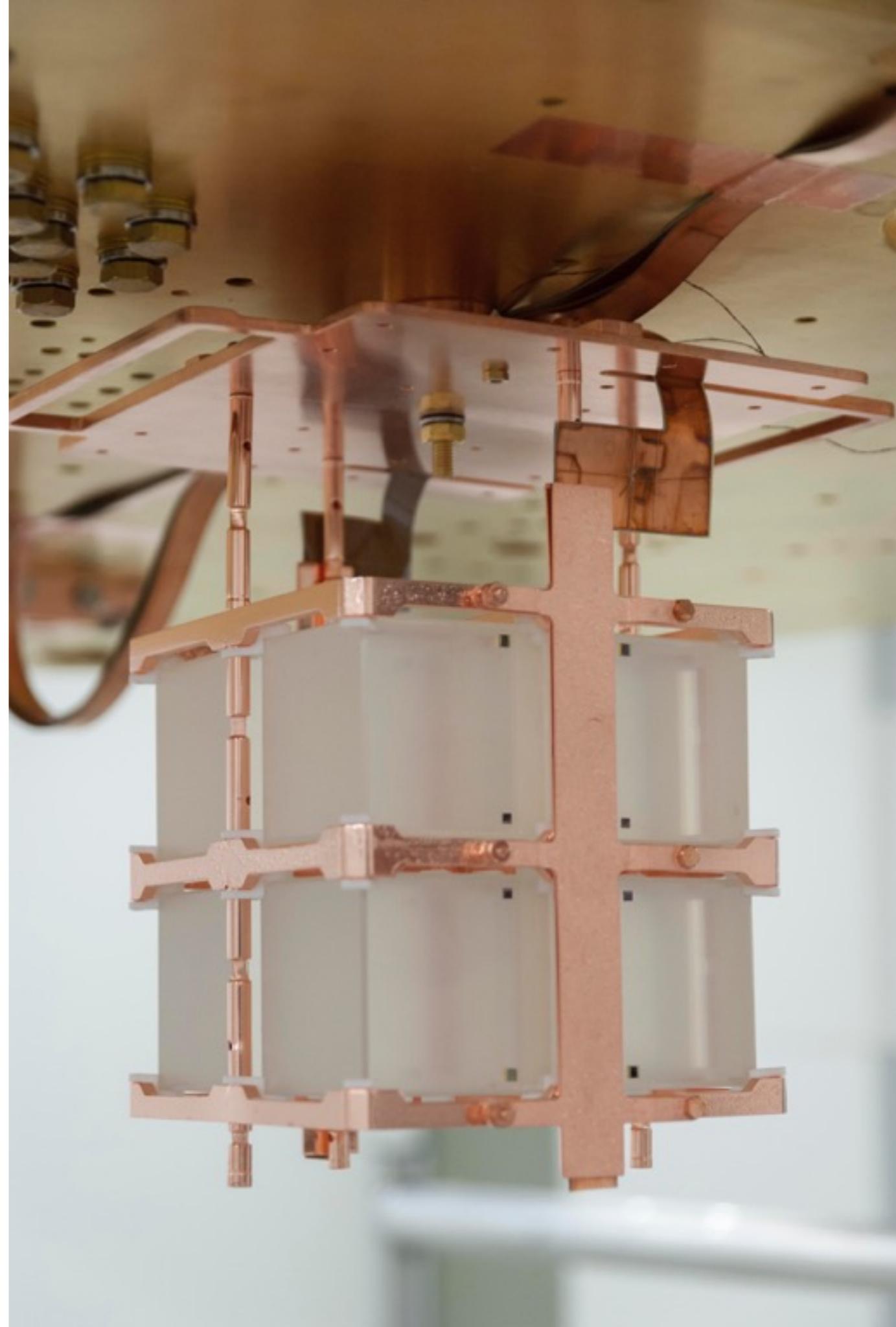


Rivelatori Bolometrici

Corso di Rivelatori di Radiazione, Laurea Magistrale in Fisica
2014-2015

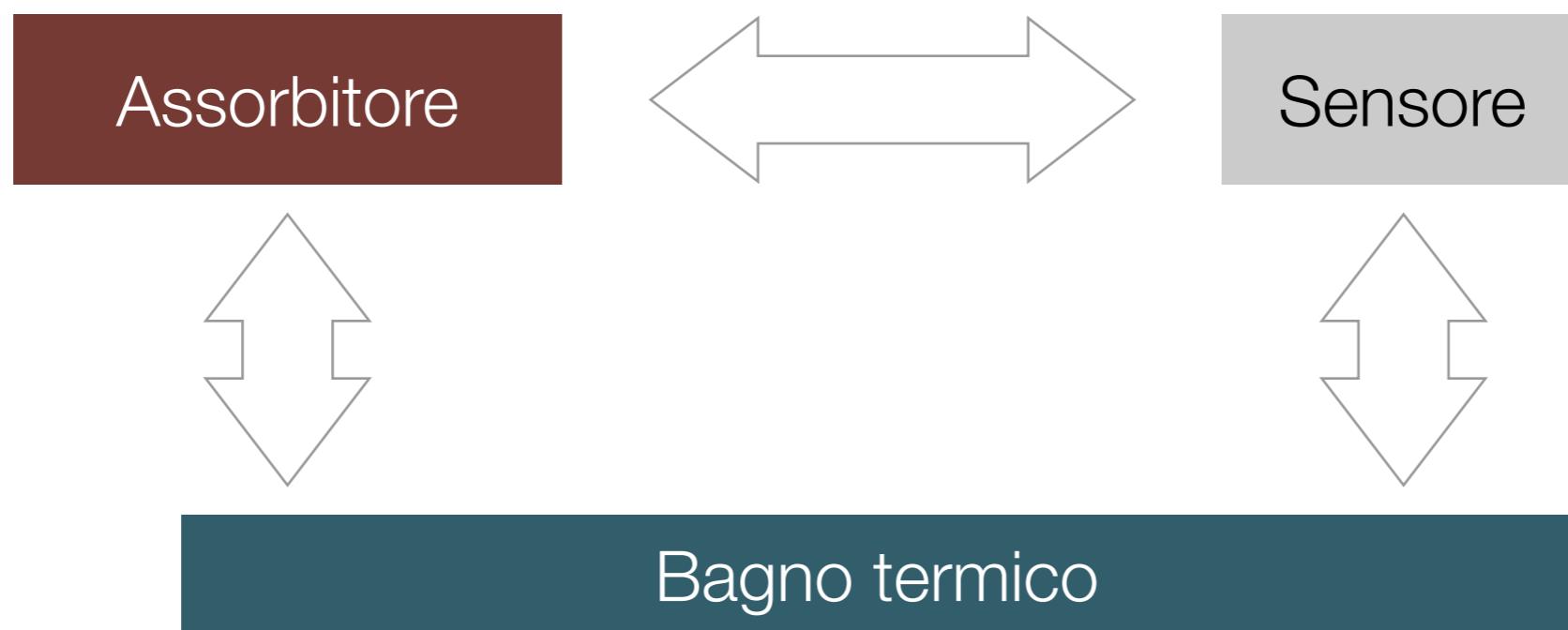
Outline

- Principi di funzionamento
- Risoluzione energetica
- La fisica delle particelle:
l'assorbitore
- La misura della temperatura: il
sensore
- La fisica del freddo: il bagno
termico
- Confronto con altri rivelatori
- Presente e futuro dei bolometri



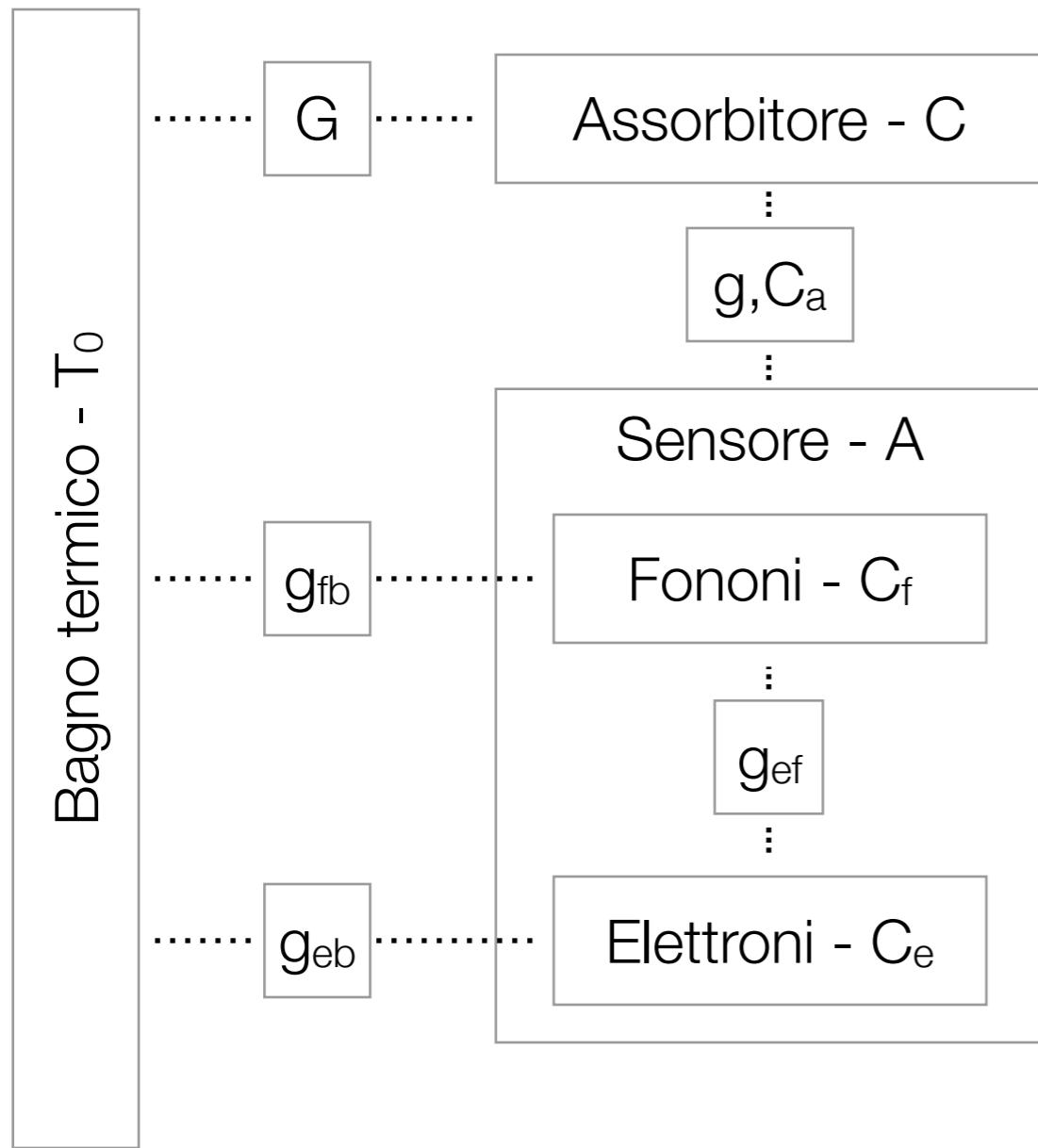
Principi di funzionamento

- bolometro (in fisica delle particelle, eventi rari) = rivelatore termico
- portatori di informazione = fononi = quanti del campo vibrazionale del reticolo (l'equivalente dei fotoni per il campo elettromagnetico...)
- versione naïve: calorimetro perfetto = tutta l'energia depositata viene convertita in calore e quindi rivelata sotto forma di variazione di temperatura
- elementi fondamentali di un bolometro:



Principi di funzionamento

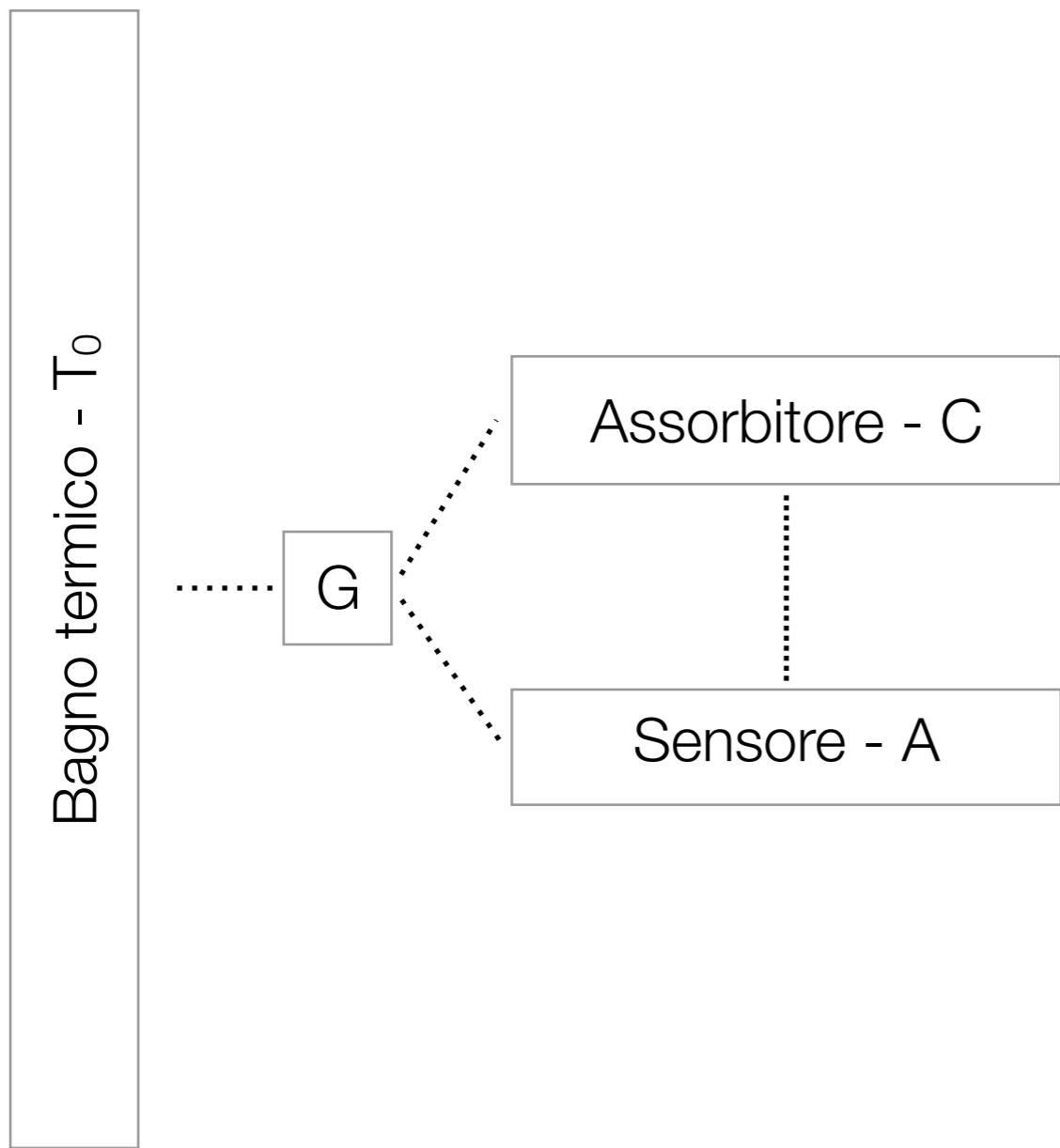
Modello termico completo (?) di un rivelatore bolometrico:



- assorbitore, con la sua capacità termica C ;
- sensore, composto da elettroni e lattice; ognuno dei due ha una capacità termica (C_f e C_e) e sono accoppiati tramite una conduttanza g_{ef} , detta disaccoppiamento elettrone-fonone; la sensibilità A caratterizza il sensore;
- il sensore e l'assorbitore sono accoppiati tramite una conduttanza termica g , che in alcuni casi può essere un oggetto dotato di una sua capacità termica aggiuntiva C_a ;
- assorbitore, fononi ed elettroni del sensore sono accoppiati al bagno termico a temperatura T_0 con le rispettive condutranze G , g_{fb} e g_{eb} .

Principi di funzionamento

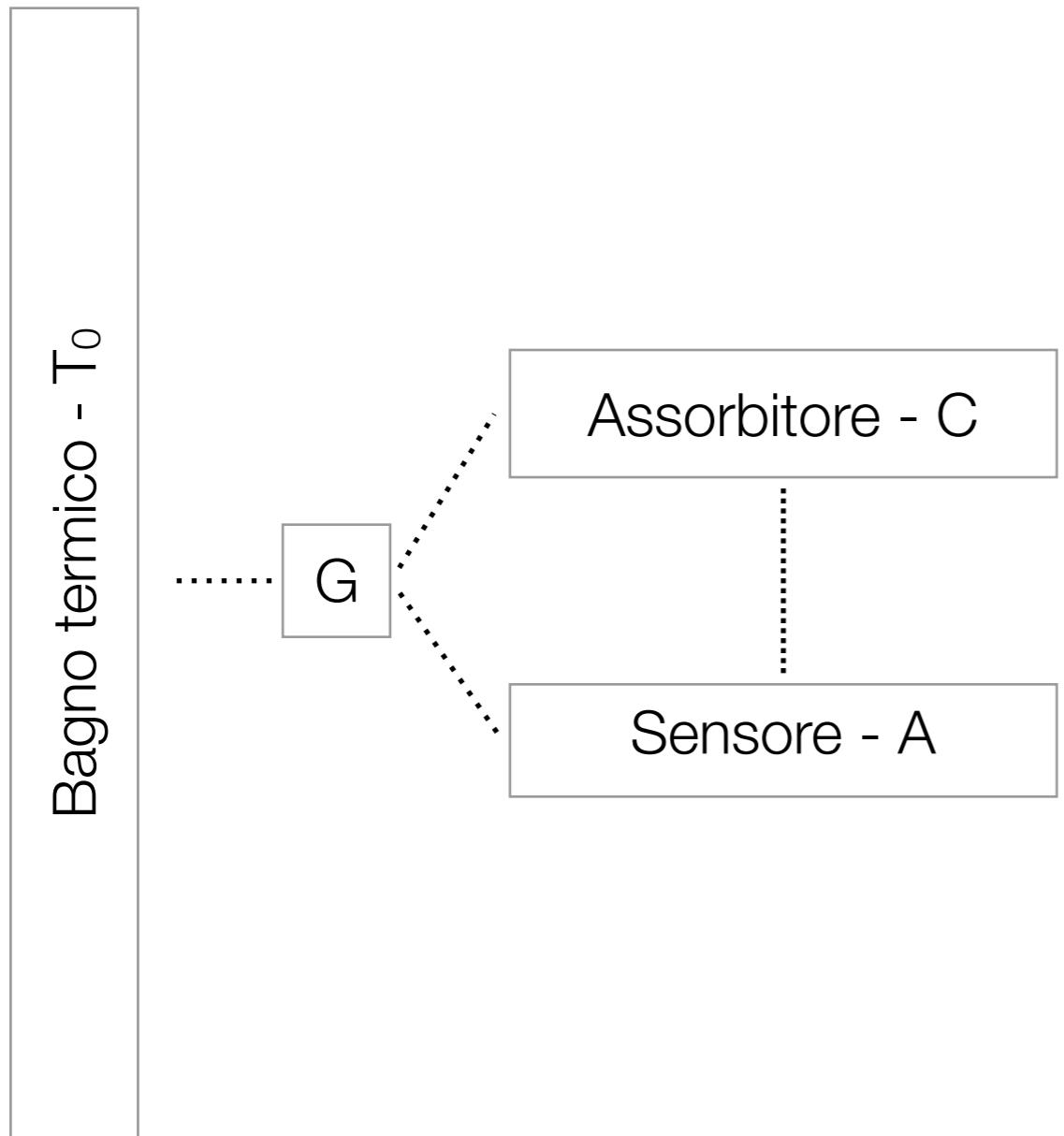
Non tutti gli elementi del sistema hanno lo stesso peso sulle prestazioni; le conduttanze molto grandi o piccole e capacità termiche molto piccole possono essere trascurate, ottenendo un modello termico semplificato del bolometro



- assorbitore, con la sua capacità termica C;
- sensore, con capacità termica trascurabile rispetto all'assorbitore, e sensibilità A
- il sensore e l'assorbitore sono accoppiati tramite una conduttanza termica molto maggiore degli altri accoppiamenti, quindi li consideriamo sempre alla stessa temperatura;
- assorbitore e sensore sono collegati al bagno tramite una conduttanza termica G.

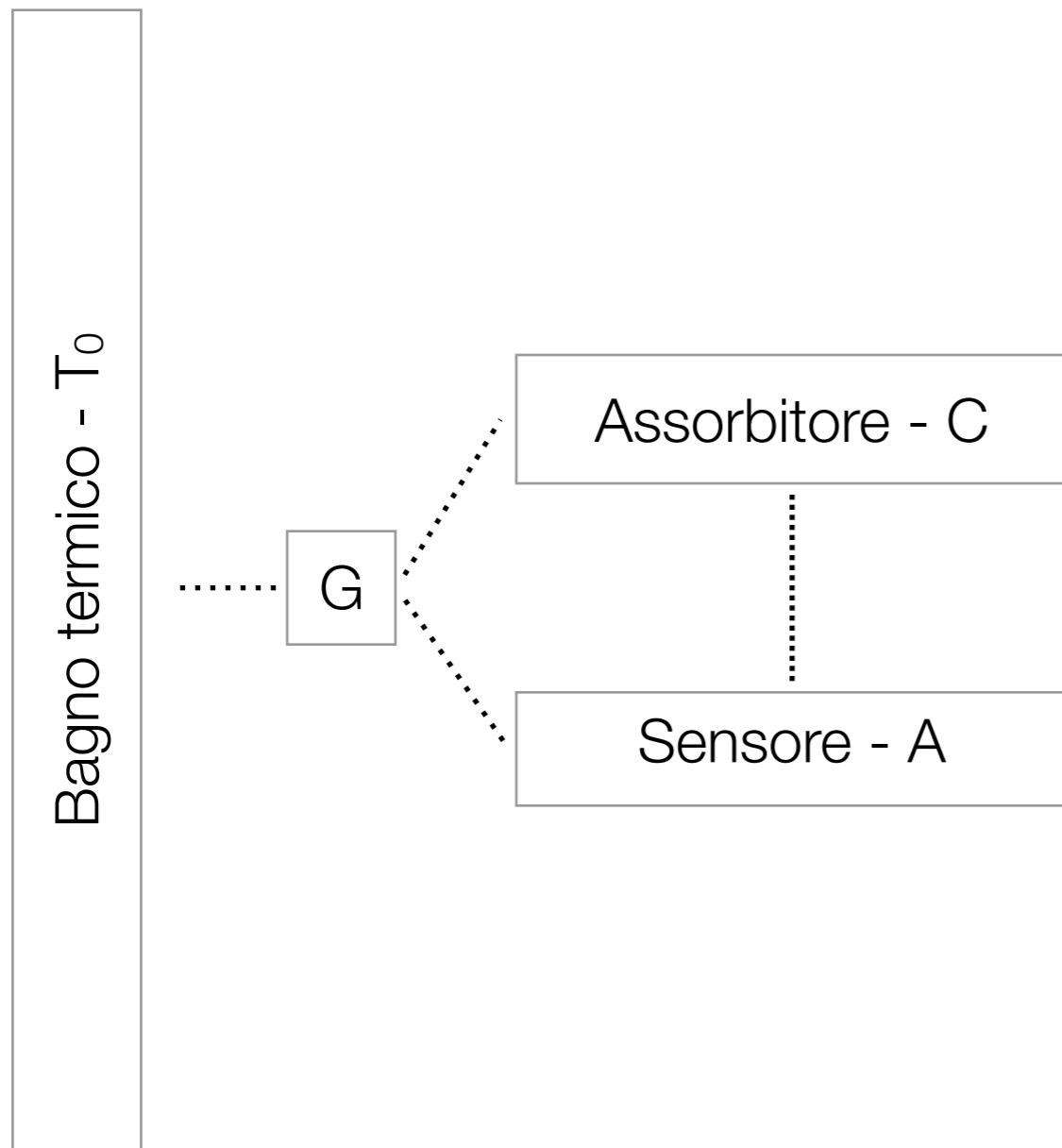
Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata



Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata

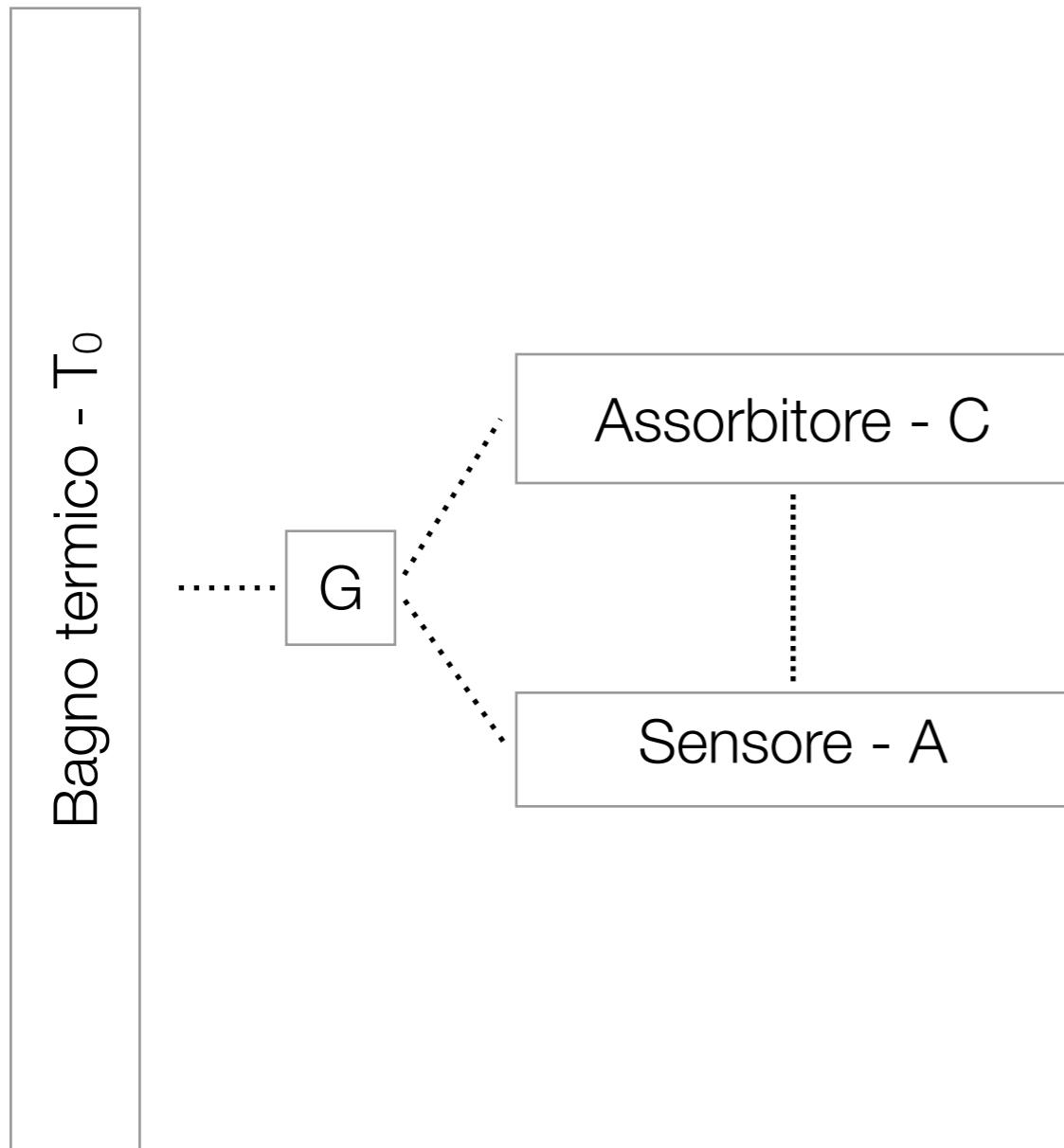


Una particella interagisce nell'assorbitore, rilasciando tutta la sua energia E attraverso i meccanismi classici di interazione radiazione-materia.

