

# L'ELETTRONICA PER GLI ARRAY DI RIVELATORI CRIOGENICI: I BOLOMETRI

Gianluigi PESSINA

INFN Sez. di Milano-Bicocca ed Università di  
Milano-Bicocca, Facoltà di Fisica

[Gianluigi.Pessina@mib.infn.it](mailto:Gianluigi.Pessina@mib.infn.it)

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

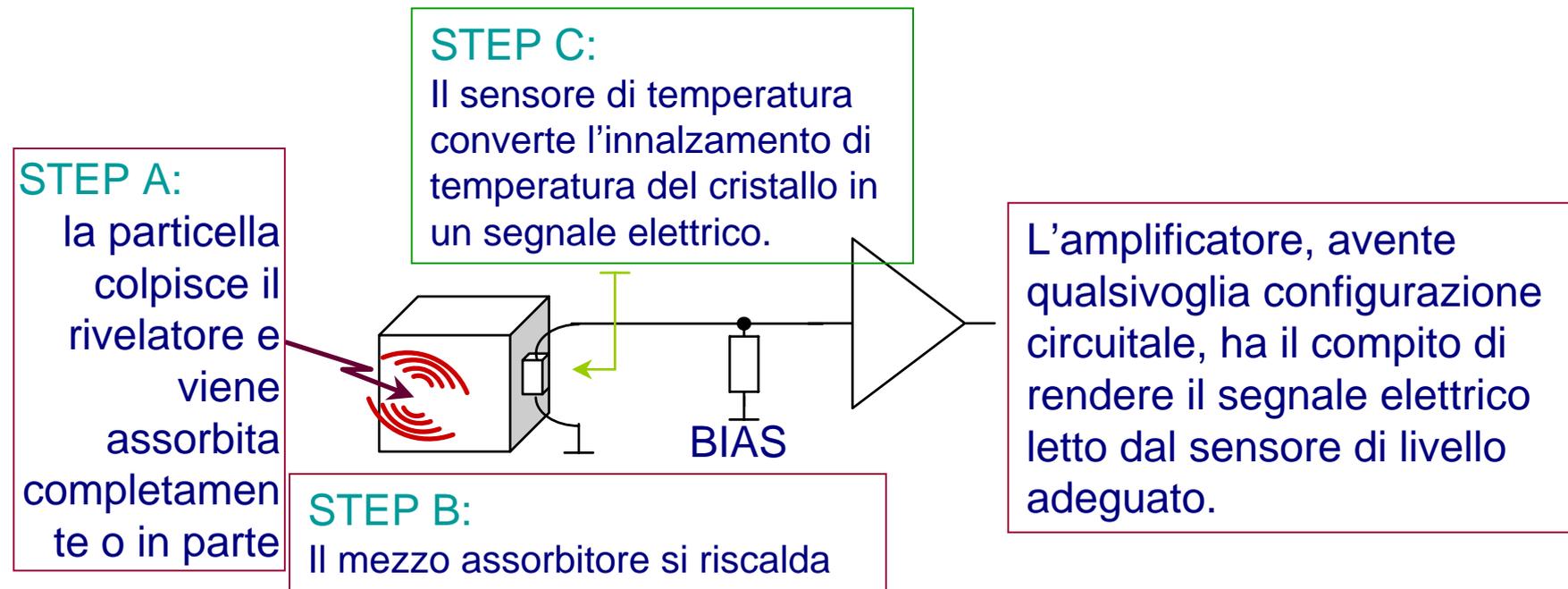
**IN UN ESPERIMENTO DI FISICA QUALSIASI COSA  
ACCADE LA COLPA E' SEMPRE  
DELL'ELETTRONICA.**

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

# Come opera un rivelatore criogenico 1

## II PRINCIPIO DI OPERAZIONE E' MOLTO SEMPLICE



Quali sono I requisiti che rendono il processo descritto fattibile:

- ➔ La variazione di temperatura deve essere apprezzabile. In qualche modo sia il mezzo assorbitore che l'ambiente devono avere determinate caratteristiche;
- ➔ Il sensore, trasduttore, di temperatura deve essere posto in eccellente contatto termico con l'assorbitore ed anch'esso deve fornire un segnale di intensità adeguata;
- ➔ L'amplificatore deve leggere il segnale in modo preciso, senza aggiungere disturbi, o rumore.

## Come opera un rivelatore criogenico 2

### Prima considerazione:

Un rivelatore convenzionale è sensibile alla ionizzazione che corrisponde a circa il 30 % dell'energia depositata nel mezzo assorbente.

Un rivelatore termico, un vero e proprio calorimetro, è sensibile ai così detti FONONI ovvero ai modi di vibrazione degli atomi attorno alla loro posizione di equilibrio.

Pertanto un rivelatore termico può essere sensibile al 100 % dell'energia: 70 % (fononica) + 30 % (ionizzante, che rilassa nel canale fononico dopo breve tempo, assumendo che non vi siano perdite radiative e che nessun campo elettrico sia applicato dedicato alla raccolta delle cariche generate).

## Come opera un rivelatore criogenico 3

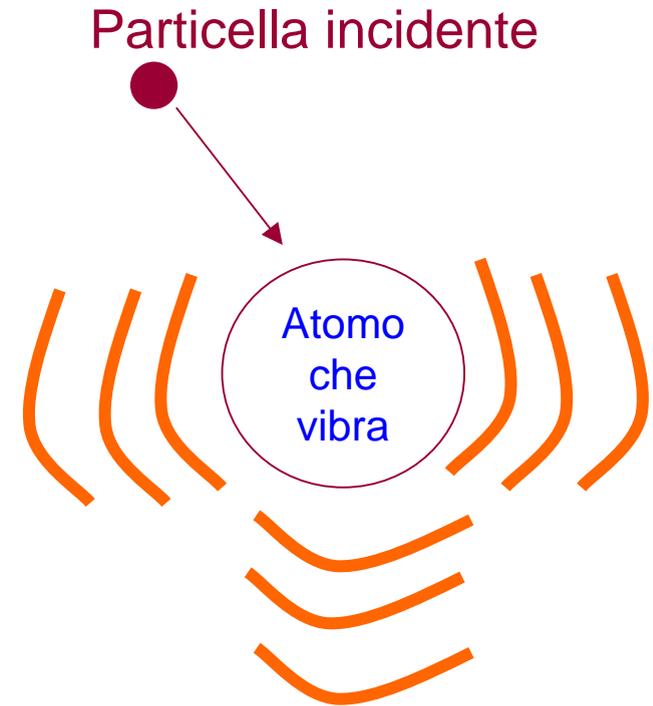
Un corpo è composto di tanti atomi che possono oscillare attorno alla loro posizione di equilibrio. L'ampiezza dell'oscillazione è proporzionale all'energia posseduta, ovvero alla temperatura, che è una rappresentazione dell'energia posseduta.

Una particella che entra nella materia subisce una successione continua di urti.

Ad ogni urto la particella cede parte della propria energia di movimento, che viene acquisita dall'atomo urtato.

L'atomo urtato aumenta l'ampiezza dell'oscillazione, che si manifesta con un aumento della temperatura.

(In questo esempio supponiamo trascurabili i fenomeni che portano alla liberazione di carica conseguente all'urto).



## Come opera un rivelatore criogenico 4

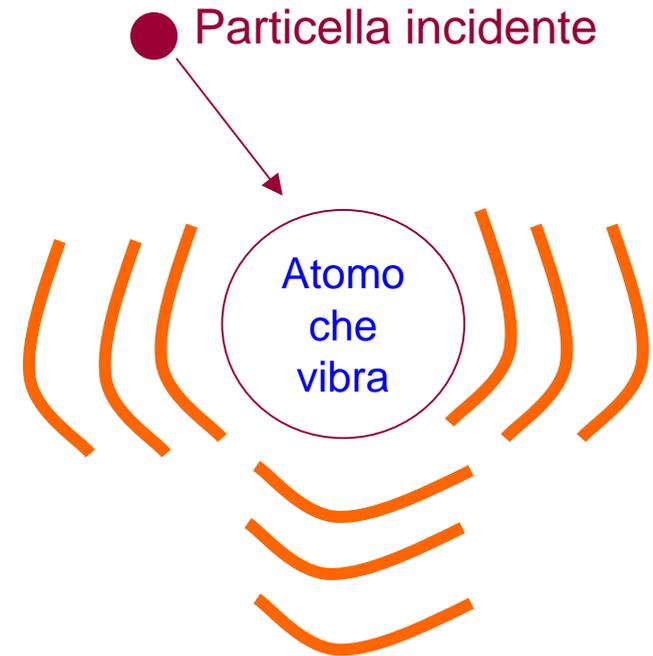
L'atomo nel corpo può oscillare secondo le 3 direzioni che individuano lo spazio.

Ad ogni direzione è assegnato un fonone.

Se il corpo ha N atomi si avrà in media la presenza di 3N fononi. In media perché i fenomeni di urto tra gli stessi atomi possono portare all'assorbimento del fonone, ovvero l'atomo potrebbe rallentare la propria oscillazione temporaneamente.

A temperature ordinarie si può dimostrare che ogni fonone possiede un'energia  $E_{\text{Fonone}} = K_B T$ , dove  $K_B$  è la costante di Boltzmann pari a  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

Per esempio a temperatura ambiente,  $T=300 \text{ K}$  (circa  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $E_{\text{fonone}}=26 \text{ meV}$ , dove per convenzione  $1 \text{ eV}=1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .



## Come opera un rivelatore criogenico 5

Perciò l'energia contenuta in un corpo composto da  $N_{\text{TOT}}$  atomi a temperatura ordinaria è:

$$\begin{aligned} E &= 3N_{\text{TOT}}(K_{\text{B}}T) & N_{\text{A}} &= \text{numero di Avogadro, ovvero numero di atomi per mole;} \\ &= 3NN_{\text{A}}(K_{\text{B}}T) & N &= \text{numero di moli che compongono il corpo;} \\ &= 3NRT & R &= \text{costante dei Gas, } 8.31 \text{ J/(mole K).} \\ &= C_{\text{T}}T & C_{\text{T}} &= \text{capacità termica o calore specifico della sostanza.} \end{aligned}$$

Ovverosia l'energia contenuta dal corpo è proporzionale:

1. al numero di atomi in grado di oscillare attorno alla loro posizione di equilibrio;
2. al numero di possibili direzioni di oscillazioni per atomo, 3;
3. alla energia posseduta da ogni modo di vibrazione o fonone.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
- 2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;**
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

## Come opera un rivelatore criogenico 4

Quando la particella incide l'assorbitore incontra fononi a cui cede via via energia. Il numero di fononi che può eccitare sarà dell'ordine di:

$$N_{EC} = \frac{U_{part}}{K_B T}$$

La statistica di un processo come quello descritto è soggetta a fluttuazione.

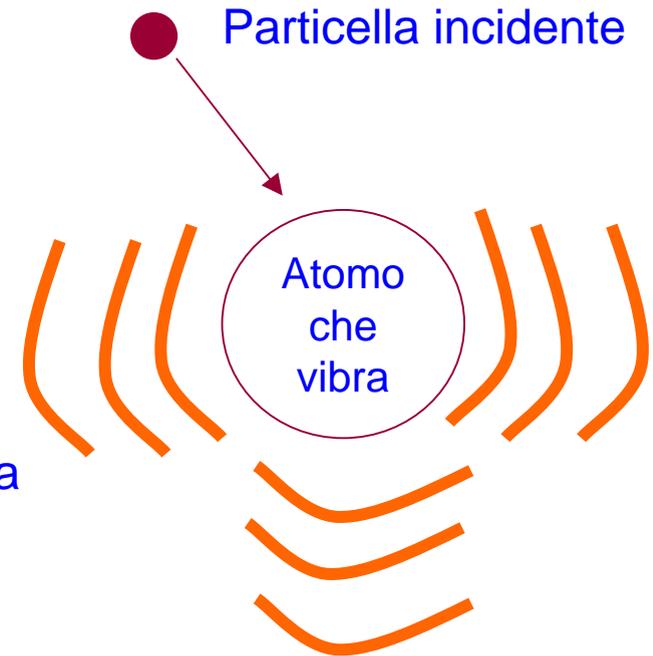
Quasi sempre la fluttuazione statistica del numero di portatori di energia o carica soddisfa la così detta statistica di Poisson.

Ovvero, in genere, Teorema:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \quad N = \text{numero di portatori di energia eccitati dalla particella}$$

$$\text{Ma: } N = \frac{E}{E_Q} \quad ; \quad \text{quindi: } \frac{\Delta E}{E} \approx \sqrt{\frac{E_Q}{E}} \quad . \text{ Pertanto per la fluttuazione energetica è:}$$

$$\begin{aligned} \Delta E &\approx \sqrt{\frac{E_Q}{E}} E \\ &\approx \sqrt{E_Q E} \end{aligned}$$



## Considerazioni importanti

La risoluzione di un rivelatore è sempre dipendente dall'energia che occorre fornire per generare o eccitare un singolo portatore di energia o carica:

$$\Delta E \approx \sqrt{E_Q E}$$

Per esempio nel caso di un rivelatore a giunzione al Si per generare una coppia elettrone-lacuna a cui si è sensibili occorrono circa 3.6 eV.

Dalla formula trovata abbiamo allora che per una particella avente energia di 1000 eV la fluttuazione energetica attesa è dell'ordine di:

$$\Delta E = \sqrt{F} \sqrt{E_Q E} = \sqrt{0.2} \sqrt{3.6 \times 1000} = 27 \text{ eV}$$

Il termine F è detto fattore di Fano. Tiene conto che nel rivelatore la statistica di Poisson non è del tutto soddisfatta. Ovvero le cose vanno un po' meglio di quanto ci si aspetti.

## Come opera un rivelatore criogenico 5

$$\begin{aligned}\text{Fluttuazione energetica} = \Delta E &= \sqrt{\frac{E_Q}{E}} E \\ &= \sqrt{E_Q E}\end{aligned}$$

Nel nostro caso il livello di energia  $E_Q$  risulta essere uguale a  $K_B T$ , perciò:  $\Delta E = \sqrt{K_B T E}$

Nel caso di un calorimetro siamo nella situazione particolare in cui la variazione di temperatura indotta dalla particella è molto piccola rispetto alla temperatura del mezzo assorbitore:

$$E + U_{\text{part}} = 3N_{\text{TOT}} K_B (T + \Delta T)$$

Inoltre anche la temperatura del mezzo assorbitore fluttua seguendo una statistica molto simile a quella della particella:

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{Ass}} &= \sqrt{K_B T (3N_{\text{TOT}} K_B T)} \\ &= \sqrt{3N_{\text{TOT}} K_B T} \\ &= \sqrt{C_T K_B T}\end{aligned}$$

## Come opera un rivelatore criogenico 6

Es.  $T=300$  K,  $N_{\text{TOT}}=N_A$  (una mole) si ottiene:

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{Ass}} &= \sqrt{3N_{\text{TOT}}} K_B T \\ &= 1.34 \times 10^{12} \times 26 \times 10^{-3} \text{ eV} = 3.48 \times 10^{10} \text{ eV} !!!\end{aligned}$$

Considerato che l'energia delle particelle da studiare potrebbe essere dell'ordine di un migliaio di eV risulta impensabile cercare di essere sensibili mantenendo il mezzo assorbitore a temperatura ambiente.

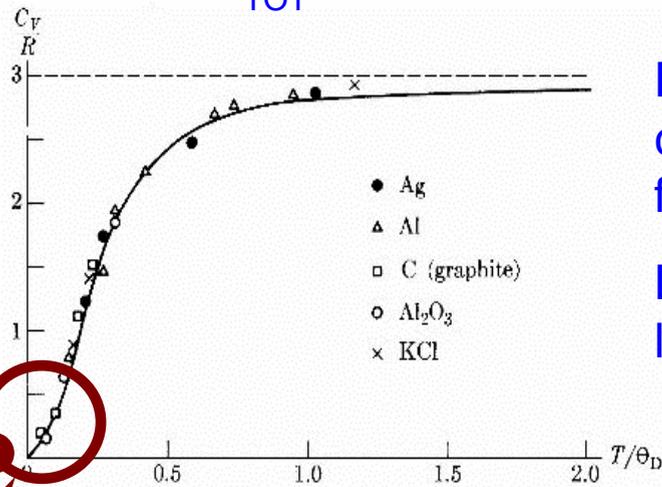
Ad esempio se operassimo il mezzo assorbitore a  $T=5$  mK, ovvero a  $-272.995$  °C si avrebbe che:

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{Ass}} &= \sqrt{3N_{\text{TOT}}} K_B T \\ &= 1.34 \times 10^{12} \times 4.31 \times 10^{-7} = 577 \times 10^5 \text{ eV}\end{aligned}$$

Le cose migliorano, ma non abbiamo tenuto conto di un fatto straordinario che accade a temperature così basse.

## Considerazioni pratiche: quando il processo diviene fattibile 1

Senza entrare nei dettagli possiamo dire che ogni corpo isolante, dielettrico e diamagnetico, possiede una temperatura caratteristica  $\Theta_D$ , detta temperature di Debye, al di sotto della quale fenomeni quantistici fanno sì che il numero di fononi aventi energia  $K_B T$  sia minore di  $3N_{TOT}$ .



La capacità termica diviene evanescente a temperature molto basse.

Di fatto la capacità termica dei corpi smette di essere costante al di sotto di  $\Theta_D$ , come si può vedere nella figura a fianco.

La legge che descrive bene questo comportamento è la legge di DEBYE:

$$C_T = K_B N_{TOT} \frac{12\pi^4}{5} \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad \text{DEBYE LAW}$$

$$C_T \approx \frac{N_{TOT}}{N_A} 1944 \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3$$

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

Per gli elettroni nei metalli e semiconduttori invece la dipendenza termica diviene:

$$C_e = N \frac{Z\pi^2 R}{2} \left( \frac{T}{\Theta_f} \right)$$

## Considerazioni pratiche: quando il processo diviene fattibile 2

Facciamo un esempio. Supponiamo di essere a  $T = 5$  mK e sia  $\Theta_D = 200$  K (un valore medio). Per una mole di materiale la fluttuazione energetica possiamo calcolarla a partire da:

$$C_T \approx N_{\text{MOLI}} 1944 \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 = 30 \text{ pJ} \quad \text{Per una mole}$$

Quindi:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{Ass}} &= \sqrt{C_T K_B T} \\ &= \sqrt{30 \times 10^{-12} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 5 \times 10^{-3}} \\ &= 0.63 \text{ eV} \text{ !!!!!!!!!!!} \end{aligned}$$

Consideriamo ora la fluttuazione energetica legata alla fluttuazione statistica dei fononi eccitati dalla particella incidente:

$$\Delta E = \sqrt{E_Q E} = \sqrt{K_B T E} = 20 \text{ meV per } E = 1 \text{ KeV} \text{ !!!!!!!!!!!!!!!}$$

 Fatto fondamentale: in un rivelatore termico la fluttuazione energetica non dipende dall'energia della particella, come avviene per un rivelatore convenzionale.

{ Questo risultato va confrontato con la risoluzione di un rivelatore convenzionale per esempio al Si che è dell'ordine di 27 eV, ben 43 volte superiore. }

## Considerazioni pratiche: quando il processo diviene fattibile 3

Il fatto che la fluttuazione energetica non dipenda dall'energia della particella incidente è ovvio se consideriamo la variazione di temperatura indotta dalla particella assorbita nel mezzo:

$$\text{Partiamo ancora da } T = 5 \text{ mK e : } C_T \approx N_{\text{MOLI}} 1944 \left( \frac{T}{\Theta_D} \right)^3 = 30 \text{ pJ}$$

$$\text{Da: } E + U_{\text{part}} = C_T (T + \Delta T)$$

$$(T + \Delta T) - T = \left( \frac{E}{C_T} + \frac{U_{\text{part}}}{C_T} \right) - \frac{E}{C_T} \Rightarrow \Delta T = \frac{U_{\text{part}}}{C_T} \quad (\text{Se } U_{\text{part}} = 1 \text{ KeV})$$
$$\approx 5.34 \times 10^{-6} \text{ K} = 5.34 \mu\text{K}$$

Perciò il rapporto tra la temperatura del mezzo e quella indotta dalla particella è:

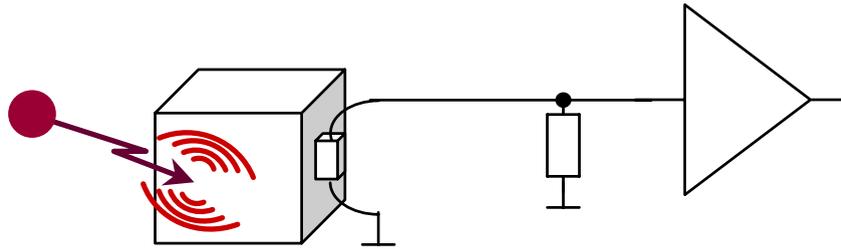
$$\frac{5 \text{ mK}}{5.34 \mu\text{K}} = 936$$

Ecco spiegata la ragione.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
- 3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;**
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

## Il segnale di un rivelatore termico 1

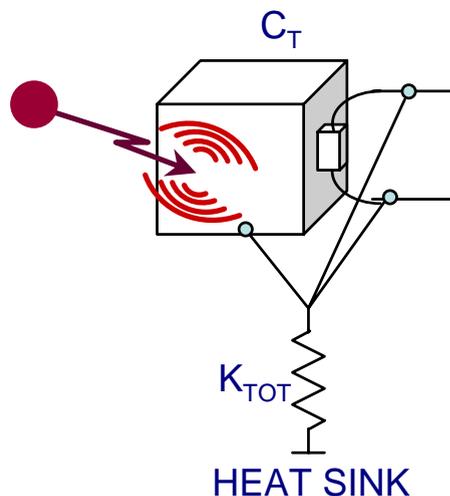


Ma che tipo di segnale viene generato da un rivelatore termico?

Per come abbiamo trattato ora il rivelatore ogni segnale determina una variazione di temperatura che rimane a tempo indefinito:

$$\Delta T = \frac{U_{\text{part}}}{C_T}$$

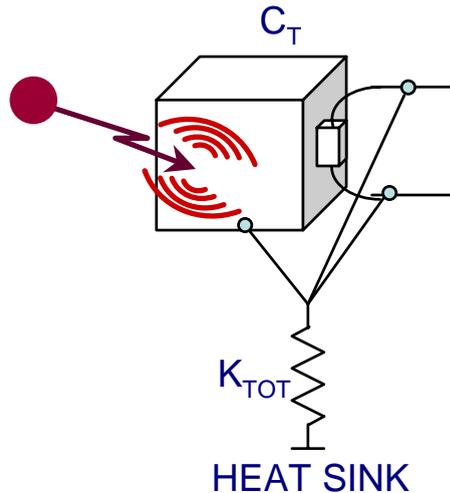
In realtà il rivelatore necessita di essere corredato di una parte molto importante: una connessione termica verso una sorgente di riferimento a temperatura costante:



La Resistenza termica,  $R_{\text{TOT}}$ , o la sua inversa, la conduttanza termica  $K_{\text{TOT}}$ , impone al sistema di rilassarsi alla temperatura del così detto Heat Sink a seguito dell'assorbimento dell'energia della particella.

Mentre l'innalzamento della temperatura è un processo relativamente veloce, il rilassamento è tanto più lento quanto più il collegamento termico è debole.

## Il segnale di un rivelatore termico 3



In sostanza, l'energia della particella viene accumulata e quindi “consegnata” alla sorgente.

Accade la stessa cosa di quando 2 corpi a temperatura differente vengono posti a contatto attraverso una conduttanza termica finita. Il primo corpo cede energia al secondo fino a che i 2 corpi vengono ad avere la stessa energia, ovvero temperatura.

Siccome la sorgente di temperatura è in grado di assorbire grosse quantità di energia senza cambiare la propria temperatura, accade che in seguito all'assorbimento della particella si verifica un lento rilassamento verso la temperatura iniziale.

La costante di tempo di rilassamento è in prima istanza quella termica:

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

## La rete termodinamica

C'è una completa analogia tra i componenti passivi elettrici e quelli termici:

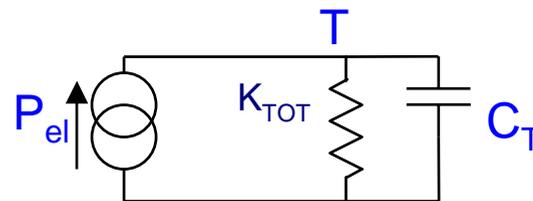
Conduttanza termica ➡ conduttanza elettrica;

Capacità termica ➡ capacità elettrica;

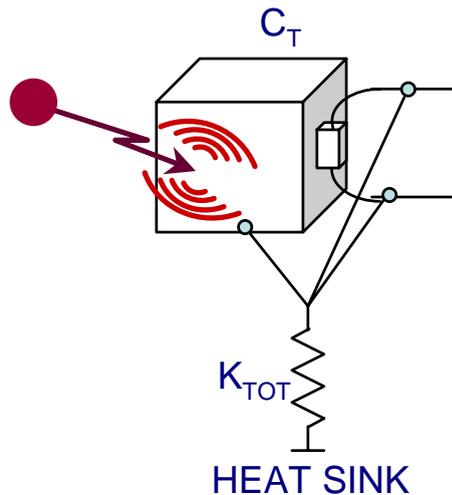
Temperatura ➡ tensione elettrica;

Potenza elettrica ➡ corrente elettrica.

Esempio:



## Il segnale di un rivelatore termico 4



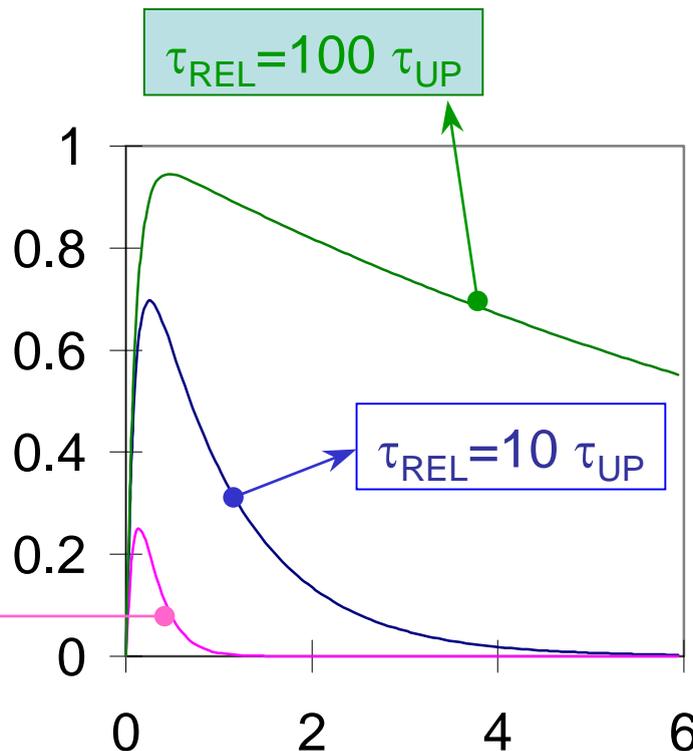
L'innalzamento di temperatura necessita del tempo necessario alla diffusione dei fononi in tutto il mezzo assorbente. Questo tempo è tanto maggiore quanto più l'assorbitore è di grosse dimensioni. La velocità con cui i fononi diffondono nel materiale è limitata dalla velocità del suono nel mezzo in considerazione.

