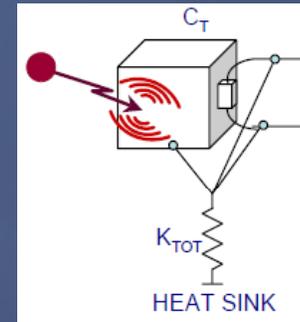
Possibile arrivare all'equilibrio tra potenza dissipata e temperatura di lavoro!

Segnale prodotto

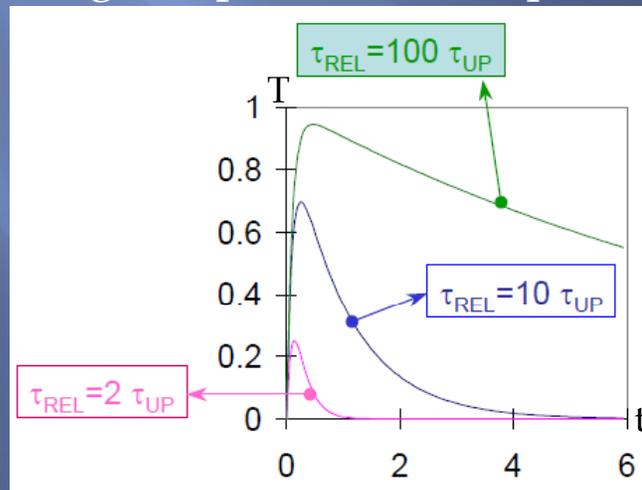
Schematizzando l'apparato in questo modo:

Utilizzando le analogie con i componenti elettrici:

- $K_T \longrightarrow K_E$
- $C_T \longrightarrow C_E$
- $T \longrightarrow V$
- $P \longrightarrow I$



Il segnale prodotto sarà quindi:



$$T(t) = \Delta T \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_{REL}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{UP}}\right) \right]$$

Dove τ_{UP} dipende velocità del suono all'interno del cristallo, quindi dalla sua grandezza.

τ_{REL} invece è dato da:

$$\tau_{REL} = \frac{C_T}{K_{TOT}}$$

Segnale prodotto

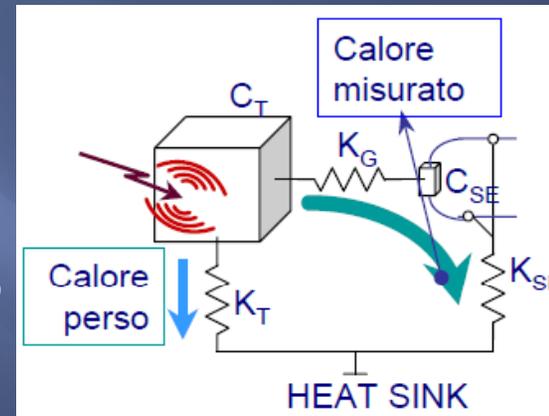
Nel nostro caso $\tau_{UP} \sim 10 \text{ ms}$, mentre $\tau_{REL} \sim (10,100) \tau_{UP}$

↳ segnale lento ($\sim \text{s}$) ⇒ adatti ad un basso rate di eventi

Una schematizzazione più realistica è:

Dove

- ✓ K_T è data dai supporti isolanti di collegamento al bagno termico
- ✓ K_G dalla colla tra termistore e bolometro
- ✓ K_{SE} dai fili di connessione

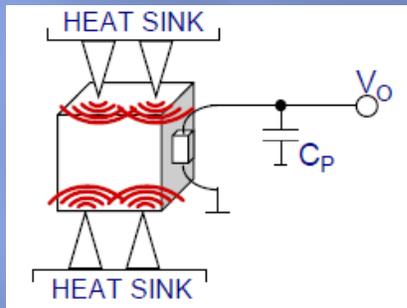


Quindi il tutto dovrà essere dimensionato in modo tale che la quantità di calore fluisca tramite i supporti sia minima.

Inoltre, il termistore dovrà avere una capacità termica praticamente nulla rispetto a quella del cristallo.