Tutta l'energia depositata si converte istantaneamente in calore e la temperatura dell'assorbitore aumenta di una quantità $T = E/C$

Principi di funzionamento

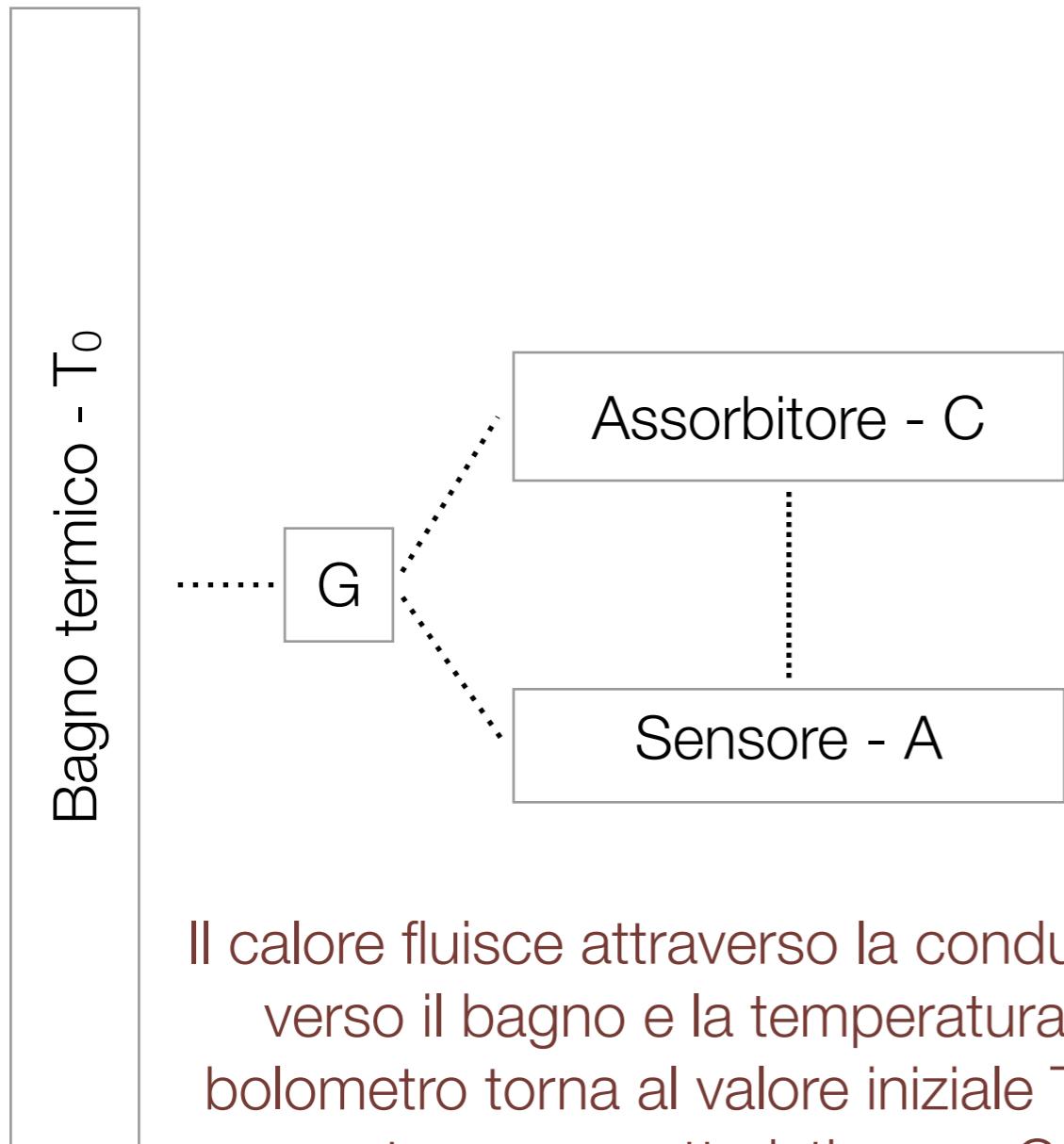
Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata



La temperatura del sensore, fortemente accoppiato all'assorbitore, aumenta della stessa quantità, producendo una variazione misurabile delle sue proprietà (elettriche, magnetiche...)

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata



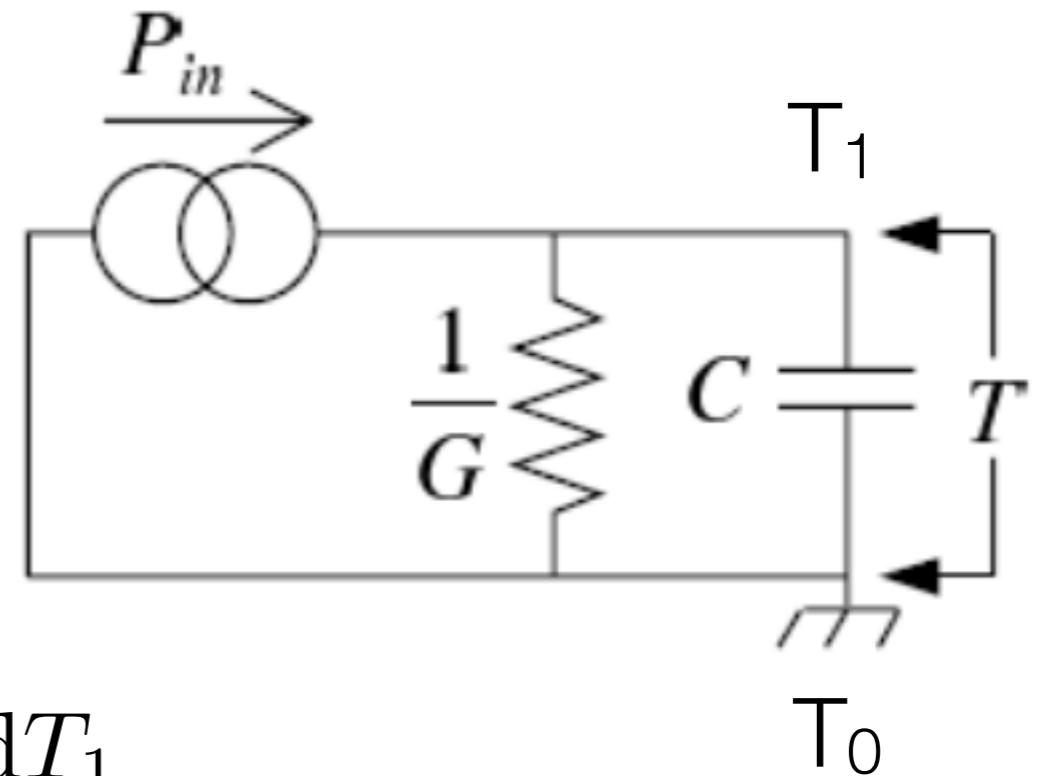
Il calore fluisce attraverso la conduttanza
verso il bagno e la temperatura del
bolometro torna al valore iniziale T_0 con
un tempo caratteristico $\tau = C/G$

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata

Circuito elettrico equivalente:

- $1/G$ = resistenza
- C = capacità
- temperatura = differenza di potenziale
- potenza termica (flusso di calore) = corrente



$$P_{in} = \delta(t)E = G(T_1 - T_0) + C \frac{dT_1}{dt}$$

$$T_1 = \frac{E}{C} e^{-\frac{t}{\tau}} + T_0 \quad \text{con} \quad \tau = C/G$$

Praticamente è la (s)carica di un condensatore!

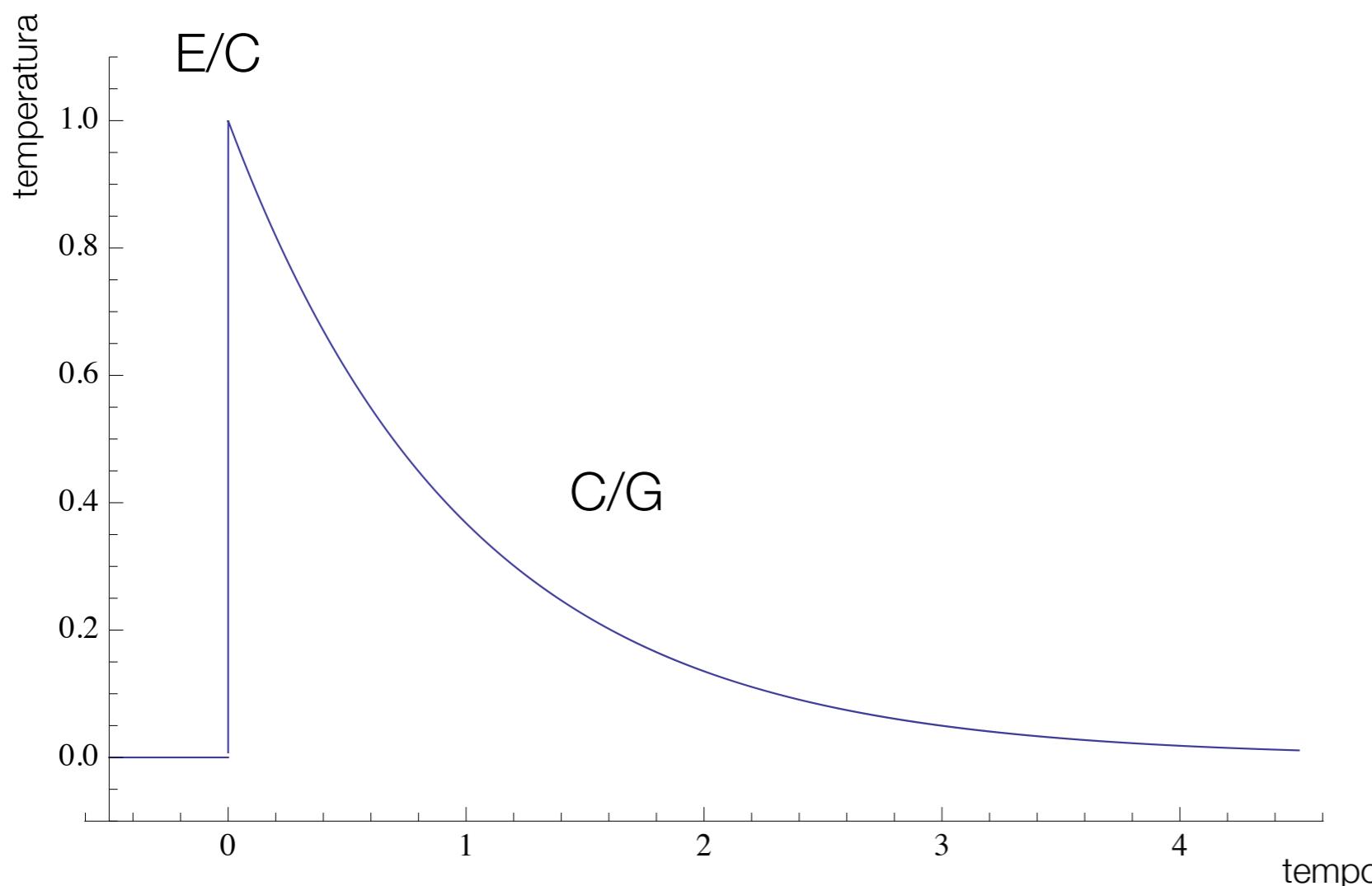
Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione molto semplificata

$$\Delta T = \frac{E}{C} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

con

$$\tau = C/G$$

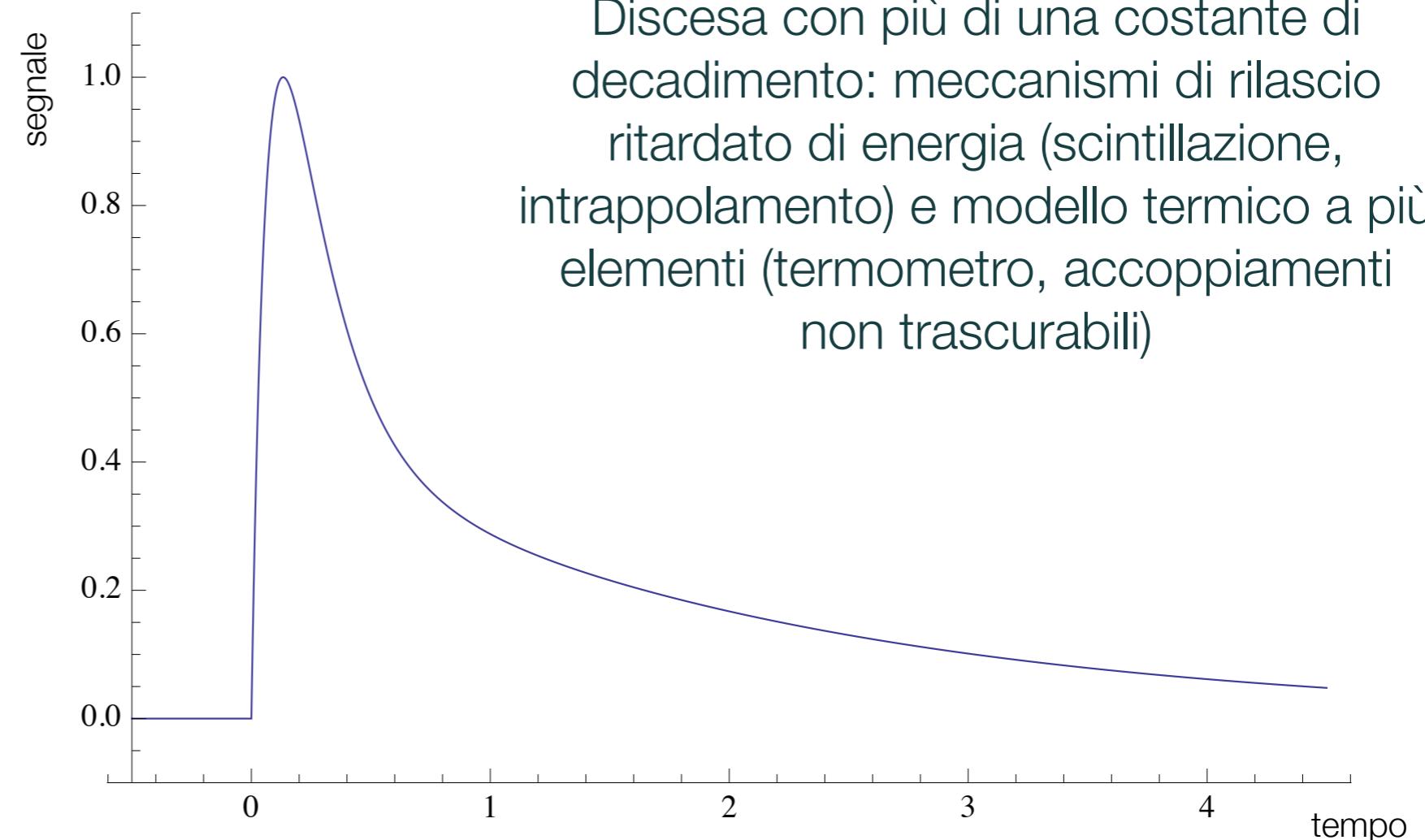


- ampiezza inversamente proporzionale a C
- lunghezza direttamente proporzionale a C e inversamente proporzionale a G

Principi di funzionamento

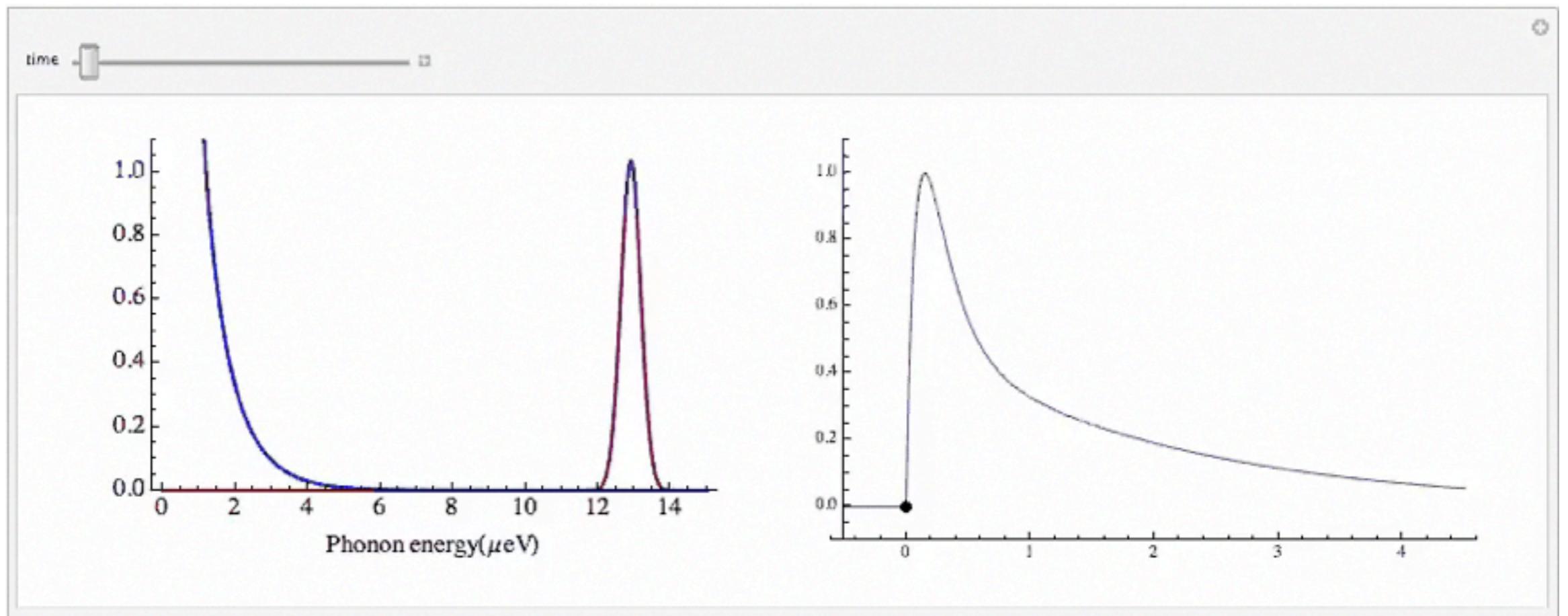
Evoluzione del segnale in un bolometro: versione un po' meno semplificata (inclusa la lettura del sensore)

Salita esponenziale:
effetti elettrici (RC dei
fili, filtri) + rilascio non
istantaneo (rispetto ai
tempi caratteristici di
termalizzazione) di
tutta l'energia



Principi di funzionamento

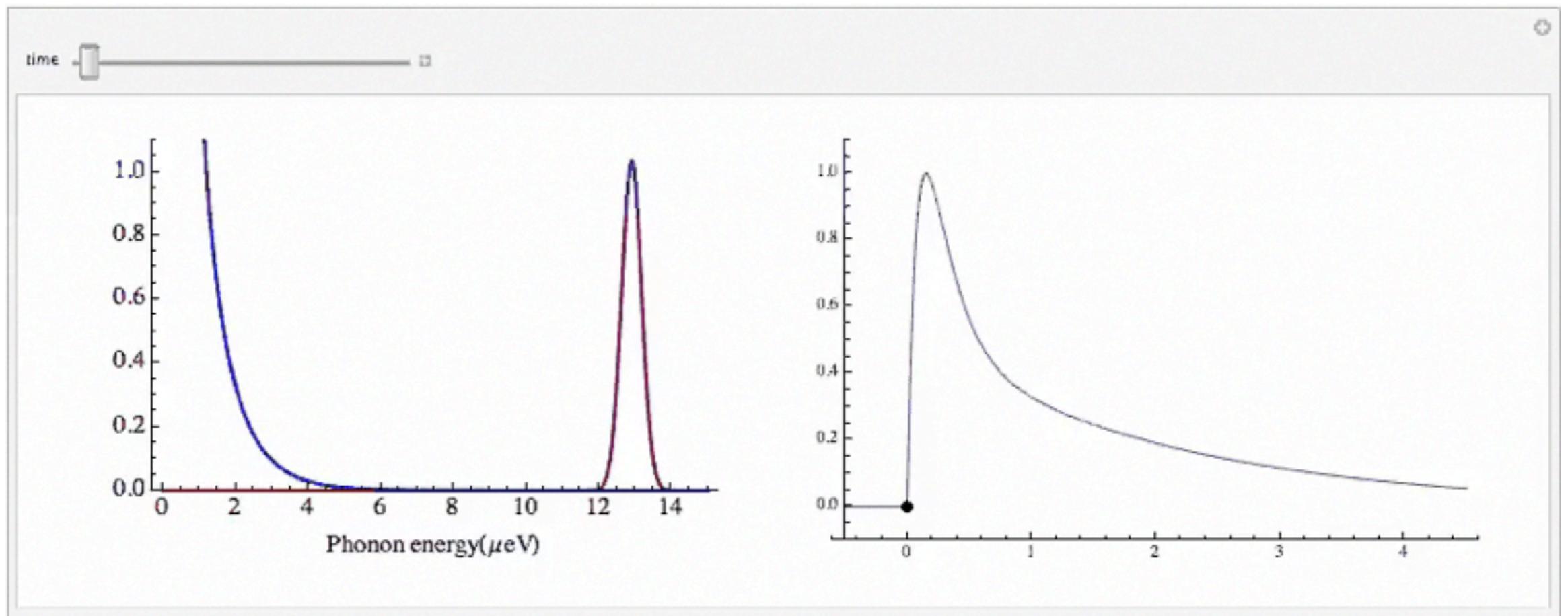
Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)



Immaginate la corda di una chitarra: vibra con delle frequenze proprie caratteristiche della geometria e del materiale di cui è composta = onde stazionarie = fononi termici. Quando viene pizzicata in un punto si generano delle onde non stazionarie che propagano lungo la corda = fononi atermici. In breve tempo l'onda non stazionaria scompare, la sua energia viene ridistribuita sui modi normali della corda e le onde stazionarie avranno un'ampiezza maggiore = tremalizzazione dei fononi.

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)



Immaginate la corda di una chitarra: vibra con delle frequenze proprie caratteristiche della geometria e del materiale di cui è composta = onde stazionarie = fononi termici. Quando viene pizzicata in un punto si generano delle onde non stazionarie che propagano lungo la corda = fononi atermici. In breve tempo l'onda non stazionaria scompare, la sua energia viene ridistribuita sui modi normali della corda e le onde stazionarie avranno un'ampiezza maggiore = tremalizzazione dei fononi.

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

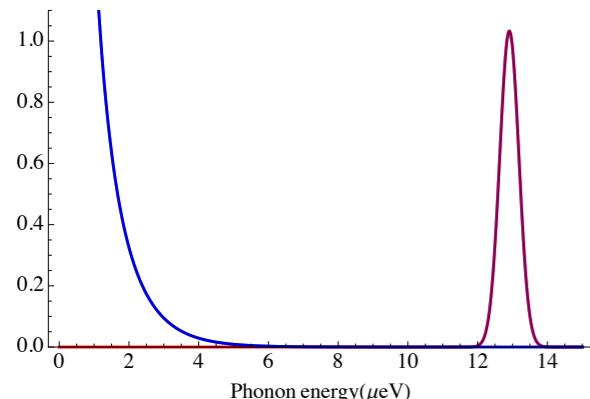
Tempo trascorso dall'interazione



Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

Tempo trascorso dall'interazione

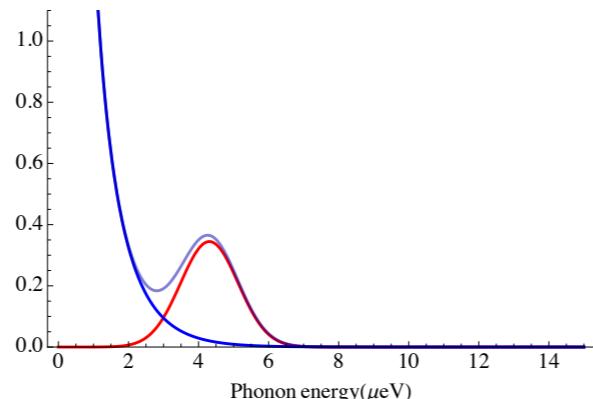
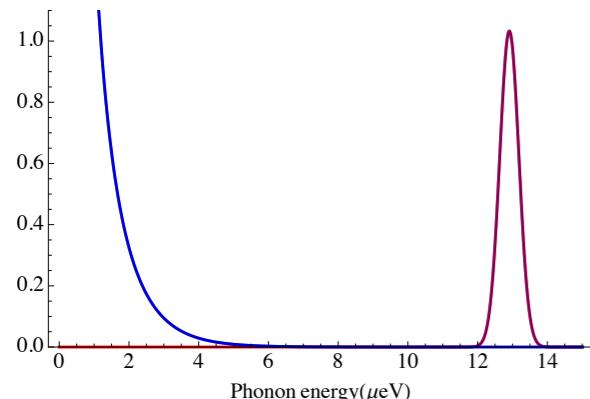


Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

Tempo trascorso dall'interazione



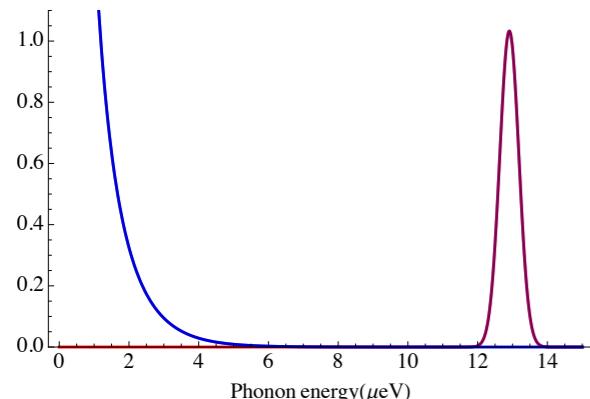
Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...

I fononi atermici propagano
nel cristallo e perdono
rapidamente energia per
scattering nel reticolo

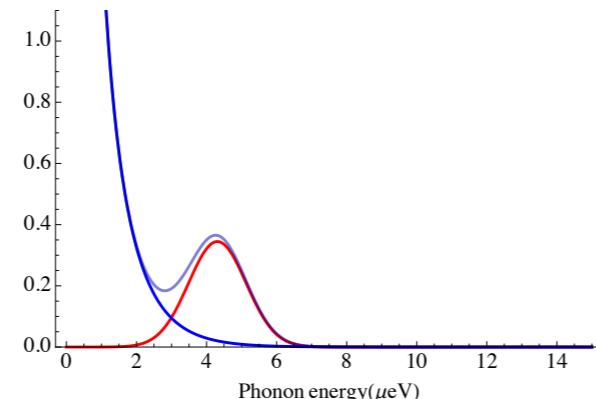
Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

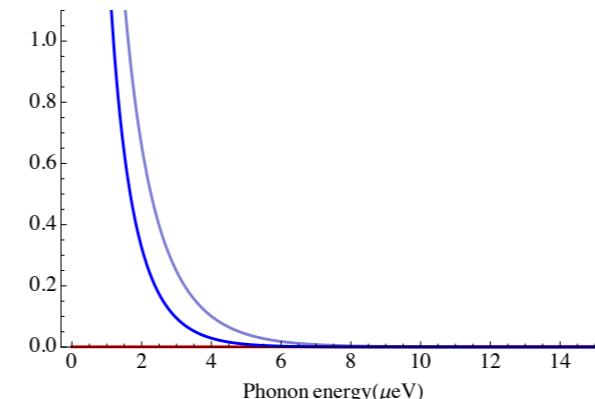
Tempo trascorso dall'interazione



Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...



I fononi atermici propagano
nel cristallo e perdono
rapidamente energia per
scattering nel reticolo

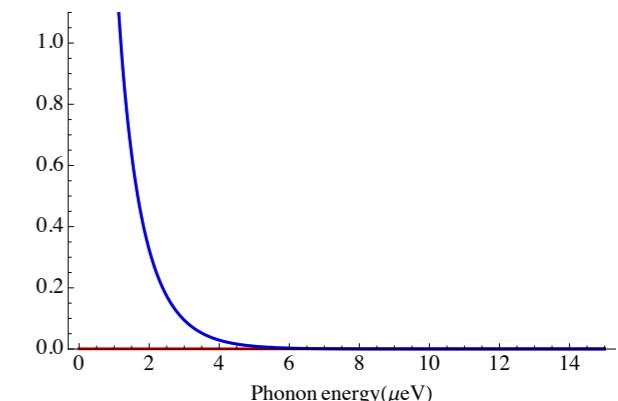
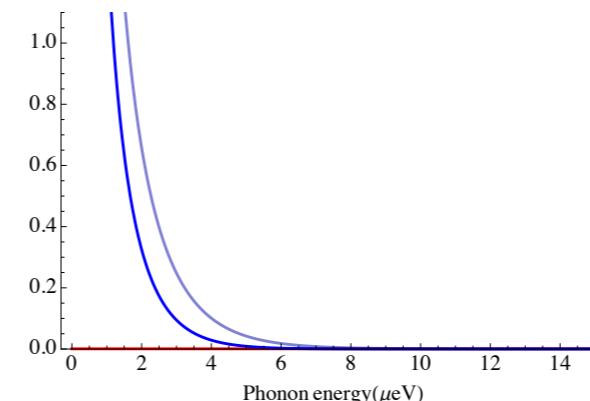
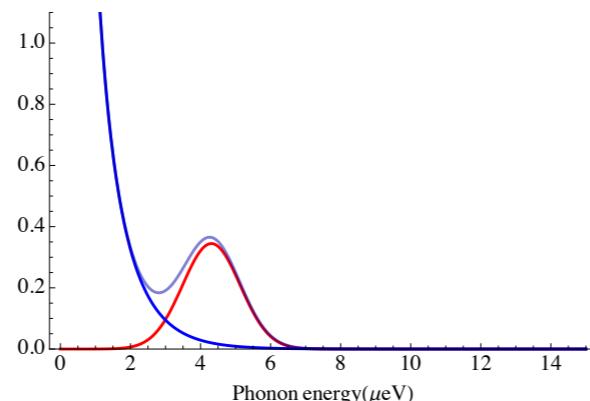
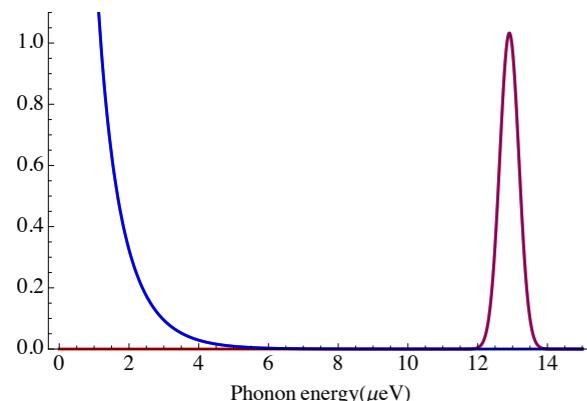


Quando tutti i fononi si sono
termalizzati il cristallo è a una
temperatura più alta $T_1 > T_0$
(spettro blu più scuro). Solo
informazioni sull'energia

Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

Tempo trascorso dall'interazione



Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...

I fononi atermici propagano
nel cristallo e perdono
rapidamente energia per
scattering nel reticolo

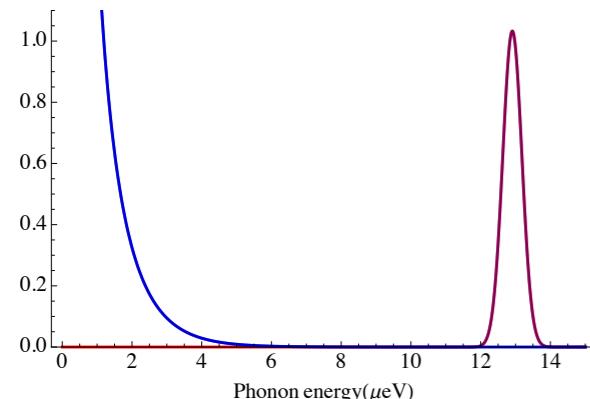
Quando tutti i fononi si sono
termalizzati il cristallo è a una
temperatura più alta $T_1 > T_0$
(spettro blu più scuro). Solo
informazioni sull'energia

L'energia in eccesso fluisce
attraverso la conduttanza G
e lo spettro di fononi torna
alla condizione iniziale

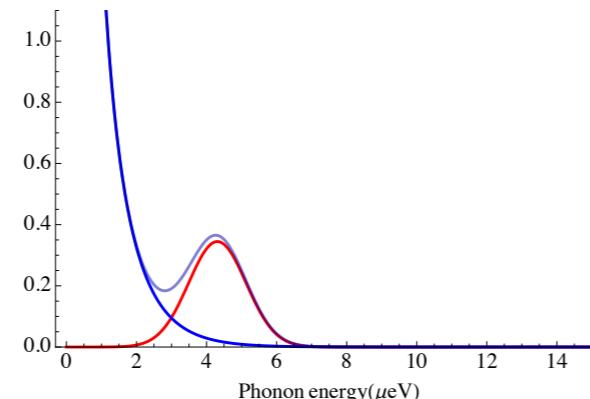
Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

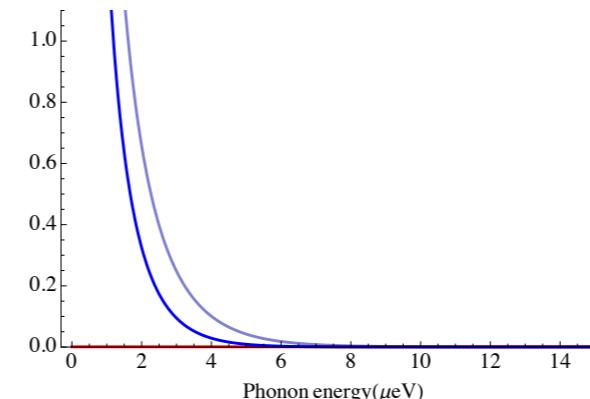
Tempo trascorso dall'interazione



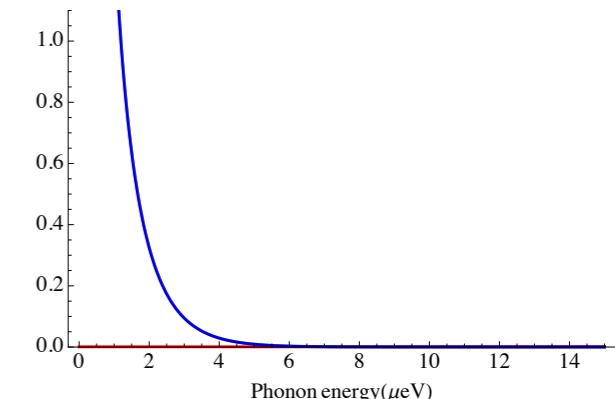
Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...



I fononi atermici propagano
nel cristallo e perdono
rapidamente energia per
scattering nel reticolo



Quando tutti i fononi si sono
termalizzati il cristallo è a una
temperatura più alta $T_1 > T_0$
(spettro blu più scuro). Solo
informazioni sull'energia



L'energia in eccesso fluisce
attraverso la conduttanza G
e lo spettro di fononi torna
alla condizione iniziale

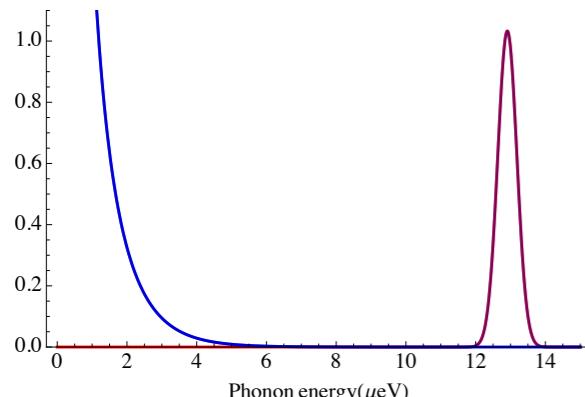
$\tau \ll \mu s$

- tipo di radiazione
- posizione
- energia (bassa risoluzione)

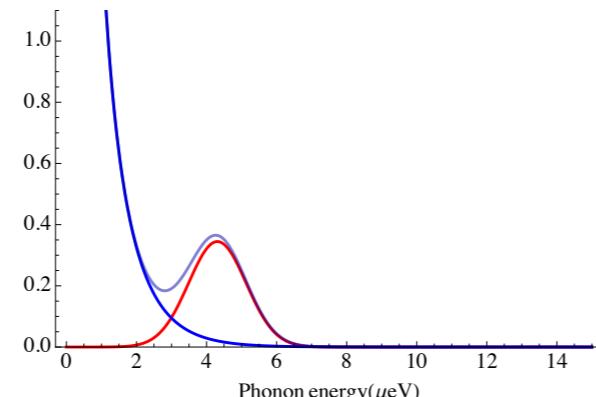
Principi di funzionamento

Evoluzione del segnale in un bolometro: versione ancora meno semplificata (evoluzione temporale dello spettro di fononi)

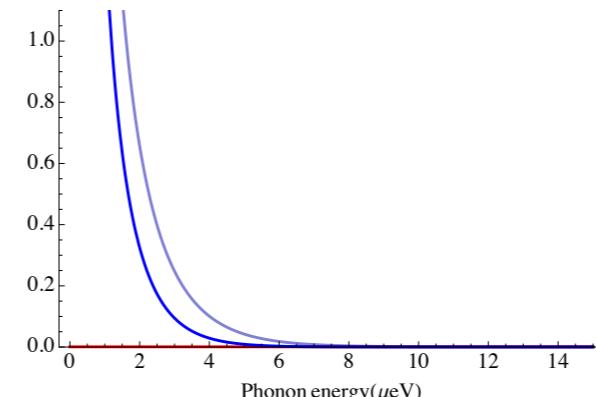
Tempo trascorso dall'interazione



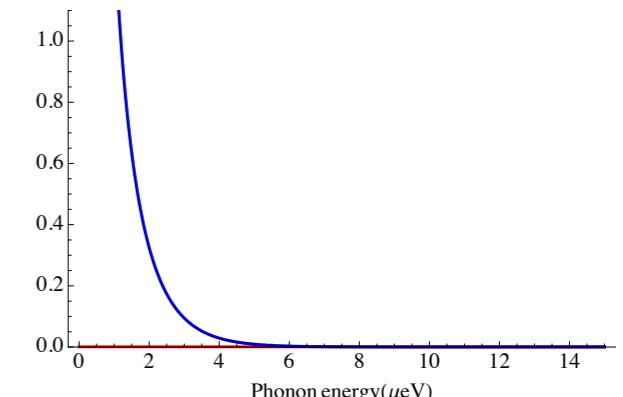
Blu: spettro termico T_0
Rosso: fononi atermici (fuori
equilibrio) prodotti
dall'interazione. La forma
porta informazioni sul tipo di
particella, posizione, etc...



I fononi atermici propagano
nel cristallo e perdono
rapidamente energia per
scattering nel reticolo



Quando tutti i fononi si sono
termalizzati il cristallo è a una
temperatura più alta $T_1 > T_0$
(spettro blu più scuro). Solo
informazioni sull'energia



L'energia in eccesso fluisce
attraverso la conduttanza G
e lo spettro di fononi torna
alla condizione iniziale

$\tau \ll \mu s$

- tipo di radiazione
- posizione
- energia (bassa risoluzione)

$\mu s < \tau < s$

- energia (alta risoluzione)
- tipo di particella (in presenza di fenomeni a vita lunga)

Risoluzione energetica

I bolometri hanno in genere risoluzioni energetiche molto buone. Nei bolometri i portatori di informazione sono i **fononi = quanti del campo vibrazionale del reticolo cristallino**.

L'energia di un portatore di informazione è dell'ordine di:

- scintillatori ~100eV
- gas ~ 30eV
- semiconduttori ~ 3eV
- bolometri ~ $k_B T \sim 1\mu eV$ @ 10mK (il famoso 1/40eV a $T_{amb}...$)

Quindi i portatori di informazione in un bolometro sono enormemente meno energetici, e quindi enormemente più numerosi, ma...

Risoluzione energetica

Un bolometro non è mai “vuoto”, ma a qualunque temperatura T_0 avviene uno scambio di fononi tra l’assorbitore e il bagno termico. Il numero di fononi nell’assorbitore all’equilibrio è, per un cristallo di TeO_2 da 750g ($C(10\text{mK}) \sim 2\text{e-}9\text{J/K}$)

$$N \sim C(T)/k_B \sim 7\text{e+}13 @ 10\text{mK}$$

La risoluzione è data dalla fluttuazione di questo numero (>> del numero di fononi prodotti in un’interazione $\sim 1\text{e+}12$ fononi per MeV).

Quindi:

$$\Delta E = \Delta N \langle E \rangle = \Delta N k_B T = \sqrt{C(T)/k_B} k_B T = \sqrt{k_B C(T) T^2} \sim 10\text{eV}$$

La risoluzione energetica:

- non dipende dall’energia (costituiscono un’eccezione alla “regola”)
- dipende linearmente dalla capacità termica
- dipende più che quadraticamente dalla temperatura

Risoluzione energetica

Bolometri di CUORE: cristalli di TeO₂, 750g, 10mK:

$$\Delta E @ 2615\text{MeV} \sim 5\text{keV} (\Delta E_{\text{noise}} \sim 500\text{eV})$$

$$\Delta E/E \sim \text{sqrt}(E)$$

I conti non tornano; i bolometri reali sono sistemi molto più complessi di quello descritto fin qui, alle cui prestazioni contribuiscono molti fattori, tra cui i più importanti sono:

- meccanismi di intrappolamento o perdita di energia (scintillazione, cherenkov, imperfezioni reticolari, effetti di superficie)
- conversione di fononi atermici in elementi diversi dell'assorbitore (sensore, interfacce)
- capacità e conduttanze termiche parassite
- rumore microfonico dovuto alle alte impedenze (solo ST - vedi “sensore”)
- forti non-linearità (TES - vedi “sensore”)

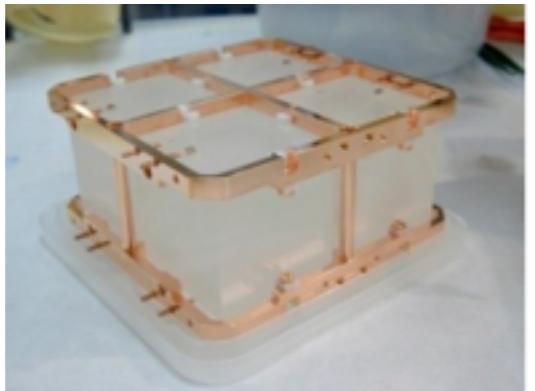
L'assorbitore

E' l'elemento del bolometro:

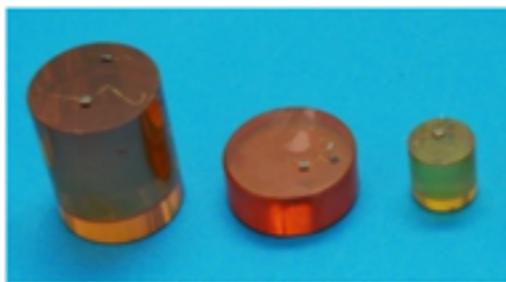
- strettamente legato alla fisica che si vuole studiare:
 - posso scegliere il materiale in base alle particelle che voglio rivelare
 - posso scegliere un materiale che sia anche la sorgente della radiazione che voglio misurare
 - posso scegliere materiali con proprietà particolari (scintillatori, liquidi, semiconduttori - vedi più avanti)
- in cui interagisce la radiazione, depositando energia e modificando lo spettro dei fononi
- macro ($O(g, cm)$) vs. micro ($O(mg, 100\mu)$)
- può contenere il sensore al suo interno (rivelatori monolitici) o essere accoppiato ad esso mediante un'interfaccia (rivelatori compositi)
- deve sempre avere una **capacità termica molto piccola**
- deve possibilmente essere un cristallo di buona qualità e purezza

L'assorbitore

Decadimento
doppio beta:
CUORE,
Lucifer



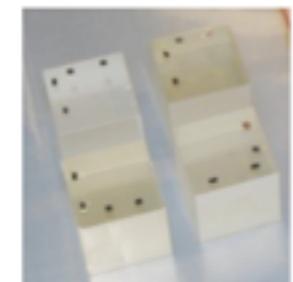
TeO_2



ZnSe

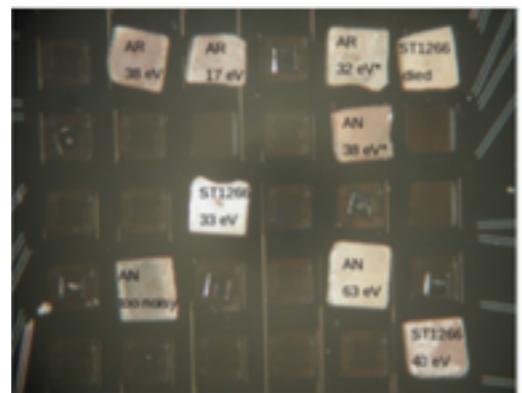


CaMoO_4



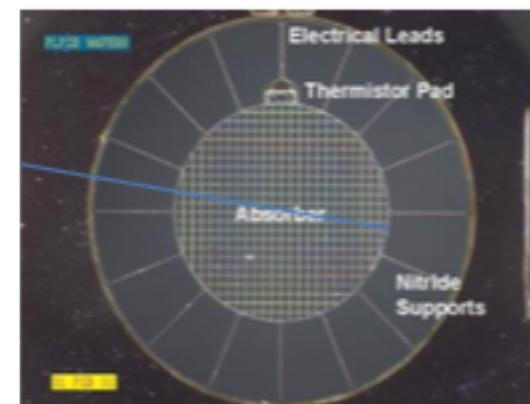
CdWO_4

Decadimento
beta singolo:
MARE

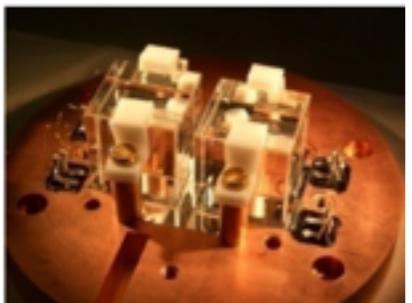


AgReO_4

CMB:
BOOMERanG



BGO - ^{209}Bi



Eventi
rari

Dark
Matter



Ge

CRESST



CaWO_4

Edelweiss



Ge

CDMS



Ge

L'assorbitore

La capacità termica dell'assorbitore deve essere minimizzata per:

- ottenere variazioni di temperatura misurabili ($\Delta T = E/C$)
- ottenere ottime risoluzioni energetiche ($\Delta E_{\text{intrinseca}} = \sqrt{k_B C(T) T^2}$)

$$C(T) = c_{\text{tot}}(T) M \text{ (calore specifico, massa dell'assorbitore)}$$

$$c_{\text{tot}}(T) = c_r(T) + c_e(T) + c_m(T) \text{ (reticolare, elettronico, magnetico)}$$

Cristalli dielettrici e diamagnetici: solo contributo reticolare

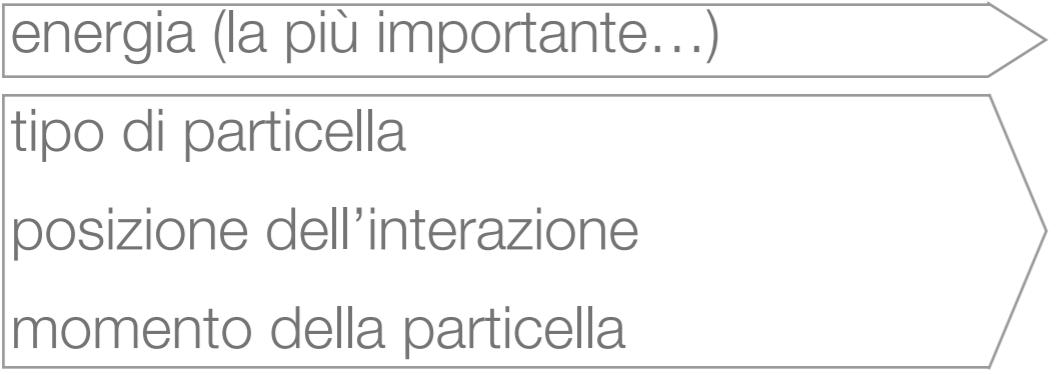
$$c_{\text{tot}}(T) = c_r(T) \sim (T/T_{\text{Debye}})^3 \quad \text{per} \quad T \ll T_{\text{Debye}}$$

Cristalli dielettrici e diamagnetici sono la scelta ottimale come assorbitori, soprattutto per macrobolometri (M grande). In generale la capacità termica dei materiali decresce con la temperatura, quindi i bolometri funzionano a $T \ll 1K$.

In realtà, scherzando (ma non troppo), si dice che, purchè la temperatura sia abbastanza bassa, più o meno qualunque cosa funziona da bolometro...