La velocità di salita del segnale termico è caratterizzato da una costante di tempo  $\tau_{UP}$ , mentre la costante di tempo di discesa da:

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

La legge di evoluzione del segnale è ben descritta dalla classica funzione che si trova spesso nei segnali elettronici:

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



## Il segnale di un rivelatore termico 5

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

Il segnale termico nella sua forma semplificata vista ora è caratterizzato da 2 componenti: l'innalzamento di temperatura conseguente all'assorbimento della particella ed il rilassamento termico alla temperatura di partenza.

In genere la costante di tempo di riscaldamento è dell'ordine di qualche  $\mu\text{sec}$ , mentre la costante di tempo di raffreddamento può essere anche 10, 100 volte più lunga.

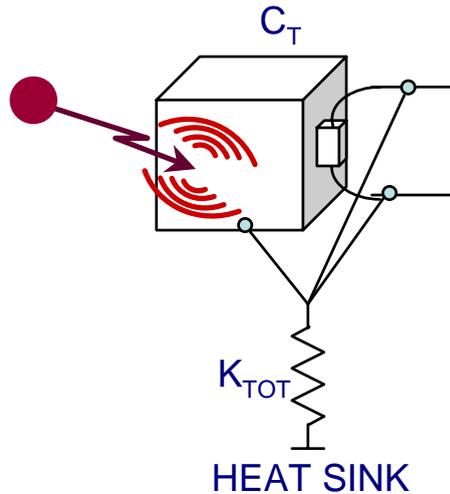
Nei rivelatori termici non sia hanno quindi i tipici segnali impulsivi dei rivelatori tradizionali e la frequenza degli eventi incidenti non potrebbe certamente essere elevata.

Applicazioni con acceleratori come LHC sono difficilmente applicazioni a cui i rivelatori termici si adattano.



**Un rivelatore termico è altamente risolutivo, ma relativamente lento. Non in grado di sopportare tassi di conteggio elevati.**

## Il segnale di un rivelatore termico 6

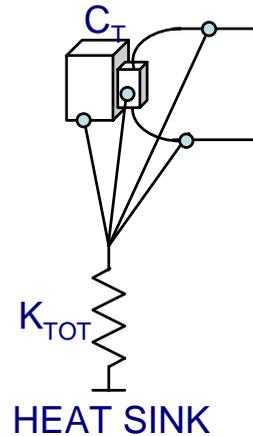


Fino ad ora abbiamo considerato il sistema termico coincidere con il solo assorbitore. Le cose sono un po' più complesse.

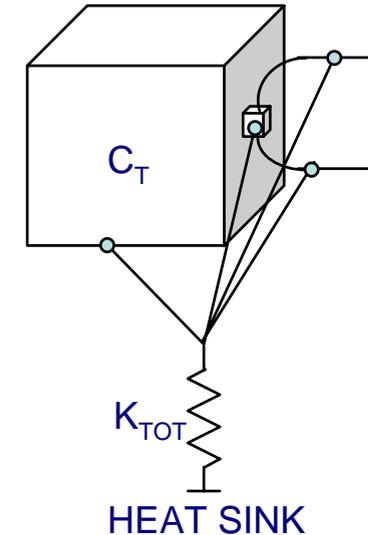
Dobbiamo considerare che l'elettronica è sensibile ad un segnale elettrico, non termico. Quindi è ora che si cominci a pensare anche all'eventuale contributo del trasduttore temperatura-segnale elettrico.

Esistono, ed accenneremo, diversi tipi di trasduttori. Per ora in termini generici vediamo il loro possibile effetto sull'economia del sistema.

## Il segnale di un rivelatore termico 7



Indubbiamente se le dimensioni del sensore, o meglio, la massa del sensore risulta confrontabile a quella dell'assorbitore la capacità termica totale diviene la combinazione delle due.



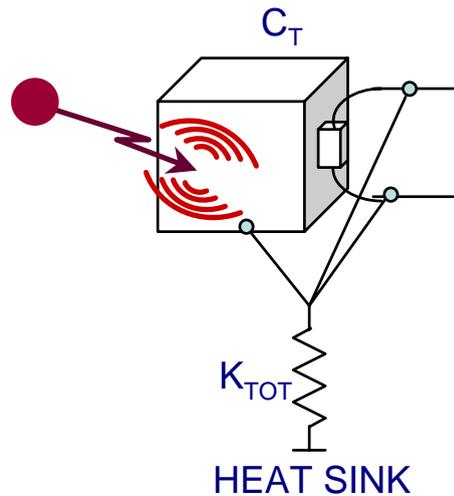
In questa situazione abbiamo un degrado del segnale termico visto che avremmo:

$$\Delta T = \frac{U_{part}}{C_T + C_{trasd}} < \frac{U_{part}}{C_T}$$

➔ Perciò la prima regola è fare in modo che il sensore non degradi le prestazioni termiche.

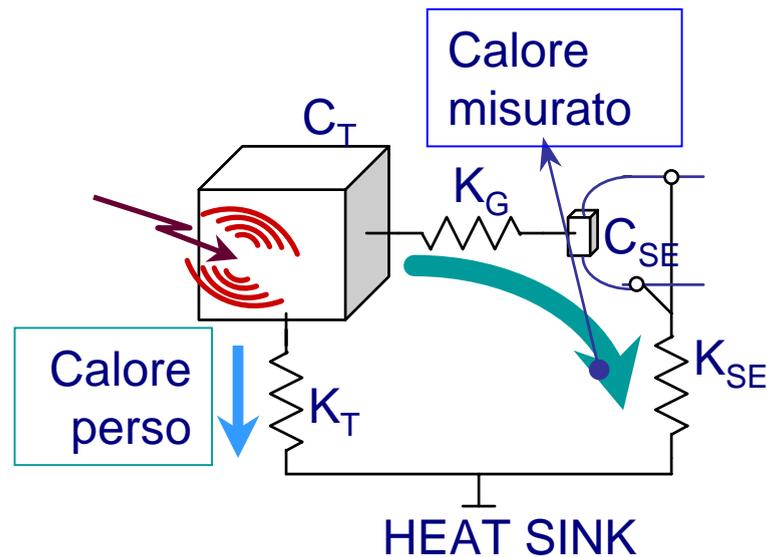
Ovvero occorre fare in modo che la trasduzione non necessiti di una frazione apprezzabile dell'energia acquisita per svolgere il proprio compito.

## Il segnale di un rivelatore termico 8



Il collegamento termico è rappresentato da  $K_{TOT}$  che però riassume il fatto che le connessioni termiche sono più complesse.

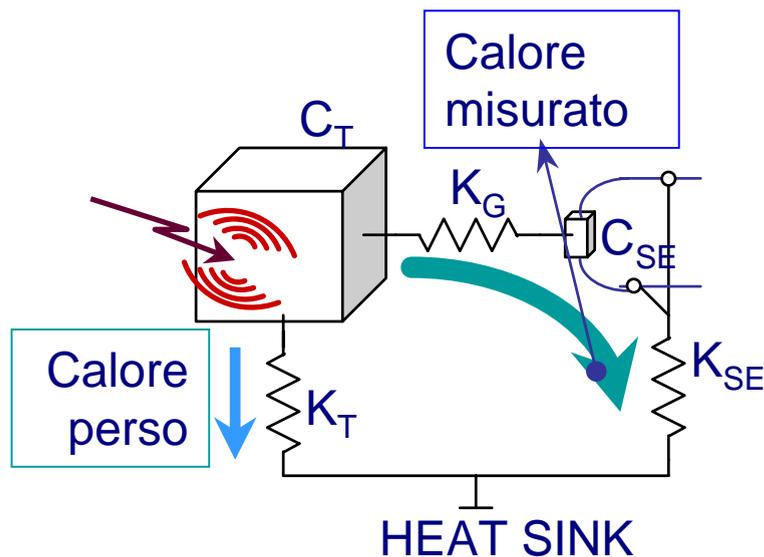
In realtà un maggiore dettaglio è fornito dallo schema espanso che ha carattere meno generale:



Le conduttanze termiche vanno ottimizzate in modo tale che il calore fluisca attraverso il sensore di temperatura, prima di essere consegnato all'Heat Sink.

La realizzazione di questa situazione non è ovvia perché a bassa temperatura le conduttanze termiche hanno una forte dipendenza dalla temperatura.

## Il segnale di un rivelatore termico 9



Esempi di conduttanze termiche:

Le conduttanza  $K_T$  è realizzata con supporti isolanti.

La conduttanza  $K_G$  è spesso una colla isolante con cui si attacca il sensore all'assorbitore.

Alle temperature basse di esercizio di un rivelatore termico si evince per esse un comportamento del tipo:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = K_0 T^3$$

La conduttanza  $K_{SE}$  è fornita dai fili di connessione del trasduttore. I fili sono ovviamente metallici. Se non sono superconduttori per essi vale:

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = K_0 T$$

Si deve osservare che a temperature ordinarie per entrambe vale

che:  $\frac{\Delta P}{\Delta T} = K_{00}$        $\frac{\Delta P}{\Delta T} = K_0$

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
- 4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;**
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

## La reazione elettrotermica 1

Per potere leggere il segnale della particella occorre polarizzare il trasduttore.

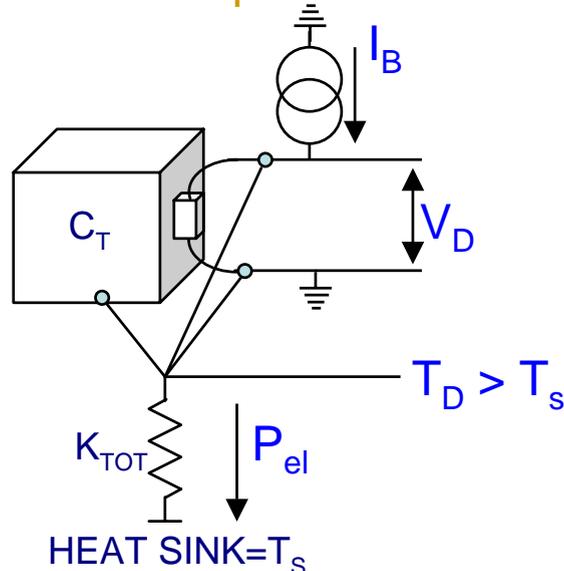
Quando lo si polarizza il trasduttore è costretto a dissipare potenza elettrica.

La potenza elettrica sviluppa attraverso la conduttanza  $K_{TOT}$  un innalzamento di temperatura.

L'innalzamento di temperatura determina un cambiamento delle condizioni di lavoro del trasduttore e del rivelatore.

Di conseguenza la potenza elettrica cambia, allora cambia di nuovo la temperatura. A questo punto si chiude il ciclo: si è creata una reazione che terminerà quando si raggiungerà un equilibrio tra potenza dissipata e temperatura di lavoro.

Questa reazione è in genere negativa, per cui la situazione di equilibrio finale viene raggiunta in un tempo breve.



## Il segnale di un rivelatore termico 10

Aggiungendo le condizioni di non idealità imposte dalla presenza del trasduttore certamente si arriva a deteriorare la risoluzione energetica del rivelatore.

Tuttavia la risoluzione intrinseca stimata del rivelatore è così bassa che l'effetto della presenza del trasduttore, se ben progettato, non viene certamente ad inficiare il risultato finale.

Esistono differenti tipi di trasduttori capaci di operare a temperature così basse soddisfacendo le condizioni accennate fino ad ora.

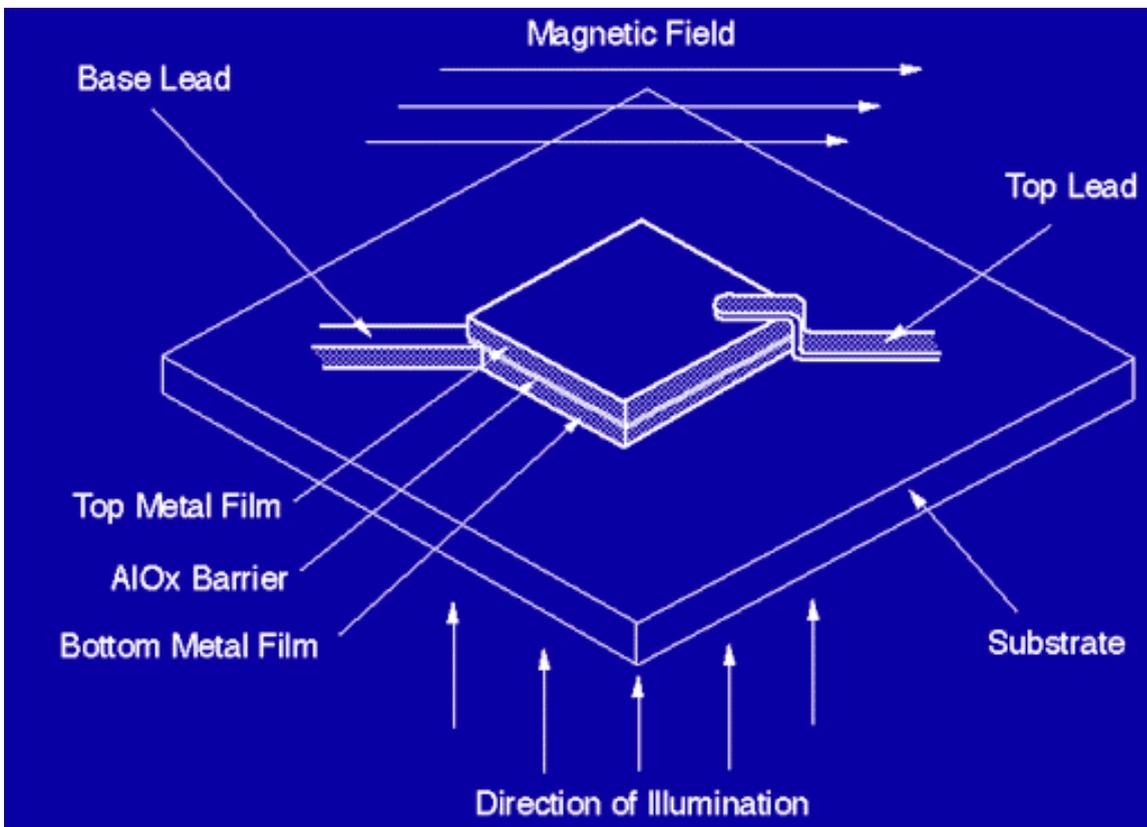
I sensori più utilizzati fino ad ora sono:

- 1. Superconductor Tunnel Junction, STJ;**
- 2. Superconductor Edge Detector, TES;**
- 3. Termistori a semiconduttore, NTD Ge e Si.**

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. **I Superconducting Tunnel Junction, STJ;**
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

# Superconductor Tunnel Junction, STJ 1



In questo trasduttore si interpone uno strato sottilissimo di materiale isolante, 1-2 nm, tra due superconduttori. Il materiale isolante previene il passaggio di corrente interponendo una barriera.

La cosa sorprendente è che, grazie alle proprietà quantistiche che si manifestano a temperature così basse (\*\*), piccole variazioni di temperatura sono sufficienti ad eccitare gli elettroni a compiere il salto tra un superconduttore e l'altro.

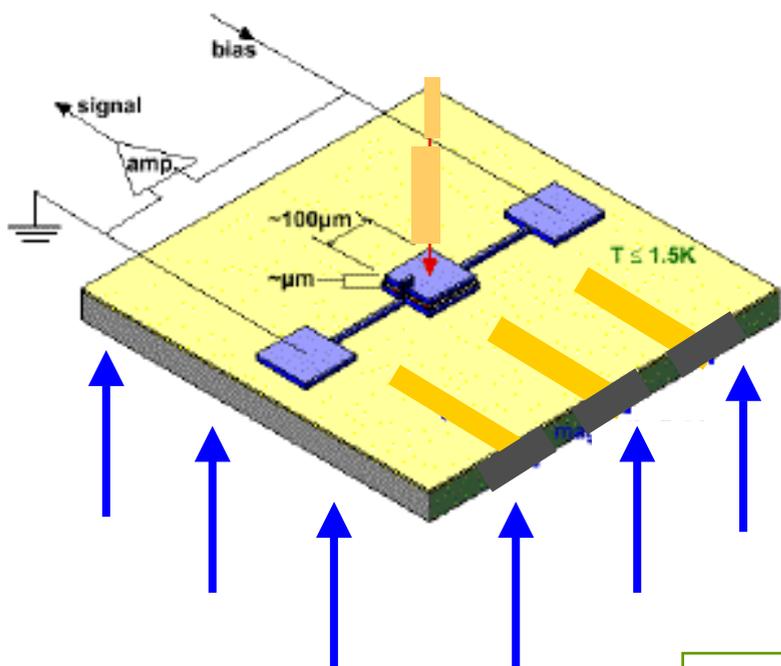
La giunzione viene serigrafata sull'assorbitore.

(\*\*) Le funzioni d'onda a basse T si estendono da una parte all'altra dei 2 elettrodi.

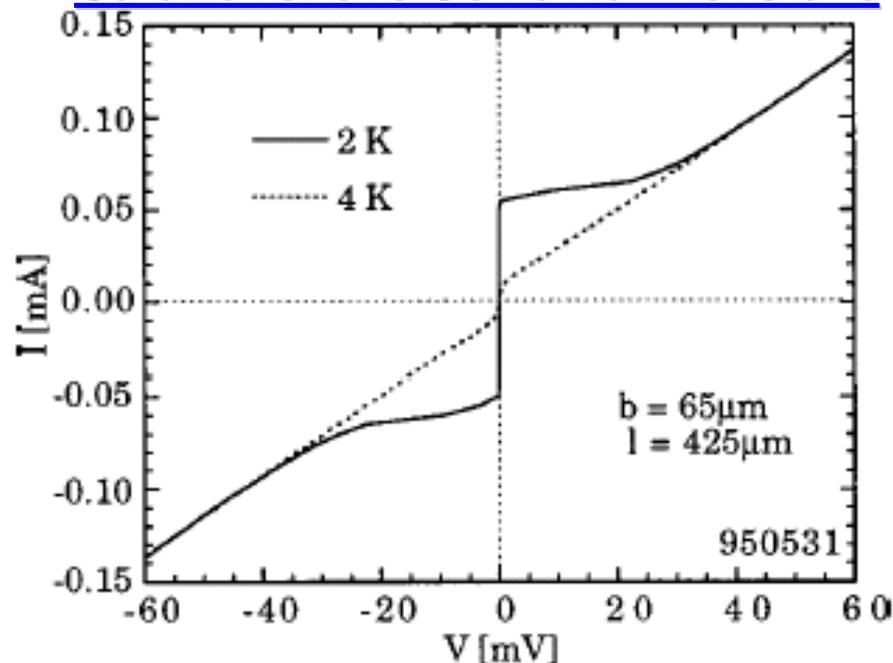
## Superconductor Tunnel Junction, STJ 2

Polarizzando opportunamente il dispositivo, un'adeguata sensitività si ottiene quando l'impedenza dinamica ha il valore di qualche decina di  $K\Omega$  in parallelo ad una capacità di qualche centinaio di pF. La velocità del segnale elettrico generato conseguente ad una variazione di temperatura è dell'ordine delle decine di  $\mu\text{sec}$ .

Si può osservare come rispetto ad un rivelatore tradizionale abbiamo impedenze relativamente piccole.



### Caratteristiche Corrente - Tensione

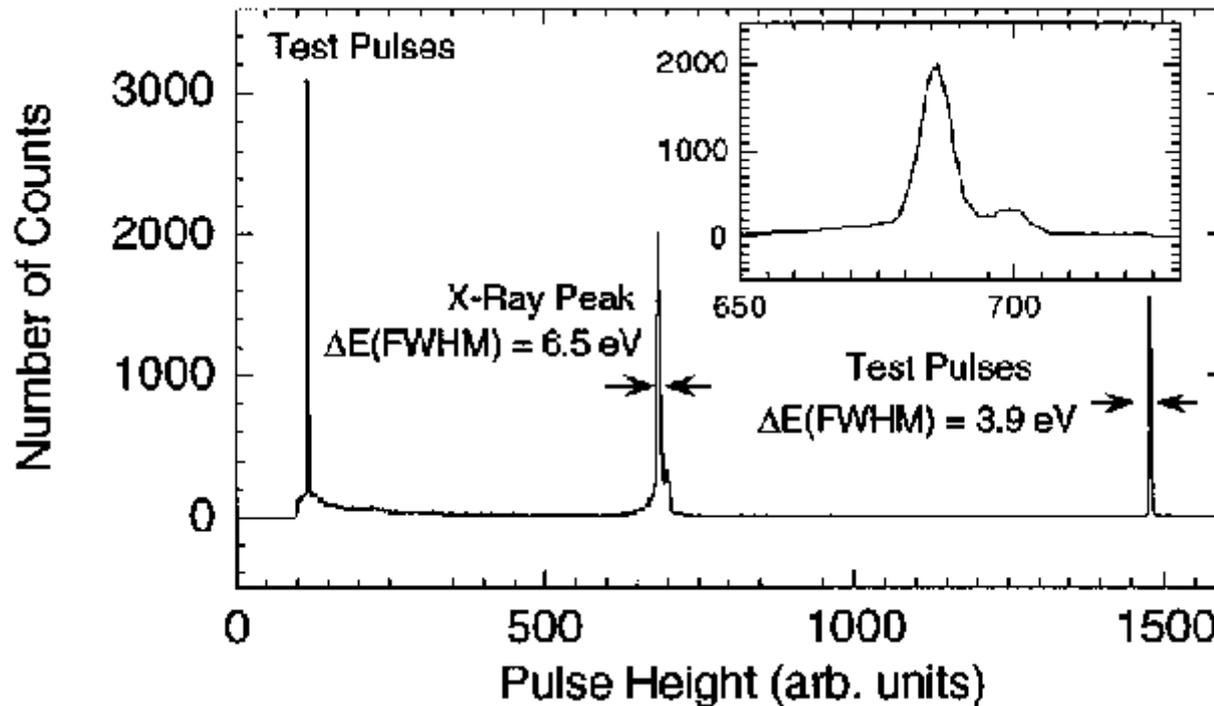


Nelle caratteristiche corrente – tensione si osserva un salto in corrispondenza della zona dove l'energia fornita dal campo elettrico applicato è in grado di innescare un passaggio di corrente tra le 2 parti della giunzione.

## Risultati con STJ

E' interessante osservare come in effetti la risoluzione ottenibile da questo tipo di trasduttori sia impressionante.

La giunzione illustrata qui sotto è: thin-film Nb/Al/AlOx/Al/Nb junctions



La risoluzione energetica all'energia di 700 eV di un raggio X è di 6.5 eV.

Dobbiamo ricordare che quella indicata è la larghezza a metà altezza:

$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.355 \Delta E$$

Perciò:

$$\Delta E = \frac{\Delta E_{\text{FWHM}}}{2.355} = 2.7 \text{ eV}$$

**National Institute of Standards and Technology**

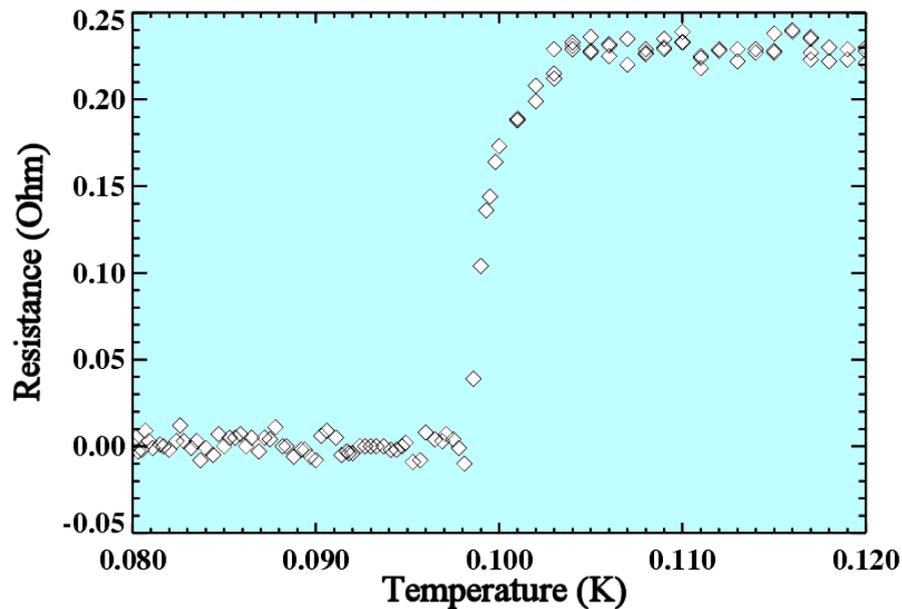
The device reported by Lawrence Livermore NL on ASC'98 consists of a (265 nm Nb/200 nm Al) base electrode, a ~1–2 nm thin AlOx tunnel barrier, and a (200 nm Al/165 nm Nb) counter electrode.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;**
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

## Transition Edge Sensor, TES

Superconducting to Normal transition



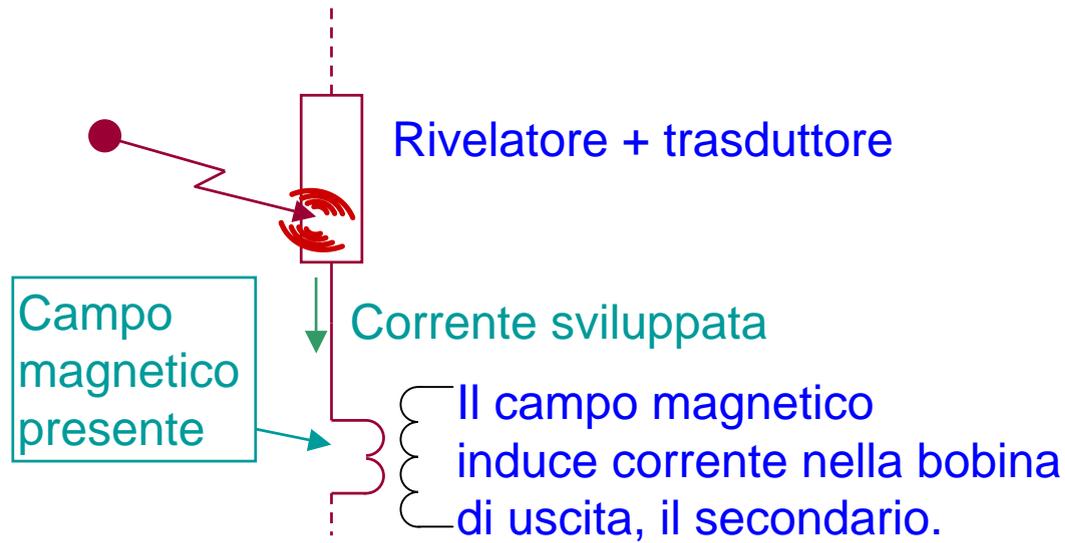
Il trasduttore in questo caso è un sottile strato di metallo superconduttore serigrafato sull'assorbitore, realizzato in modo tale che l'energia di transizione tra lo stato di metallo normale e superconduttore (ad impedenza trascurabile) coincida proprio con la temperatura a cui si vorrebbe fare operare l'assorbitore.