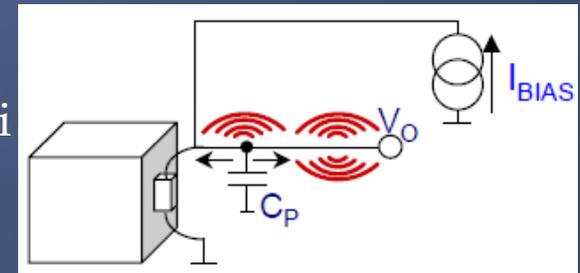
Rumore

Il rumore presente nella lettura del segnale è principalmente di tipo microfonico, e può essere dato da:



Vibrazioni dei cristalli

Vibrazioni dei fili



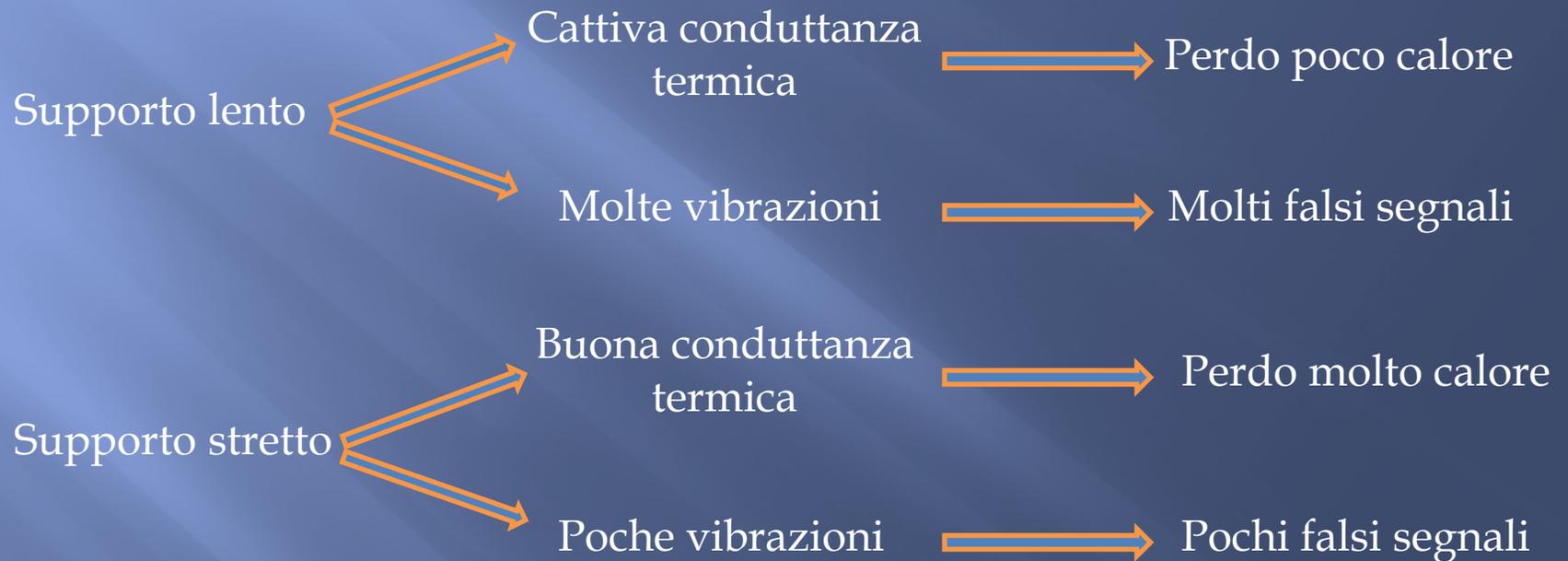
Le vibrazioni dei cristalli inducono degli innalzamenti di temperatura, e quindi dei falsi segnali.

L'oscillazione dei fili di lettura, induce una variazione della capacità della linea di trasmissione.

Come possiamo risolvere?

Rumore

Per quanto riguarda le vibrazioni dei cristalli, è un problema di non semplice soluzione, perché:

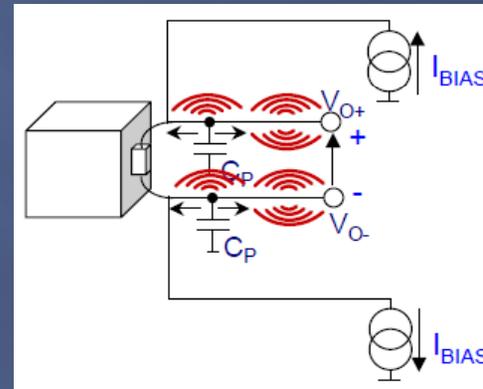
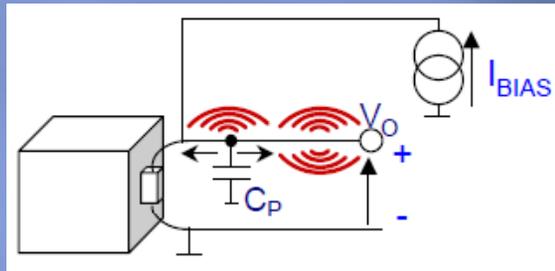


Dobbiamo quindi trovare un compromesso, in modo da bilanciare pro e contro con il resto della progettazione.