Il sensore

Il sensore è la parte del bolometro che genera un segnale elettrico che possa essere processato da una catena elettronica per estrarre le informazioni sulle grandezze fisiche che si vogliono misurare:

- energia (la più importante...) 
 - tipo di particella
 - posizione dell'interazione
 - momento della particella
- tutti i sensori = termometri
- sensori sensibili a fononi atermici = rivelatori di fononi

In generale un sensore è un oggetto le cui proprietà elettriche (resistenza, induttanza, suscettività magnetica) dipendono dalla temperatura (termometro) o vengono modificate dall'interazione di fononi atermici (rivelatore di fononi). I più utilizzati sono:

- **Semiconductor Thermistors**
- **Transition Edge Sensors**
- **Microwave Kinetic Inductance Detectors**
- **Magnetic Micro Calorimeters**
- **Superconductive Tunnel Junctions**

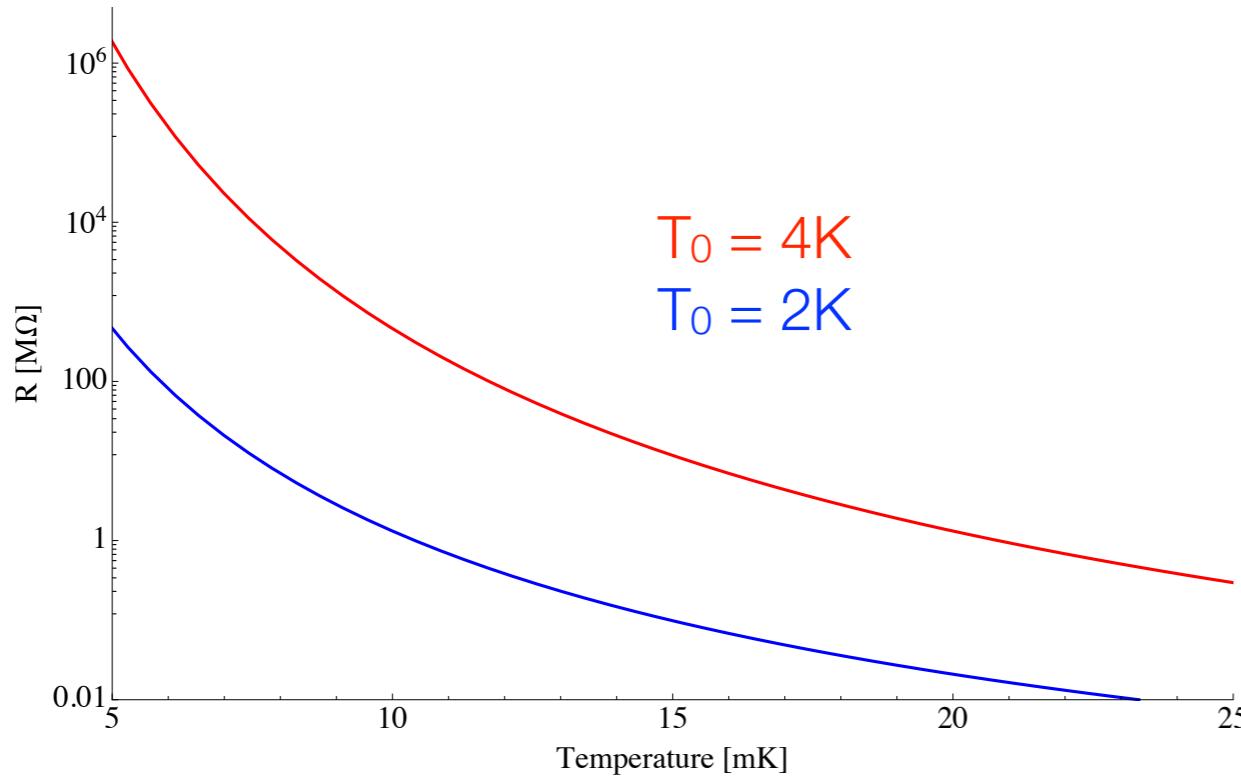
Il sensore

Semiconductor Thermistors

Sono piccoli chip di Si o Ge. Opportunamente drogati a cavallo della MIT (Metal-Insulator Transition) hanno una resistività che, a basse temperature (<<10K) dipende fortemente dalla temperatura:

$$\rho = \rho_0 \exp(T_0/T)^{1/2}$$

ρ_0 e T_0 sono parameteri che dipendono dal livello di droggaggio e determinano la temperatura a cui devono lavorare i termistori.



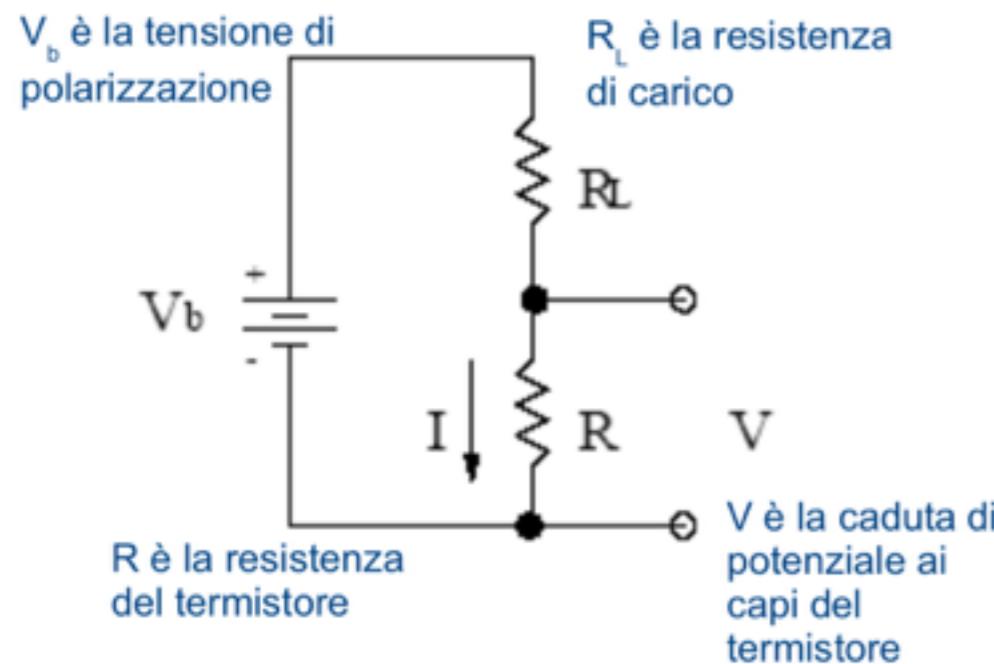
Sensibilità logaritmica:

$$A = \left| \frac{d\log(R(T))}{d\log(T)} \right| \sim 1 - 10$$

Il sensore

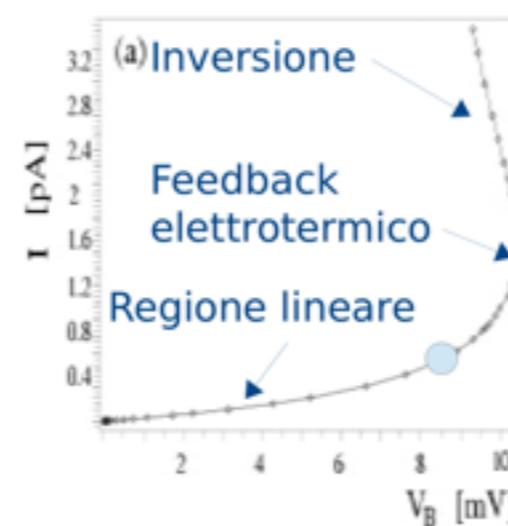
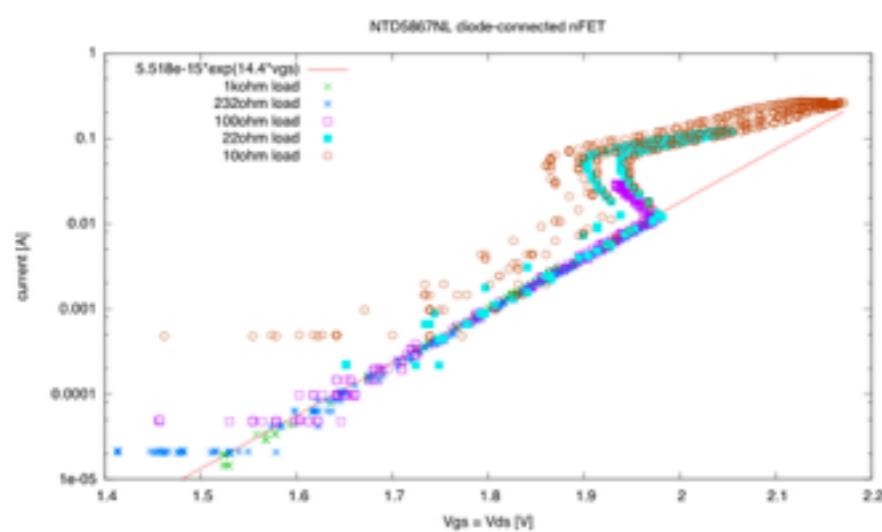
Semiconductor Thermistors

Per misurare la resistenza (e quindi la temperatura) si utilizza un circuito di polarizzazione:



Per $R_L \gg R$, la corrente che scorre attraverso il termistore è costante e la caduta di potenziale su di esso dipende dalla sua resistenza.

La corrente di polarizzazione rilascia potenza per effetto Joule sul termistore, riscaldandolo. Per caratterizzare il termistore si usano le **curve di carico**.



Feedback elettrotermico:

- prima dell'inversione la I_{bias} aumentando fa aumentare la V_{bol}
- dopo l'inversione, aumentando la I_{bias} si riduce la R_{bol} più in fretta di quanto aumenti la V_{bol}

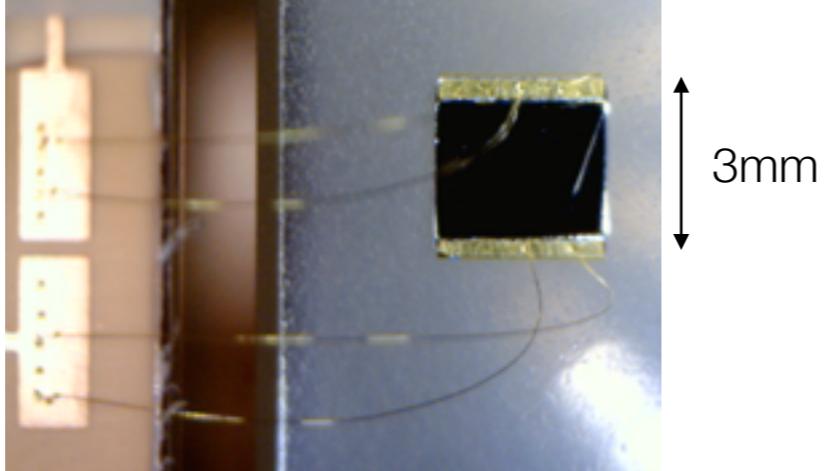
Dipende anche dall'accoppiamento del termistore col bagno...

Il sensore

Semiconductor Thermistors

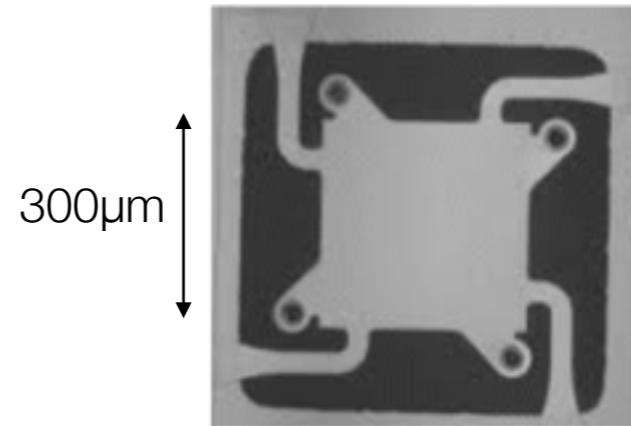
Ge - Neutron Transmutation Doping

- doping per trasmutazione neutronica, uniforme e controllabile con grande precisione
- tecnica non standard
- solo geometrie semplici
- piccola capacità termica perché si parte da cristalli intrinseci



Si

- doping per impiantazione
- tecnologia standard dell'industria microelettronica
- sensibilità logaritmica in genere inferiore
- adatti per microbolometri
- possibilità di ottenere geometrie anche molto complesse



Pro:

- semplice utilizzo (possono essere incollati all'assorbitore)
- alta impedenza: lettura con elettronica standard
- grande range dinamico, non linearità contenute
- insensibili a fononi atermici, ottima risoluzione

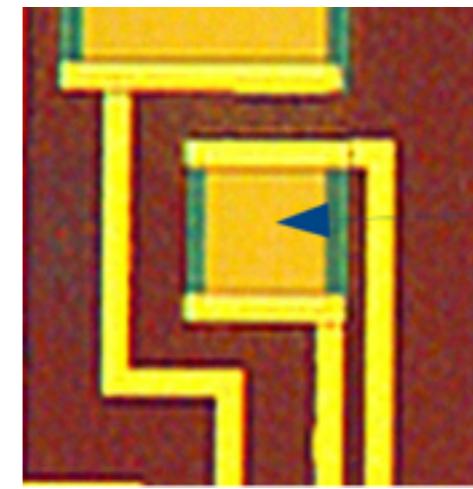
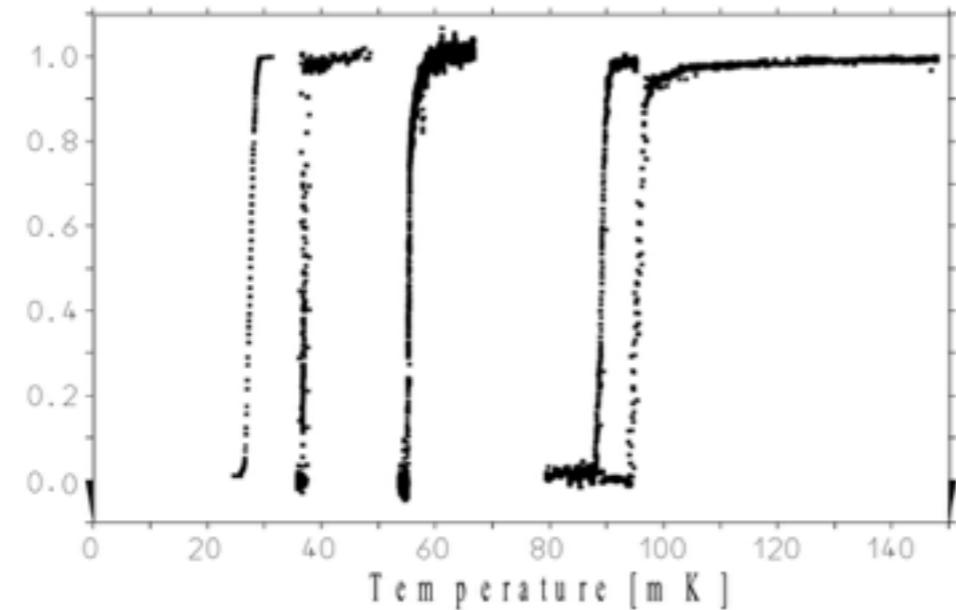
Contro:

- alta impedenza: molto sensibili a microfonismo e vibrazioni meccaniche
- limitata sensibilità
- volume non trascurabile, rischio di interazioni el sensore

Il sensore

Transition Edge Sensors

- film superconduttivo ($O(100\text{nm})$) mantenuto alla temperatura di transizione T_c
- intorno alla transizione la dipendenza della resistenza dalla temperatura è fortissima



pro:

- sensibilità logaritmica $A \sim 1000$, molto maggiore dei ST
- film depositato direttamente sull'assorbitore o su un phonon-collector superconduttivo, sensibile ai fononi atermici
- risposta molto più veloce dei ST

contro:

- costruzione complicata e difficilmente riproducibile
- necessità di accoppiare diversi materiali per ottenere T_c voluta
- dinamica ridotta e forti non linearità, necessità di utilizzare un phonon collector
- bassissima impedenza, lettura con elettronica dedicata

Il sensore

Magnetic Micro Calorimeters

- sfruttano la dipendenza della magnetizzazione di un materiale paramagnetico dalla temperatura
- ampio range dinamico
- sensore = assorbitore, micro calorimetri
- complicati e necessitano di elettronica dedicata, ma ottima risoluzione

Microwave Kinetic Inductance Detectors

- risonatori RLC con induttanza superconduttriva
- la rottura di coppie di Cooper nel superconduttore da parte di fononi di alta energia o particelle ionizzanti modifica l'induttanza e quindi la frequenza di risonanza
- possibilità di leggere grandi array di rivelatori con sistemi di multiplexing
- complicati e necessitano di elettronica dedicata, sensibilità a fononi termici mai dimostrata

Superconductive Tunnel Junctions

- film superconduttrivi separati da isolante
- misurano corrente generata per effetto tunnel di quasi-particelle prodotte dalla rottura di coppie di Cooper
- sensibili solo a fononi atermici o particelle ionizzanti, sensibilità a fononi termici mai dimostrata

Il bagno termico

Abbiamo visto quali sono i motivi per cui i bolometri devono funzionare a bassa temperatura:

- capacità termica e ampiezza del segnale
- risoluzione energetica
- sensibilità A dei sensori

Le temperature di funzionamento sono tipicamente tra 100mK (microbolometri) e 5-10mK (macrobolometri).

I segnali sono dell'ordine di $10-100\mu\text{K}$, quindi la temperatura deve essere stabile a 10^{-3} o più.

Le masse da raffreddare possono essere molto grandi (tonnellate tra rivelatori e schermature) e i carichi termici importanti (migliaia di canali di elettronica).

Grandissima sfida tecnologica.

Le macchine che permettono di raggiungere queste condizioni di lavoro sono i **criostati con unità a diluizione**.

Il bagno termico

CRIOSTATO = macchina in grado di raggiungere e mantenere temperature criogeniche, ovvero molto prossime allo zero assoluto:

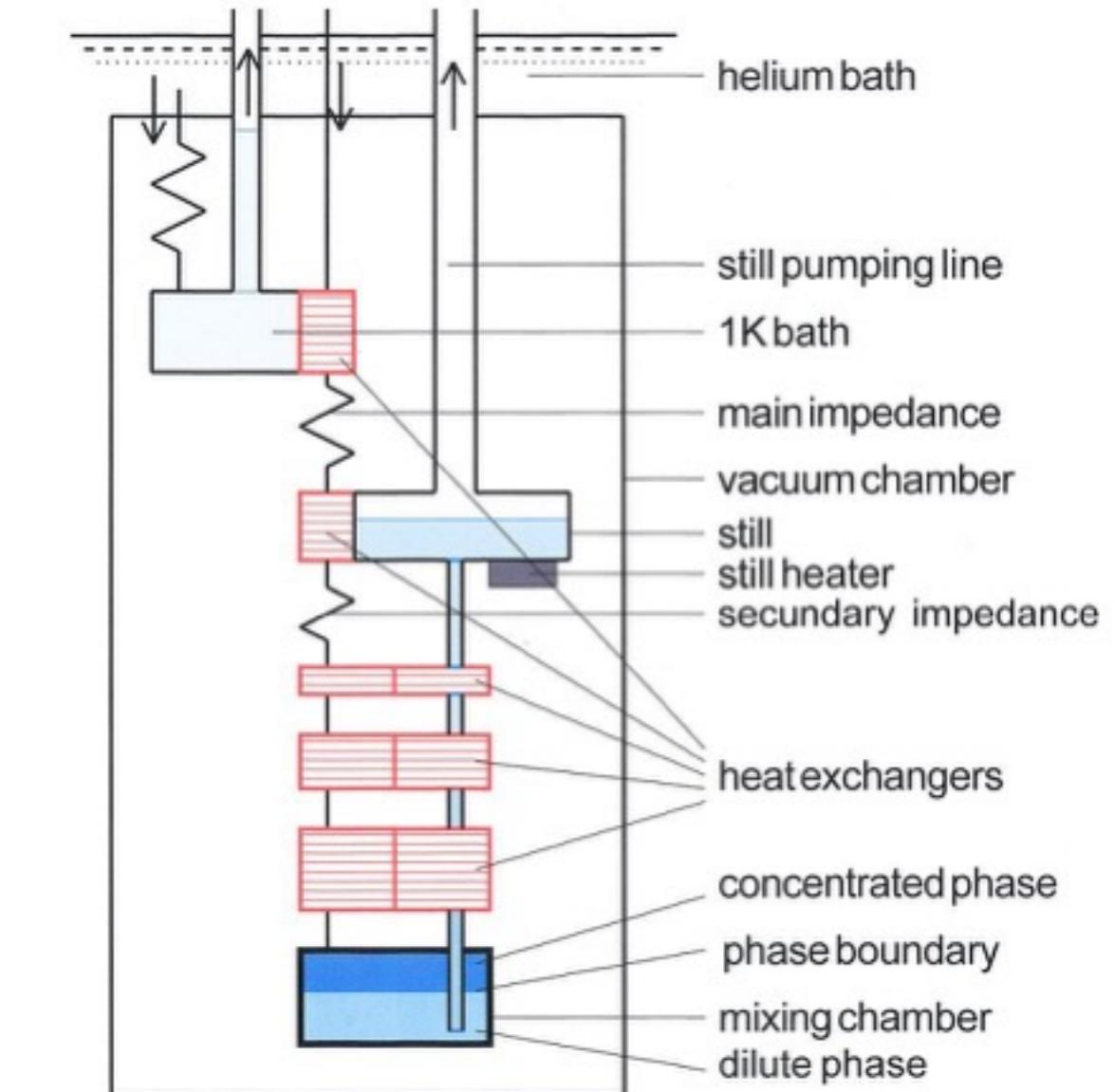
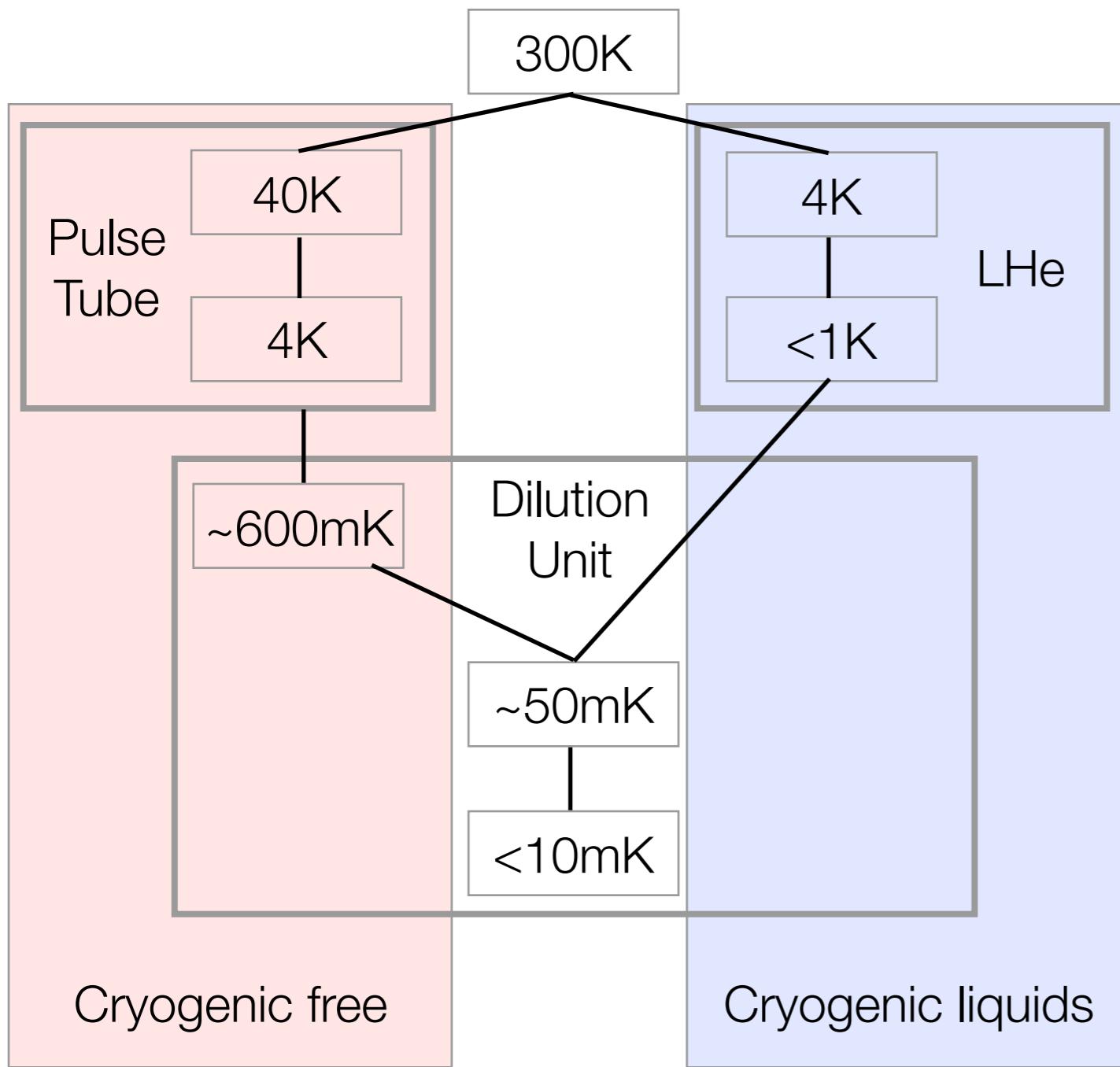
- serie di volumi definiti da schermi concentrici (struttura a cipolla);
- in ogni volume viene creato l'alto vuoto ($<10^{-6}$ mbar) per annullare conduzione e convezione;
- i diversi schermi vengono accoppiati meccanicamente con materiali a bassa conducibilità termica;
- gli schermi concentrici a temperature decrescenti servono a minimizzare l'irraggiamento (legge di Stefan-Boltzmann);
- per annullare il contributo di potenze residue servono dei sistemi che rimuovano attivamente calore dalle parti più interne del criostato

UNITA' A DILUIZIONE = è l'unico sistema attualmente in grado di generare potenza refrigerante costante a temperature dell'ordine del millikelvin:

- sfrutta un circuito chiuso in cui circola una miscela di ^3He - ^4He ;
- a temperature sufficientemente basse ($<$) la miscela si divide in due fasi (concentrata e diluita) e il passaggio di ^3He dall'una all'altra è un processo endotermico

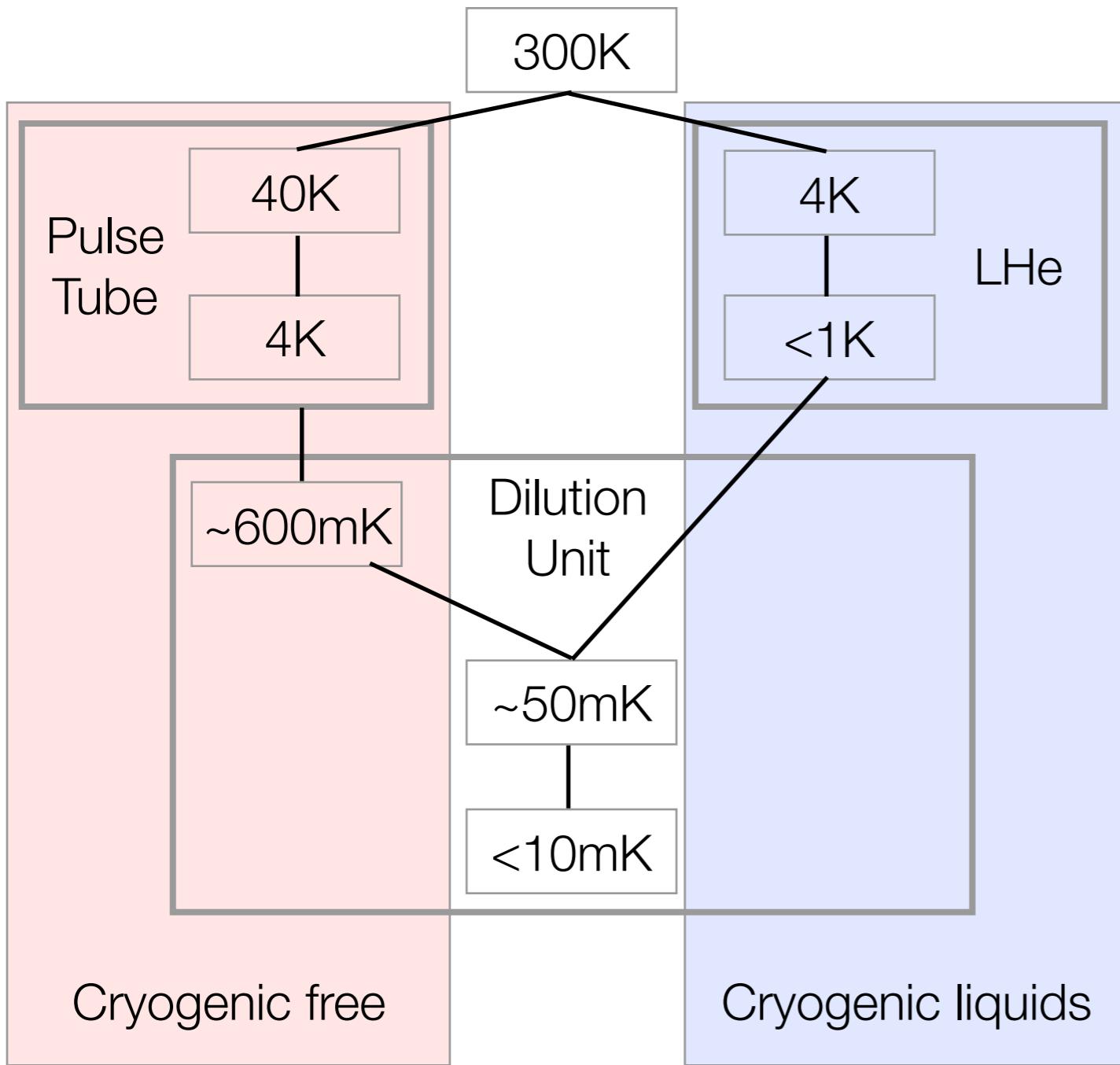
Il bagno termico

Sistema a più stadi:



Il bagno termico

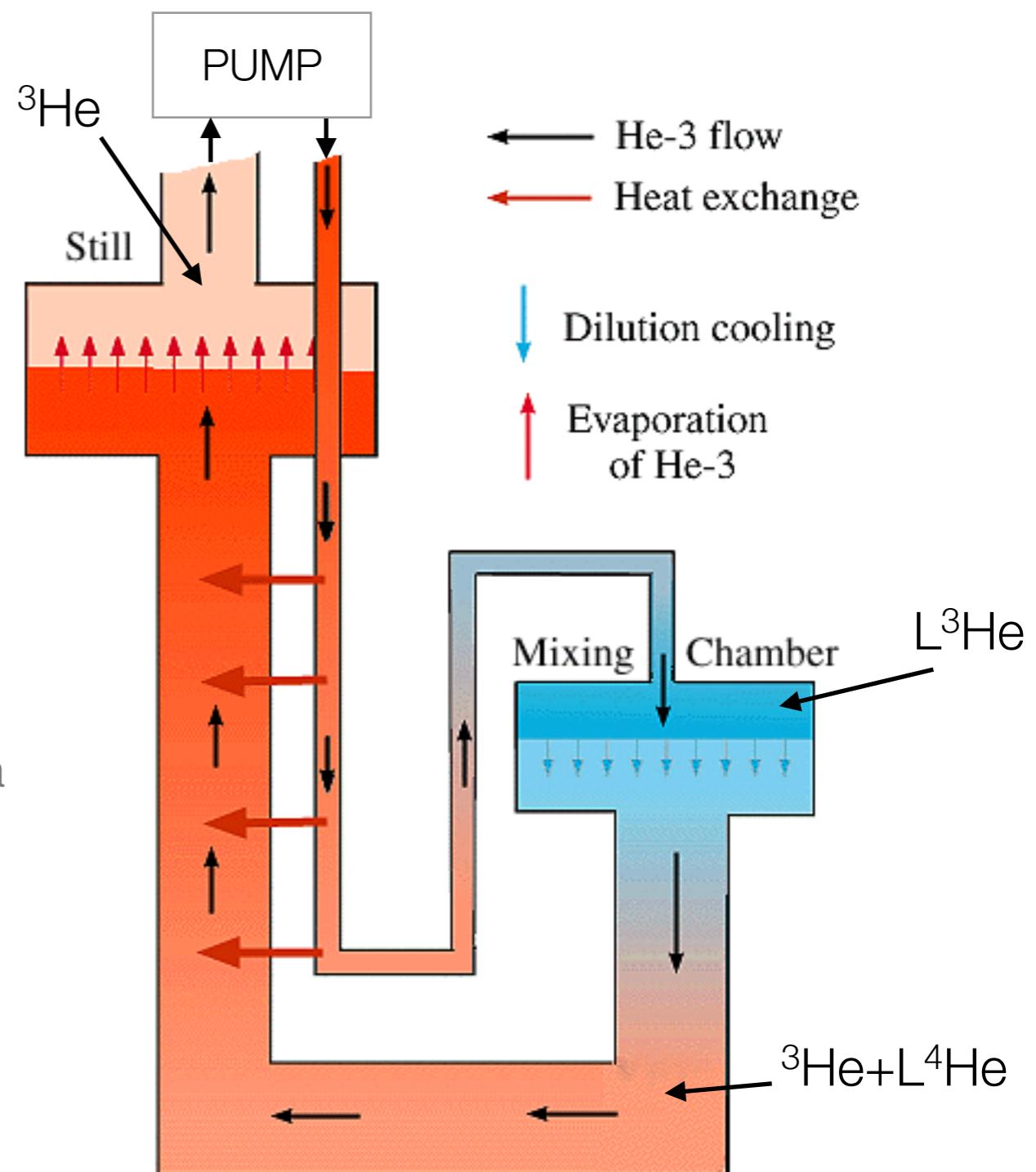
Sistema a più stadi:



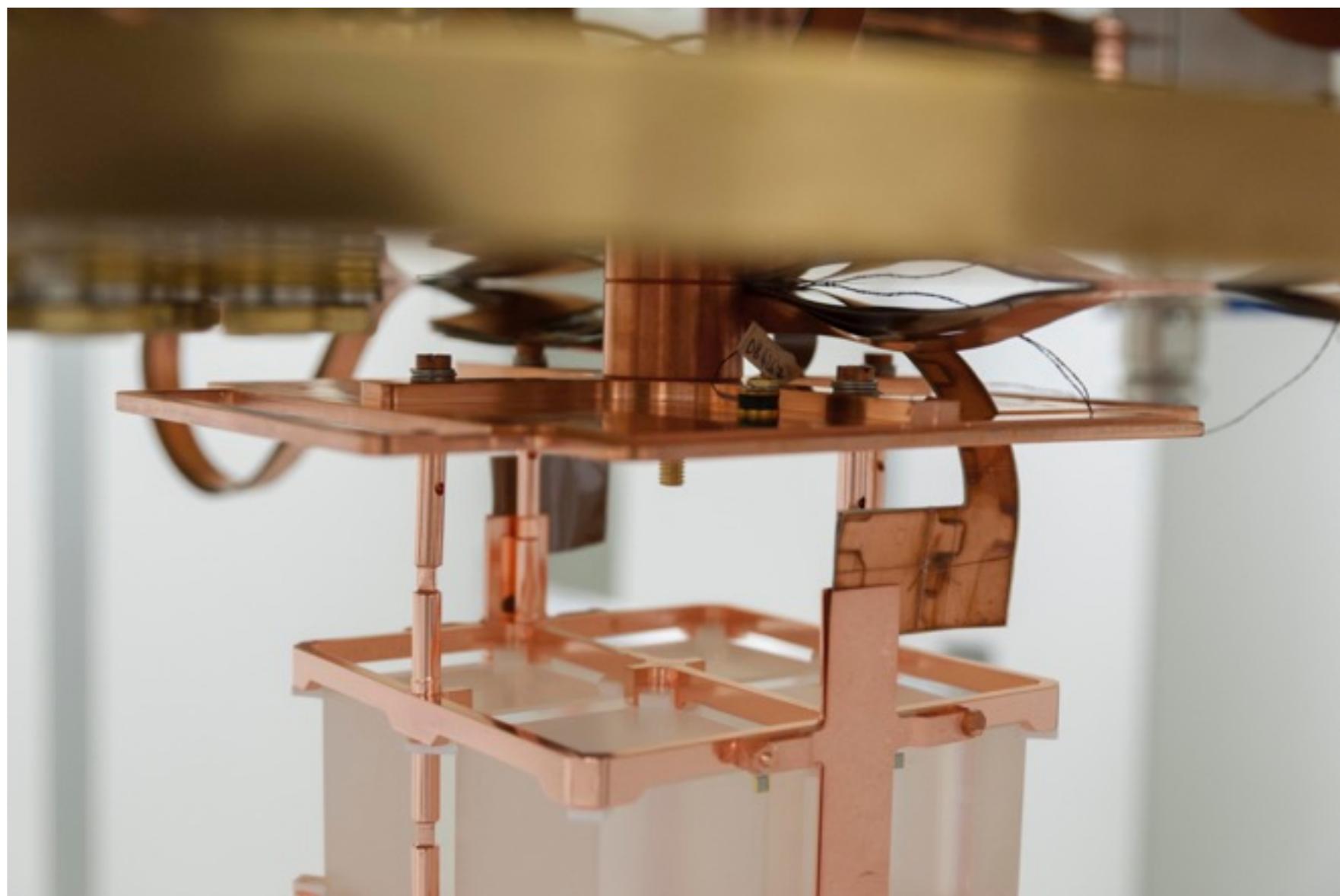
Il bagno termico

Unità a diluizione:

- miscela ^3He - ^4He , condensa e riempie il volume tra la Mixing Chamber e lo Still (fase diluita)
- nello Still ($\sim 700\text{mK}$) ^3He viene costantemente pompato via (pressione di vapore $^4\text{He} \sim 0$)
- l' ^3He viene ricondensato attraverso il Condenser e immesso nella Mixing Chamber (fase concentrata)
- l' ^3He “evapora” all’interno della fase diluita dove l' ^4He è superfluido
- il passaggio di ^3He dalla fase concentrata a quella diluita è simile all’evaporazione da fase liquida a fase gassosa ==> calore latente ==> potenza refrigerante
- funziona solo con miscela ^3He - ^4He perché ^3He è l’unico gas la cui frazione a 0K è non nulla

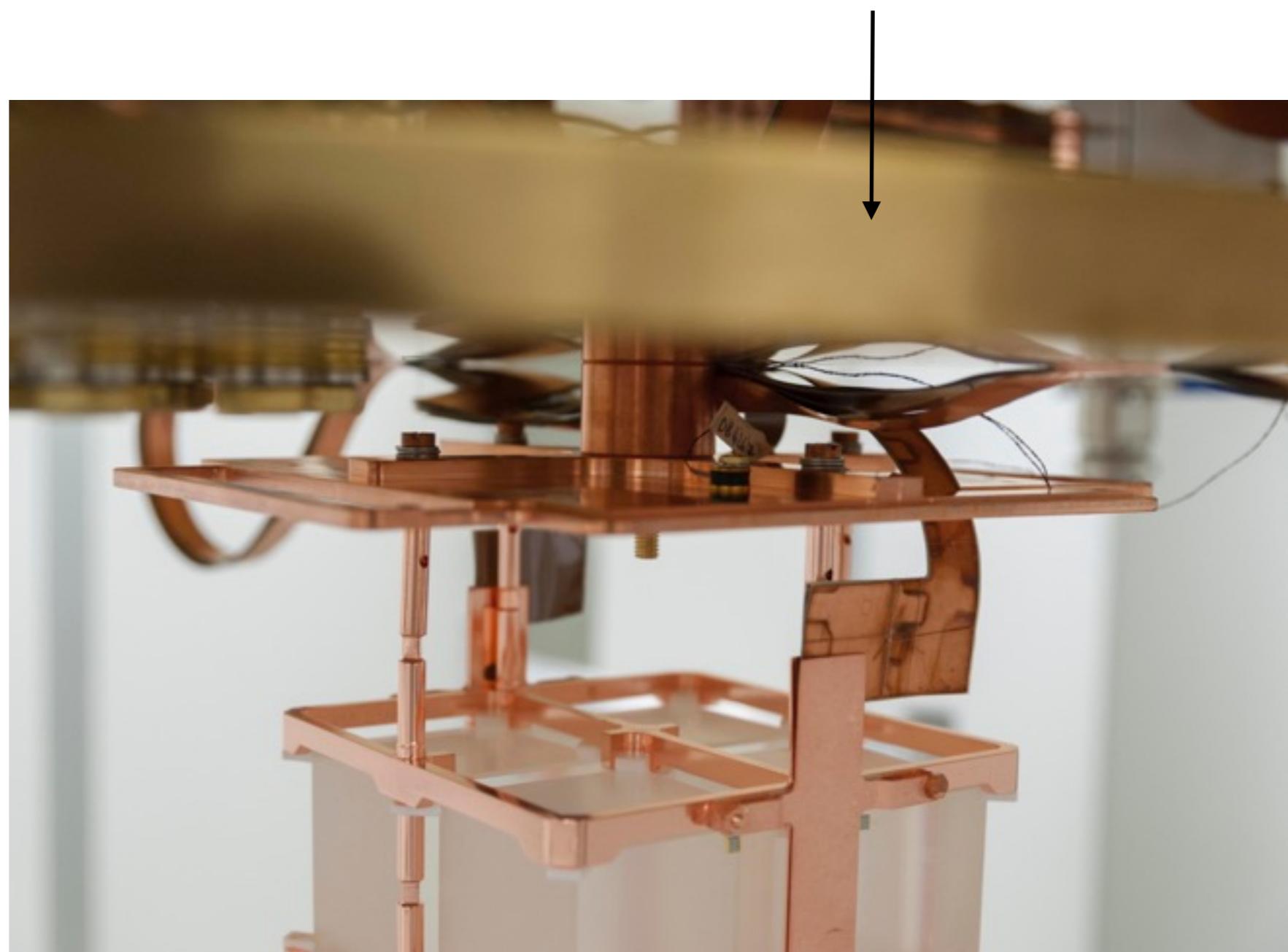


Il bagno termico



Il bagno termico

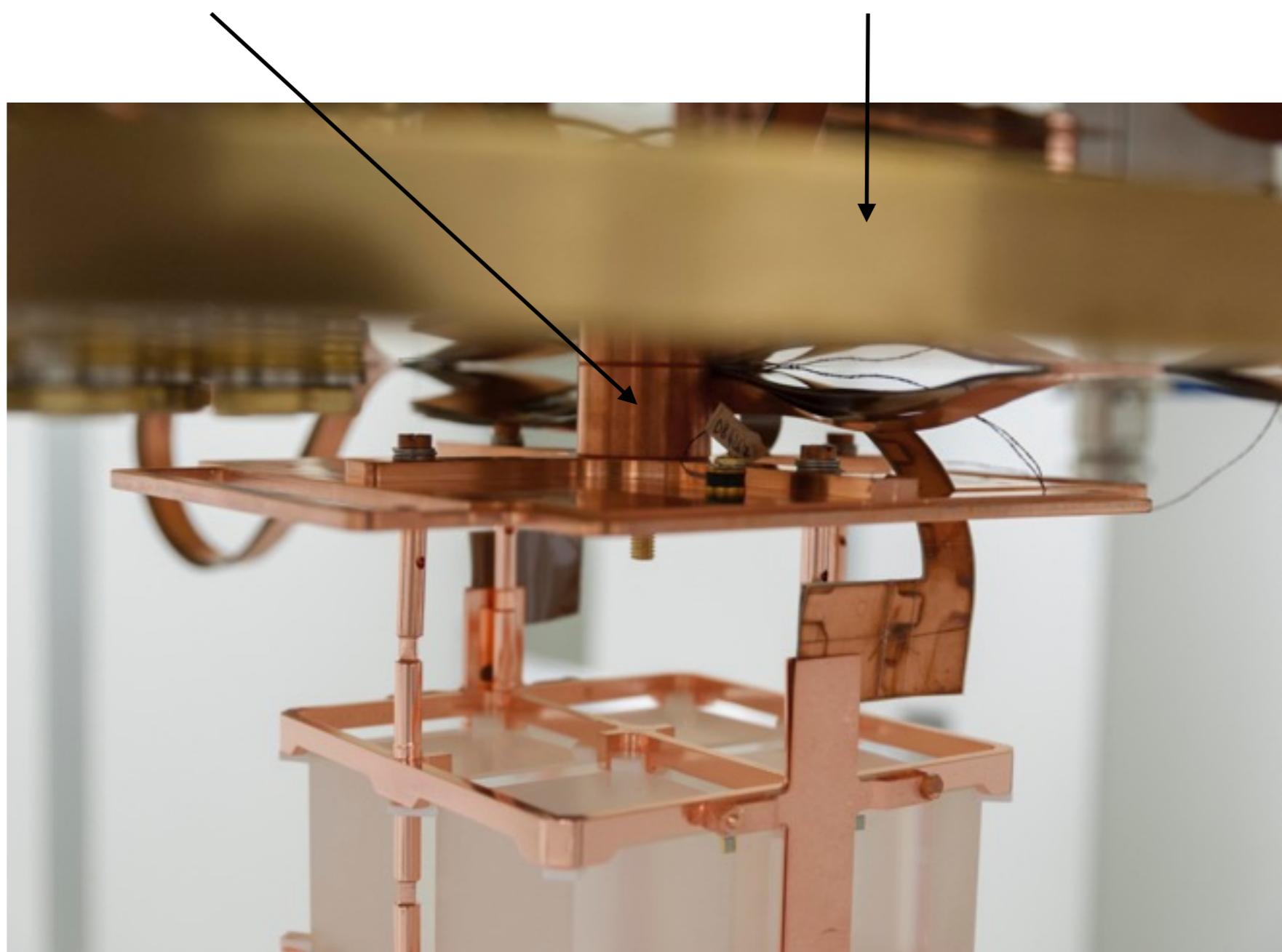
Punto più freddo del criostato
(piatto della Mixing Chamber)



Il bagno termico

Massima conduttanza tra MC
e strutture del rivelatore

Punto più freddo del criostato
(piatto della Mixing Chamber)

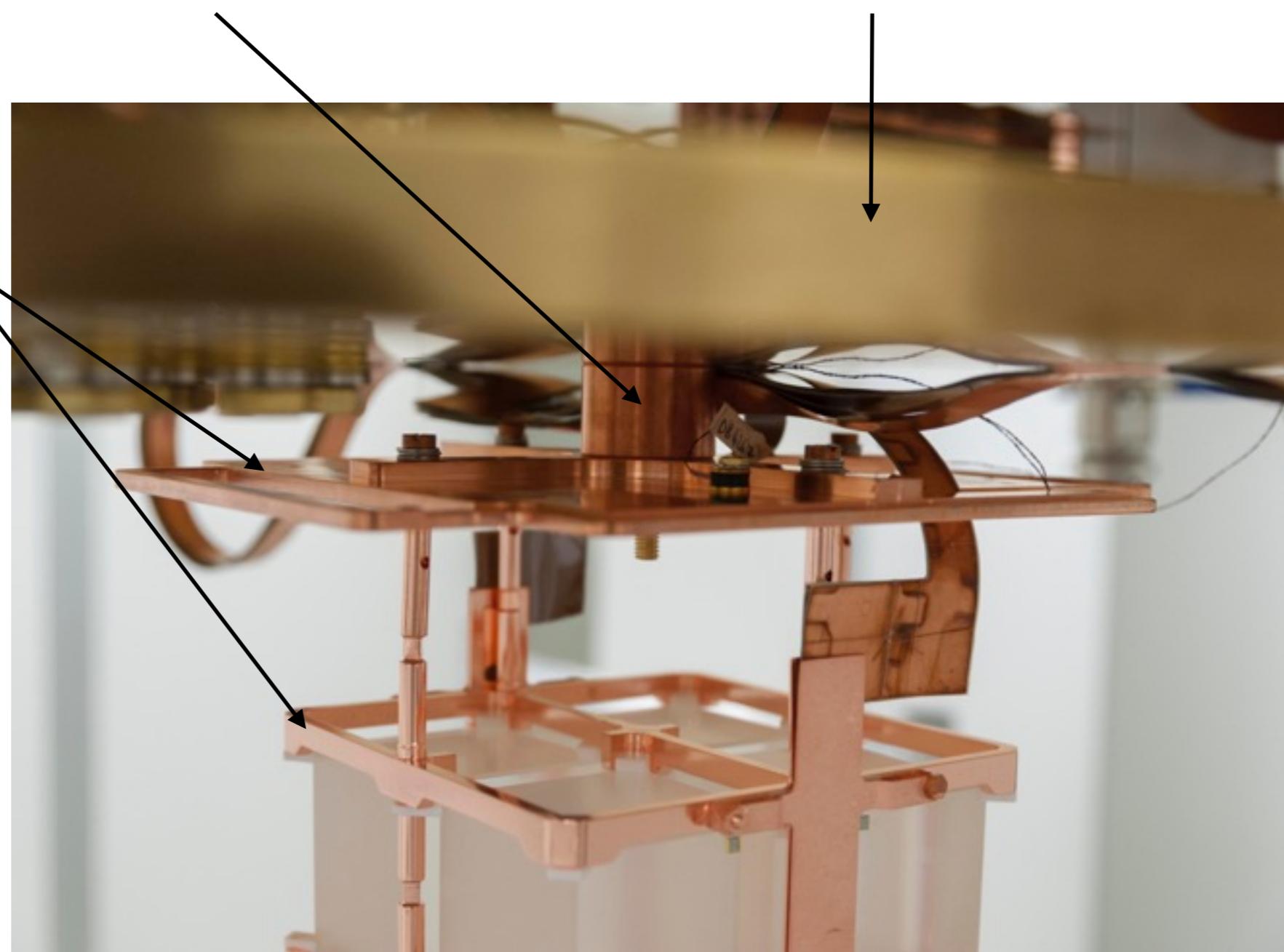


Il bagno termico

Massima conduttanza tra MC
e strutture del rivelatore

Struttura del rivelatore ad alta
conduttività (rame): supporto
meccanico e bagno termico

Punto più freddo del criostato
(piatto della Mixing Chamber)