Siccome la transizione è molto ripida, la sensibilità di questo tipo di trasduttore è molto elevata.

Qua la differenza tra un rivelatore termico ed un rivelatore tradizionale è ancora più evidenziata: dovendo fronteggiare una transizione tra uno stato metallico ed uno a superconduttore le impedenze in gioco sono molto piccole, dell'ordine di qualche frazione di  $\Omega$ .

Di fatto la piccola corrente che viene generata in questo tipo di trasduttore non viene letta direttamente da un amplificatore, ma viene trattata da un altro dispositivo posto nelle vicinanze: lo SQUID.

# SQUID: Superconducting Quantum Interference Device 1



In una applicazione convenzionale la bobina verrebbe accoppiata ad un'altra bobina a più alto numero di spire in modo da formare un trasformatore.

Il trasformatore così composto sarebbe in grado di amplificare la corrente generata nel primario.

Con gli SQUID si parte dallo stesso concetto sfruttando però le proprietà quantistiche dei metalli a queste temperature e le proprietà delle STJ.

# SQUID: Superconducting Quantum Interference Device 2

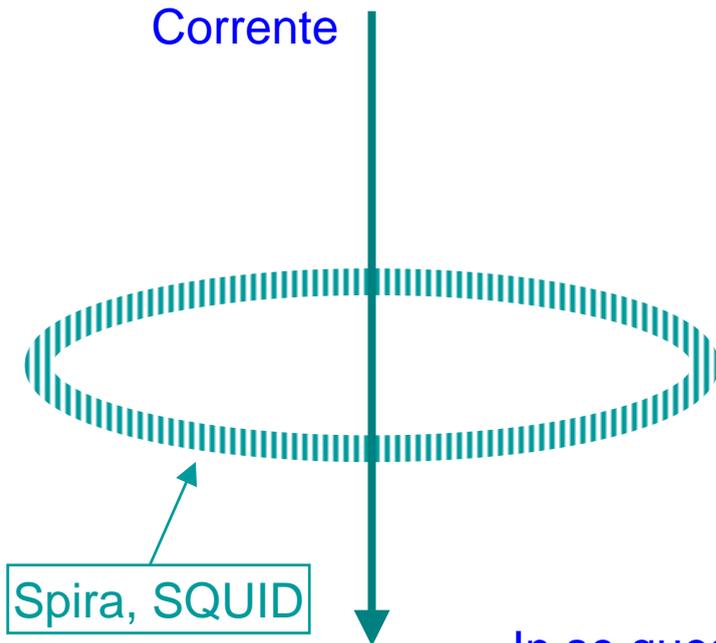
Legge di Faraday – Neumann - Lenz

Prima di tutto si osserva che in una spira realizzata con materiale superconduttore l'eventuale flusso indotto risulta essere quantizzato.

Ovverosia il flusso può solo essere della forma:

$$\Phi = n\Phi_0$$

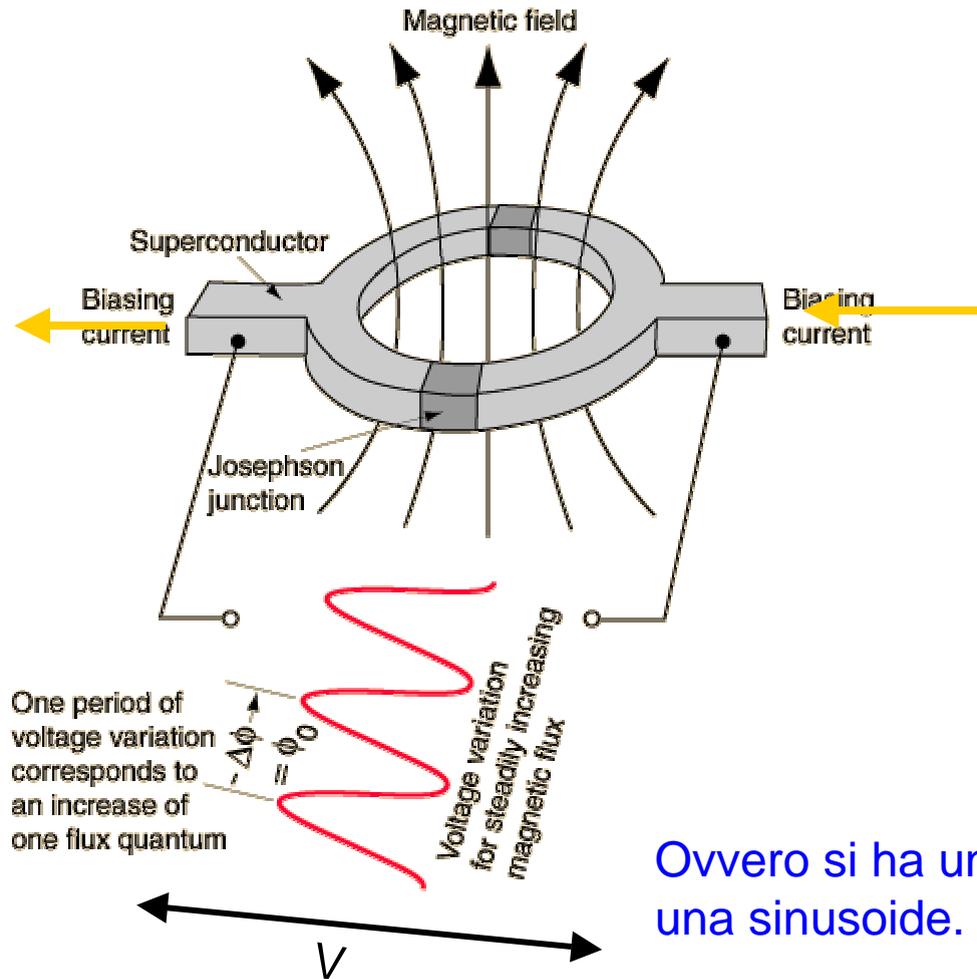
Dove:  $\Phi_0 = \frac{\hbar^2}{2e} = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ tesla} \times \text{m}^2$



In se questa proprietà sarebbe poco più che una curiosità.

Per avere segnali consistenti dovremmo porre molti anelli con il risultato di occupare spazio.

# SQUID: Superconducting Quantum Interference Device 3



La bobina superconduttrice è interrotta da 2 giunzioni tunnel ed una piccola corrente è fatta circolare per polarizzare le 2 giunzioni.

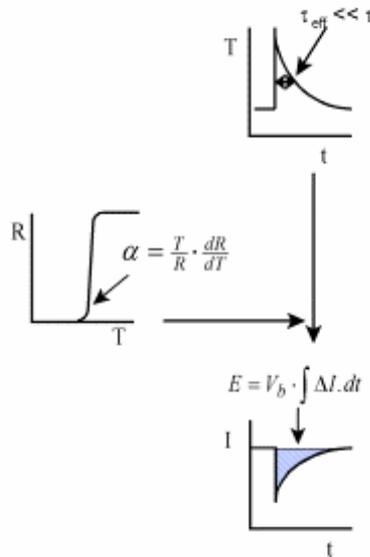
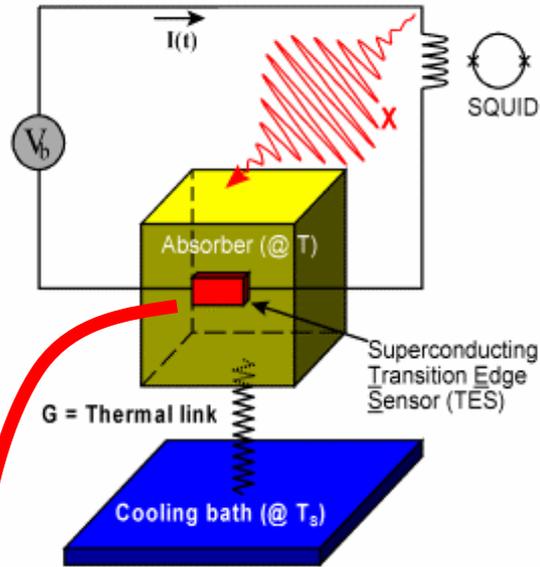
Essendo sagomato a spirale il campo magnetico induce ancora un campo quantizzato nella spirale. Però è possibile dimostrare che ora la tensione indotta ai capi della spirale soddisfa:

$$V \div V_0 \sin\left(2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right)$$

Ovvero si ha una conversione del flusso nello sfasamento di una sinusoide.

In sostanza utilizzando lo SQUID si ottiene una conversione corrente del trasduttore  $\rightarrow$  sinusoide di uscita con periodo  $\Phi_0$ .

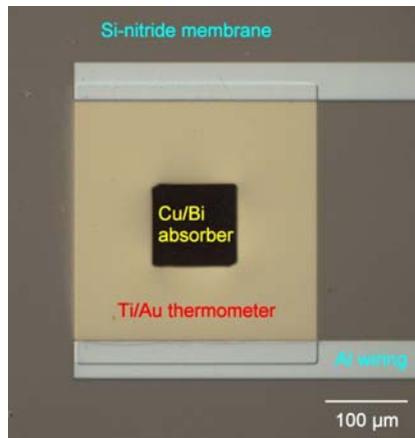
# SQUID: Superconducting Quantum Interference Device 3



Perciò la lettura di un TES viene condotta accoppiando uno SQUID al sensore.

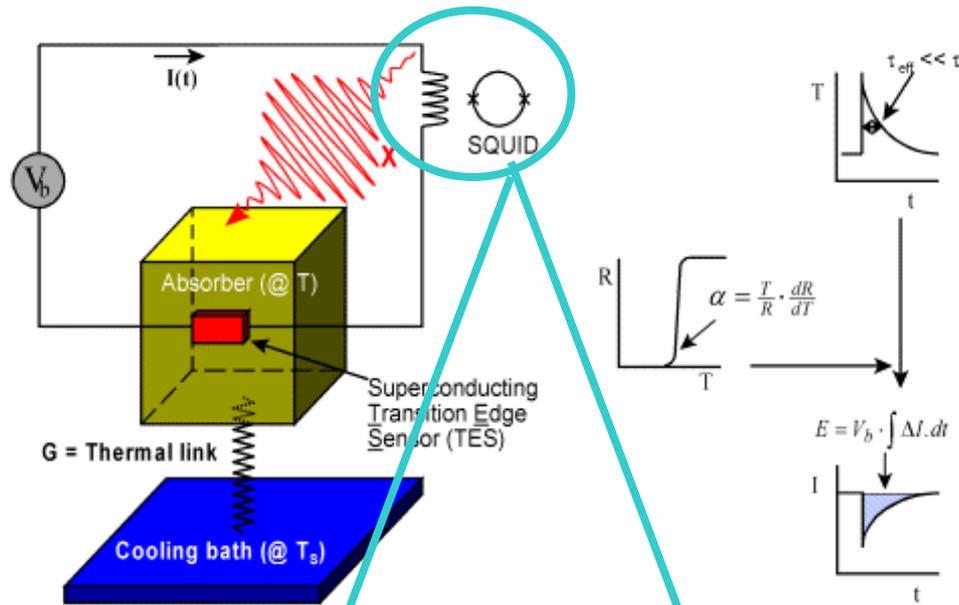
L'accoppiamento è realizzato con una piccola induttanza che in combinazione con lo SQUID forma una sorta di trasformatore quantistico.

La corrente di segnale prodotta dal trasduttore viene trasformata in un segnale avente una frequenza proporzionale alla corrente stessa.



Per realizzare il TES si usa sovrapporre un superconduttore ad un metallo normale. I 2 materiali cercano di trasformarsi vicendevolmente nella propria specie. Il risultato è lo spostamento della temperatura di transizione al livello desiderato.

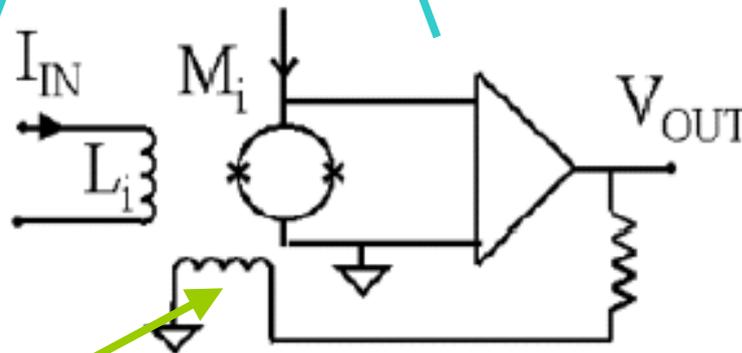
# SQUID: Superconducting Quantum Interference Device 4



Va considerato che la lettura di uno SQUID viene fatta in modo del tutto non convenzionale.

Occorre infatti ricostruire il segnale di corrente, od un segnale proporzionale alla corrente, traducendo la forma sinusoidale del segnale ottenuto.

Ciò che serve è una riconversione da fase a tensione, o corrente, del segnale dello SQUID.



Reazione per stabilizzare le condizioni di polarizzazione dello SQUID.

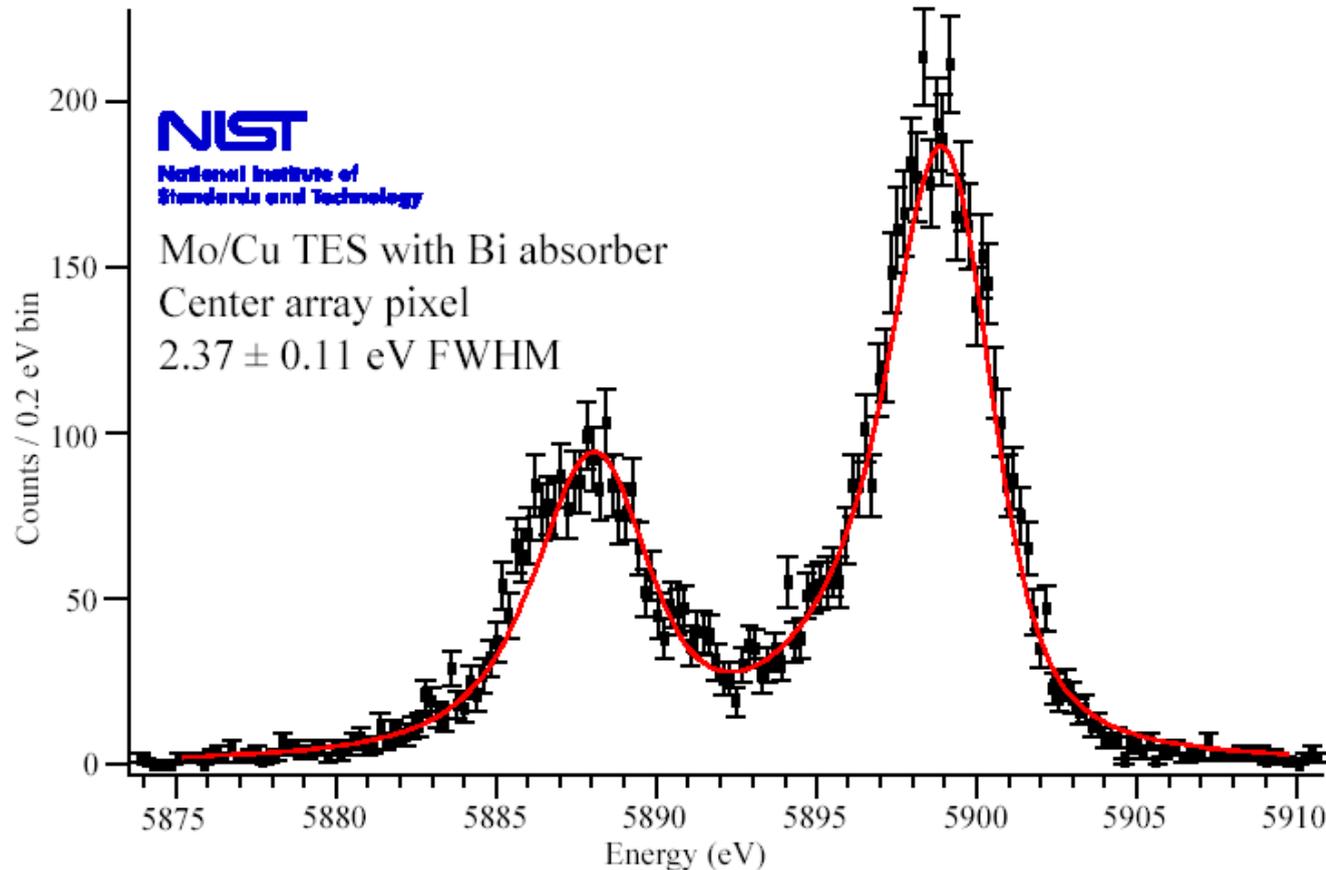
La forma più semplice di lettura del segnale si fa utilizzando una seconda spira che viene eccitata dal segnale di uscita dell'amplificatore, chiudendo l'anello di reazione. In questo modo il segnale di uscita dell'amplificatore è costretto ad essere simile al segnale eccitante.

## Risultati con i TES accoppiati a SQUID

Per gentile concessione del gruppo NIST e di K.D.Irwin possiamo mostrare questo splendido risultato appena ottenuto e non ancora pubblicato.

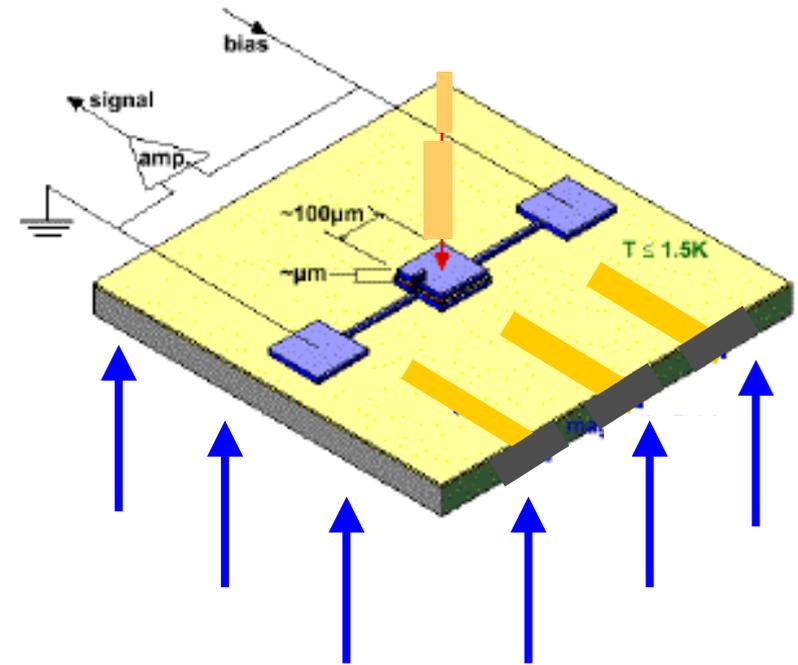
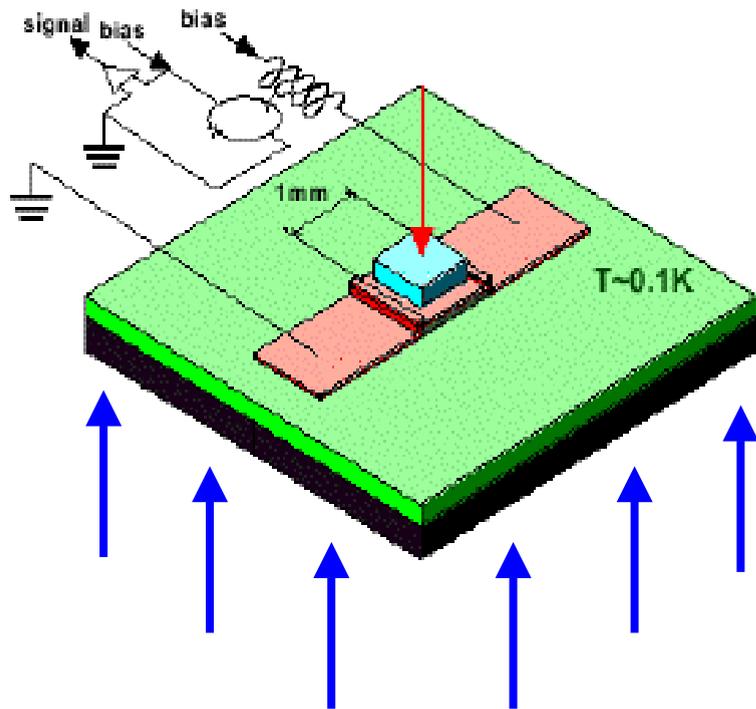
La risoluzione indicata è di  $2.37 \text{ eV}_{\text{FWHM}}$  che corrisponde ad una fluttuazione energetica di solo 1 eV.

Sunday, Sep 12, 2004 12:39:28 PM



## STJ con elettronica con stadio a SQUID

Abbiamo visto come il segnale degli STJ si possa leggere mediante l'utilizzo di un preamplificatore di carica o tensione.

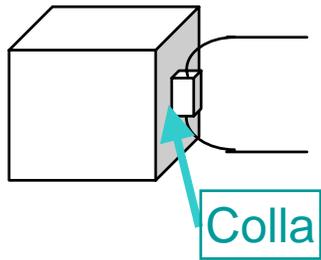


Nel caso in cui l'impedenza dinamica dello STJ risulti particolarmente piccola è vantaggioso l'utilizzo di uno SQUID per la lettura della sua corrente di segnale.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;**
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

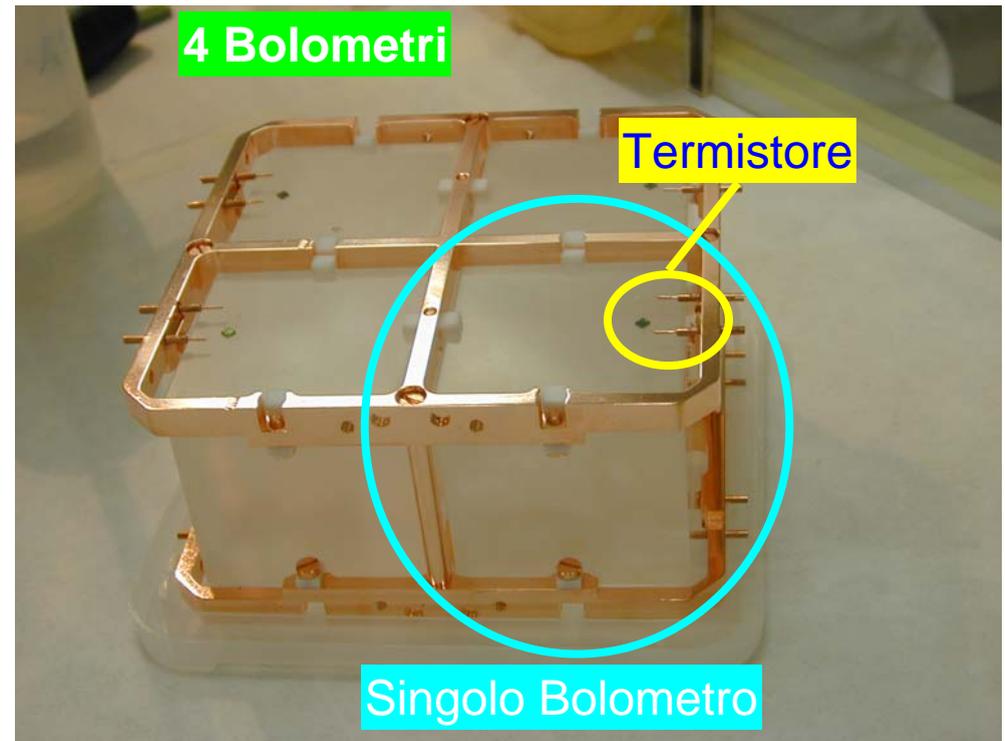
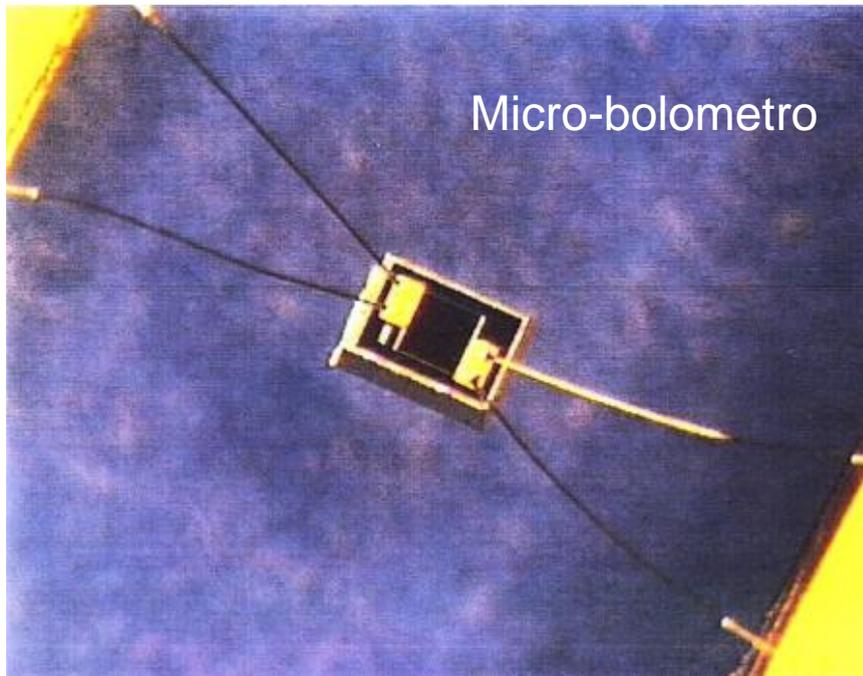
## I termistori 1



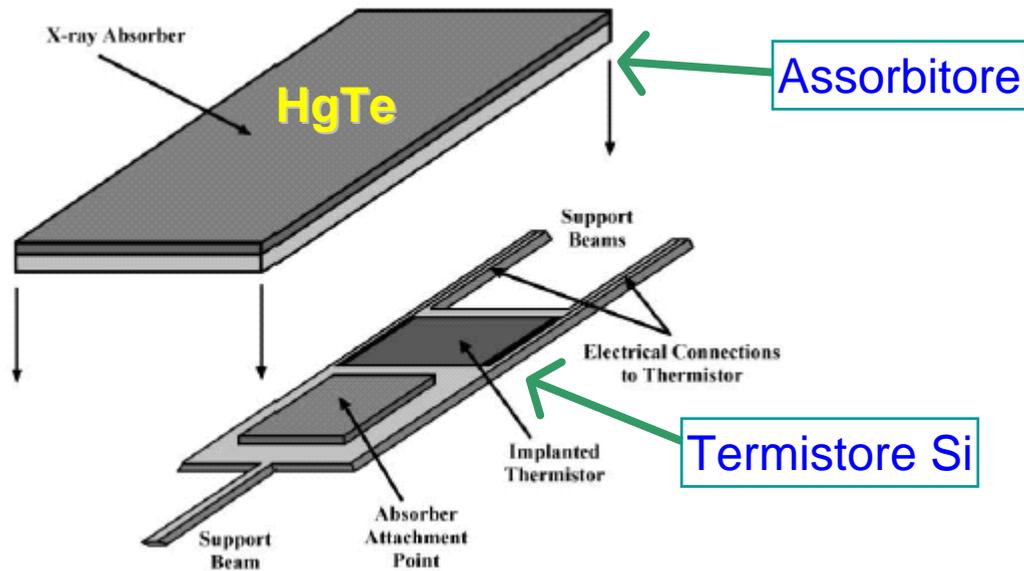
I termistori sono i trasduttori più comodi da usare. Semplicemente si incollano sull'assorbitore, al contrario del processo serigrafico che per contro richiede accuratezza ed alcune proprietà di coesione da parte dei materiali che si intenderebbero usare.