Questo tipo di rumore è tanto più grande quanto più è grande la massa del rivelatore.

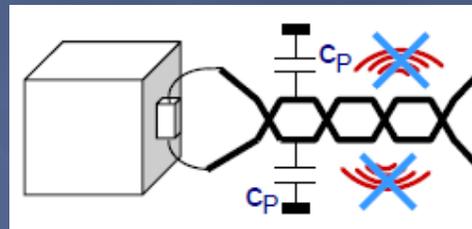
Rumore

Il rumore introdotto dalle vibrazioni dei fili può essere eliminato quasi completamente, perché:



Effettuando una lettura differenziale, avremo del rumore su entrambi i cavi.

Rendendoli solidali, il rumore sarà lo stesso su entrambi i fili



Abbiamo quindi eliminato gran parte del rumore introdotto dalle vibrazioni dei cavi!!!

Rumore

Dobbiamo considerare anche la lunghezza della linea di trasmissione (nel nostro caso ~ 4m), perché:

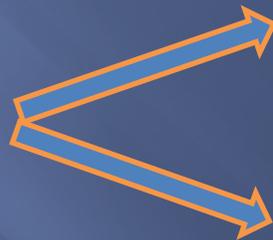
Maggiore lunghezza  Maggiore degradazione rapporto S/R

Dobbiamo inserire quindi uno stadio di amplificazione, ma dove?

- Vicino al termistore  aumenta la T di lavoro del cristallo
- Lontano dal termistore  arriva degradato

Come risolvere?

Dividiamo l'elettronica in "calda" e "fredda"



Elettronica fredda:

- I. Lavora a temperature criogeniche
- II. Amplificazione a guadagno unitario
- III. Adatta l'impedenza (diminuisce)

Elettronica calda:

- I. Lavora a temperatura ambiente
- II. Vera amplificazione

Rumore

Altra fonte di rumore che contribuisce alla diminuzione della risoluzione è il

rumore Johnson



Ogni resistenza R operante a temperatura T genera rumore

Nel nostro caso avremo che le fluttuazioni introdotte saranno dell'ordine:

- Per il termistore ~ 200 eV
- Trascurabile per la resistenza di carico
- Il pre-amplificatore ~ 250 eV

In definitiva la nostra risoluzione in energia si sarà degradata fino ad arrivare all'ordine dei KeV

Stabilizzazione

Abbiamo visto come ridurre il rumore introdotto dall'elettronica
cosa fare per le fluttuazioni del bagno termico?

L'instabilità dovuta al consumo di ^4He presente nel criostato, è stata ridotta con la seguente strategia:

- 1) Installato un termometro sullo scheletro in rame della torre
- 2) Il segnale proveniente, invertito e inviato ad un convertitore V-I
- 3) La corrente fatta scorrere all'interno di una resistenza posta sullo scheletro

Tenendo sempre la temperatura al di sopra di quella minima raggiungibile.

Questo non dà però un livello di stabilità adeguato su variazioni rapide nel tempo, per le quali bisognerà effettuare un'analisi offline.

Criogenizzazione

Il raggiungimento temperature così basse, è effettuato in vari step:

1. Immissione di ^4He liquido ($\sim 5\text{ K}$)
2. Aspirazione superficiale ($\sim 700\text{ mK}$)
3. Miscela ^3He - ^4He , e qui entra in gioco la meccanica quantistica, perché:

^4He bosone  Condensazione Bose-Einstein

Quindi l' ^4He va sul fondo, sono però presenti sempre impurità di ^3He .

Questo permette all' ^3He di fluire all'interno di ^4He , con il conseguente trasferimento di calore.



Facendo circolare la miscela e possiamo scendere a $T \sim 0\text{ K}$

Stabilizzazione

Questo però non basta ad avere un livello di stabilizzazione adeguato!

È necessaria quindi un'ulteriore analisi offline \longrightarrow Abbiamo bisogno di un riferimento

Applichiamo quindi una resistenza sul cristallo, a cui inviamo un impulso noto sia in ampiezza che temporizzazione \longrightarrow Facilmente identificabile

In questo modo possiamo effettuare la stabilizzazione nel seguente modo:

- I. Vengono correlati i valori di tensione acquisiti per l'impulso V_s , con quelli del livello di baseline V_b , ottenendo così $V_s(V_b)$
- II. Si costruisce $A(V_b) = V_s^{\text{rif}} / V_s(V_b)$
- III. Si stabilizzano le ampiezze dei segnali acquisiti $V_{\text{stab}} = V(V_b) A(V_b)$

Arriviamo così ad avere:

