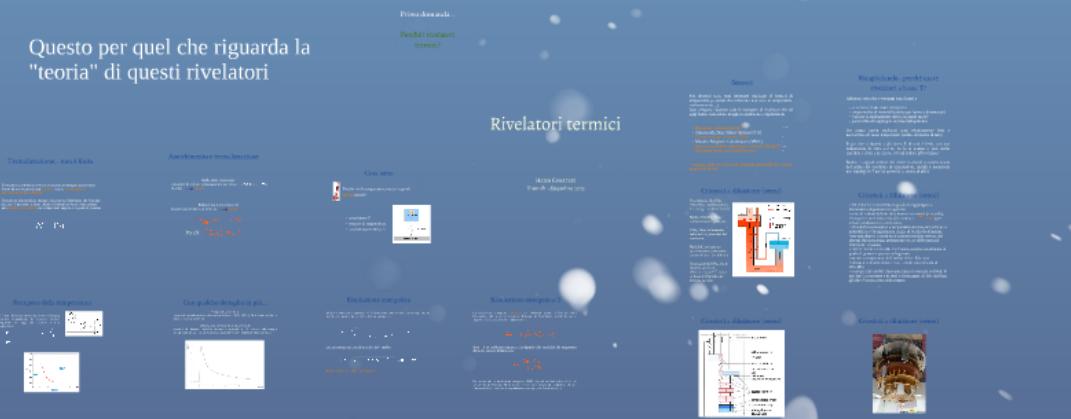


Questo per quel che riguarda la "teoria" di questi rivelatori



Ora una breve carrellata su alcuni esperimenti di fisica

Rivelatori termici

Marco Faverzani
Unimib - dicembre 2015

Prima domanda...

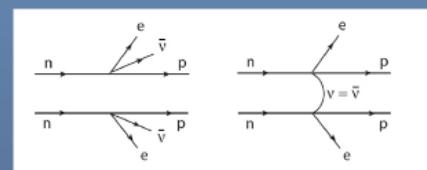
Perché i rivelatori
termici?

Applicazioni fisiche

- Studio del β singolo (misura diretta m_ν)



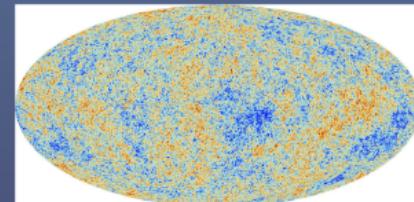
- Ricerca del $\beta\beta 0\nu$



- Ricerca della materia oscura



- Misurazioni della radiazione di fondo cosmica (CMB)

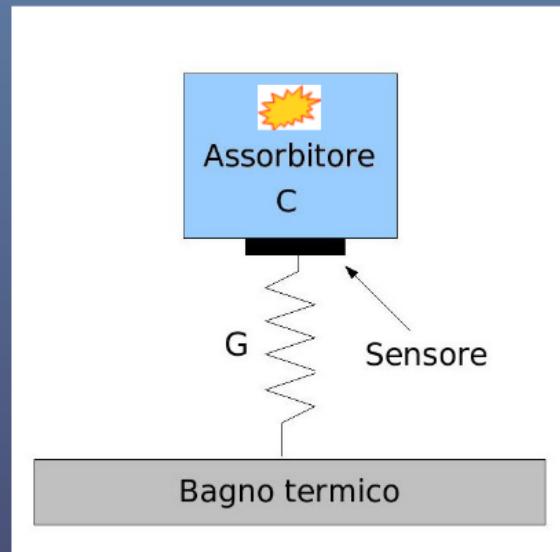


Cosa sono



Rivelatori di temperatura, ma con segnali
molto piccoli!

- assorbitore C
- sensore di temperatura
- conduttanza termica G



Assorbitore

- deve contenere tutta l'energia del decadimento da misurare
- deve avere piccola capacità termica
- ha a disposizione un'ampia gamma di materiali 😊 ...da scegliere in base al tipo di fisica a cui si è interessati