Sebbene siano i più comodi da usare non sono necessariamente i più semplici da implementare.

Risulta agevole con i termistori realizzare rivelatori aventi i più svariati tipi di materiale come assorbitore. Le dimensioni finali del sistema assemblato possono essere molto grandi o molto piccole:



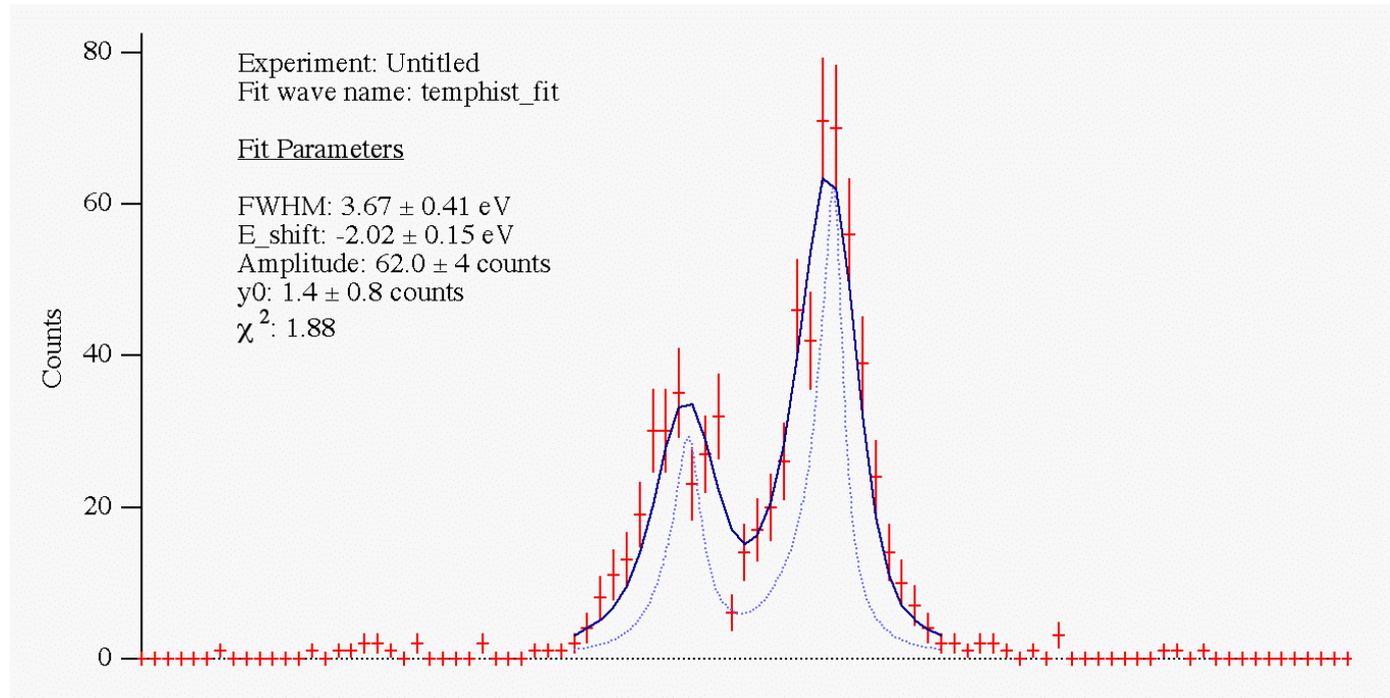
# Risultati con i termistori come sensori 1



La risoluzione risulta essere molto buona. La fluttuazione energetica è intorno ad 1.55 eV.

Il peso del rivelatore in questo caso è poche decine di  $\mu\text{g}$ .

Per cortese concessione di D.Mc Cammon, NASA Goddard Space Flight Center. Dati non ancora pubblicati.

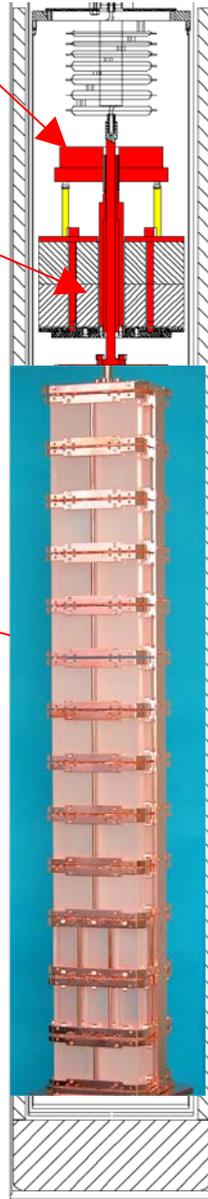


## Risultati con i termistori come sensori 2

Mixing chamber

Cold finger

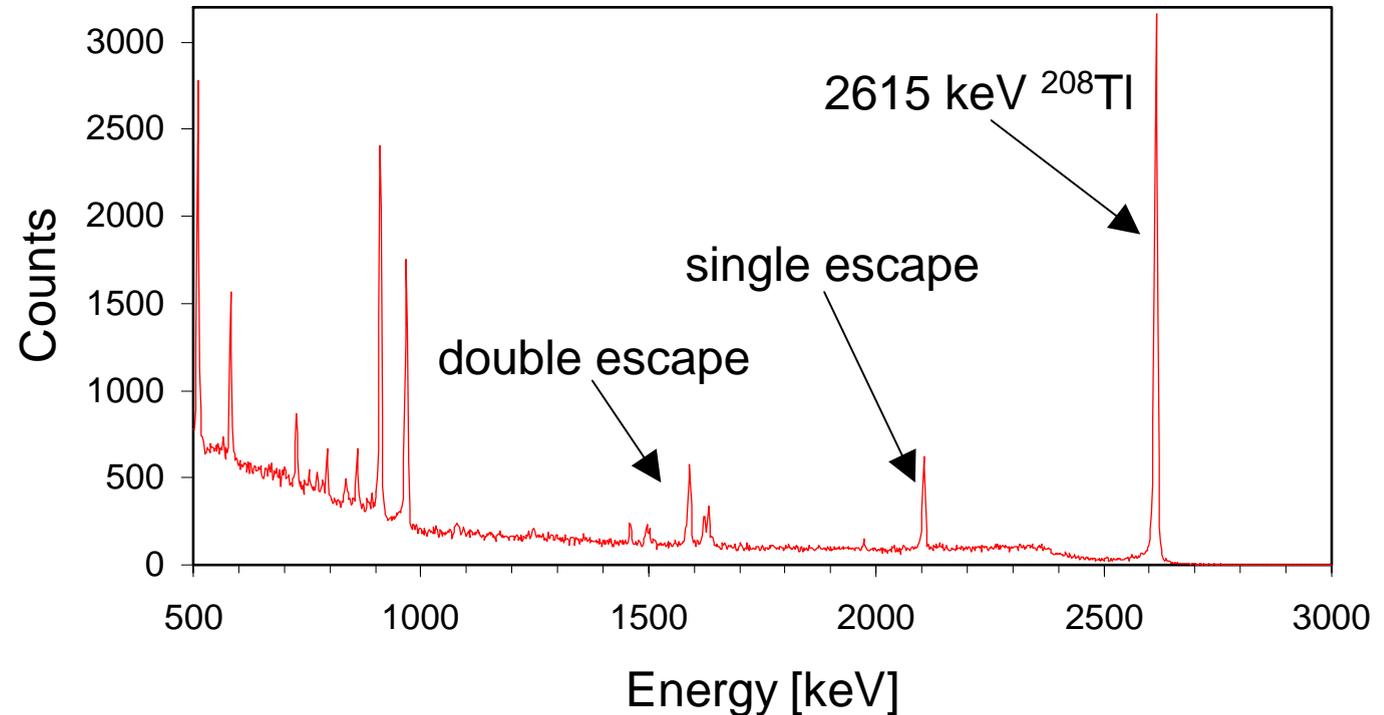
Tower



Total mass  
40.9 kg  
62 Channels

Qui abbiamo un risultato ottenuto con un rivelatore avente il peso di 450 g. Questo è uno dei rivelatori facenti parte della matrice di 62 rivelatori mostrati qui a fianco.

La risoluzione è certamente peggiore di quella precedente. La ragione è ascrivibile al solo fatto che la risoluzione dipende dalla massa totale dell'assorbitore.



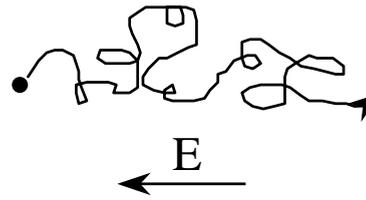
$$\Delta E_{FWHM} = 7 \text{ keV @ } 2615 \text{ keV}$$

## I termistori 2

Esistono 2 classi di termistori:

- ❖ Termistori a strato metallico;
- ❖ Termistori a semiconduttore.

**I termistori a strato metallico** sono caratterizzati dal possedere un coefficiente termico positivo. La resistenza in un metallo infatti aumenta con la temperatura perché il grande numero di elettroni presente è maggiormente soggetto ad urtare gli atomi, deviando dalla direzione di moto imposta dal campo elettrico applicato.



Sono molto precisi, ad esempio si considerino le resistenze al platino che mostrano una dipendenza dalla temperatura che è lineare in un ampio intervallo di temperature.

Siccome la resistenza di un termistore a strato metallico diviene molto piccola a temperature estremamente basse questo tipo di trasduttore non viene mai utilizzato nella realizzazione dei rivelatori termici.

## I termistori 3

**I termistore a semiconduttore** sono caratterizzati dal possedere un coefficiente termico negativo. Infatti la resistenza di un termistore a semiconduttore diminuisce all'aumentare della temperatura perché aumentano il numero di portatori di carica disponibili alla conduzione.

A basse temperature non sono caratterizzati da una legge lineare, ma si riescono ad ottenere sensibilità molto elevate.

2 sono le classi di termistori a semiconduttore più sfruttate:

- ✓ Termistori al Silicio;
- ✓ Termistori al Germanio.

Termistori ad alta sensibilità vengono realizzati sfruttando le proprietà dei semiconduttori che emergono quando atomi di impurità appartenenti a specie opportune vengono inseriti nel reticolo cristallino.

## I termistori 4

Il comportamento tipico che si ottiene per la resistenza del termistore è:

$$R(T) = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T}}\right)$$

Da cui la dipendenza dalla temperatura si ottiene per derivazione:

$$\frac{\Delta R}{\Delta T} = -\frac{R(T)}{2T_0} \left[\frac{T_0}{T}\right]^{3/2}$$

Valori tipici:

$$R_0 = 5 \Omega,$$

$$T_0 = 3 \text{ K}$$

Per una temperatura di lavoro di 10 mK risulta:

$$R(10 \text{ mK}) = 166 \text{ M}\Omega \text{ e:}$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta T} = -1.44 \times 10^{11} \frac{\Omega}{\text{K}}$$

Per esempio, supponendo di polarizzare il termistore mediante un generatore di corrente di intensità di  $I_B = 10 \text{ pA}$  si ottiene che per una variazione di temperatura di  $10 \text{ }\mu\text{K}$  risulta:

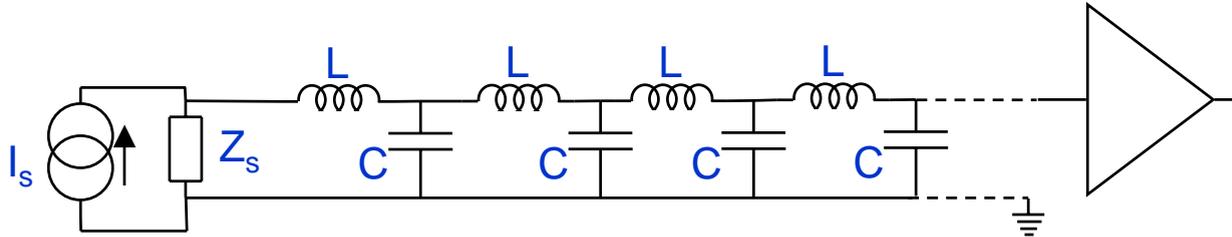
$$\Delta V = I_B \frac{\Delta R}{\Delta T} \Delta T \approx 1.44 \text{ }\mu\text{V}$$

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
- 5. L'elettronica per sensori termici;**
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

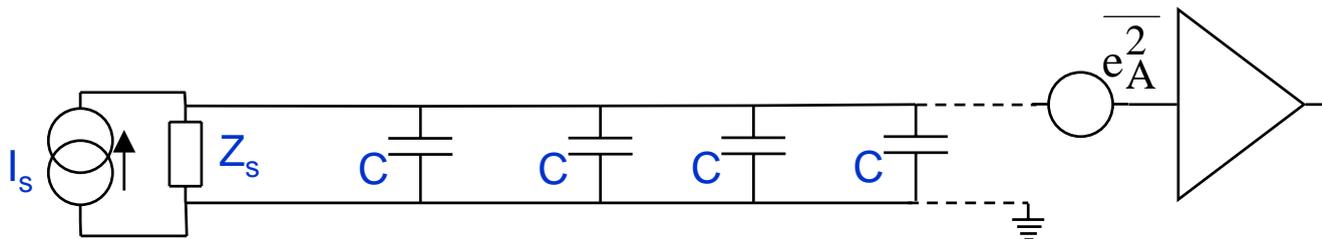
## Dove situare l'elettronica? 1

Ci sono 2 aspetti importanti da tenere in considerazione quando si realizza l'elettronica per un rivelatore termico. Dove localizzare l'elettronica e che tipo di configurazione adottare.

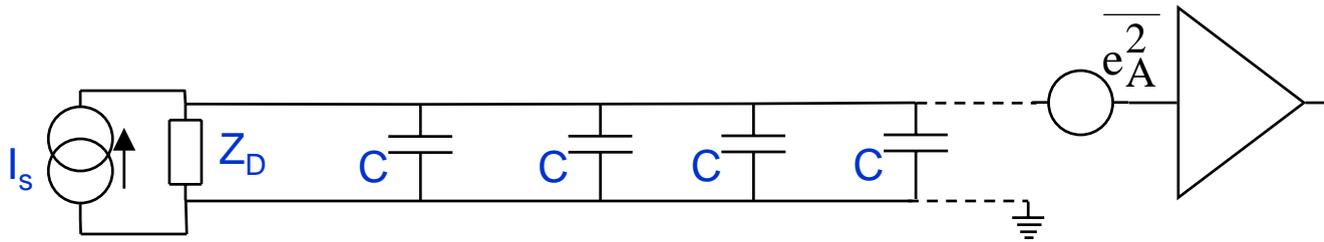


Maggiore è la lunghezza della linea di connessione tra amplificatore e rivelatore, maggiore risulta essere la induttanza totale e la capacità totale presente.

Sei segnali sono lenti rispetto all'impedenza offerta dall'induttanza possiamo pensare al sistema come limitato dalla presenza della sola capacità:



## Dove situare l'elettronica? 2



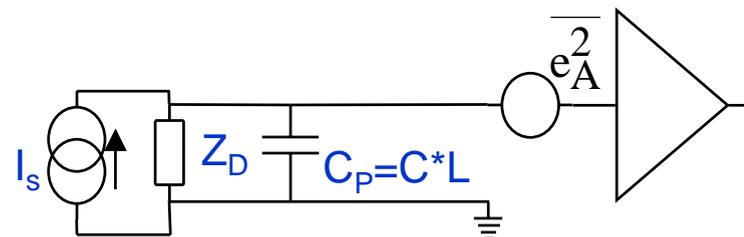
L'effetto della lunghezza della connessione è posta nei confronti del rumore serie del preamplificatore. La linea di connessione filtra le componenti a più alta frequenza del segnale del rivelatore. Però il contributo del rumore serie dell'amplificatore rimane intonso, indipendente dalla lunghezza della linea.

➔ La conclusione è che più la linea è lunga e più si ha un degrado della prestazione del rapporto segnale/rumore, S/N, nel caso in cui il rumore serie dell'amplificatore non sia trascurabile.

Il degrado deriva quindi da una riduzione dell'informazione portata dal segnale rispetto al rumore serie, il cui contributo rimane inalterato.

Questa situazione si applica per qualsiasi tipo di configurazione circuitale adottabile.

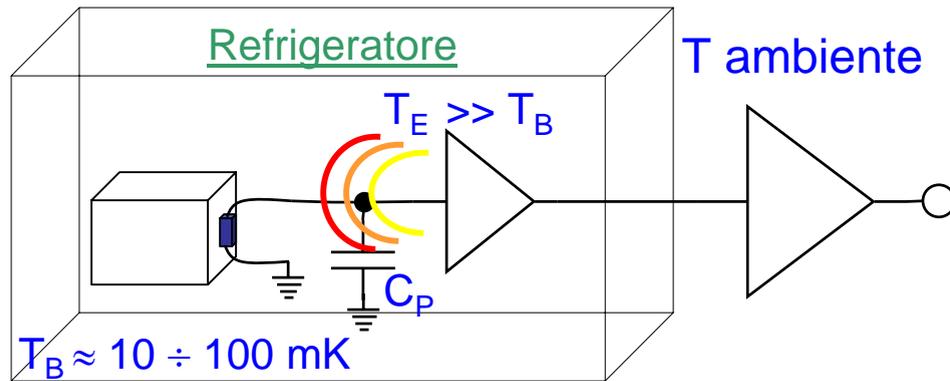
Modello compatto della sistema:



$L$ =lunghezza della linea

## Dove situare l'elettronica? 3

Quindi, se si vuole minimizzare l'impedenza parassita presente occorre porre almeno il primo stadio di amplificazione all'interno del sistema di refrigerazione, ammesso di potere ammettere che esistono componenti capaci di operare a quella temperatura:



Però occorre fare attenzione che:

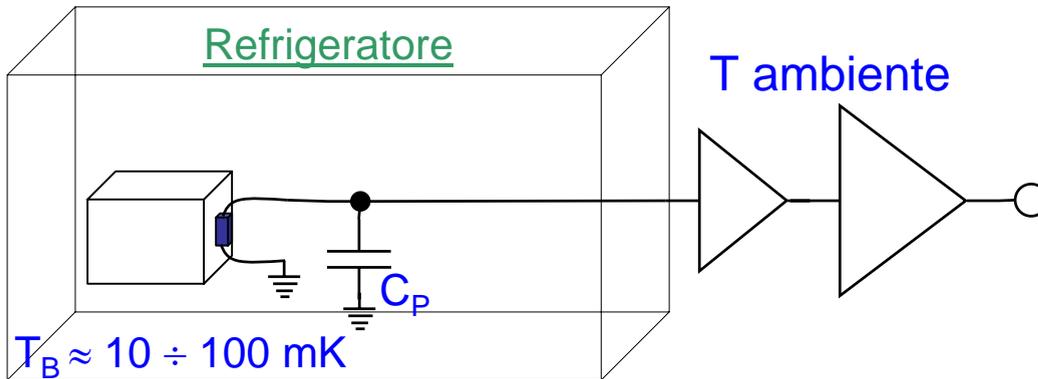
- L'elettronica non è in grado di operare alla stessa temperatura del rivelatore, ma molto più elevata;
- L'elettronica dissipa potenza elettrica.

I 2 fattori esposti possono determinare un'iniezione di potenza termica verso il rivelatore, che opera a temperatura estremamente bassa (anche poche centinaia di  $\mu\text{K}$  possono peggiorare la caratteristica del rivelatore).

Questa potenza iniettata potrebbe variare la temperatura di lavoro con tutte le conseguenze del caso.

## Dove situare l'elettronica? 4

L'alternativa è l'adozione di una lettura del segnale realizzata usando un'elettronica operante completamente a temperatura ambiente:



In questo caso sicuramente si evitano tutti i problemi relativi alla potenza elettrica dissipata all'interno del sistema di raffreddamento.

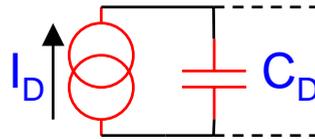
Lo svantaggio di questa soluzione è ovviamente che l'impedenza parassita è molto bassa, ovvero la capacità che si trova in parallelo al rivelatore non è certamente minimizzata.

**Visto che entrambe le soluzioni presentano vantaggi e svantaggi, quando discriminare una in favore dell'altra?**

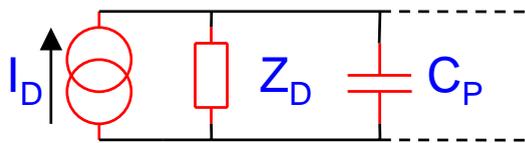
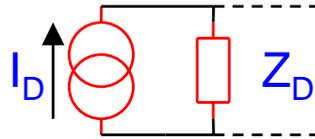
## Dove situare l'elettronica? 5

In realtà va osservato che i rivelatori termici presentano caratteristiche dinamiche molto diverse dai rivelatori tradizionali.

Un rivelatore tradizionale offre un'impedenza che nella maggior parte delle volte è di tipo capacitivo:

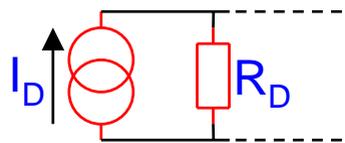


Un rivelatore termico offre un'impedenza che ha componenti che possono essere anche reattive:

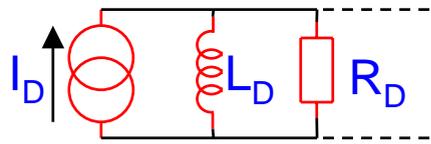


L'effetto della capacità parassita  $C_P$  lo si può trascurare fino a che la costante di tempo dinamica introdotta, dell'ordine di  $\text{Real}(R_D)C_P$ , è piccola rispetto alla massima velocità del segnale (ad esempio per un rivelatore a ionizzazione  $\text{Real}(R_D)=\infty$ , perciò  $C_P$  non è mai da sottovalutare).

## Dove situare l'elettronica? 6



**TES:**  $R_D \div 1 \Omega$

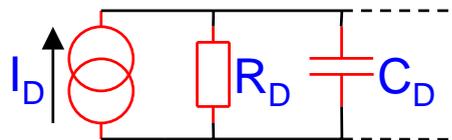


**SQUID:**  $L_D \div 100 \text{ pH}$ ,  
 $R_S \div 10 \Omega$

In questi 2 casi la parte reale dell'impedenza del sensore è molto piccola. Per avere tempi confrontabili alle velocità del segnale, dell'ordine del  $\mu\text{sec}$ ,  $C_P$  deve soddisfare:

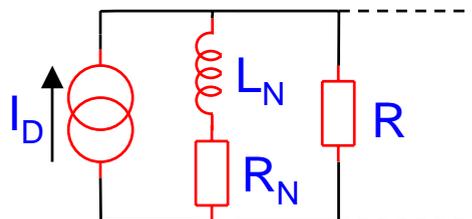
$$C_P \approx \frac{1 \mu\text{sec}}{R_D} \approx 100 \text{ nF}$$

Ovvero 100 m di cavo coassiale avente come valore tipico 100 pF/m: completamente trascurabile rispetto all'ordinario, un paio di m. Con i TES e SQUID si può certamente adottare un'elettronica operante a T ambiente.



**STJ:**  $R_D \div 10 \text{ K}\Omega$ ,  $C_D \div 500 \text{ pF}$

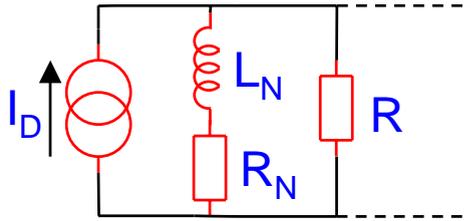
$R_D C_D$  è già grande. Diciamo che  $C_P$  deve mantenersi minore di  $C_D$ , diciamo 100 pF. Qui la discriminazione tra elettronica calda e fredda va considerata caso per caso.



**Termistori:**  $R \div 100 \text{ M}\Omega$ ,  
 $L_N \div 1 \text{ mH}$ ,  $R_N \div 10 \text{ M}\Omega$

$C_P$  dovrebbe essere completamente trascurabile, l'elettronica consigliata è fredda.