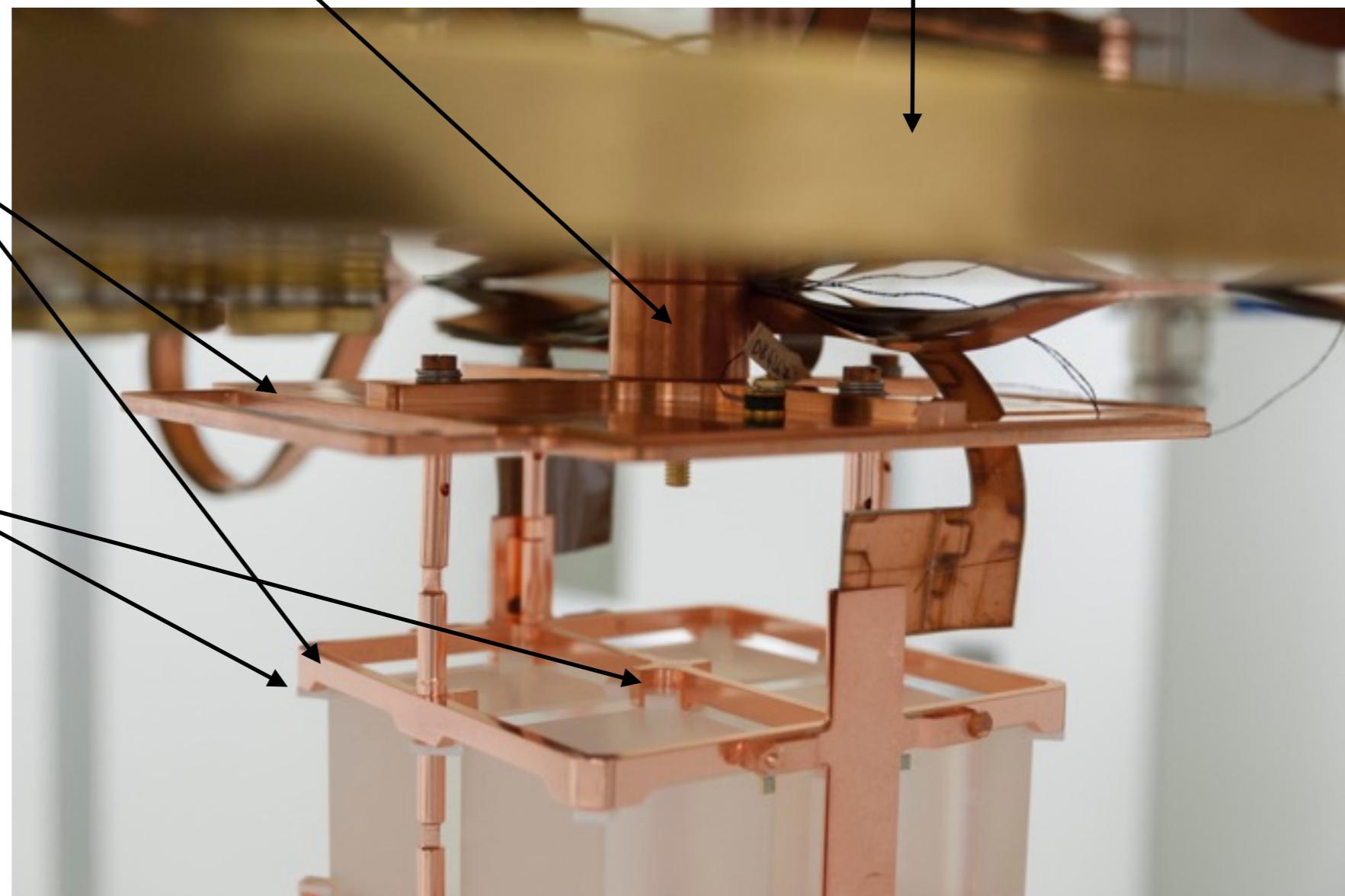
Il bagno termico

Massima conduttanza tra MC
e strutture del rivelatore

Struttura del rivelatore ad alta
conduttività (rame): supporto
meccanico e bagno termico

Conduttanze finite tra
assorbitore e bagno termico
(supporti in PTFE)

Punto più freddo del criostato
(piatto della Mixing Chamber)



Il bagno termico

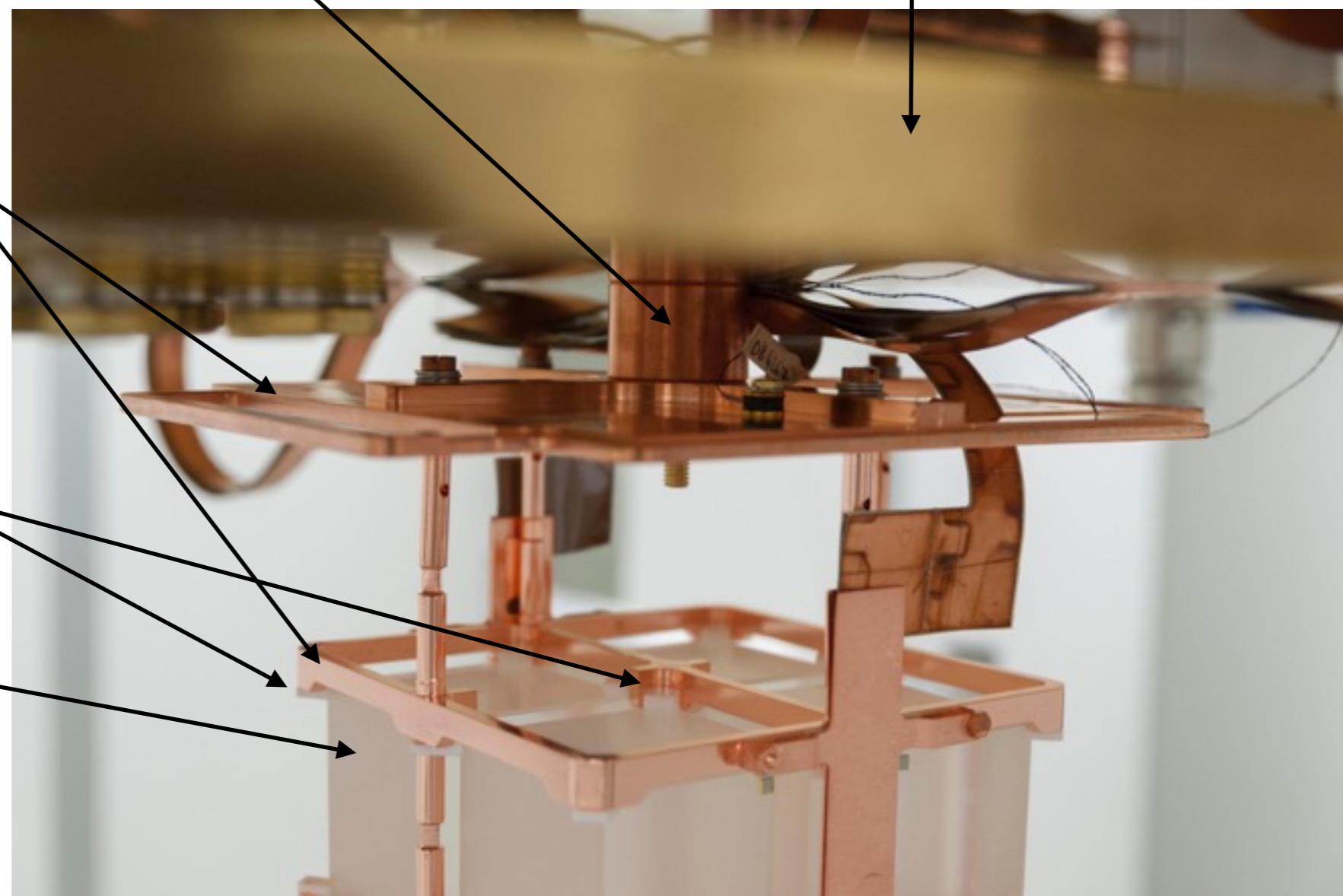
Massima conduttanza tra MC
e strutture del rivelatore

Struttura del rivelatore ad alta
conduttività (rame): supporto
meccanico e bagno termico

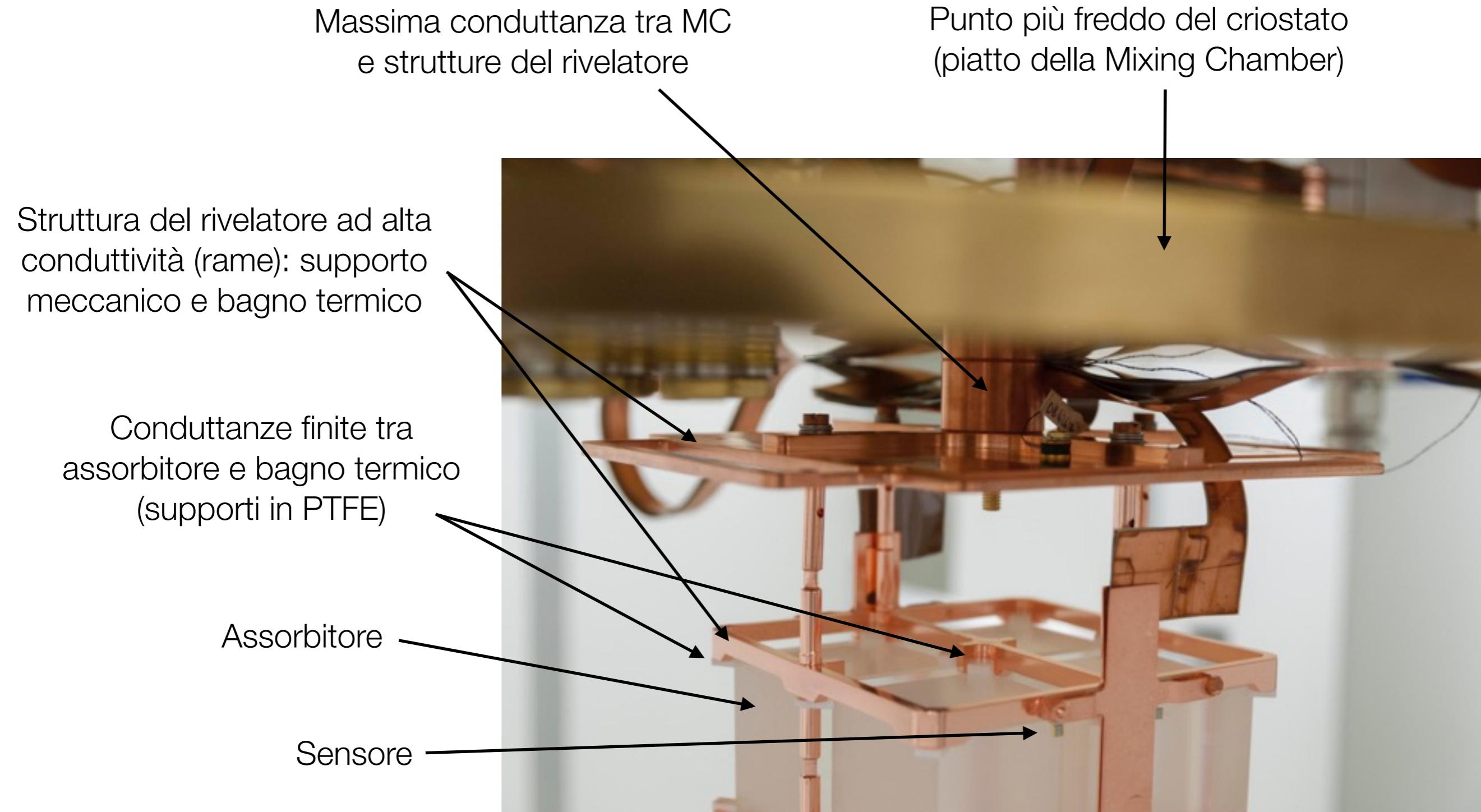
Conduttanze finite tra
assorbitore e bagno termico
(supporti in PTFE)

Assorbitore

Punto più freddo del criostato
(piatto della Mixing Chamber)



Il bagno termico



Confronto con altri rivelatori

PRO:

- rivelatori con la migliore risoluzione energetica (come semiconduttori o meglio)
- ampia scelta di materiali e fisica che si può studiare (particelle, nucleare, astroparticelle, astrofisica)
- ampia scelta di dimensioni e masse
- volume completamente attivo, nessuno strato morto (coincidenze, nessuna degradazione dell'energia, alta efficienza)
- informazione sul tipo di particella (a volte)
- possibilità di raggiungere i massimi livelli di radio-purezza

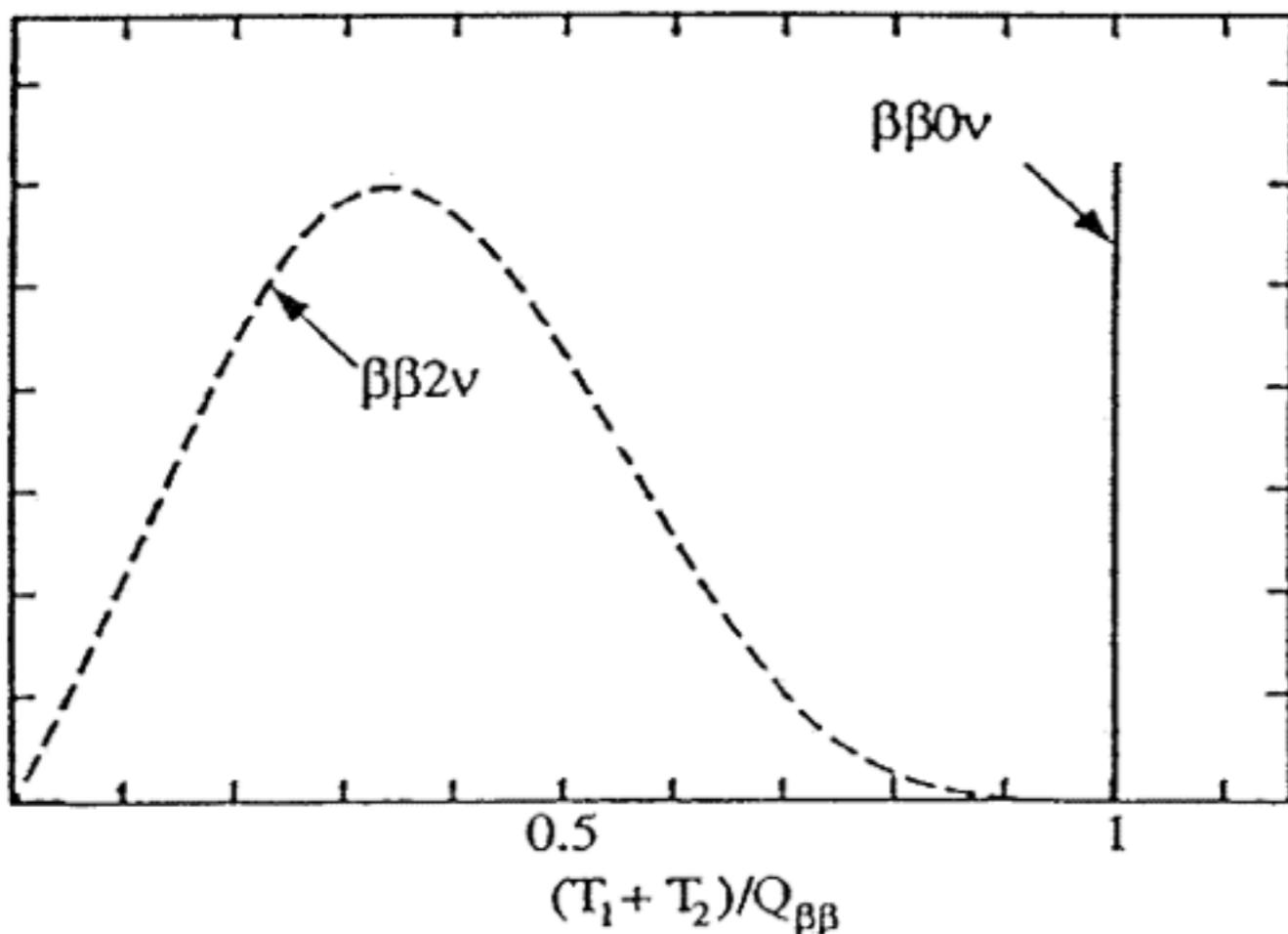
CONTRO:

- relativamente complicati da costruire (nessun processo industriale)
- decisamente complicati da far funzionare (criogenia)
- lenti O(ms-s), non radiation-hard, limitati ad ambienti a bassa attività
- volume completamente attivo, nessuno strato morto (sensibili a sorgenti di fondo)

Presente e futuro dei bolometri

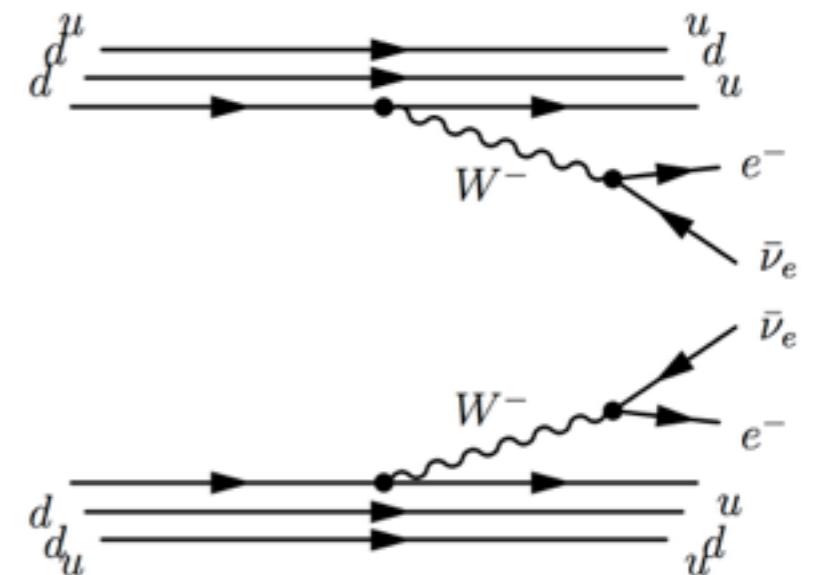
Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento doppio beta



Doppio beta senza neutrini:

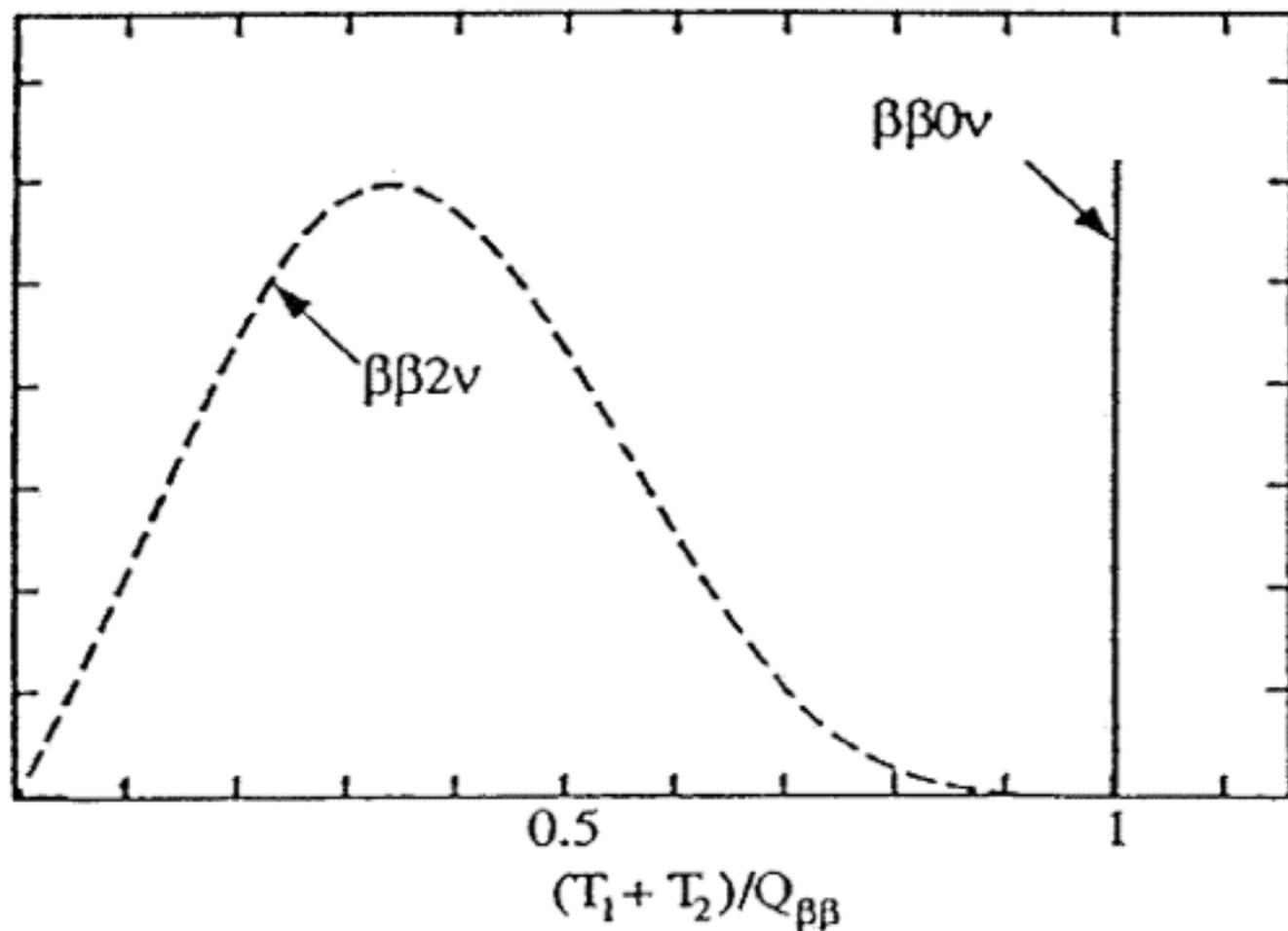
- NON previsto dal SM
- mai osservato sperimentalmente
- contiene importanti informazioni sulla fisica del neutrino



Presente e futuro dei bolometri

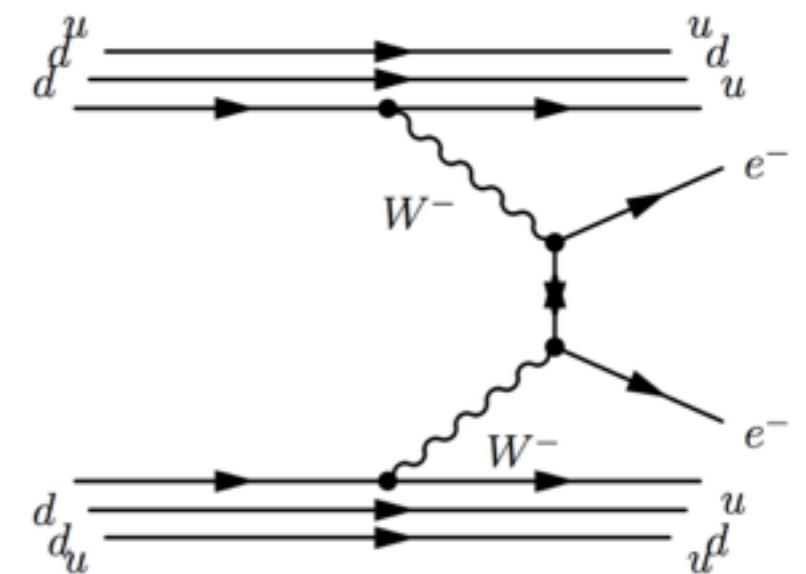
Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento doppio beta



Doppio beta con emissione di neutrini:

- previsto dal SM
- osservato sperimentalmente

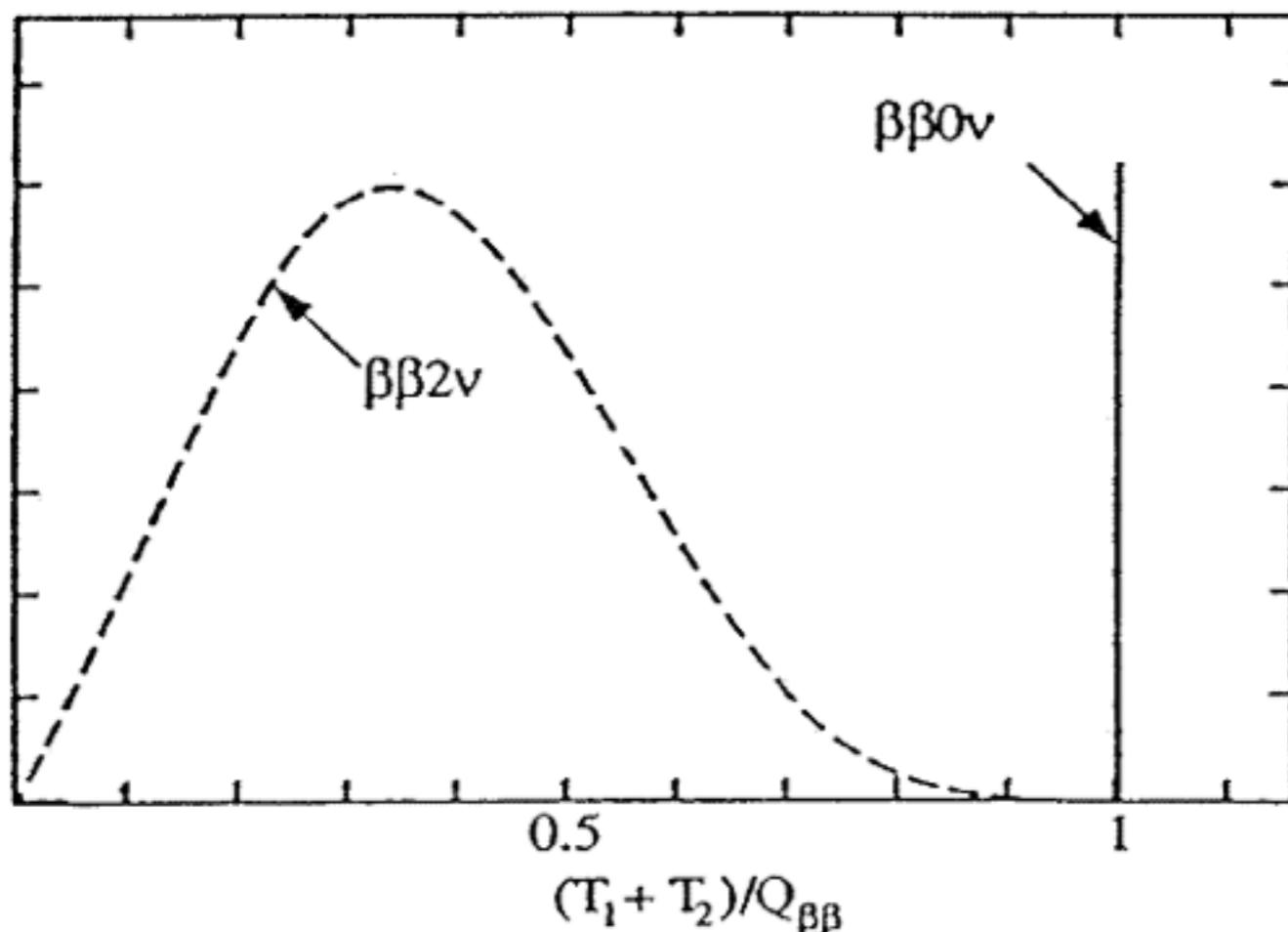


Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

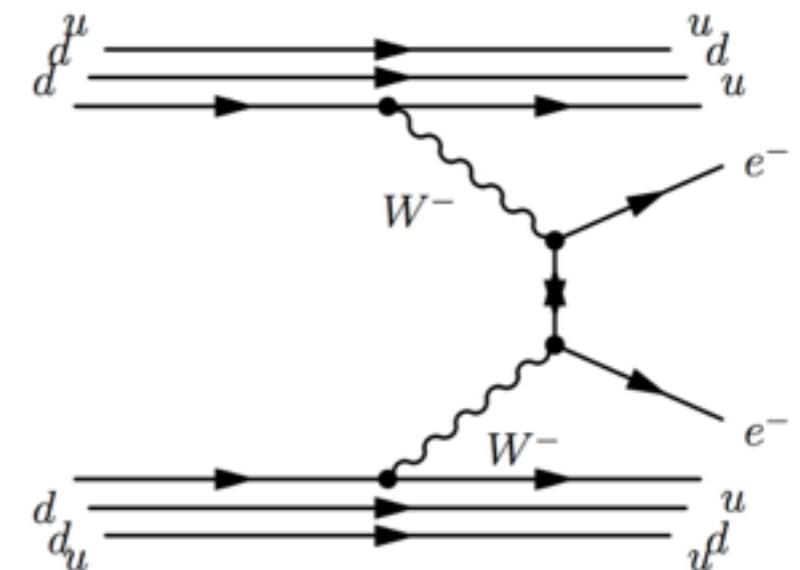
Decadimento doppio beta

- evento rarissimo ($>10^{26}$ anni)
- risoluzione energetica fondamentale
- nessun problema di pile-up
- fondo deve essere bassissimo