Capacità termica

Contributi

- elettroni



metalli $c_e(T) = \frac{\pi^2}{\Theta_D} n_c R \frac{T}{\Theta_F}$

superconduttori

$$c_e(T) \propto T_c \left(1.76 \frac{T_c}{T_e}\right)^{3/2} e^{-1.76 \frac{T_c}{T}}$$

dielettr./semicond. $c_e(T) = 0$

- reticolo cristallino (fononi)

$$c_r(T) = \frac{12}{5} \pi^4 k_B N_A \left(\frac{T^3}{\Theta_D^3} \right)$$

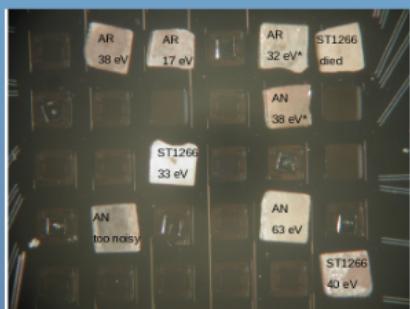


- ulteriori (momenti dipolo&c...)

e.g. Renio: $c(T) \sim T^{-2}$

Materiali - assorbitori

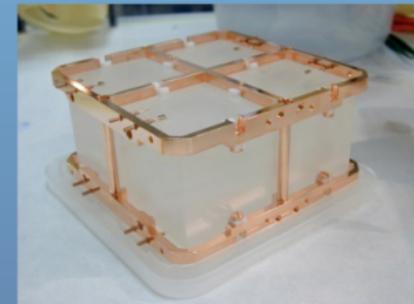
AgReO₄ (m_{ν})



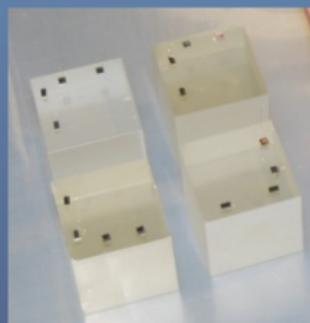
CaMoO₄ ($\beta\beta0\nu$)



TeO₂ ($\beta\beta0\nu$)



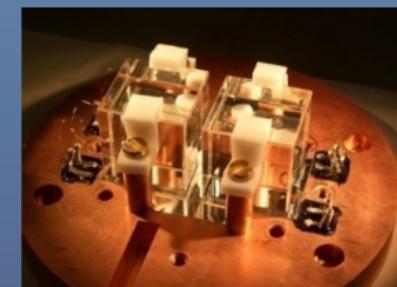
CdWO₄ ($\beta\beta0\nu$)



ZnSe ($\beta\beta0\nu$)



BGO (α ^{209}Bi)



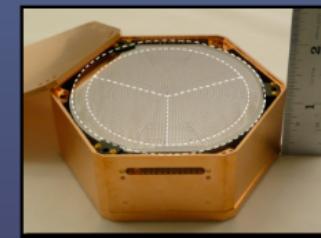
Edelweiss (DM)



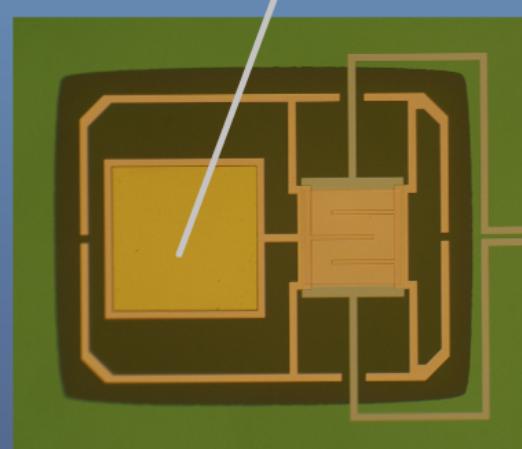
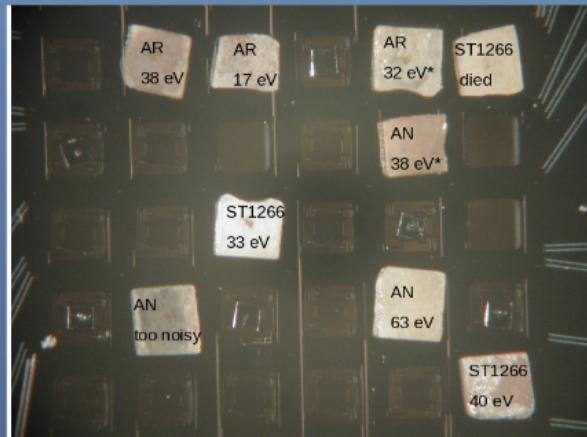
CRESST (DM)



CDMS (DM)