## Dove situare l'elettronica? 7



Termistori:  $R \div 100 \text{ M}\Omega$ ,

$L_N \div 1 \text{ mH}$ ,  $R_N \div 10 \text{ M}\Omega$

Nel caso però in cui un termistore è usato come trasduttore di un cristallo di grande massa, la diffusione del calore all'interno del cristallo e la trasmissione del calore dal cristallo al trasduttore, per via della cattiva conduttanza termica delle colle usate, può divenire anche dell'ordine dei 50 msec.

In tale caso  $C_p$  potrebbe essere anche dell'ordine di 500 pF ed una elettronica operante a temperatura ambiente è adottabile.

**Ci sono altri fattori importanti che consigliano la scelta del tipo di elettronica: il rumore.**

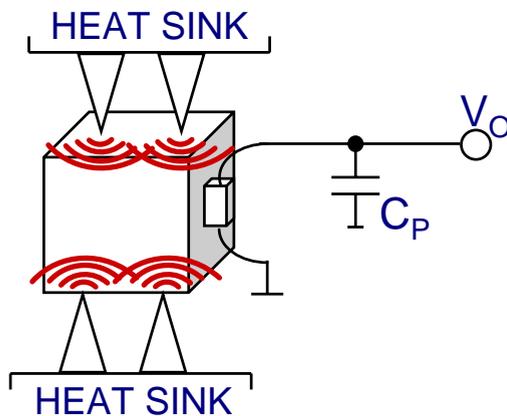
## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 1

Abbiamo accennato al limite nella risoluzione energetica di un rivelatore termico come limitazione proveniente dalla statistica nella creazione o eccitazione dei portatori di energia.

Occorre però anche accennare alle sorgenti di rumore che non sono di tipo intrinseco, ma che spesso sono i principali paletti alla risoluzione finale.

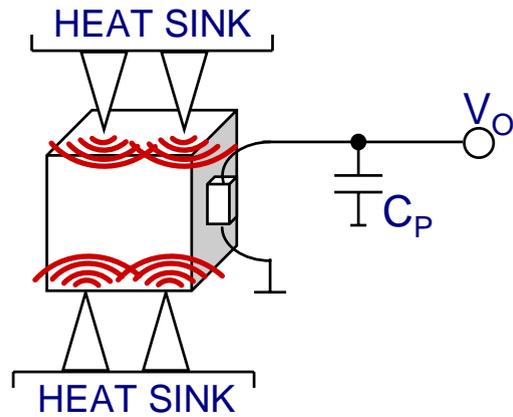
Una delle sorgenti principali di rumore è il “microfonismo” (invero comune a molti altri rivelatori tradizionali), che si presenta in 2 aspetti.

### Attrito o frizione del rivelatore con i supporti meccanici

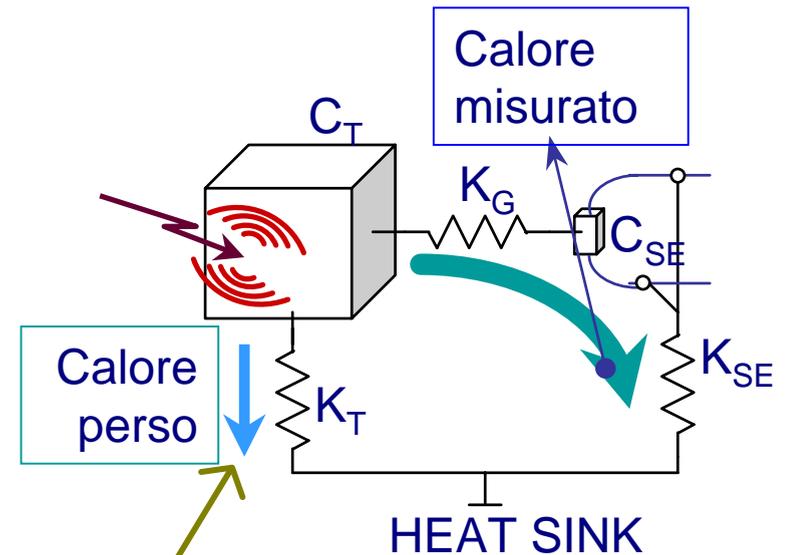


La frizione conseguente alle vibrazioni meccaniche genera “colpi” di calore che danno disturbo. Questo fenomeno è di difficile soluzione.

## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 2



Se il supporto meccanico è troppo blando si ottiene una cattiva conduttanza termica  $K_T$ , che consente di perdere poco calore. Però allo stesso tempo la frizione diventa pressante.

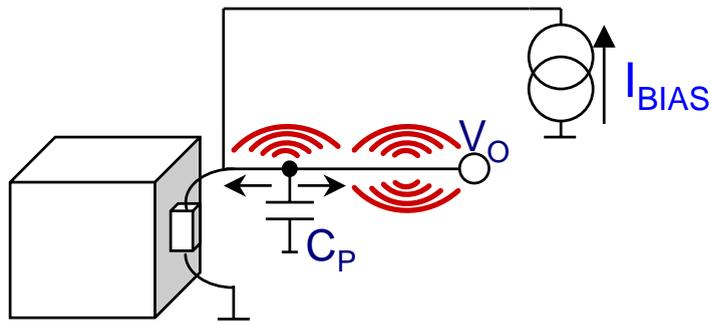


Se il supporto meccanico è molto fermo la frizione si minimizza, però anche la conduttanza termica  $K_T$  migliora. La conseguenza è una perdita dell'ampiezza de segnale.

Perciò occorre sempre trovare un compromesso. Va considerato che questa fonte di disturbo è più fastidiosa per rivelatori di grande massa.

## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 3

### Microfonismo derivante dalla vibrazione dei cavi di connessione:



Se il cavo di connessione oscilla attorno alla propria posizione di equilibrio la capacità associata varia, proprio come un microfono. Questa situazione determina del rumore, giacché viene indotta una variazione di carica ai capi della capacità per via della polarizzazione imposta applicata al trasduttore.

Assumendo per semplicità che la vibrazione sia sinusoidale ad una singola frequenza ci aspettiamo che:

$$\Delta C_P = N \sin(\omega_0 t)$$

il disturbo indotto risulta pertanto ( $V_{BIAS} = I_{BIAS} R_D$ ):

$$\Delta V_i \approx \frac{\omega_0 R_D C_P}{\sqrt{1 + (\omega_0 R_D C_P)^2}} V_{BIAS} \frac{\Delta C_P}{C_P} \sin(\omega_0 t)$$

E' interessante notare che il microfonismo derivante dalla vibrazione dei fili si riduce in proporzione ad  $R_D$  e che la sua ampiezza non dipende dal valore assoluto della capacità, ma dalla sua variazione percentuale.

Il disturbo esiste in modo analogo sia che si adotti una configurazione operante a bassa temperatura che a temperatura ambiente.

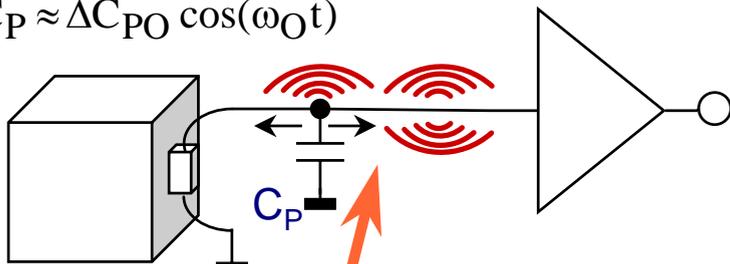
## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 4

Il microfonismo conseguente alla frizione del rivelatore è difficilmente cancellabile completamente. Quello dei fili potrebbe essere attenuato fortemente?

La risposta è sì pur di sacrificare qualche cosa.

Partiamo dalle possibili configurazioni classiche: il rumore microfonico ha effetti

$$\Delta C_P \approx \Delta C_{P0} \cos(\omega_0 t)$$



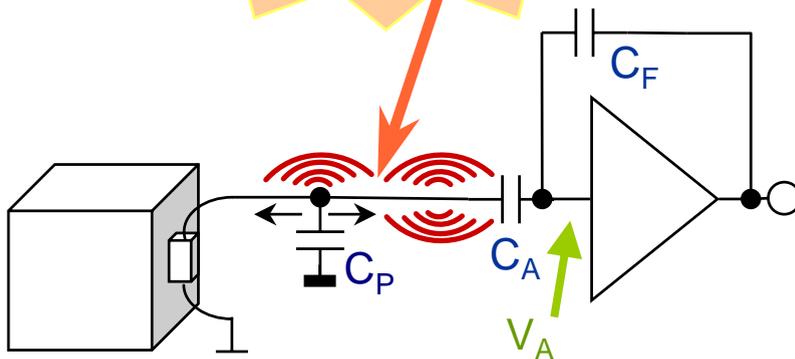
Amplificatore di tensione:

$$\Delta V_i \approx \frac{\omega_0 R_D C_P}{\sqrt{1 + (\omega_0 R_D C_P)^2}} V_{BIAS} \frac{\Delta C_P}{C_P} \sin(\omega_0 t)$$

in particolare se  $R_D C_P > \omega_0$ :

$$\Delta V_i \approx V_{BIAS} \frac{\Delta C_P}{C_P} \sin(\omega_0 t)$$

Vibrazioni  
meccaniche dei  
fili.



Amplificatore di carica :

Caso  $C_A < \infty$ :

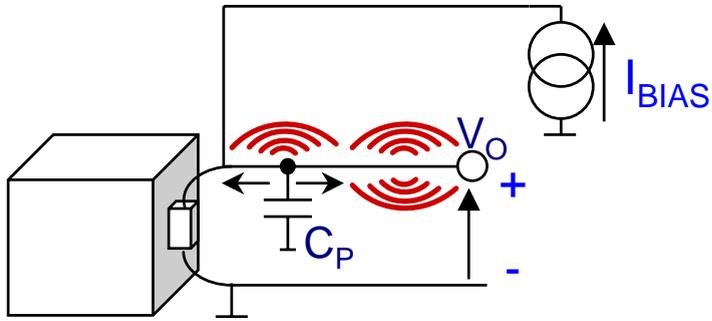
$$\Delta Q_{AC} \approx \frac{C_P}{C_F} \frac{\Delta C_P}{C_P} V_{BIAS} \sin(\omega_0 t)$$

Caso  $C_A = \infty$  (accoppiamento DC):

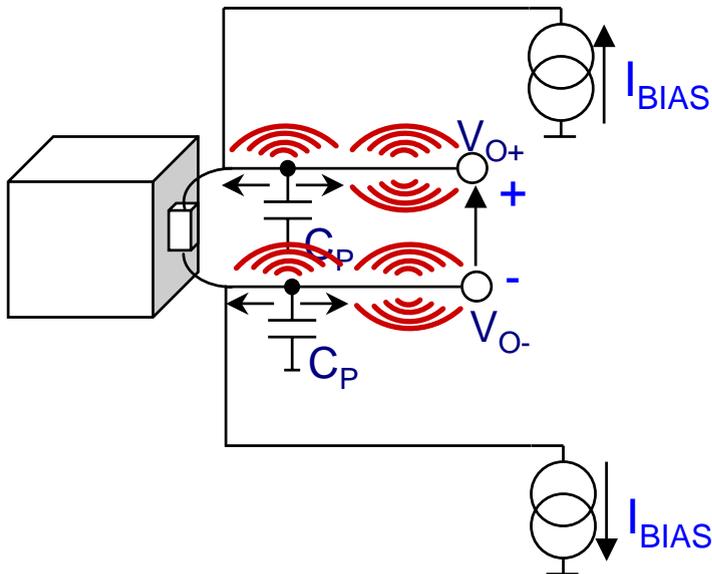
$$\Delta Q_{DC} \approx \frac{C_P}{C_F} \frac{\Delta C_P}{C_P} V_A \sin(\omega_0 t) \gg \Delta Q_{AC}$$

## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 5

Come si elimina il rumore microfonico?



In questo caso se  $C_P$  varia il segnale di uscita ne risente.



In questo caso imponendo ai 2 fili di essere solidali, si ottiene un comportamento simile sotto l'effetto degli stessi disturbi.

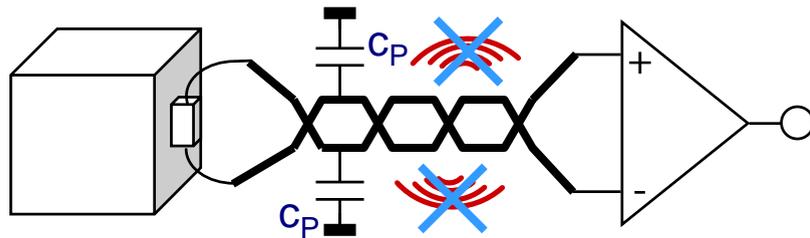
Un qualsiasi fenomeno microfonico induce lo stesso movimento, perciò la stessa variazione di potenziale ai 2 terminali  $V_{o+}$  e  $V_{o-}$ . La differenza  $(V_{o+} - V_{o-})$  è quindi priva di rumore indotto.

D'altro canto il segnale indotto dalla particella invece induce sempre la stessa variazione di potenziale.

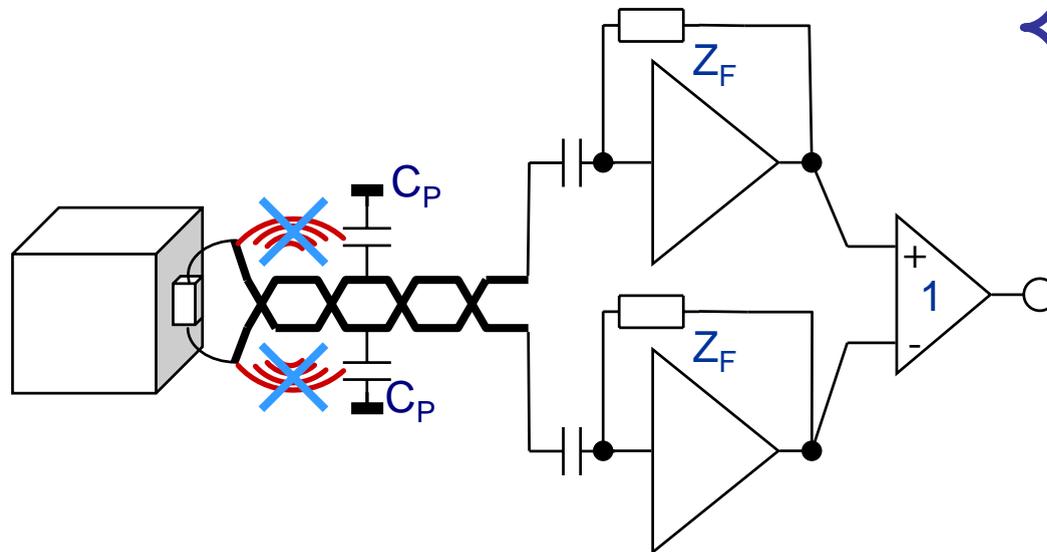
## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 6

La lettura differenziale del segnale consente la così detta reiezione dei disturbi di modo comune, quale è fatto diventare il segnale microfonico.

### Amplificazione differenziale di tensione



### Amplificazione differenziale di corrente o carica



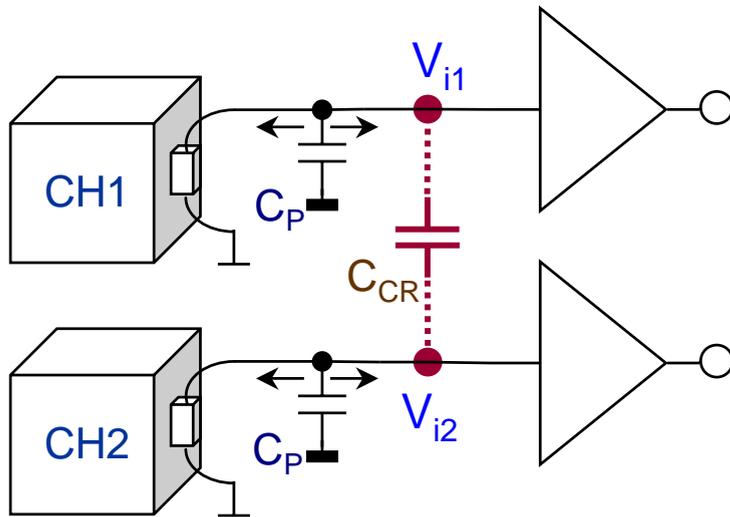
Perché la reiezione sia efficiente i fili devono essere ben solidali tra di loro. Per questo si usa intrecciarli.

Lo scotto che si paga adottando questo tipo di configurazione è che il rumore dell'amplificatore aumenta di un fattore  $\sqrt{2}$ , rispetto all'utilizzo di un amplificatore singolo.

Occorre quindi fare molta attenzione nel valutare l'opportunità o meno dell'adozione di una tale configurazione.

## Le cause di disturbo in un rivelatore termico 7

Altro fenomeno: quando si usano matrici di rivelatori i fili passano vicini. Sotto certe condizioni esiste la possibilità che si induca un piccolo segnale in un rivelatore limitrofo.

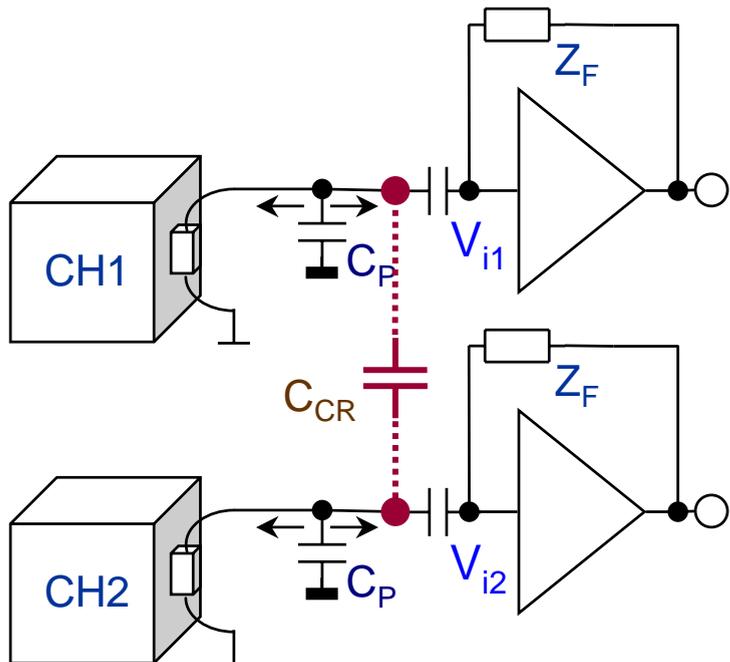


Amplificatore di tensione:

Nel caso che l'impedenza dinamica del rivelatore sia sufficientemente grande:

$$\Delta V_{i2} \approx \frac{C_{CR}}{C_{CR} + C_P} V_{i1}$$

Amplificatore di carica:



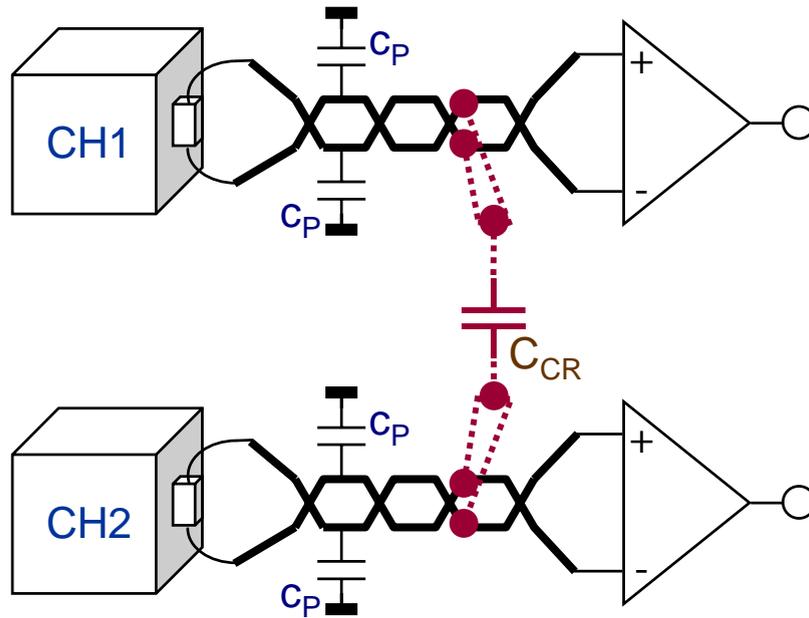
$$\Delta V_{i2} \approx \frac{C_{CR}}{C_{CR} + C_{iPREA}} V_{i1} \approx 0$$

$$\left( \Delta V_{i1} \approx \frac{I_{D1}}{i\omega C_{iPREA}} \approx 0, \text{ ALREADY} \right)$$

questo grazie al fatto che la capacità dinamica presente all'ingresso del preamplificatore,  $C_{iPREA}$ , è grande grazie all'effetto Miller.

Quindi l'amplificatore di corrente o carica non subisce il fenomeno del cross-talk.

### Amplificatore di tensione differenziale



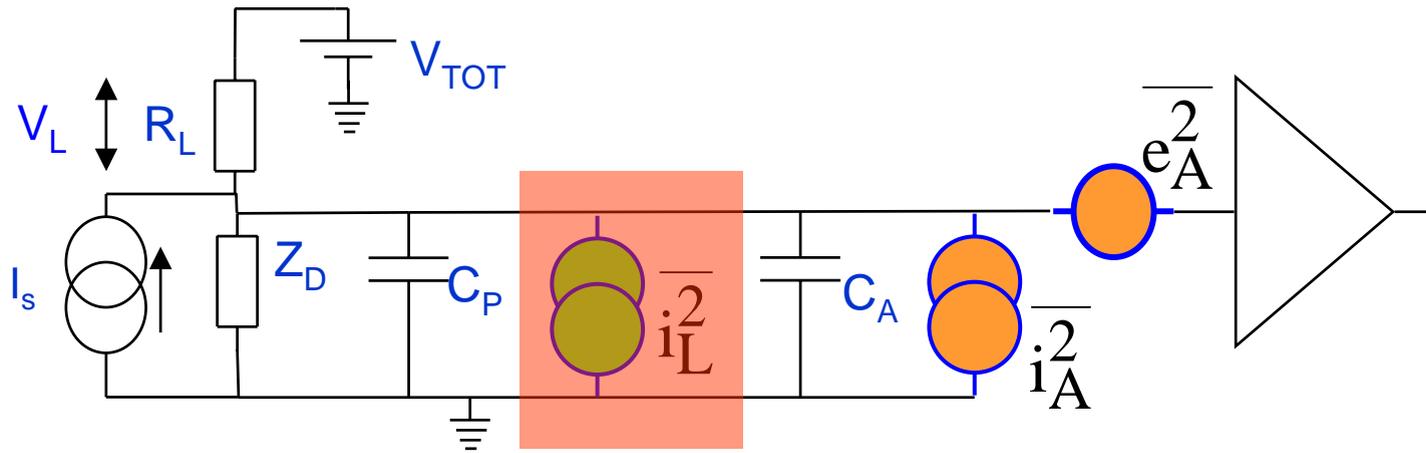
Anche in questa situazione la configurazione di lettura differenziale consente di sopprimere i segnali di cross-talk.

Infatti il segnale inducente, attraverso la capacità induttrice  $C_{CR}$ , proviene e inietta su coppie di fili: il segnale di disturbo diviene di modo comune e viene cancellato.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
- 6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;**
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

# L'effetto del rumore elettronico sulla risoluzione 1



$$\overline{i_L^2(f)} = \frac{4K_B T}{R_L} + \beta \frac{V_L^2}{R_L} \frac{1}{f}$$

Il rumore termico della resistenza  $R_L$ . Maggiore è il valore di  $R_L$ , minore è il suo contributo.

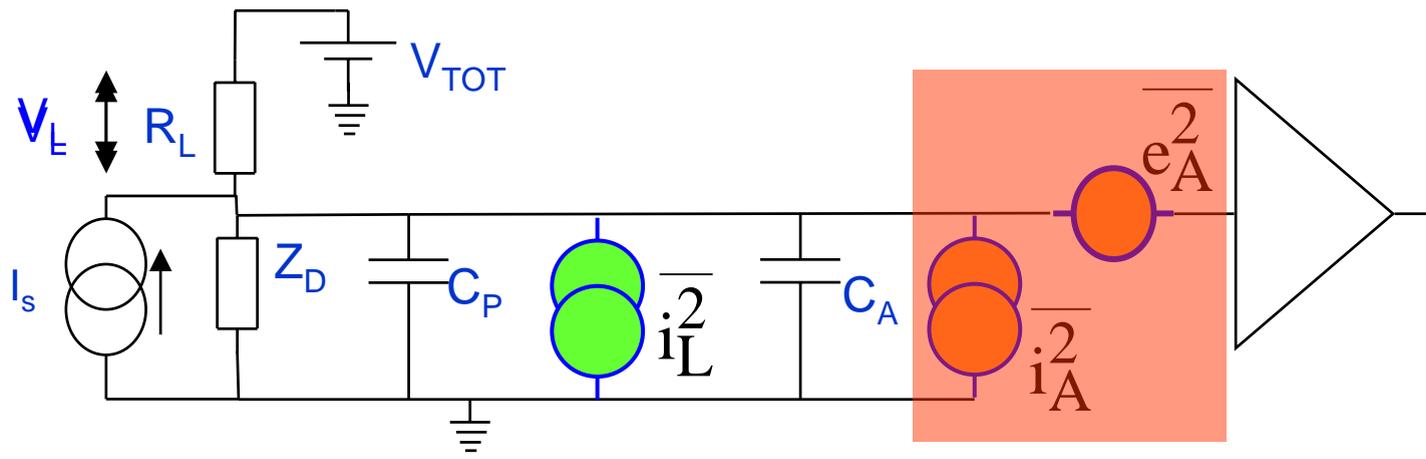
$K_B$ =costante di Boltzmann,  
 $1.38 \times 10^{-23}$  J/K.

Il rumore è bilatero.

Il rumore di bassa frequenza di  $R_L$  non è necessariamente trascurabile nei rivelatori termici. Con essi la corrente nella resistenza è finita, a differenza di quanto accade nei rivelatori capacitivi.

In genere accade che  $R_L \gg |Z_D|$ , per cui  $V_L \approx V_{TOT}$ .