Doppio beta con emissione di neutrini:

- previsto dal SM
- osservato sperimentalmente



Presente e futuro dei bolometri

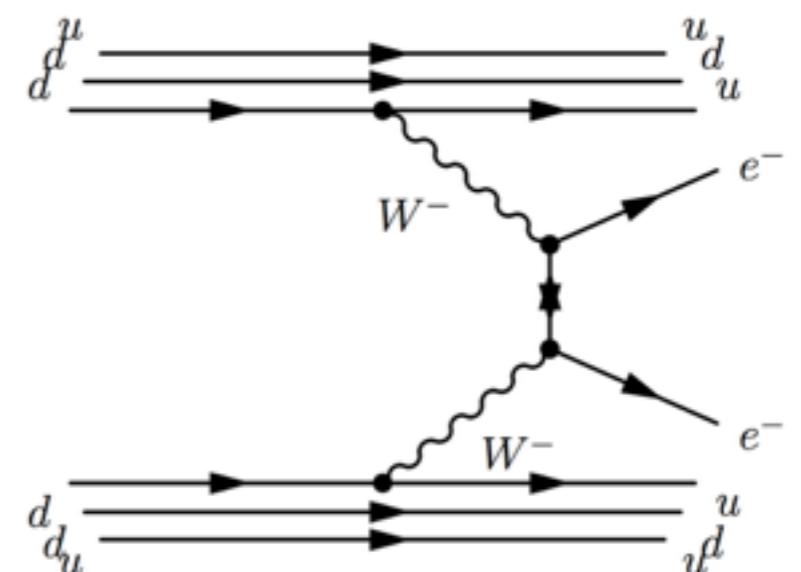
Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento doppio beta

- evento rarissimo ($>10^{26}$ anni)
- risoluzione energetica fondamentale
- nessun problema di pile-up
- fondo deve essere bassissimo

- Macrobolometri di TeO_2
- sorgente = assorbitore
- massa $\sim 1\text{ton}$
- ultrapure environment, rivelatori circondati da poco materiale
 - ultrapuro
- rivelatori debolmente accoppiati al bagno, impulsi lenti

- Doppio beta con emissione di neutrini:
- previsto dal SM
 - osservato sperimentalmente

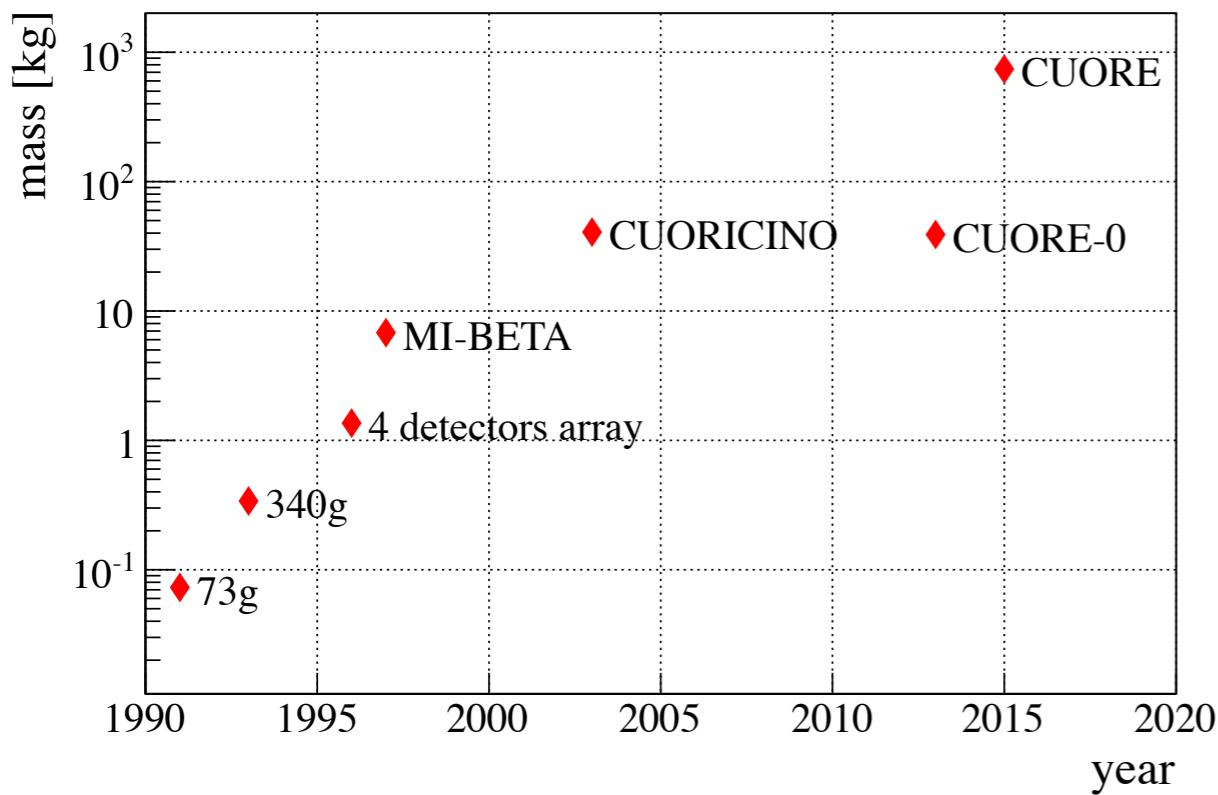


Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento doppio beta

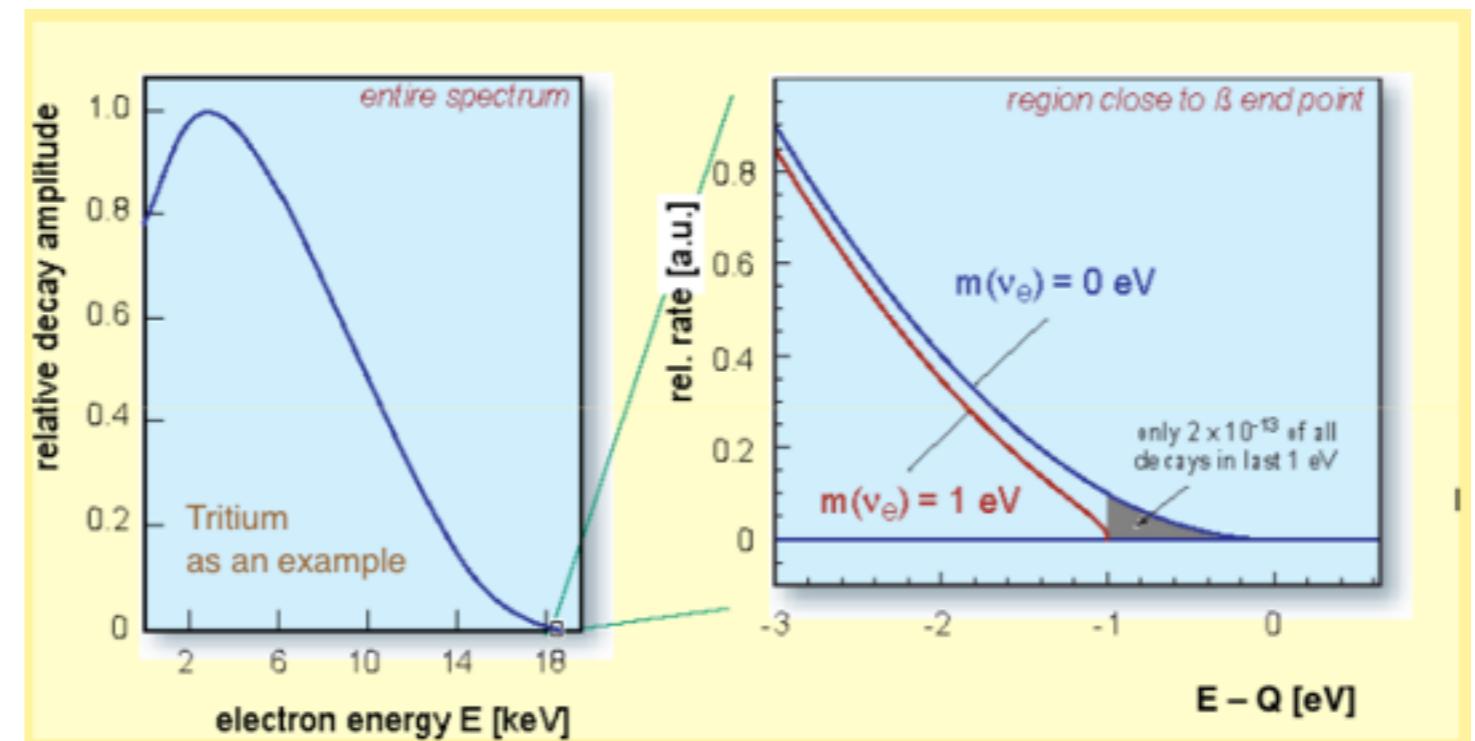
Dagli anni '90 a oggi...
a voi il domani!



Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

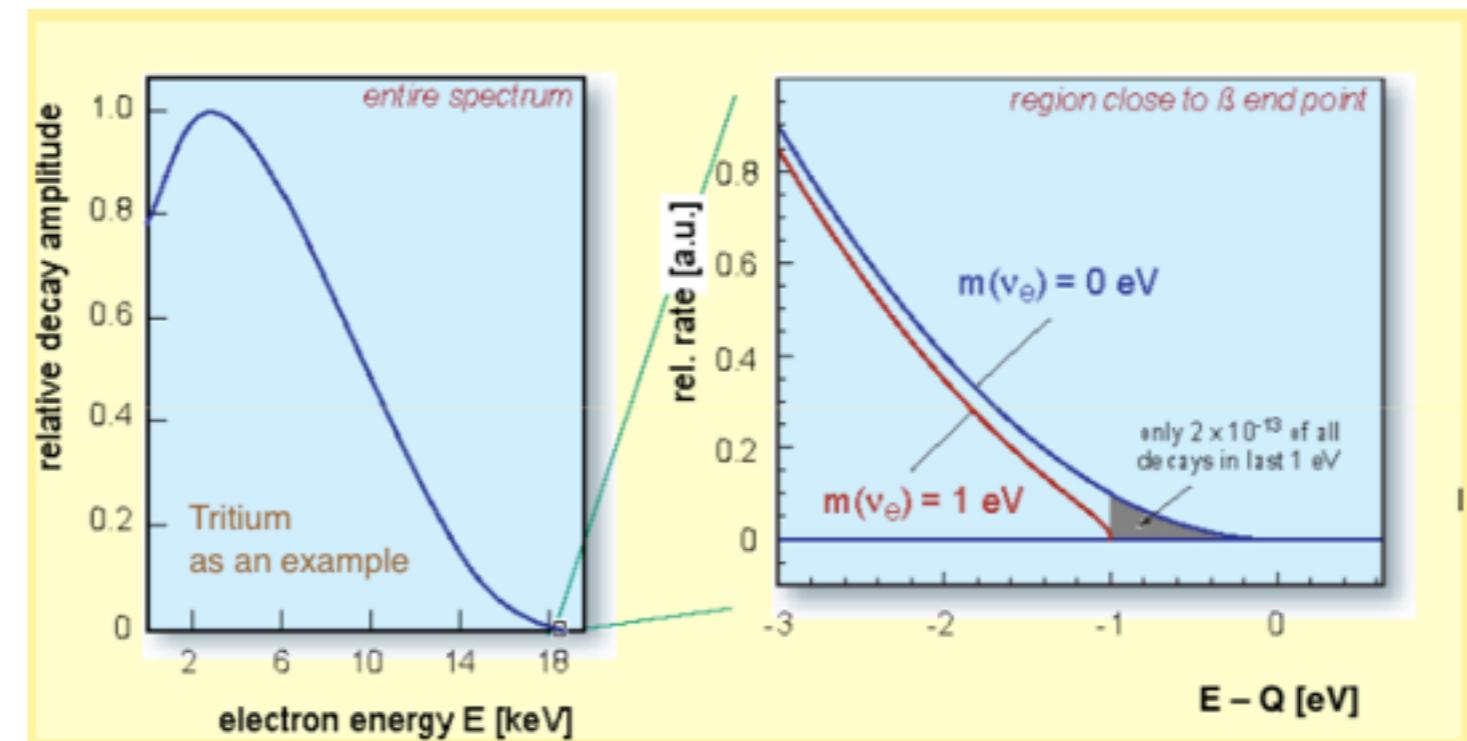


Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

- studiando l'end-point dello spettro si può misurare la massa del neutrino
- rate alti, problemi di pile-up
- fondo tipicamente trascurabile
- energia in gioco piccole
- necessaria risoluzione altissima



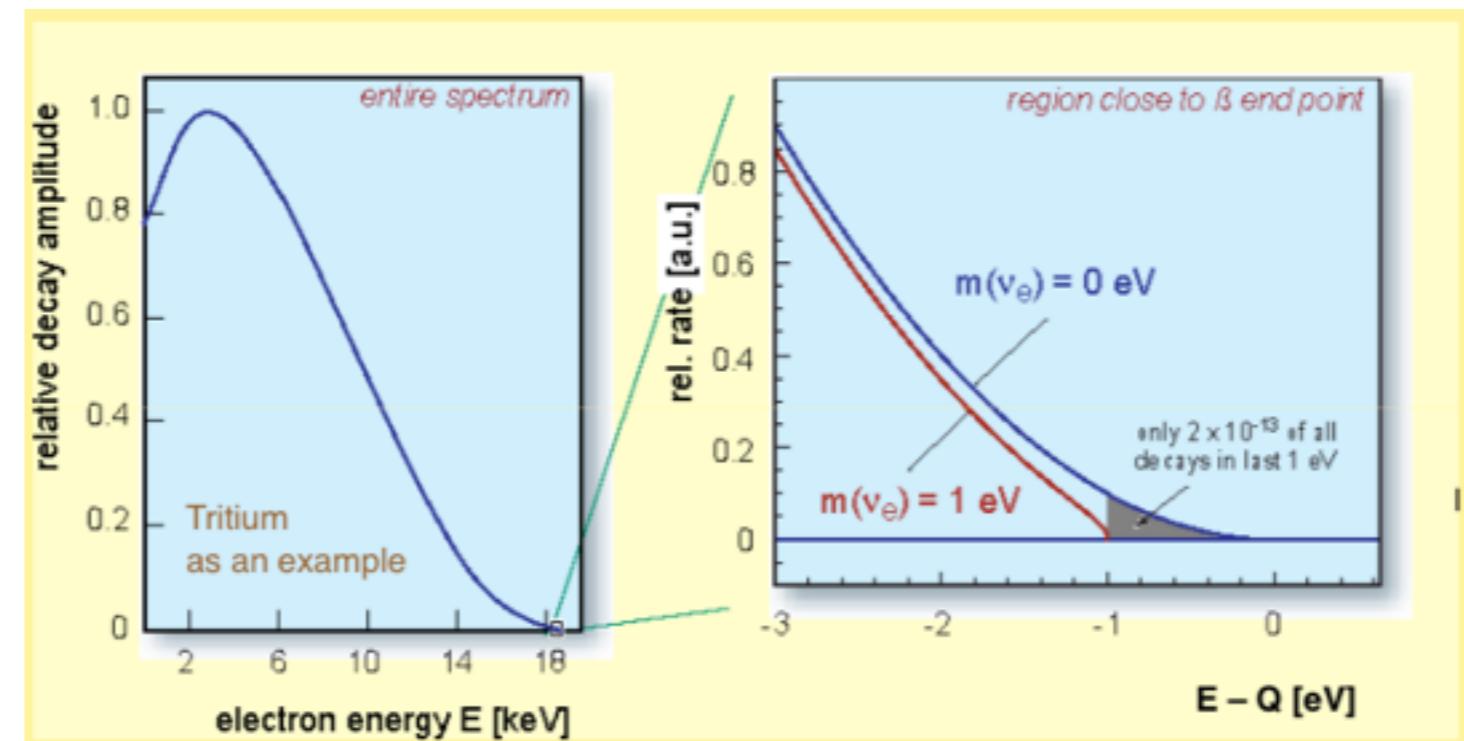
Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

- studiando l'end-point dello spettro si può misurare la massa del neutrino
- rate alti, problemi di pile-up
- fondo tipicamente trascurabile
- energia in gioco piccole
- necessaria risoluzione altissima

- Microbolometri
- sorgente = assorbitore
- massa \sim g
- rivelatori veloci, ben accoppiati al bagno
- bagno termico più caldo ($\sim 100\text{mK}$)

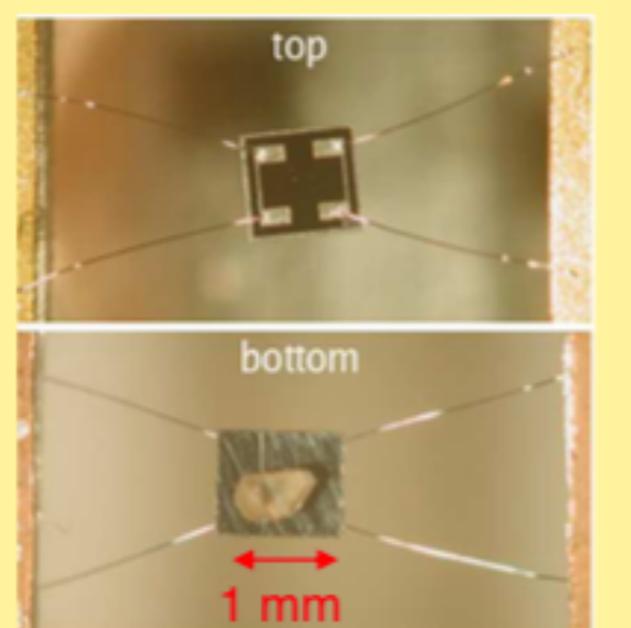


Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

Anni '90...



- Sensori fononici**
- termistori di Si impiantati
 - alta riproducibilità -> array
 - possibilità di microlavorazione



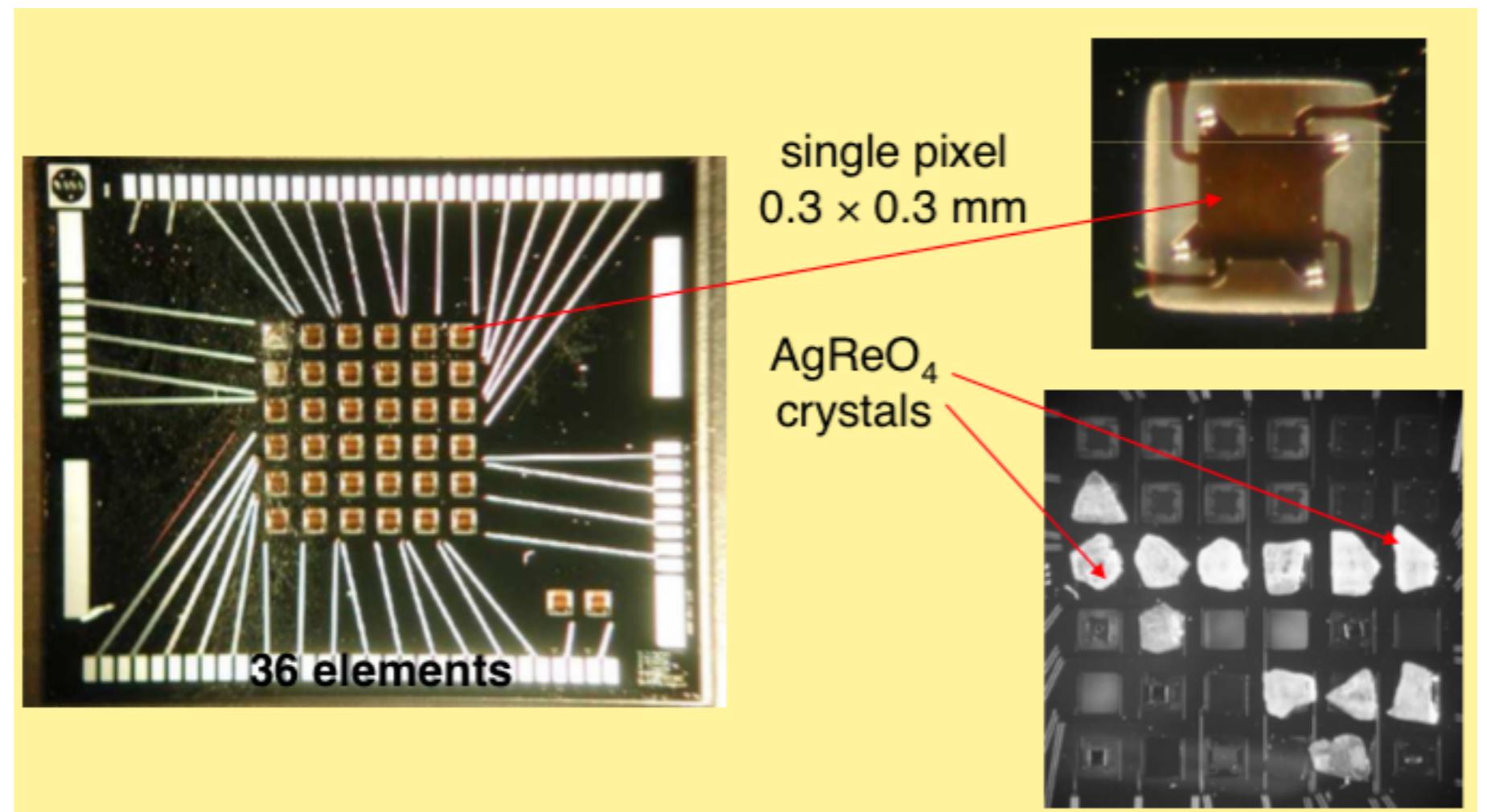
Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

... anni 2000...

MARE



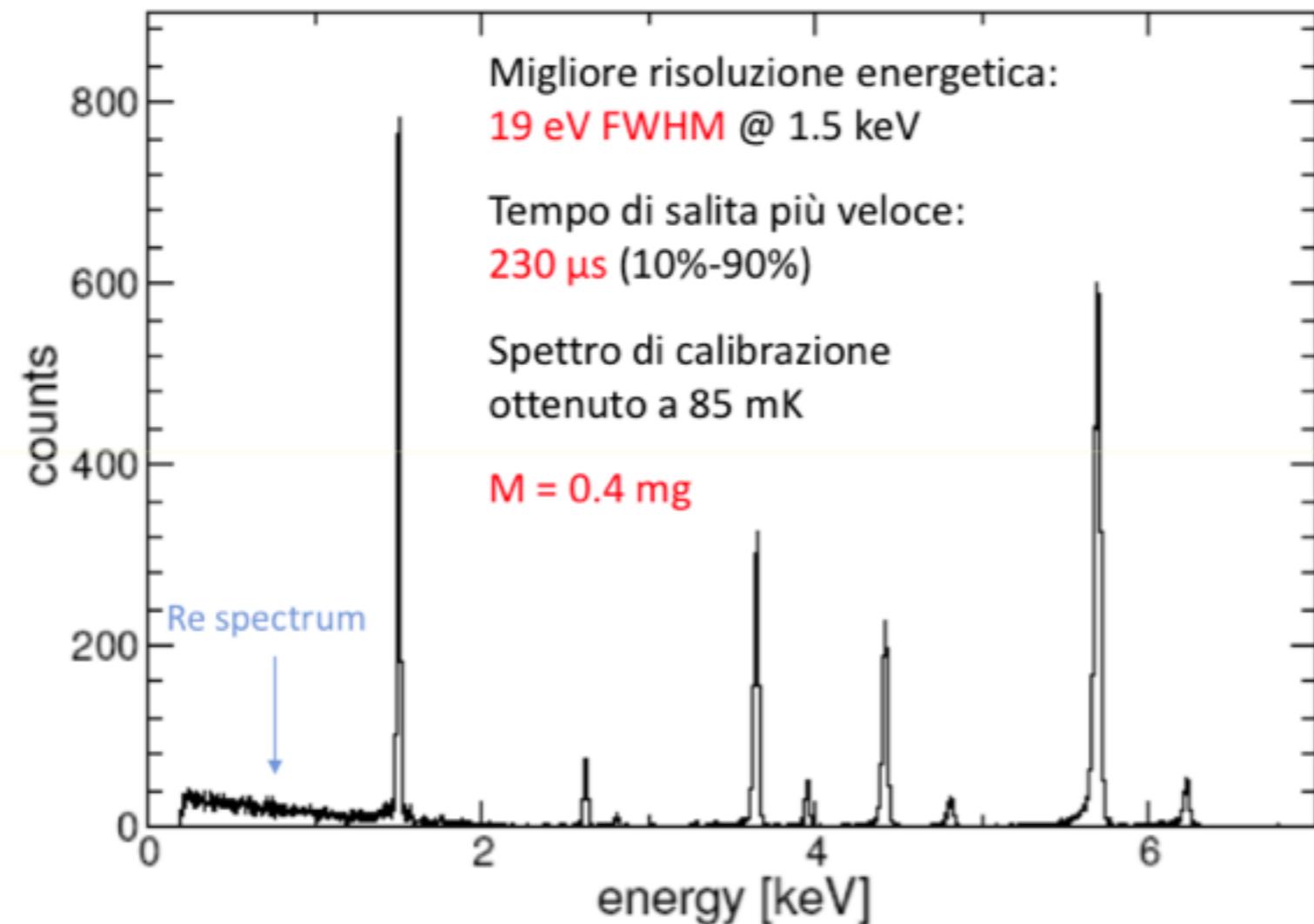
Presente e futuro dei bolometri

Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

... anni 2000...