Materiali/2



Assorbimento e termalizzazione

Radiazione ionizzante
creazione di e-h con propagazione per circa $\sim 100\mu\text{m}$ ($\sim 10^{-8}\text{s}$)
ricomb. \longrightarrow **fononi**

Radiazione non ionizzante
interazione diretta con reticolo \longrightarrow **fononi**

$$\langle E_{\text{ph}} \rangle \approx 10 \text{ } \mu\text{eV}$$

Per cfr: $\langle E_{\text{e-h}}^{\text{Si}} \rangle \approx 1 \text{ eV}$

Termalizzazione... non è finita

Una volta ricombinati gli e-h c'è un eccesso di energia sottoforma di fononi ad alta frequenza detti **atermici** poiché **non ripettano la distribuzione di Bose-Einstein**

I fononi atermici perdono energia velocemente. Man mano che l'energia decresce il processo rallenta, finché si i fononi arrivano a rispecchiare una **distribuzione termica**, con temperatura superiore a quella di partenza

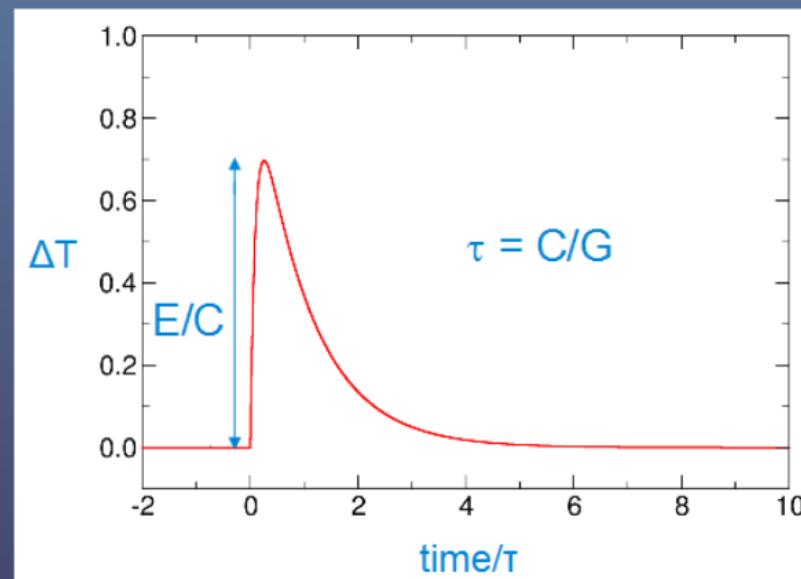
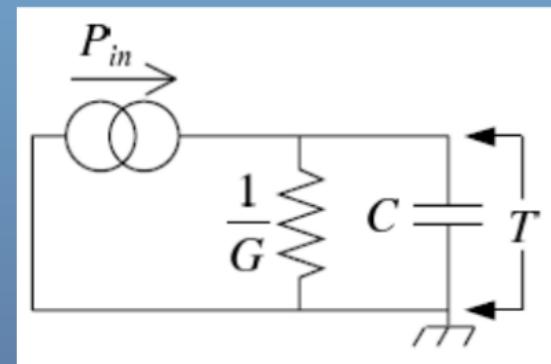
$$\Delta T = E/C$$

Recupero della temperatura

I fononi fluiscono attraverso G verso il bagno termico (considerato di capacità infinita) seguendo le leggi del circuito termico equivalente