## L'effetto del rumore elettronico sulla risoluzione 2



$$\overline{i_A^2(f)} = 2qI_{in} + \gamma I_{in}^\alpha \frac{1}{f}$$

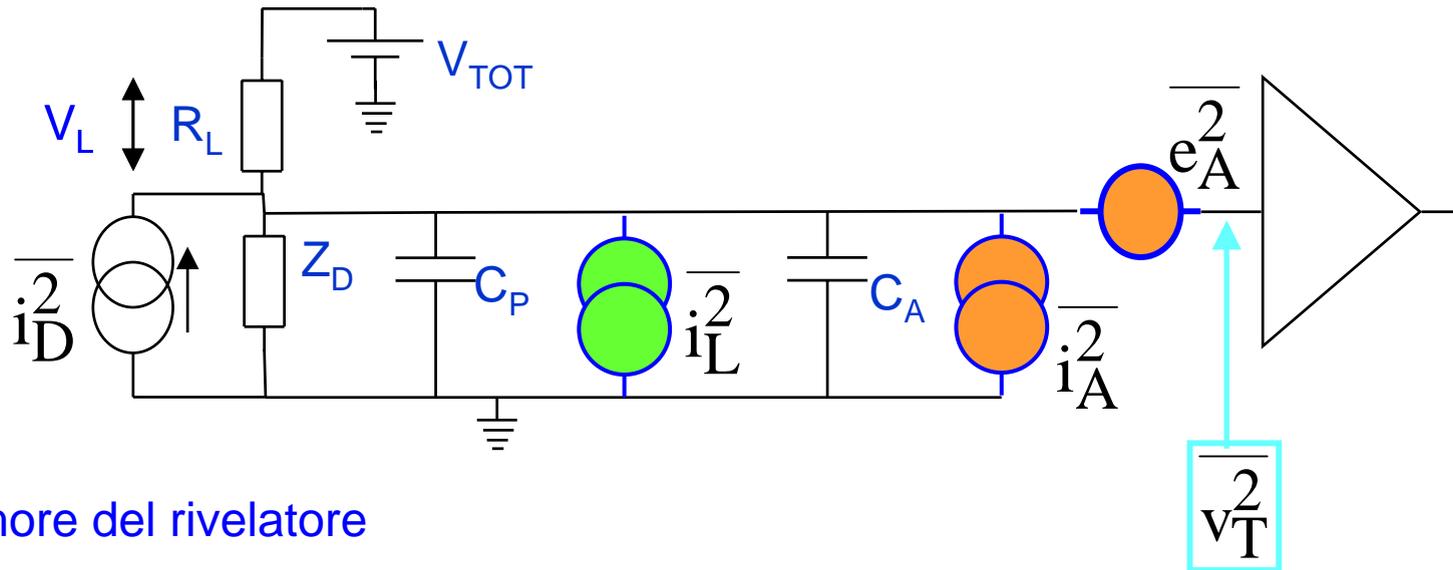
Il rumore di ingresso dell'amplificatore ha in genere una componente di rumore Shot ed una di bassa frequenza.

$$\overline{e_A^2(f)} = \overline{e_n^2} + \frac{A_f}{f^\varphi}$$

Il rumore bianco dell'amplificatore presente anch'esso una componente indipendente dalla frequenza, bianco, ed una componente dipendente dalla frequenza.

Attenzione: non si deve trascurare mai la presenza della capacità di ingresso,  $C_A$ , dell'amplificatore.

## L'effetto del rumore elettronico sulla risoluzione 3



$\overline{i_D^2(f)}$  = rumore del rivelatore

Il rumore totale presente all'ingresso dell'amplificatore (di corrente o di tensione non fa distinzione):

$$\overline{v_T^2(f)} = \left( \overline{i_A^2(f)} + \overline{i_L^2(f)} + \overline{i_D^2(f)} \right) \left| Z_D \parallel R_L \parallel \frac{1}{j\omega C_P} \parallel \frac{1}{j\omega C_A} \right|^2 + \overline{e_A^2(f)}$$

La valutazione dell'effetto totale dipende da caso a caso, dipendendo dalla forma della impedenza  $Z_D$  del rivelatore.

Per esempio nel caso dei TES  $Z_D$  è molto piccola ed il rumore si riduce a:

$$\overline{v_T^2(f)} = \overline{i_D^2(f)} |Z_D|^2 + \overline{e_A^2(f)}$$

**Stante la lentezza intrinseca dei rivelatori termici non bisogna mai sottovalutare il rumore di bassa frequenza,  $1/f$ , dell'elettronica di lettura.**

## L'effetto del rumore elettronico sulla risoluzione 5

La formatura del segnale dei rivelatori termici non è particolarmente complesso. Dal momento che sono abbastanza lenti e i sistemi di acquisizione attuali sono abbastanza veloci, in genere si tende a campionare il segnale e compiere una analisi semi-off-line o del tutto off-line.

In questo modo si possono applicare gli algoritmi di filtro ed ottimizzazione del rapporto segnale/rumore opportunamente.

Perciò l'unico tipo di formatura richiesto è un buon filtro attivo antialiasing a più poli.

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
- 7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;**
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

# Electronics operating at cryogenic temperatures 1

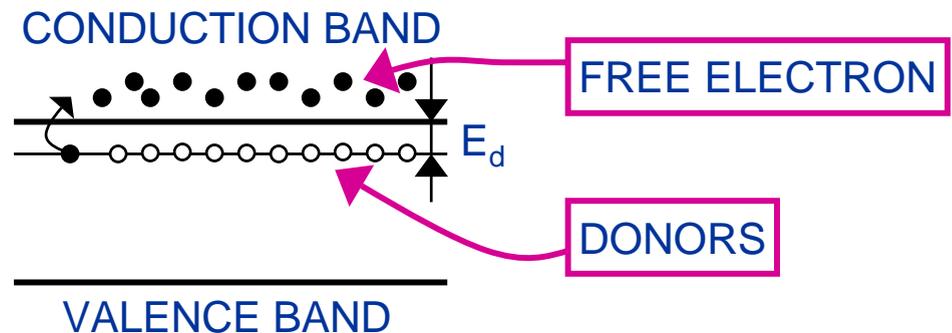
First of all, it should be observed that not all conceivable or available transistors are able to operate at temperatures below 100 K.

The reason lies in the fact that in semiconductors conduction occurs when charge carriers are available for conduction.

Charge carriers must overcome a small energy jump to become available for transport.

This energy jump is the more difficult the lower the temperature is.

The width of the energy jump depends on the type of semiconductor.



## Electronica operante a temperature criogeniche 2

I tipici semiconduttori usati e le loro caratteristiche a bassa temperatura sono indicati qui sotto:

DEVICE	MINIMUM TEMPERATURE OF OPERATION	OPTIMUM TEMPERATURE OF OPERATION	1/f NOISE LEVEL	PARALLEL NOISE	SRIES NOISE
SI MOS	LHe	> LN	High	Negligible	Not so small
Si JFET	LN (AND BELOW)	100 ÷ 150 K	Low	Negligible	Adequate
Ge JFET	LHe	60 ÷ 70 K	High		
GaAs MESFET	LHe	LHe	High	Negligible	Small
$Al_xGa_{1-x}As$ HEMT	LHe	LHe	High	Negligible	Small
SiGe HBJT	LHe	LHe ÷ LN	High	High	Small

LN= Azoto liquido, 78 K; LHe=Elio liquido, 4.2 K

## Elettronica operante a temperature criogeniche 3

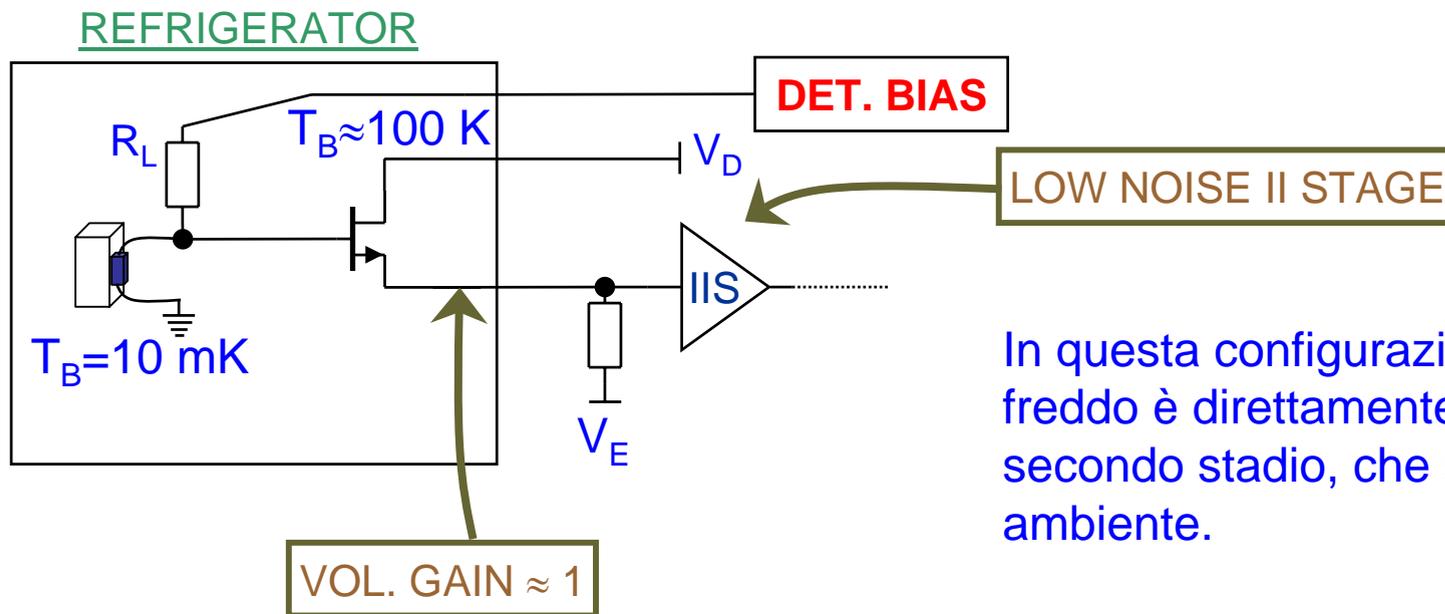
L'elettronica operante a bassa temperatura deve soddisfare diverse stringenti caratteristiche:

- ✓ Dissipare una potenza elettrica che sia la più bassa possibile, onde minimizzare il consumo di liquidi refrigeranti
- ✓ evitare di iniettare disturbi di natura termica al rivelatore;
- ✓ mostrare un rumore adeguato alle richieste;
- ✓ operare alla temperatura desiderata.

## Electronics operating at cryogenic temperatures 4

On the one hand to simplify and minimize all possible non-electrical disturbances, usually only one buffer stage with a unit gain at low temperature is implemented, which serves to convert the high impedance of the detector into an impedance sufficiently small, capable of driving the connection line towards the external system of refrigeration.

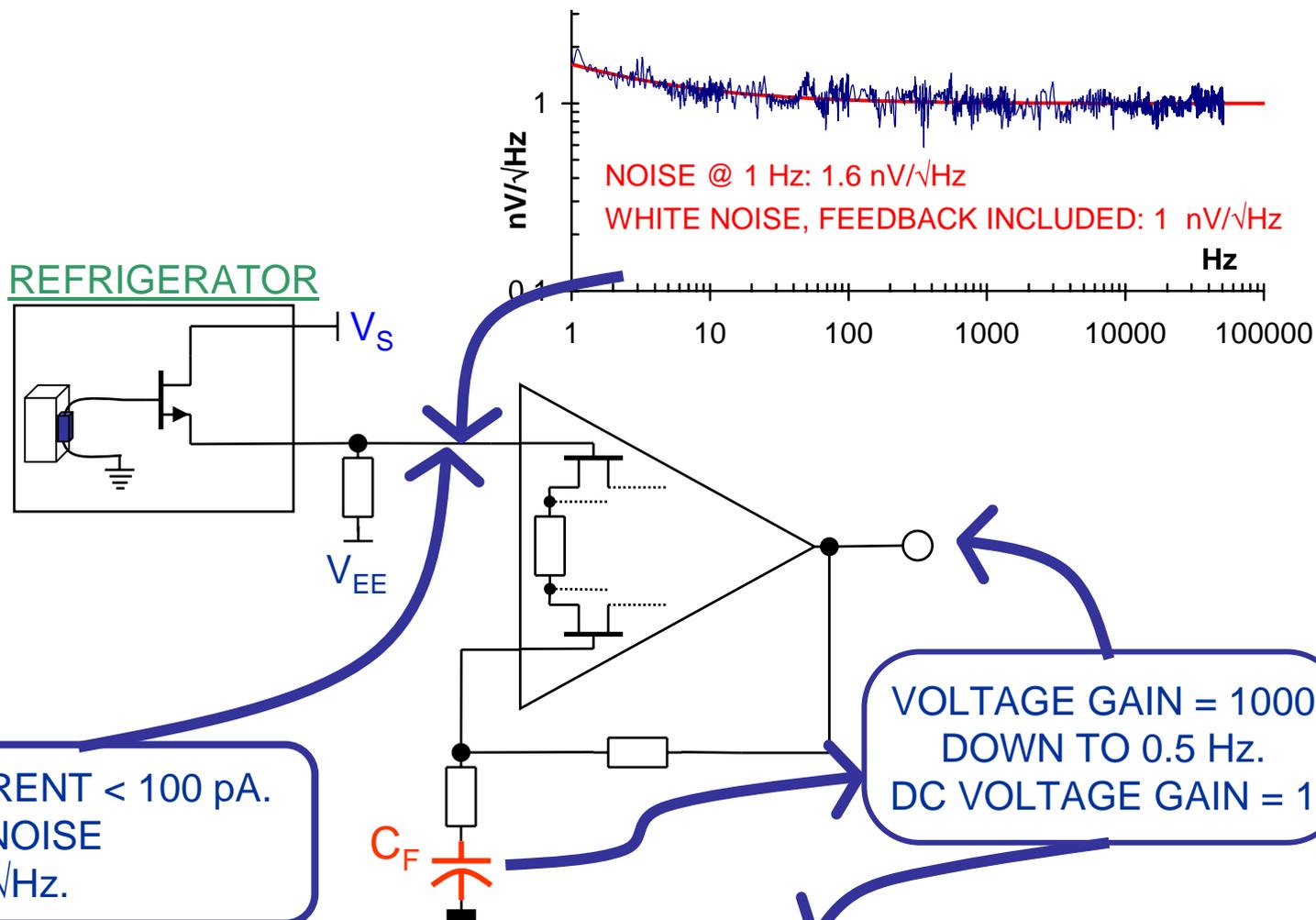
The buffer consists of a JFET transistor, or similar, in a source-follower configuration:



In this configuration the cold transistor is directly DC-coupled to the second stage, which is at ambient temperature.

## Electronica operante a temperature criogeniche 5

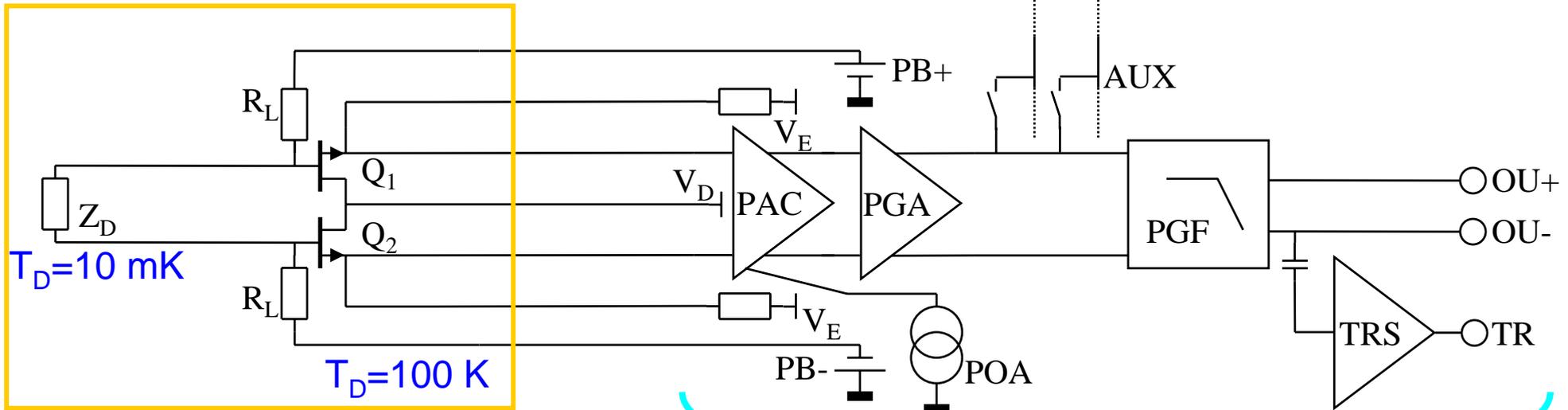
In questa seconda soluzione il JFET è connesso al secondo stadio in DC. Però il guadagno in DC è  $\ll$  di quello in AC, che amplifica il segnale del rivelatore per via della capacità  $C_F$ .



## Electronics operating at cryogenic temperatures 6

Ecco qui un esempio completo di catena di acquisizione di un termistore avente uno stadio a buffer differenziale.

Refrigeratore



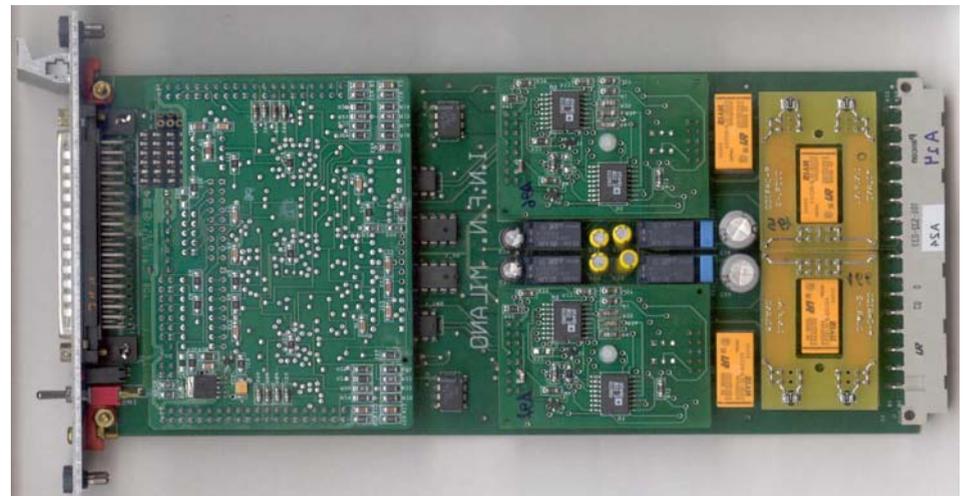
PAC= amplificatore;

POA= rete per l'aggiustamento dell'Offset;

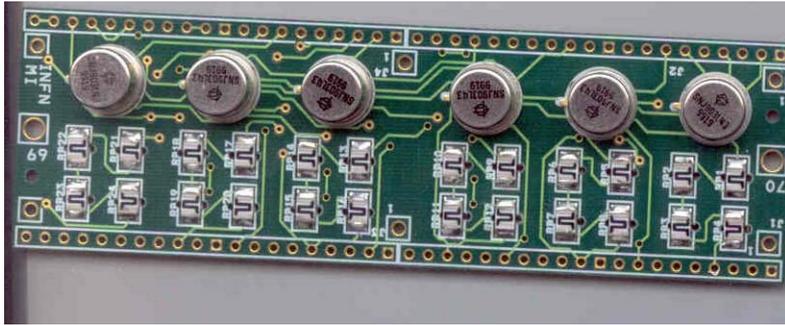
PGA= stadio di amplificazione programmabile;

PGF= filtro antialiasing;

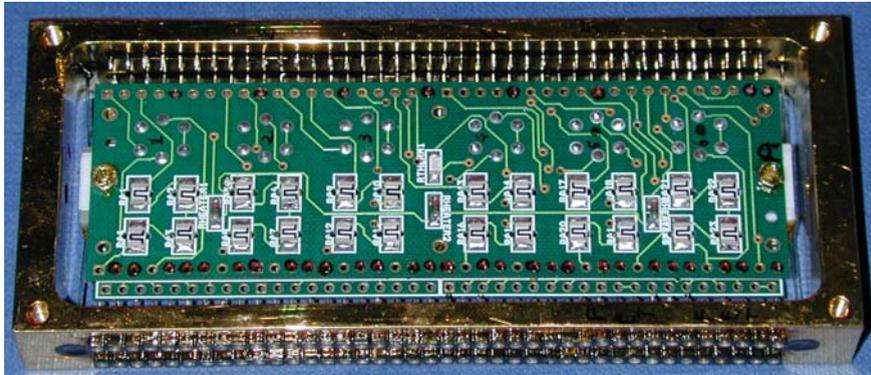
TRS= circuito analogico di trigger;



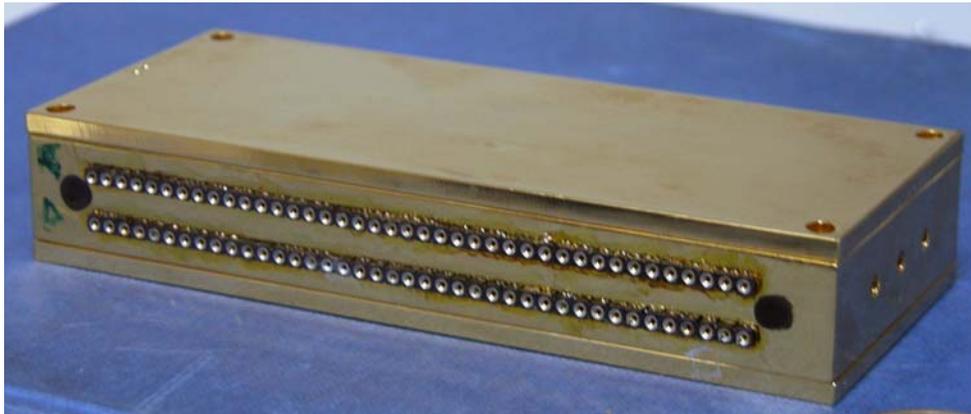
# Electronics operating at cryogenic temperatures 1



Basetta di 6 canali differenziali di elettronica fredda



Basetta montata in sede, a testa in giù.



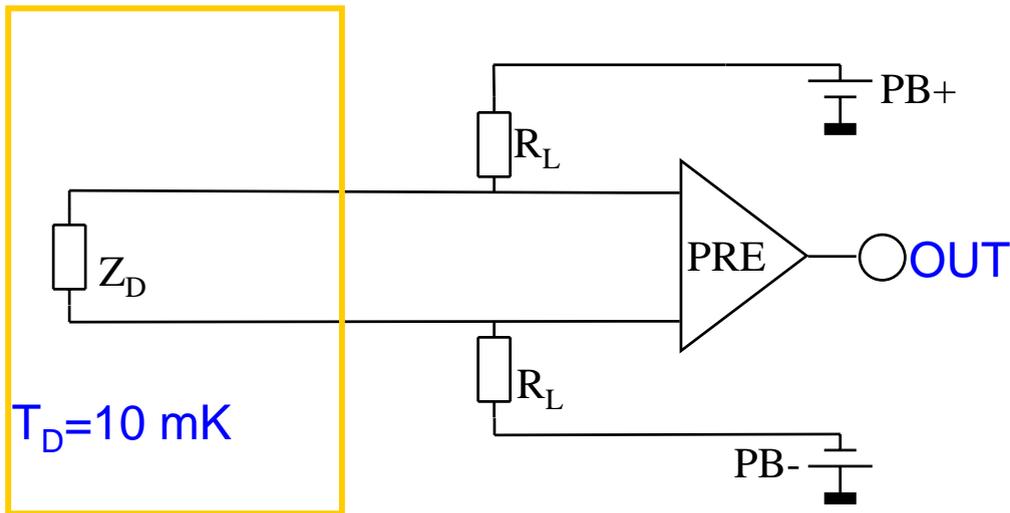
La scatola è chiusa ermeticamente in modo tale che non ci sia irraggiamento termico di nessuna natura.

# Elettronica operante a temperatura ambiente 1

Una soluzione che prevede tutta l'elettronica operante a temperatura ambiente ha come ovvia restrizione di soddisfare le specifiche di rumore.

Spesso, se l'impedenza del rivelatore non è completamente trascurabile, il rumore parallelo sia dell'amplificatore che delle resistenze di carico va curato in modo particolare.

## Refrigeratore

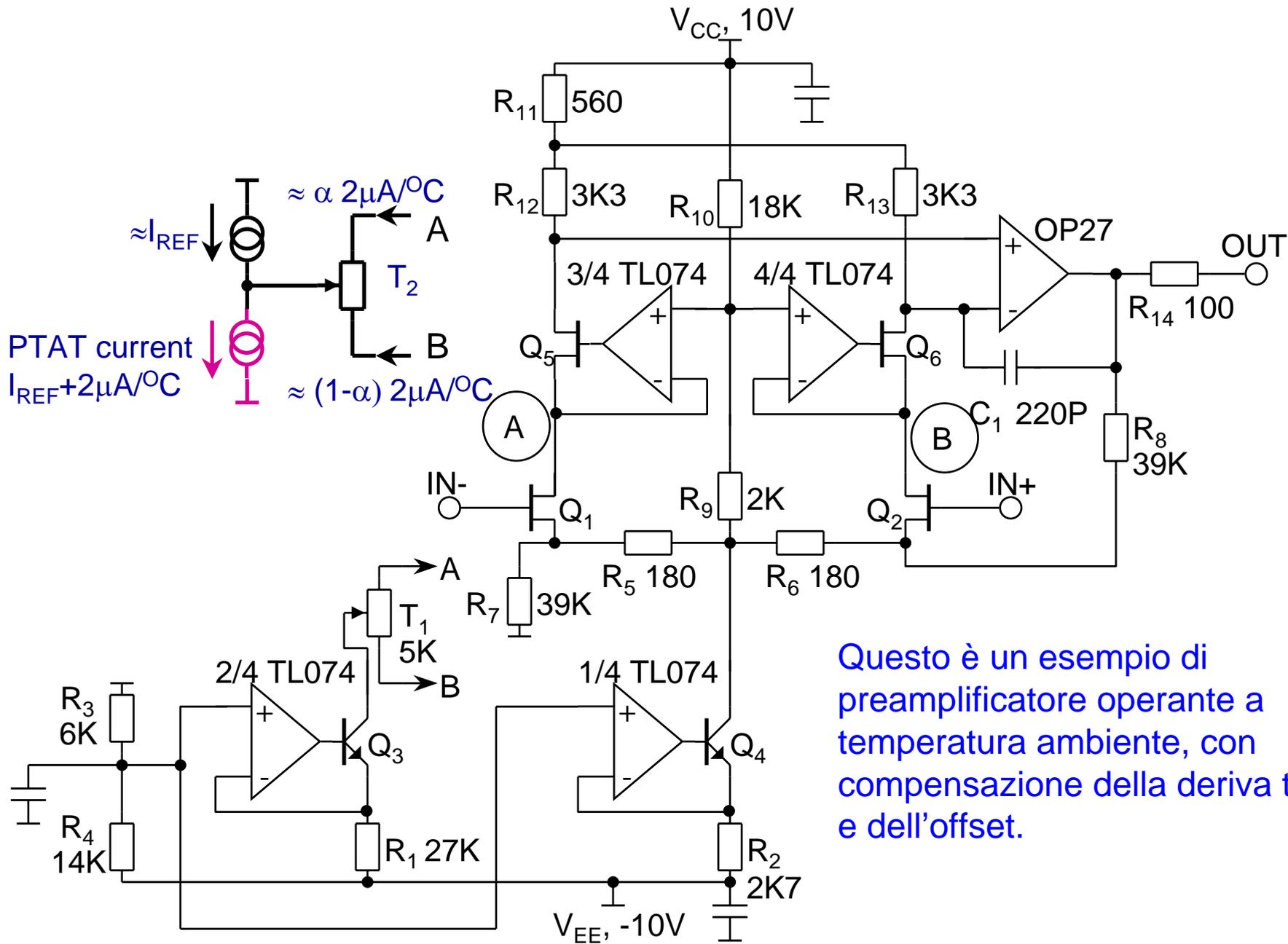


Sotto certe condizioni l'elettronica operante a temperatura ambiente e a temperatura criogenica mostrano simili prestazioni.