MARE



Presente e futuro dei bolometri

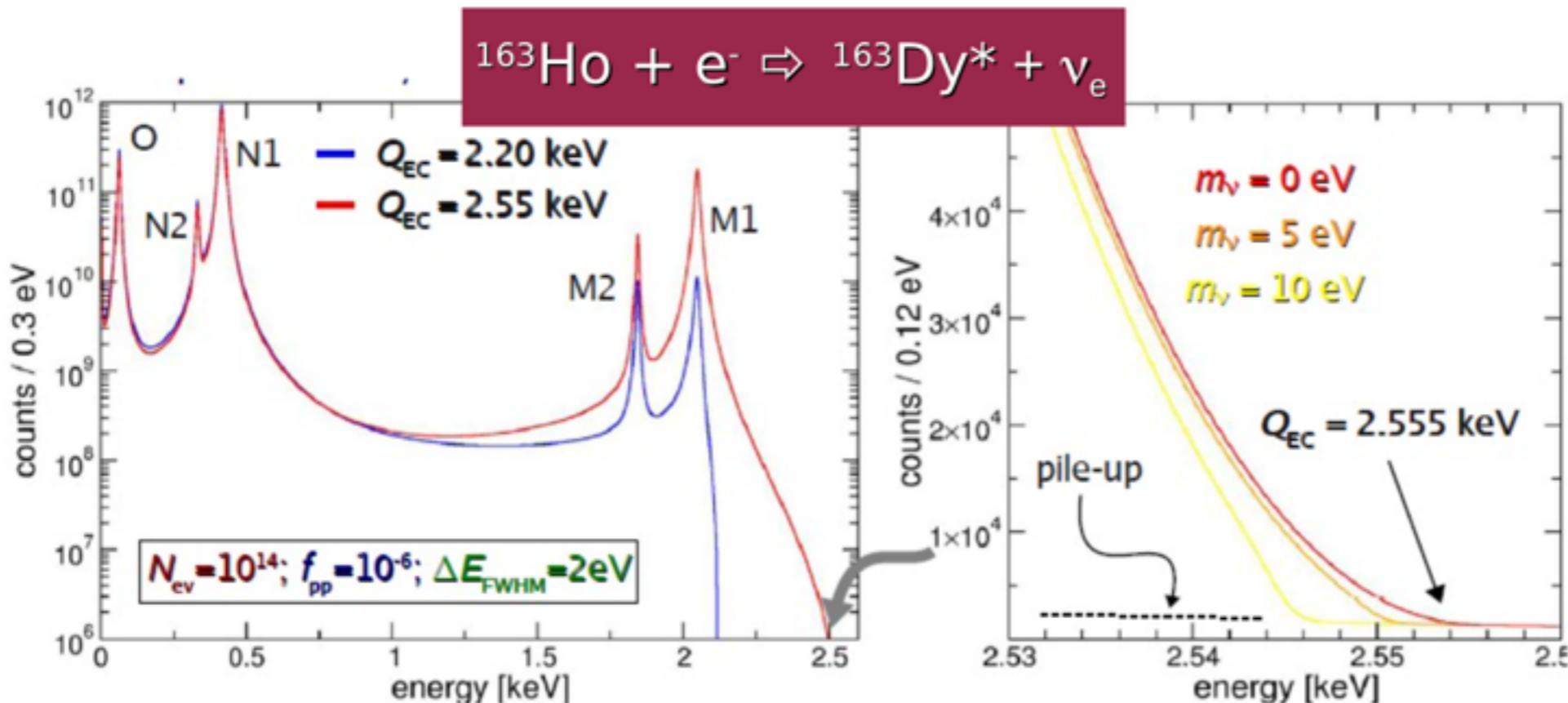
Bolometri “semplici”: solo lettura del segnale termico

Decadimento beta singolo

... anni 2013-?

HOLMES:

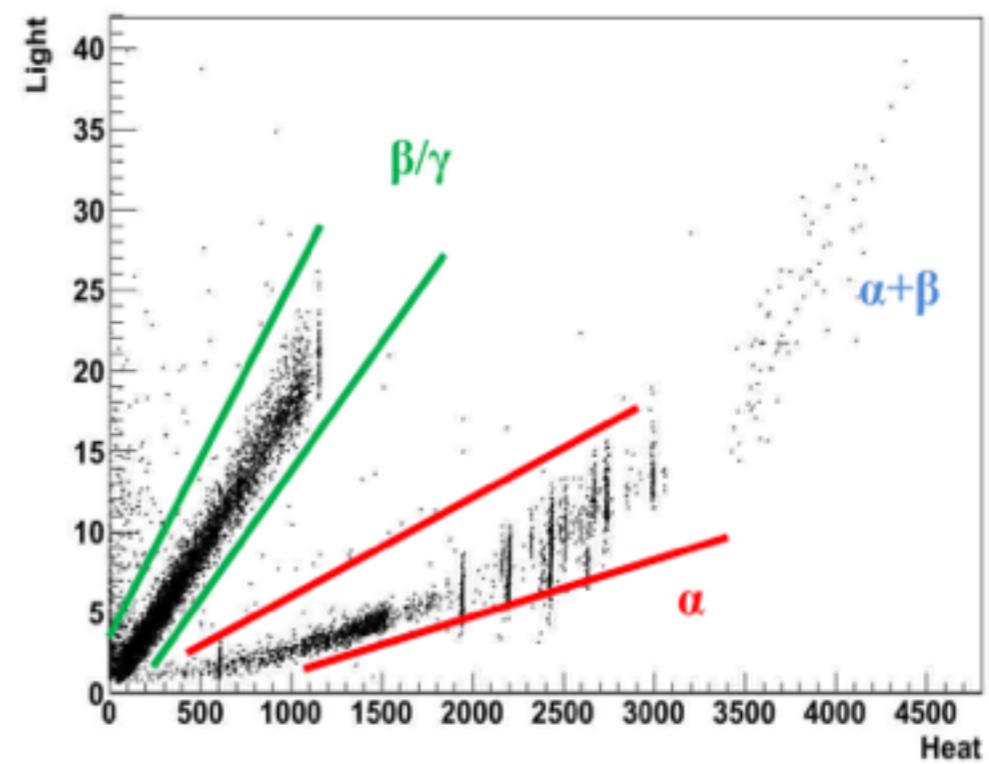
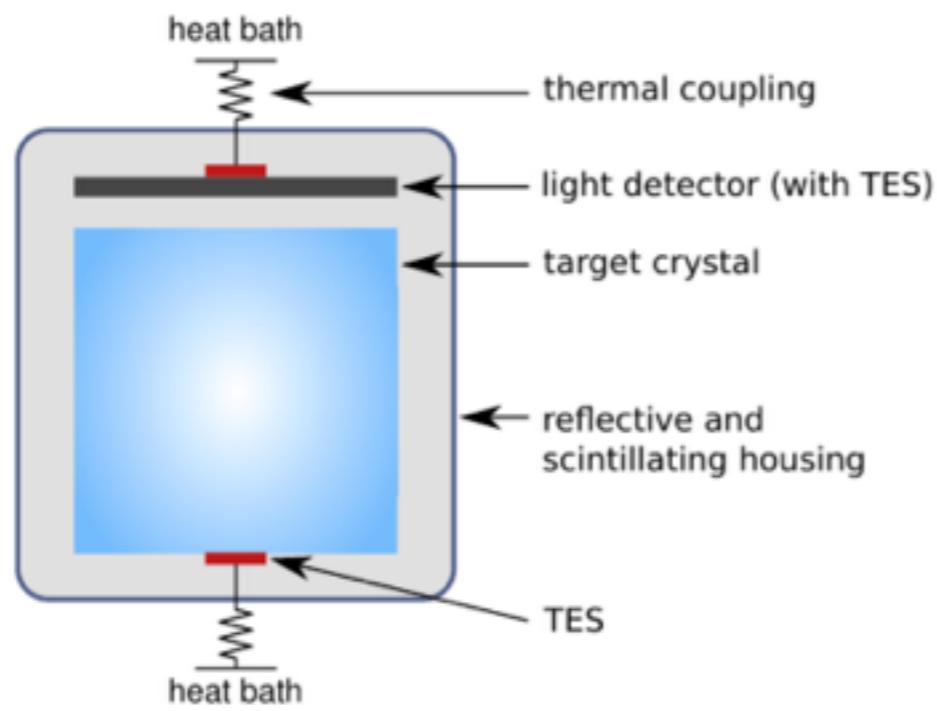
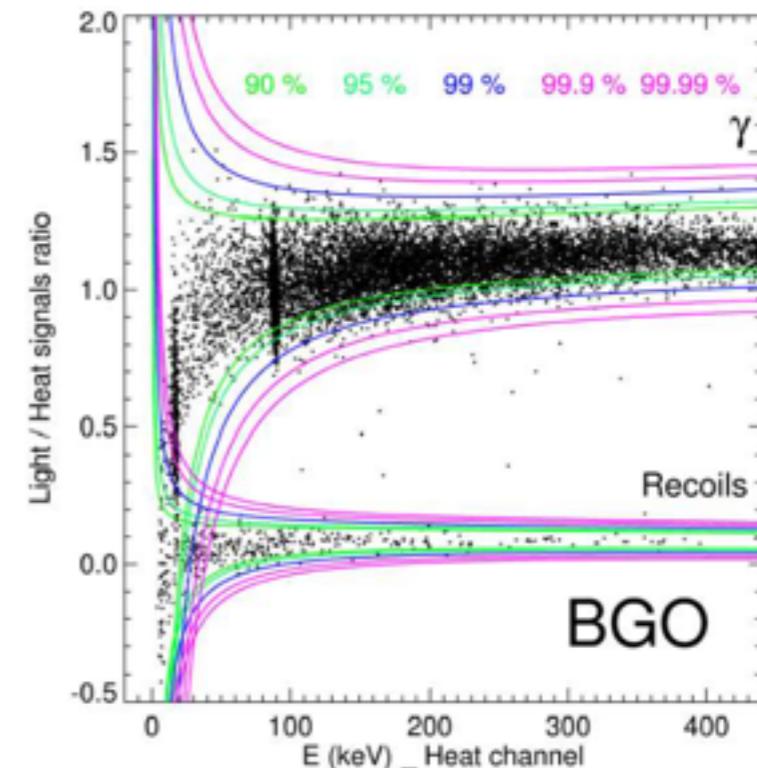
- sorgente = olmio impiantato nell'assorbitore
- masse dell'ordine dei mg
- array di molti rivelatori (100-1000)
- sensori: TES (ottima risoluzione, velocità) o KIDS (multiplexing, risoluzione velocità ma funzionamento mai dimostrato)



Presente e futuro dei bolometri

Bolometri a doppia lettura: calore e luce

- lettura simultanea del calore e della luce di scintillazione
- riv. di luce = bolometro
- rapporto L/H ==> discriminazione particella
- somma L+H ==> calorimetro perfetto
- con riv. di luce abbastanza sensibili:
 - luce Cherenkov, discriminazione anche su cristalli non scintillanti
 - scintillatori plastici affacciati, reiezione eventi esterni
- limiti:
 - complessità, necessità di doppia lettura
 - scelta più limitata di assorbitori (cristalli scintillanti)



Presente e futuro dei bolometri

Bolometri a doppia lettura: calore e luce

Dark Matter

- fondo zero a bassa energia
- discriminazione del tipo di particella
- grande massa

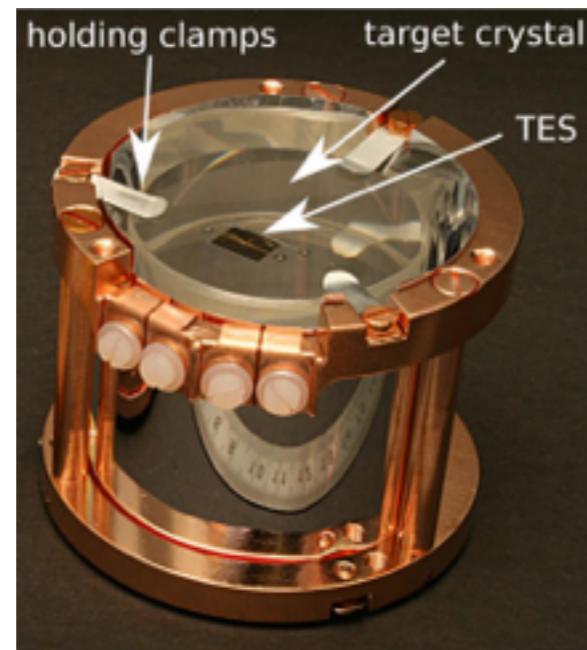
Decadimento doppio beta

- fondo zero all'energia del Q-valore con discriminazione del tipo di particella
- riduzione della massa necessaria

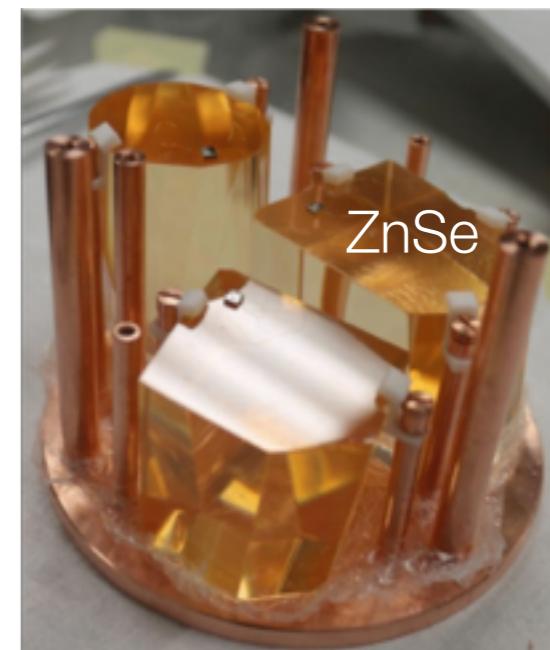
CRESST:



CaWO₄



Lucifer, Lumineu



ZnSe

Presente e futuro dei bolometri

Bolometri a doppia lettura: calore e luce

Dark Matter

- fondo zero a bassa energia
- discriminazione del tipo di particella
- grande massa

Decadimento doppio beta

- fondo zero all'energia del Q-valore con discriminazione del tipo di particella
- riduzione della massa necessaria

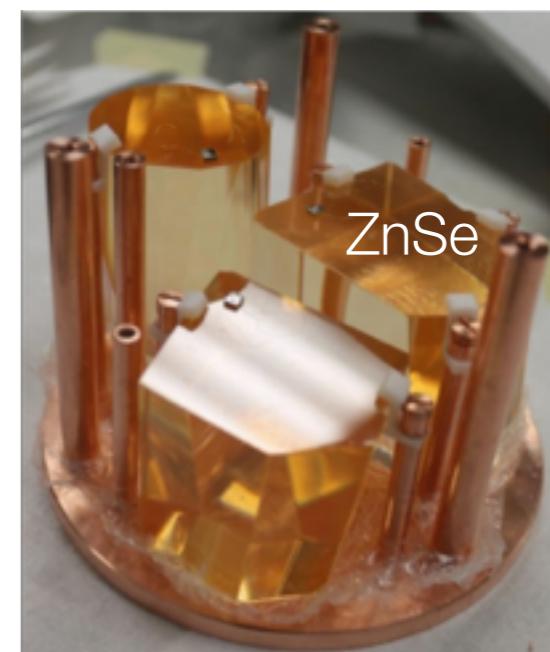
CRESST:



CaWO₄



Lucifer, Lumineu

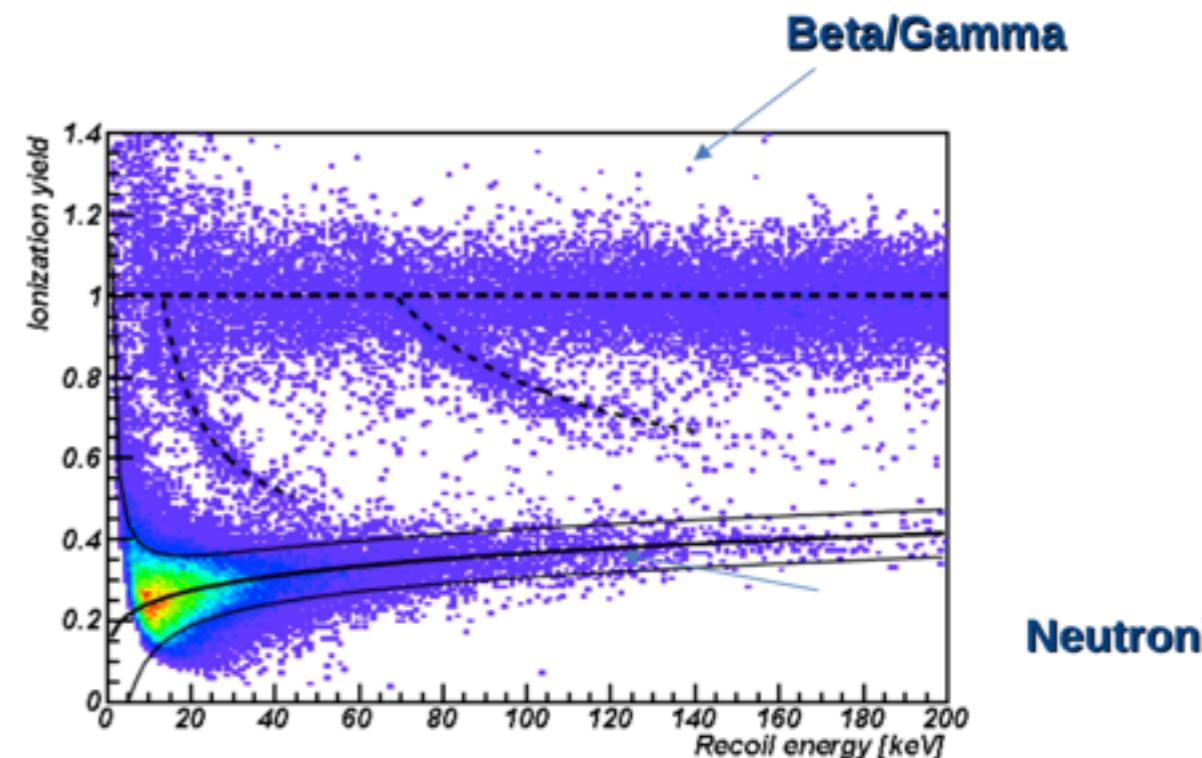


ZnSe

Presente e futuro dei bolometri

Bolometri a doppia lettura: calore e ionizzazione

- lettura simultanea del calore e della carica (come in un normale diodo pin)
- rapporto C/H ==> discriminazione particella
- somma C+H ==> calorimetro perfetto
- cariche che driftano ==> calore aggiuntivo
- risoluzione peggiora: dominata dalla fluttuazione del numero di cariche
- sensibilità alla posizione di interazione
- limiti:
 - scelta di materiali limitata (Ge)
 - complessità di costruzione e lettura, costo
 - limitata risoluzione energetica
 - peggioramento delle prestazioni ai bordi dovuti a deformazioni del campo elettrico



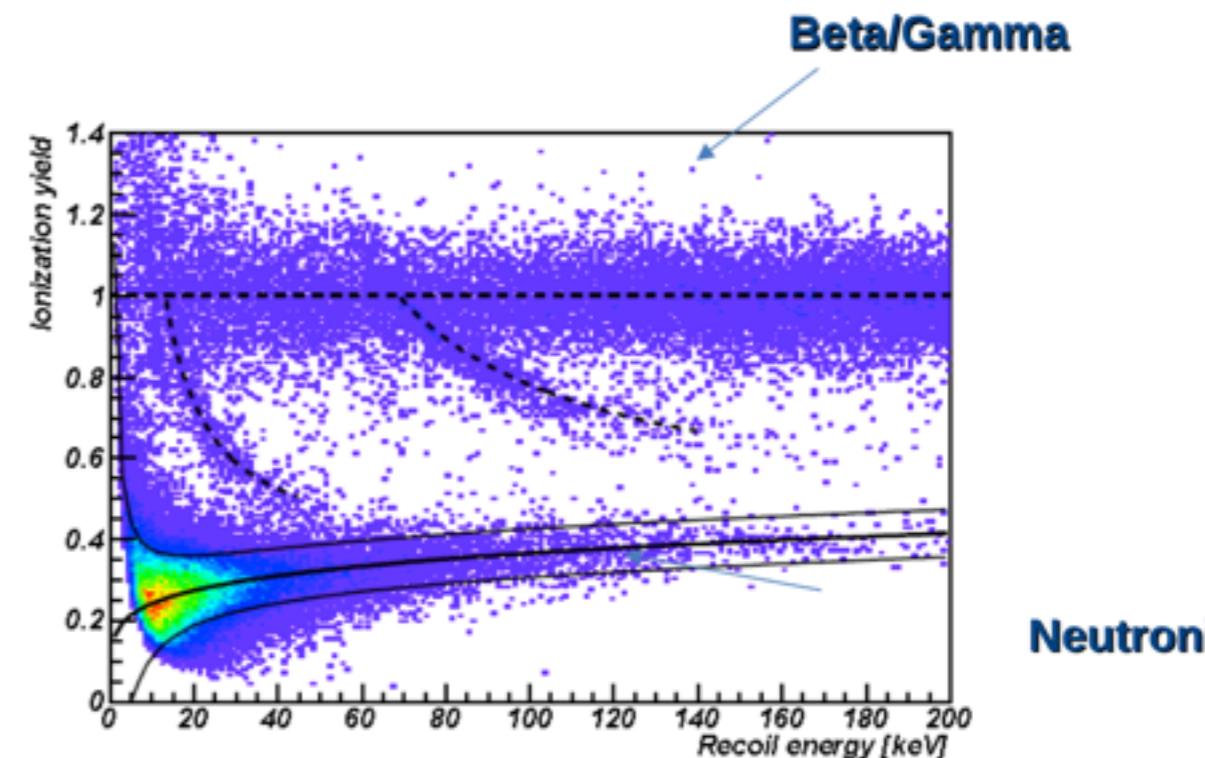
CDMS, Edelweiss

ricerca di DM, discriminazione più importante di risoluzione

Presente e futuro dei bolometri

Bolometri a doppia lettura: calore e ionizzazione

- lettura simultanea del calore e della carica (come in un normale diodo pin)
- rapporto C/H ==> discriminazione particella
- somma C+H ==> calorimetro perfetto
- cariche che driftano ==> calore aggiuntivo
- risoluzione peggiora: dominata dalla fluttuazione del numero di cariche
- sensibilità alla posizione di interazione
- limiti:
 - scelta di materiali limitata (Ge)
 - complessità di costruzione e lettura, costo
 - limitata risoluzione energetica
 - peggioramento delle prestazioni ai bordi dovuti a deformazioni del campo elettrico



CDMS, Edelweiss

ricerca di DM, discriminazione più importante di risoluzione

Presente e futuro dei bolometri

Bolometri con amplificazione del segnale termico: effetto Naganov-Luke

- rivelatori di luce bolometrici: slab di Ge o Si con sensori TES o ST
- risoluzione $\sim 250\text{eV}$ (Ge) $\sim 200\text{-}800\text{eV}$ (Si) @ 5.9keV
- soglia $\sim 200\text{eV}$ (Ge e Si)
- adatti per rivelare luce di scintillazione (decine di keV/MeV), non adatti per Cherenkov ($\sim 100\text{-}200\text{eV/MeV}$)

Effetto Luke: le coppie elettrone-lacuna prodotte dall'interazione primaria in un assorbitore semiconduttore vengono fatte derivare in un campo elettrico prima che si ricombinino. L'energia cinetica accumulata (sottratta al campo elettrico) si converte in calore generando un'amplificazione del segnale termico.

regime **proporzionale**: ogni fotone produce un photoelettrone che converte un'energia $E_{ph} + e\Delta V$ in calore

Misurato, guadagno ~ 10

regime di **moltiplicazione**: ogni fotone produce un photoelettrone che a sua volta genera N elettroni per urti e converte un'energia $E_{ph} + Ne\Delta V$ in calore

Ipotizzato, guadagno potenziale $>>10$

regime di **valanga**: un singolo photoelettrone genera abbastanza elettroni secondari da saturare il campo elettrico, generando un segnale indipendente dal numero iniziale di fotoni

Ipotizzato, guadagno potenziale = single photon counting