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

$$T_1 = T_0 + \frac{E}{C}e^{-t/(C/G)}$$



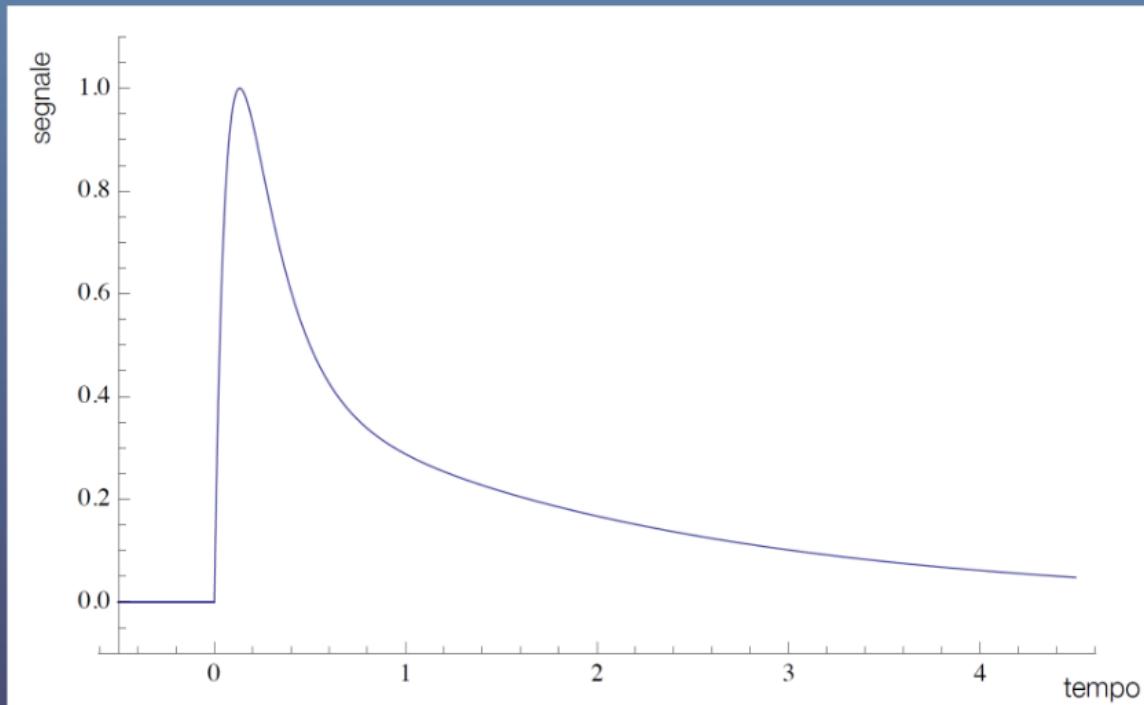
Con qualche dettaglio in più...

Tempo di salita finito

tempo di termalizzazione, elettronica di lettura (RC, L/R...), filtri fanno sì che la salita sia un'esponenziale

Discesa non perfettamente esponenziale

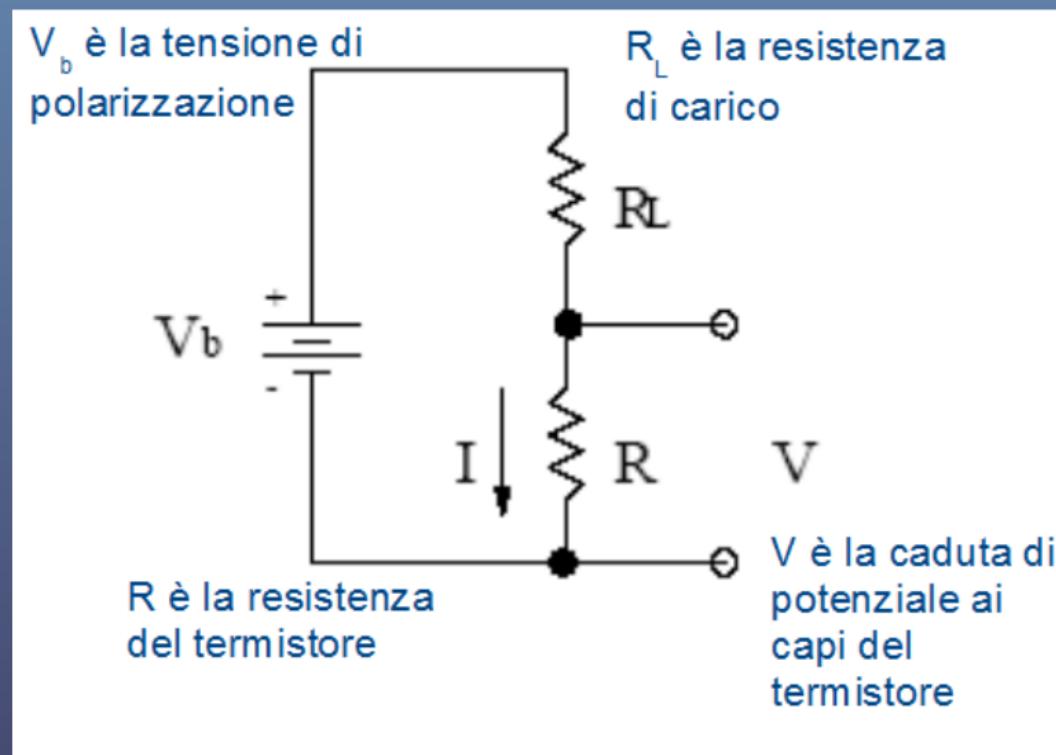
costanti di discesa multiple dovute a meccanismi di rilascio dell'energia (intrappolamento) + modello termico a più elementi + feedback elettrotermico



Feedback elettrotermico

Dovuto al riscaldamento del sensore a causa dell'effetto Joule.