La scelta della sola temperatura di operazione all'ambiente è allora certamente preferibile perché:

- Necessita di 2 soli fili di connessione invece di 4;
- Non dissipa all'interno del refrigeratore, quindi si ha un risparmio di liquidi criogenici;
- Non ci sono possibili iniezioni di calore direttamente sul rivelatore.

# Elettronica operante a temperatura ambiente 2



Questo è un esempio di preamplificatore operante a temperatura ambiente, con compensazione della deriva termica e dell'offset.

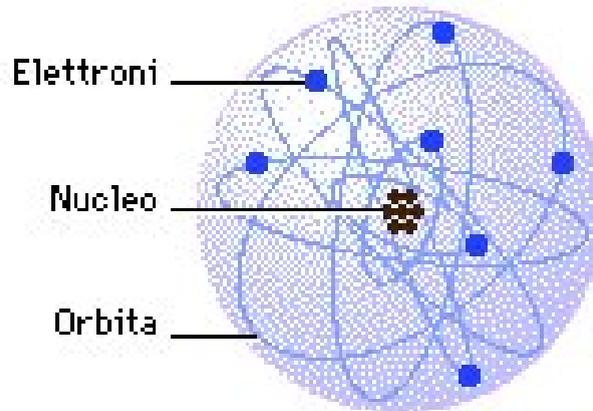
# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. **APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;**
9. APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?

# La struttura atomica 1

- elettrone: particella avente carica negativa
- protone: particella avente carica positiva uguale ed opposta a quella dell'elettrone
- neutrone: particella neutra, non avente carica.

## L'Atomo:



### **Il modello di Bohr**

"quantizza" le orbite per dare una spiegazione della stabilità dell'atomo.

**DIMENSIONI TIPICHE DELL'ATOMO:**  
 $10^{-11} \text{ m} = 0,0000000001 \text{ m}$

**UN ATOMO E' COMPOSTO DA:**

**UN NUCLEO NEL QUALE SONO COSTRETTI A COESISTERE (SOGGETTI A FORZE PARTICOLARI SUB-ATOMICHE) PROTONI E NEUTRONI;**

**UN SISTEMA DI ELETTRONI CHE ORBITA ATTORNO AL NUCLEO COMPORTANDOSI COME UN SISTEMA PLANETARIO DISORDINATO.**

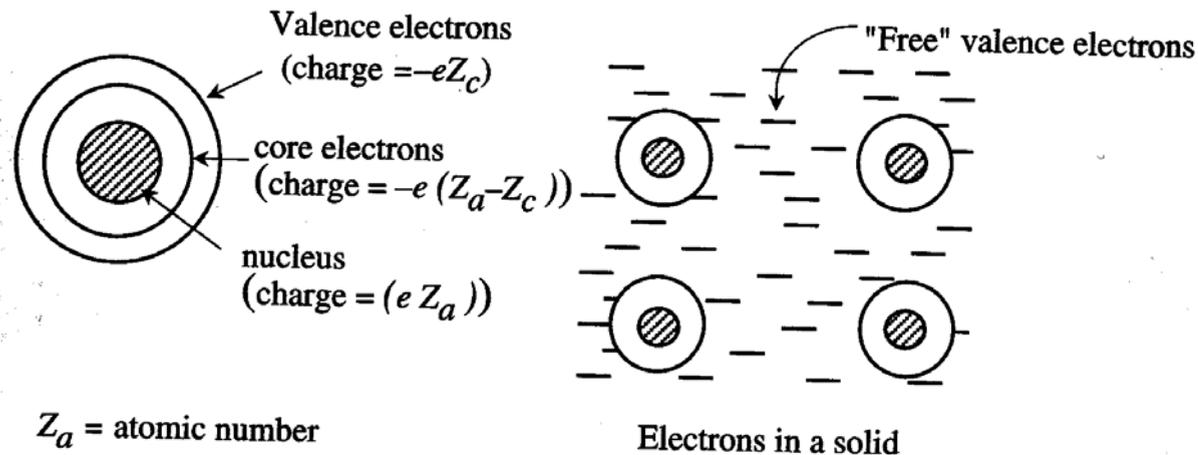
## La struttura atomica 2

Regole importanti di interesse alla conduzione:

- Le orbite concesse agli elettroni sono assegnate e di dimensioni crescenti. Non più di 2 elettroni possono “alloggiare” su di un’orbita.
- Per potere sfuggire da un’orbita un elettrone deve assorbire in qualche modo una certa quantità di energia adeguata.
- Gli elettroni che stanno sulle orbite più piccole, più vicine al nucleo, devono assorbire una quantità di energia elevata per potere sfuggire.

1.2. *Electronic Materials: Failure of Classical Physics*

5



**Figure 1.1:** A conceptual picture of an atom showing the nucleus with charge  $eZ_a$ , the core electrons, and the valence electrons. In a solid the valence electrons are “free” and are capable of charge conduction. The electron concentration in solids is quite high.

# La struttura atomica 3

1.2. Electronic Materials: Failure of Classical Physics

5

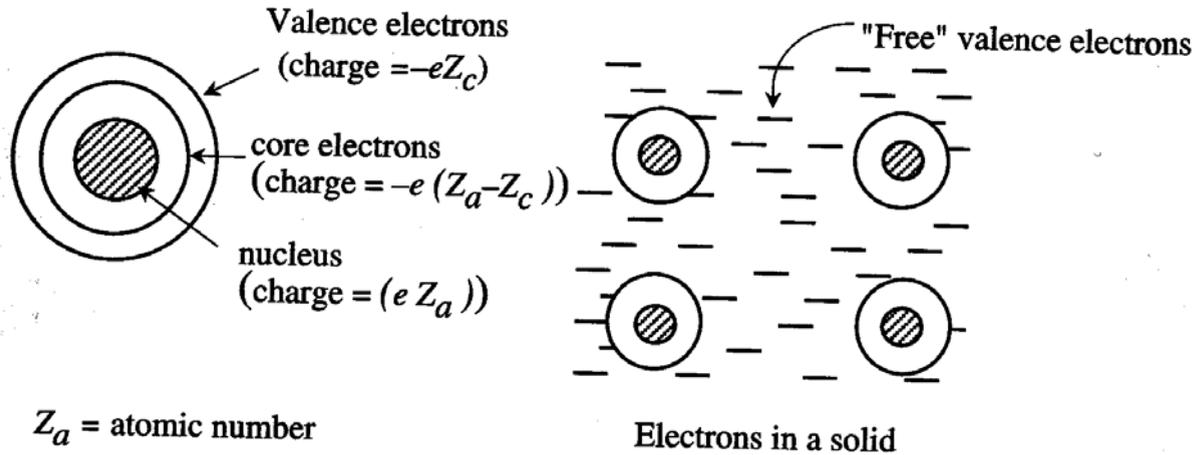


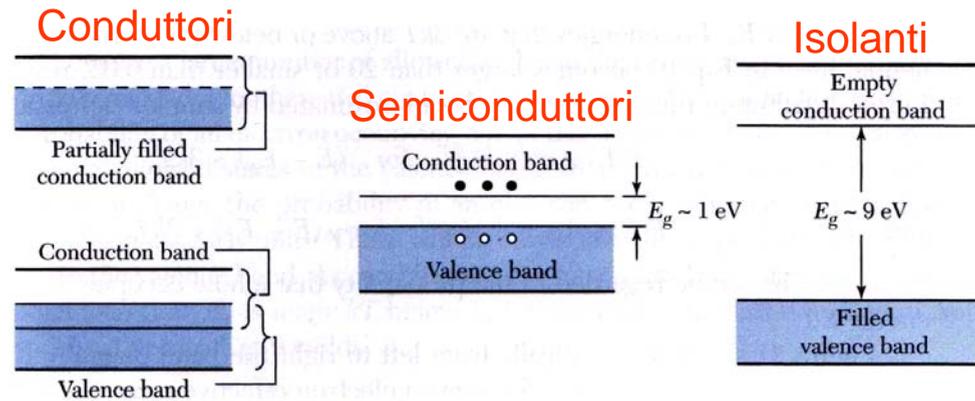
Figure 1.1: A conceptual picture of an atom showing the nucleus with charge  $eZ_a$ , the core electrons, and the valence electrons. In a solid the valence electrons are "free" and are capable of charge conduction. The electron concentration in solids is quite high.

Per quello che ci riguarda gli elettroni attorno agli atomi si possono dividere in 2 classi:

- gli elettroni confinati nelle orbite più profonde, 'core', vicine al nucleo che sono soggetti a forze di attrazione molto intense. Questi elettroni rimangono vincolati agli atomi.
- Gli elettroni che stanno sulle orbite più esterne, 'valence', che hanno un legame energetico più contenuto e che quindi possono, sotto certe condizioni, staccarsi dall'atomo.

Per quanto riguarda la conduzione è importante considerare anche la così detta banda di conduzione che è il primo livello orbitale che si trova completamente vuoto, o parzialmente pieno.

# La struttura atomica 4



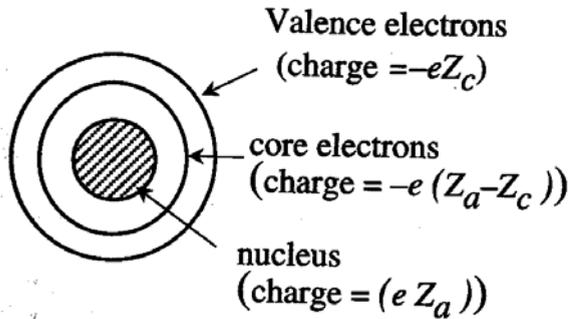
I **conduttori** si presentano secondo 2 caratteristiche: banda di conduzione non completamente piena di elettroni, ma separata in energia dalla banda di valenza, oppure banda di valenza e conduzione non completamente separate in energia, con livelli liberi in banda di conduzione. In entrambi i casi sono presenti molti elettroni disponibili alla conduzione: sotto praticamente qualsiasi condizione di temperatura i conduttori sono in grado di sopportare grandi flussi di carica.

I **semiconduttori** hanno le bande di valenza e conduzione separate in energia, in genere tra meno di 1 eV a poco meno di 2 eV, però non sono presenti elettroni in banda di conduzione: in condizioni normali sono debolmente conduttivi e non lo sono affatto a basse temperature.

Gli **isolanti** hanno le bande di valenza e conduzione separate in energia. A differenza che con i semiconduttori la separazione è in genere maggiore di 5 eV. Perciò la loro disponibilità alla conduzione è praticamente fortemente inibita.

# La struttura atomica 4

## 1.2. Electronic Materials: Failure of Clas



Nel grafico a fianco le orbite disponibili ed i livelli di riempimento in un atomo di una data specie sono indicate in funzione della distanza dal nucleo, espressa sull'asse X in energia.

In questo caso si tratta di un atomo metallico: la sua banda di conduzione è parzialmente piena.

Questo significa che questo livello può accettare l'arrivo ed il transito di altri elettroni. Anche gli elettroni dell'atomo stesso possono allontanarsi da questa banda perché debolmente legati.

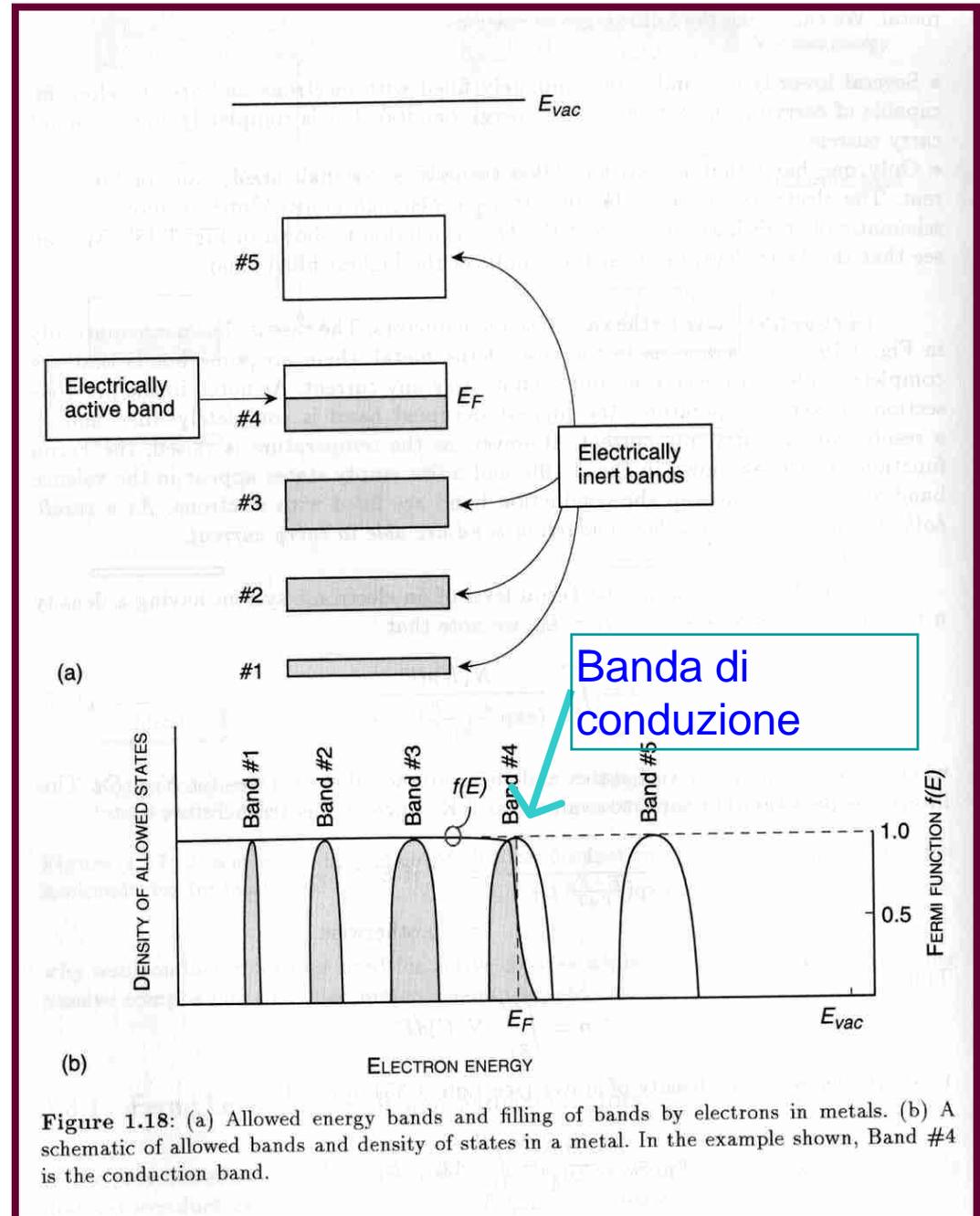
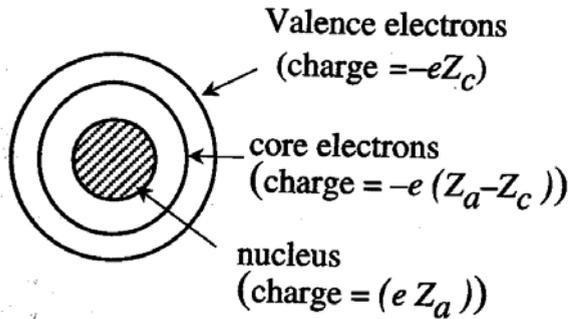


Figure 1.18: (a) Allowed energy bands and filling of bands by electrons in metals. (b) A schematic of allowed bands and density of states in a metal. In the example shown, Band #4 is the conduction band.

# La struttura atomica 5

## 1.2. Electronic Materials: Failure of Clas



Nel grafico a fianco la banda di valenza è completamente vuota mentre la banda di conduzione è piena a parte un piccolo pezzettino.

Questo è il tipico caso di un semiconduttore allo stato naturale: la conduzione è fortemente inibita.

Tuttavia la differenza di energia tra banda di conduzione e banda di valenza è contenuta e qualche carica può compiere il salto tra le 2 bande.

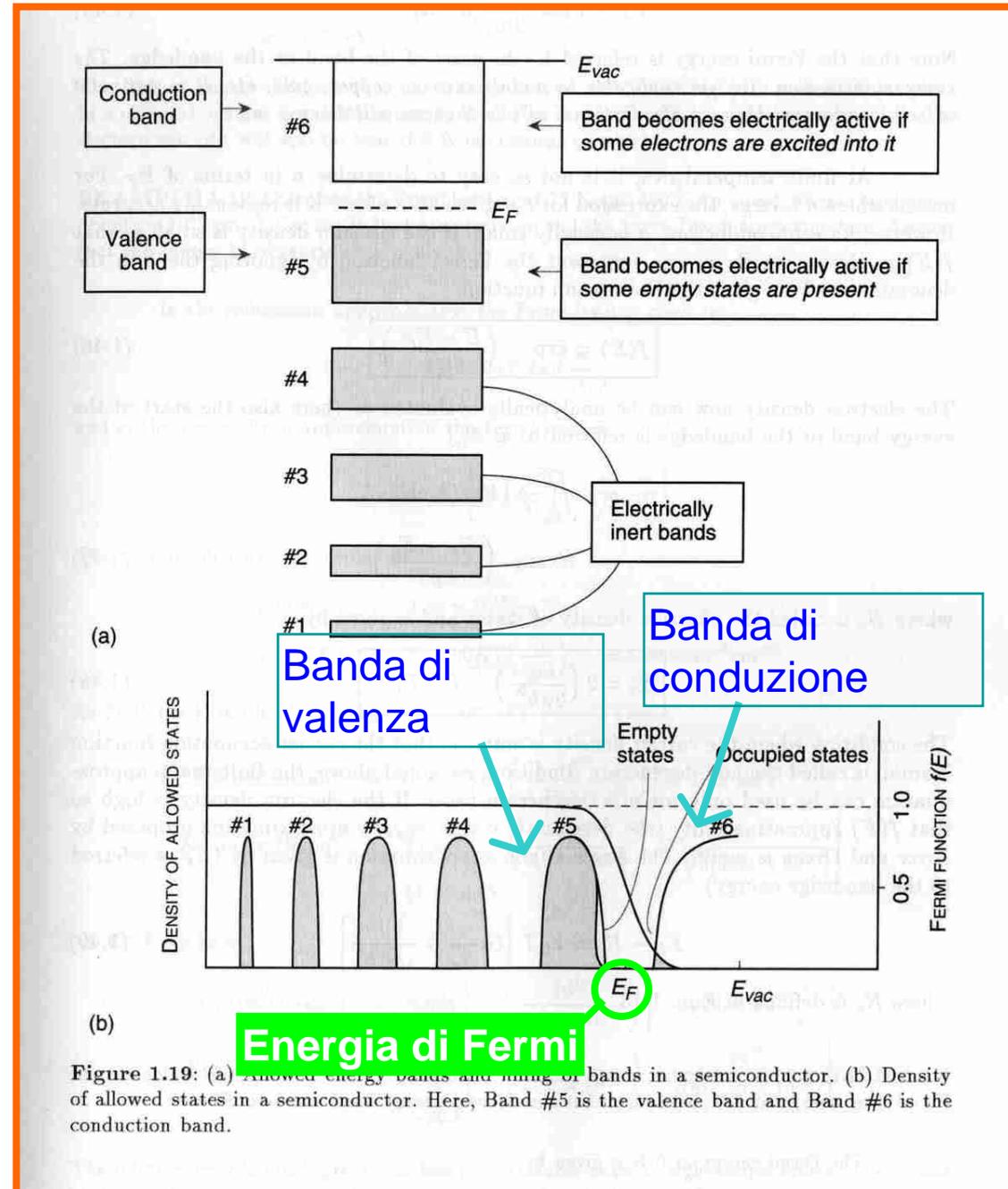
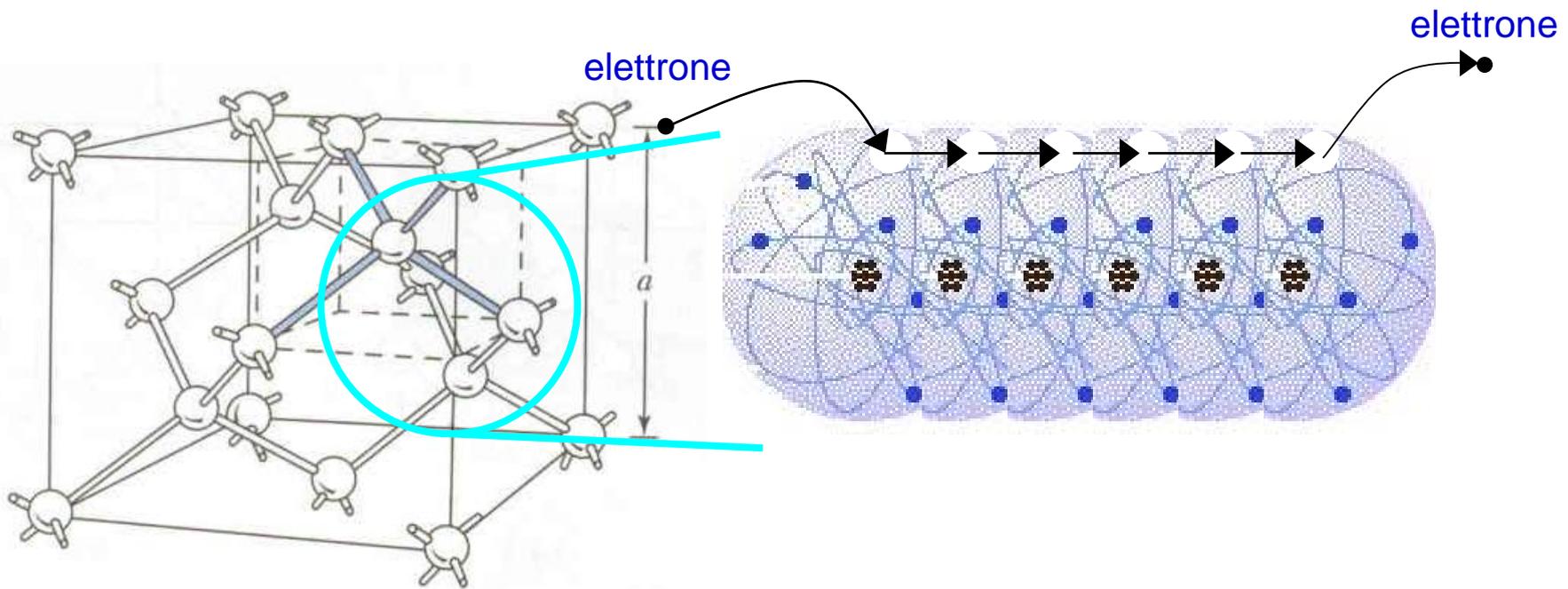


Figure 1.19: (a) Allowed energy bands and filling of bands in a semiconductor. (b) Density of allowed states in a semiconductor. Here, Band #5 is the valence band and Band #6 is the conduction band.

## La struttura atomica 6

Perché gli effetti dei riempimenti parziali delle bande abbiano effetto occorre che gli atomi siano posti ad una certa vicinanza, con una certa struttura reticolare.

In questo modo, sfruttando i vuoti presenti nelle bande, gli elettroni possono muoversi nel mezzo:



# I semiconduttori 1

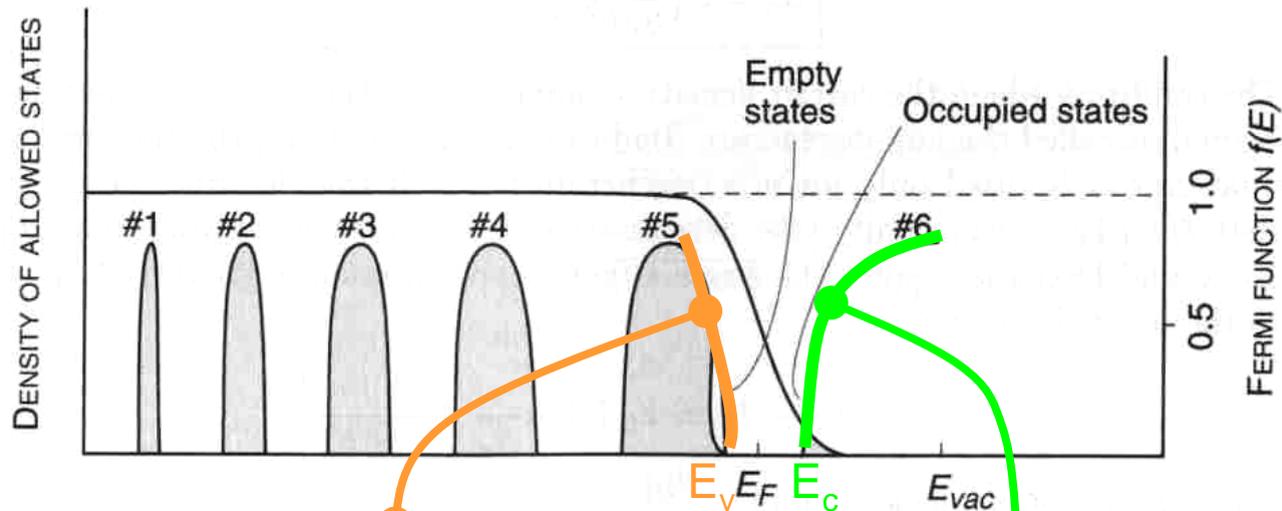
Riassumendo:

In un metallo c'è sempre disponibilità di carica alla conduzione di corrente. La maggiore o minore propensione alla conduzione dipende dalla temperatura attraverso i continui urti a cui gli elettroni sono soggetti.

In un semiconduttore la banda di valenza è piena, mentre la banda di conduzione è pressoché vuota. La conduzione di corrente è molto bassa in condizioni ordinarie.

Ma cosa comunque consente la conduzione di corrente, pur bassa che sia, in un semiconduttore?

## I semiconduttori 2



$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{K_B T}\right);$$

$$N_v = 2 \left(\frac{m_h^* K_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2}$$

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{K_B T}\right);$$

$$N_c = 2 \left(\frac{m_e^* K_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2}$$

Nei semiconduttori (e nei metalli) si considera il livello di Fermi,  $E_F$ . E' un'energia compresa tra la banda di valenza e la banda di conduzione.

Il valore di  $E_F$  dipende dal profilo presente della distribuzione degli elettroni nelle bande.

La cosa importante è che attraverso  $E_F$  è possibile esprimere la densità di carica disponibile alla conduzione presente sia nella banda di conduzione che nella banda di valenza.

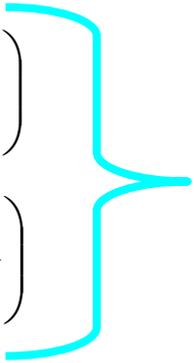
Per esempio a temperatura ambiente, 300 K, nel Silicio, Si, in condizioni intrinseche, per le quali  $E_F$  sta in mezzo tra la banda di valenza e di conduzione, è:

$$n=p= 10^{10} \text{ cariche/cm}^3$$

(Questa densità è molto piccola ed insufficiente a generare una corrente adeguata alla gran parte delle applicazioni)

## I semiconduttori 3

Queste 2 formule ci insegnano una proprietà fondamentale nel meccanismo di conduzione nei semiconduttori:

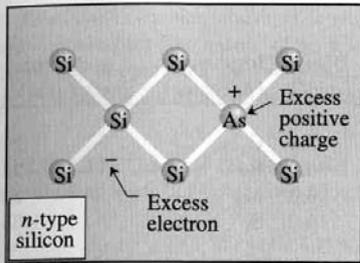
$$p = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{K_B T}\right)$$
$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{K_B T}\right)$$


La conduzione elettrica è possibile grazie all'ambiente che fornisce energia sufficiente a fare sì che le cariche possano stare sulla banda di conduzione o di valenza.

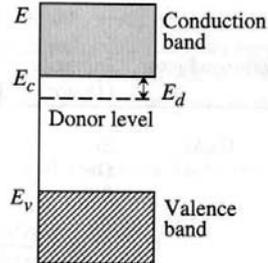
La conduzione in un semiconduttore è un fenomeno parassita. A basse temperature si evidenzia il fenomeno del congelamento dei portatori di carica nei rispettivi atomi donori.

# I semiconduttori 4

Doping: Donors and Acceptors



Arsenic (As) atom donates one electron to the conduction band to produce an *n*-type silicon



E' possibile aumentare il numero di cariche disponibili alla conduzione nella banda di conduzione o nella banda di valenza del Si grazie all'introduzione di una densità di atomi di una opportuna specie diversa.

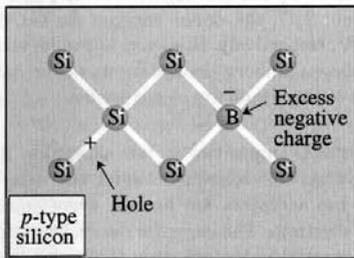
A tutti gli effetti quello che si introduce è una banda piena di cariche che sta subito sotto la banda di conduzione o subito sopra la banda di valenza.

$$E_d(\text{Si})=45 \text{ meV}, E_d(\text{Ge})=12 \text{ meV},$$

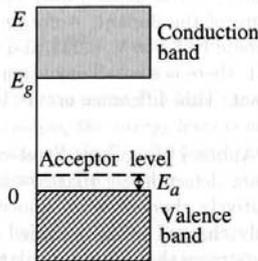
$$E_d(\text{GaAs})=6 \text{ meV},$$

❖ Se nel Si introduciamo atomi che aggiungono una banda subito sotto la banda di conduzione il Si si dice drogato n e gli atomi vengono detti donori.

❖ Se nel Si introduciamo atomi che aggiungono una banda subito sopra la banda di valenza il Si si dice drogato p e gli atomi vengono detti accettori.



One electron taken from the valence band to complete the bonding of the boron atom → hole



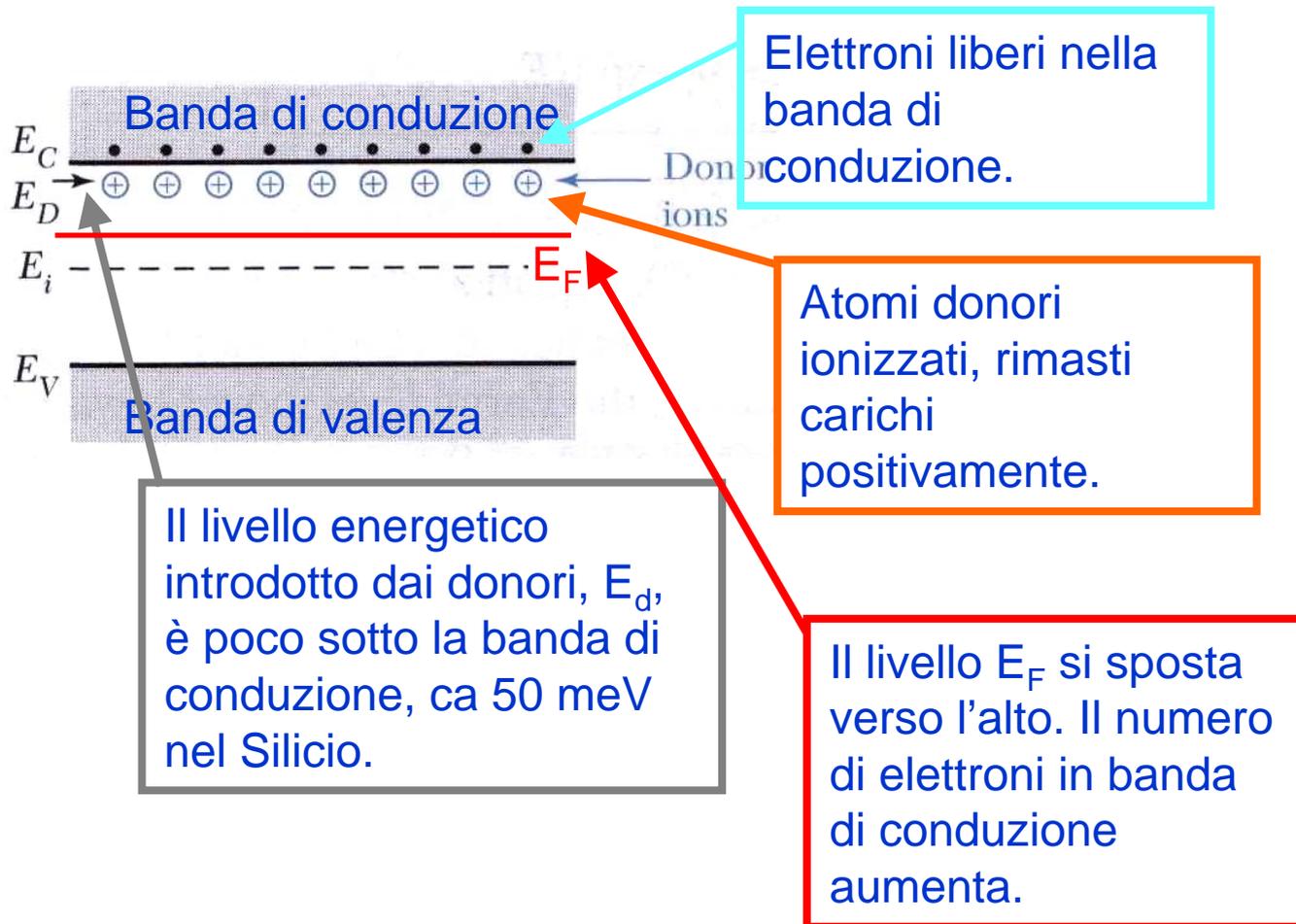
$$E_a(\text{Si})=70 \text{ meV}, E_a(\text{Ge})=11 \text{ meV},$$

$$E_a(\text{GaAs})=28 \text{ meV},$$

# I semiconduttori 5

## Semiconduttore drogato N

Siccome il livello aggiunto sta poco sotto la banda di conduzione, basta una piccola energia termica per ionizzare tutti gli atomi introdotti: ogni atomo cede il proprio elettrone che salta nella banda di conduzione. Disponibile alla conduzione.



Vale ancora che:

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{K_B T}\right)$$

ma ora  $E_F$  non è più in mezzo al gap, ma più spostato verso l'alto.

Se  $N_D$  è la densità di atomi donori introdotti, risulta che, a temperature ordinarie:

$$n \approx N_D$$

Tuttavia se la temperatura si abbassa molto  $n$  si riduce con legge esponenziale.

# I semiconduttori 6

## Semiconduttore drogato P

Siccome il livello aggiunto sta poco sopra la banda di valenza, basta una piccola energia termica per ionizzare atomi in banda di valenza: ogni atomo ionizzato cede un proprio elettrone che salta nell'atomo accettore introdotto. La densità di buche rimaste è disponibile alla conduzione. Le buche si comportano come cariche positive.

Atomi accettori ionizzati rimasti carichi negativamente



Il livello energetico introdotto dagli accettori,  $E_a$ , è poco sopra la banda di valenza, ca 50 meV nel Silicio.

Lacune libere di muoversi nella banda di valenza.

Il livello  $E_F$  si sposta verso il basso. Il numero di buche nella banda di valenza aumenta.

$E_F$  non è più in mezzo al gap, ma più spostato verso il basso.

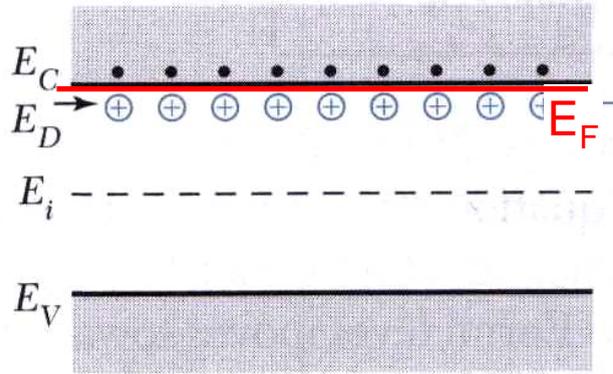
Se  $N_A$  è la densità di atomi donori introdotti, risulta che, a temperature ordinarie:

$$p \approx N_A$$

Tuttavia se la temperatura si abbassa molto  $n$  si riduce con legge esponenziale.

# I semiconduttori 7

Consideriamo per esempio il caso del drogaggio di tipo n:



Il livello di Fermi dipende anch'esso debolmente dalla temperatura. A temperature molto basse in prima approssimazione sta in mezzo tra l'energia del livello donore e la banda di conduzione:

$$n = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{K_B T}\right) \approx N_c \exp\left(-\frac{E_d/2}{K_B T}\right)$$

Ad esempio il fattore esponenziale cambia di molti ordini di grandezza scalando con la temperatura.

$$\exp\left(-\frac{E_d/2}{K_B T}\right)$$

SEMIC.	$E_d$ (meV)	Esponenziale @ 70 K ( $E_F - E_C$ ) $\approx -E_d/2$	Esponenziale @ 10 K ( $E_F - E_C$ ) $\approx -E_d/2$
GaAs	6	0.6	$10^{-2}$
Ge	9	0.5	$10^{-3}$
Si	45	$10^{-2}$	$10^{-11}$

Si può vedere l'esempio per 3 differenti semiconduttori, caratterizzati da diversi livelli energetici, tra banda di conduzione e donore.

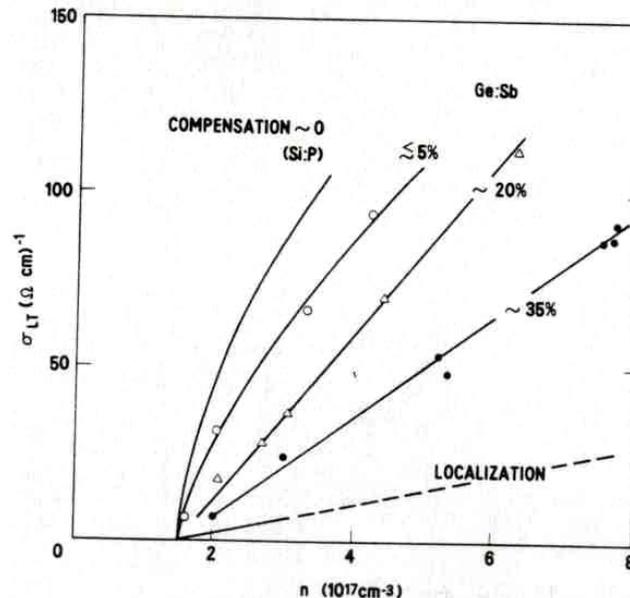
## I semiconduttori 8

Per cercare di ottenere una conduttività adeguata alle temperature di operazione dei rivelatori il metodo che si usa è di drogare in modo estremamente elevato il materiale.

Al limite si può raggiungere una resistività simile a quella di un metallo, molto bassa, convertendo sostanzialmente il materiale in una struttura reticolare simile a quella di un metallo. In questo caso però la sensibilità termica diverrebbe altrettanto povera.

La soluzione che si adotta è quella di drogare in modo intenso il materiale in modo da cercare di disporre di molti livelli disponibili alla conduzione. Però allo stesso tempo si diffondono anche droganti che pongono livelli sulla banda opposta per avere una compensazione di carica. In sostanza si droga con molti atomi donori e si compensa con atomi accettori o viceversa. In questo modo la resistività e sensibilità risultano ingegnerizzabili:

### Conducibilità elettrica



## I semiconduttori 9

Il comportamento tipico che si ottiene per la resistenza del termistore è:

$$R(T) = R_0 \exp\left(\sqrt{\frac{T_0}{T}}\right)$$

Da cui la dipendenza dalla temperatura si ottiene per derivazione:

$$\frac{\Delta R}{\Delta T} = -\frac{R(T)}{2T_0} \left[\frac{T_0}{T}\right]^{3/2}$$

Valori tipici:

$$R_0 = 5 \Omega,$$

$$T_0 = 3 \text{ K}$$

Per una temperatura di lavoro di 10 mK risulta:

$$R(10 \text{ mK}) = 166 \text{ M}\Omega \text{ e:}$$

$$\frac{\Delta R}{\Delta T} = -1.44 \times 10^{11} \frac{\Omega}{\text{K}}$$

Per esempio, supponendo di polarizzare il termistore mediante un generatore di corrente di intensità di  $I_B = 10 \text{ pA}$  si ottiene che per una variazione di temperatura di  $10 \text{ }\mu\text{K}$  risulta:

$$\Delta V = I_B \frac{\Delta R}{\Delta T} \Delta T \approx 1.44 \text{ }\mu\text{V}$$

## I semiconduttori 10

Nel caso dei termistori si riesce ad ottenere un funzionamento del dispositivo fino a temperature molto basse, grazie all'utilizzo di livelli di drogaggio molto elevati. La dipendenza dalla temperatura che ne deriva è però un effetto incancellabile presente, in modo più o meno consistente, in ogni caso.

Nel caso di dispositivi attivi, i transistor, non è ovvio come nei termistori l'ottenimento del funzionamento sfruttando livelli di drogaggio elevati.

Inoltre, anche se un transistor è in grado di operare ad una temperatura bassa, non è assolutamente detto che le sue caratteristiche di rumore e/o di guadagno siano adeguate.

Un tipico esempio sono i JFET al Si che, se opportunamente progettati, sono in grado di operare anche a 4.2 K, ma con un livello di rumore certamente non basso.

Una categoria di transistori che non sono capaci di operare a bassa temperatura per via della loro morfologia sono i transistori bipolari ad omogiunzione in Si.

## I semiconduttori 11

La lista dei diodi attivi e del loro comportamento a bassa temperatura è visibile qui sotto:

DEVICE	MINIMUM TEMPERATURE OF OPERATION	OPTIMUM TEMPERATURE OF OPERATION
SI MOS	LHe	> LN
Si JFET	LN (AND BELOW)	100 ÷ 150 K
Ge JFET	LHe	60 ÷ 70 K
GaAs MESFET	LHe	LHe
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ HEMT	LHe	LHe
SiGe HBJT	LHe	LHe ÷ LN

LN= Azoto liquido, 78 K;

LHe=Elio liquido, 4.2 K

# INDICE

1. Principio di funzionamento di un rivelatore criogenico;
2. La risoluzione di un rivelatore criogenico;
3. Le parti costituenti un rivelatore criogenico;
4. La trasduzione calore-segnale elettrico: i sensori;
  - a. I Superconducting Tunnel Junction, STJ;
  - b. I Transition Edge Sensor, TES e Superconducting Quantum Interference Device, SQUID;
  - c. I termistori;
5. L'elettronica per sensori termici;
6. L'influenza del rumore dei dispositivi elettronici nella risoluzione dei bolometri;
7. Elettronica criogenica ed elettronica operante a temperatura ambiente;
8. APPENDICE A: I meccanismi di conduzione a bassa ed ultrabassa temperatura nei semiconduttori;
9. **APPENDICE B: Come si ottengono le temperature necessarie al funzionamento dei rivelatori termici?**

## Come ottenere le basse temperature 1

Una temperatura prossima a 5 mK, ovvero -272.995 °C non si riesce ad ottenere in modo convenzionale.

Esistono diversi metodi per raggiungere temperature così basse. Una di queste tecniche è quella della refrigerazione per diluizione (le altre 2 usate sono per Demagnetizzazione nucleare adiabatica e )

Il primo passo è quello di ottenere la più bassa temperatura possibile mediante la liquefazione di un gas opportuno. La liquefazione avviene attraverso la tecnica standard consistente in una sequenza di successive compressioni adiabatiche.

Utilizzando l'Elio, He, si ottiene 4.2 K come temperatura finale.

A questo punto si può scendere ulteriormente la temperatura a circa 1.2 K aspirando dalla superficie dell'Elio liquido. Infatti quando si aspira da un liquido le particelle che si portano via sono quelle che fuggono dal liquido stesso, le più energetiche, o calde.

Un ulteriore raffreddamento non sarebbe reale visto che l'abbassamento della temperatura dipende esponenzialmente dalla potenza della pompa.

Il passo finale riguarda l'applicazione di uno straordinario effetto quantistico.

## Come ottenere le basse temperature 2

L'He ha 2 isotopi:  $^4\text{He}$  (avente nucleo composto da 2 protoni e 2 neutroni) ed il  $^3\text{He}$  (avente nucleo composto da 2 protoni ed un neutrone) (l'abbondanza naturale dell' $^3\text{He}$  rispetto all' $^4\text{He}$  è di 0.1 ppm).

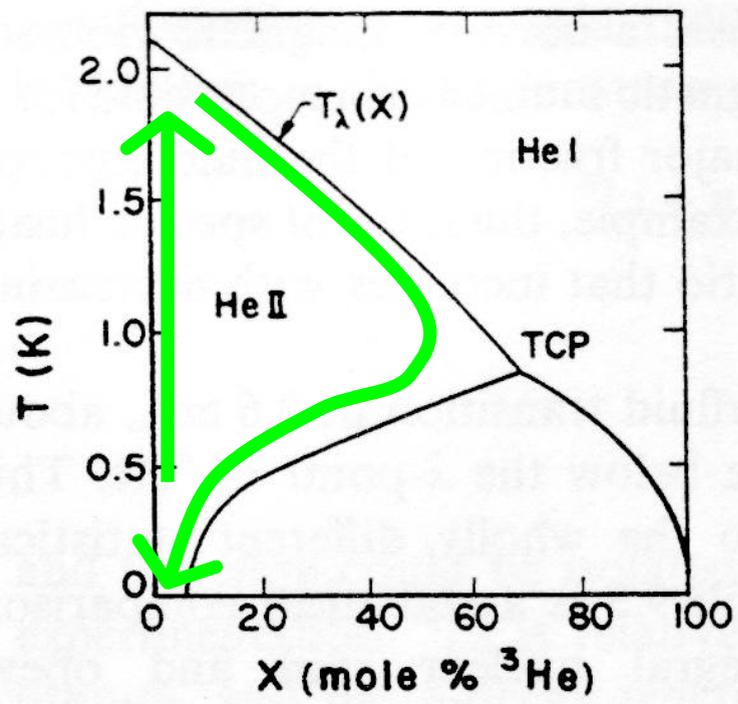
Dobbiamo ricordare che:

- $^4\text{He}$  è un gas di **BOSONI**;
- $^3\text{He}$  è un gas di **FERMIONI**.

A temperature ordinarie, dove l'energia termica delle particelle hanno una certa consistenza, i 2 tipi di gas hanno comportamenti estremamente simili.

Però a temperature molto basse, dove l'energia termica delle particelle diviene piccola, i così detti effetti quantistici si fanno sentire ed i 2 isotopi hanno un comportamento completamente differente.

## Come ottenere le basse temperature 3



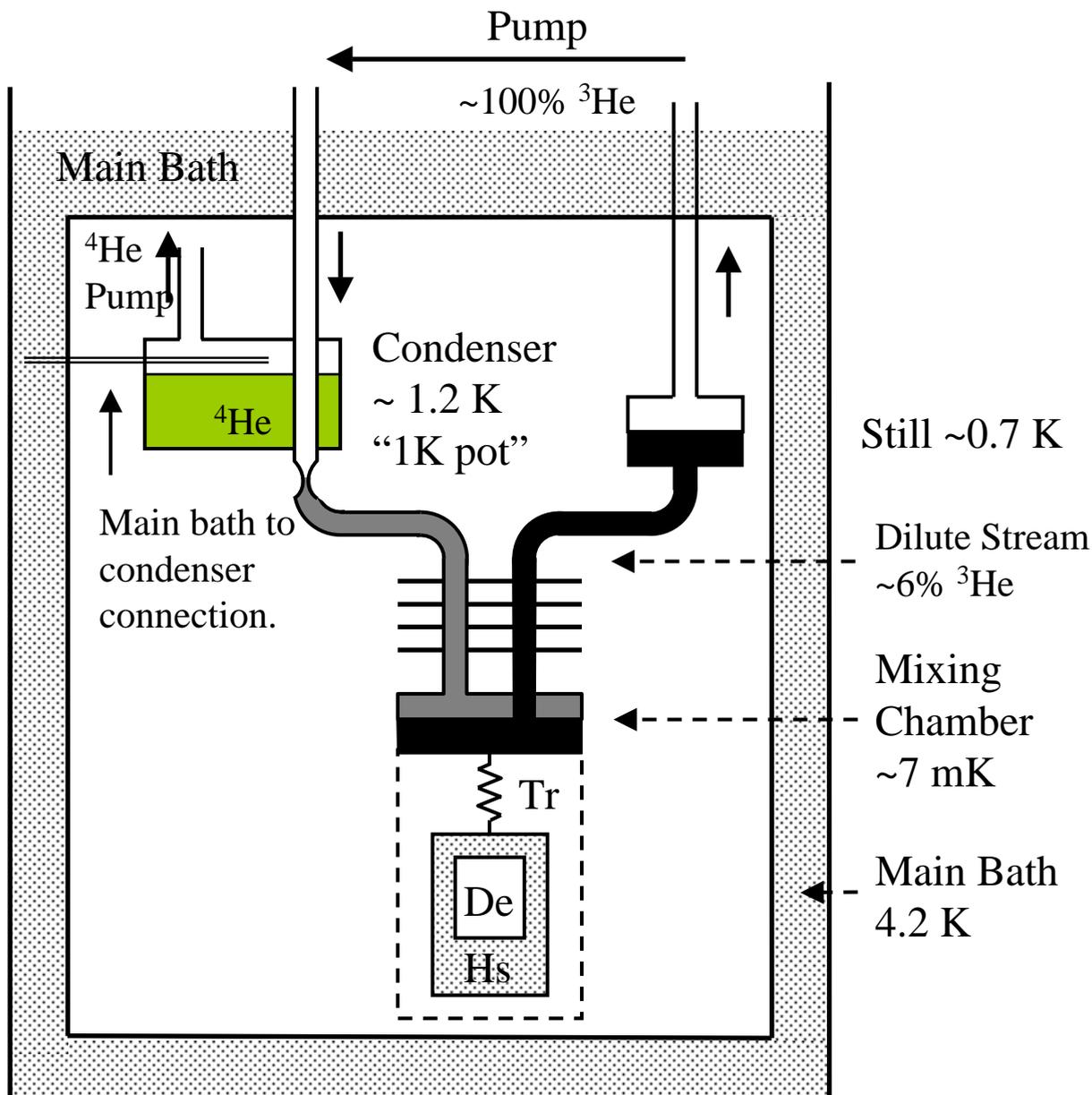
Il fatto che i 2 tipi di gas abbiano un comportamento differente è di fondamentale importanza.

Facendo percorrere al nostro sistema il ciclo verde otterremo la straordinaria proprietà di avere una percentuale finita di  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  anche alla temperatura dello zero assoluto.

Vale a dire che se facessimo circolare la miscela in un ciclo reversibile, il ciclo non avrebbe mai fine e la temperatura di principio potrebbe arrivare allo zero assoluto. Di fatto non ci si riesce per le piccole, ma fastidiose, potenze di disturbo presenti.

Per potere innestare questo processo occorre porre in circolazione la miscela. La potenza della pompa necessaria ora dipende solo dal quadrato della potenza della pompa.

## Come ottenere le basse temperature 2



Lo schema di funzionamento, non in scala, è raffigurato qui.

Nel compiere il ciclo, la miscela  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  passa vicino a posizioni dove viene scambiato calore per mantenere attivo il processo di raffreddamento.

Tutta l'economia del processo avviene a spese dell' $^4\text{He}$  liquido che si consuma lentamente, e della potenza, o energia, che le pompe sono costrette a consumare per mantenere in moto la miscela.