Es.: termistore (=sensore a semiconduttore) alimentato a corrente costante. Per questi sensori un aumento di temperatura causato da un evento energetico causa una diminuzione di resistenza del resistore, e quindi una diminuzione di potenza dissipata per effetto Joule. Questo consegue in una diminuzione del tempo necessario per recuperare la T di base



Risoluzione energetica

Abbiamo visto che i portatori di informazione sono fononi con energia molto piccola, che porterebbe a una risoluzione energetica

$$\Delta E = \frac{\sqrt{N_{ph}}}{N_{ph}} E = \frac{E}{\sqrt{N_{ph}}} = \frac{E}{\sqrt{E/\langle E \rangle}} = \sqrt{E \langle E \rangle}$$

che, per esempio nel caso di un X da 2 keV, sarebbe

$$\Delta E \sim \sqrt{2 \cdot 10^3 \text{ eV} \times 10^{-6} \text{ eV}} \sim 0.04 \text{ eV}!!$$

Nella realtà le cose vanno diversamente....

Risoluzione energetica/2

La risoluzione energetica **intrinseca** dei rivelatori termici è limitata dalla fluttuazione del numero di fononi all'interno dell'assorbitore scambiati con il bagno termico attraverso la conduttanza **G**:

$$\Delta E = \xi \sqrt{k_B T_b^2 C(T_b)}$$

dove ξ è un coefficiente numerico che dipende dalla sensibilità alla temperatura del nostro sensore, definita come

$$A = \frac{d \log R(T)}{d \log (T)}$$

Da notare che la risoluzione energetica NON dipende né dal valore di G, né tantomeno dall'energia. Nella realtà le cose sono ancora più complesse di così (presenza di stati eccitati, intrappolamento energia, non linearità, ecc...)

Sensori

Nei decenni sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che misurano non solo la temperatura, vedremo come...).

Qua vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno conosciuto maggior espansione e applicazioni

- Rivelatori a semiconduttore*
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Transition Edge Sensors (TES)*
- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC)
- Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID)*
- Rivelatori termici con scintillazione*

*vengono usati e/o sviluppati in questa università (i.e. ci sono possibilità di tesi)

Semiconduttori

Scopo: rendere i semiconduttori sensibili a basse temperature (ordine decine di mK)

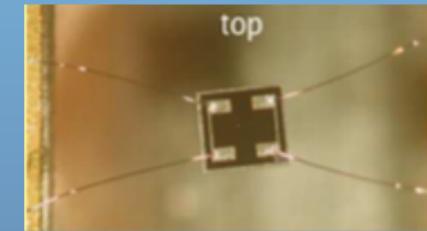
Nel Si il gap per trasportare un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione vale 1.14 eV, il che significa che per avere una risposta "elettrica" bisogna avere temperature molto elevate (a Tambiente corrisponde un'energia di 1/40 eV...). Per creare livelli energetici al di sotto della banda di conduzione o al di sopra della banda di valenza vengono introdotte impurità nel reticolo (drogaggio "n" - drogante con un elettrone extra - o "p" - drogante con un elettrone in meno - , rispettivamente). A una quantità critica il semiconduttore mantiene conduzione anche a basse temperature. Per ottenere un termometro sensibile di effettua un drogaggio appena inferiore a questo livello critico.

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot \exp(T_0/T)^{0.5}$$

Esempi di sensori a semicondutt.

Principalmente due tipologie:

- **Silicio impiantato (es. MiBeta, Mare)**



$$\Delta E^{FWHM} \sim 20 \text{ eV} @ 2.5 \text{ keV}$$

$$\tau_R \sim 0.3 \text{ ms}; \tau_D \sim 15 \text{ ms}$$

- **Germanio Neutron Trasmutation Doped - NTD (es. Cuoricino, Cuore)**

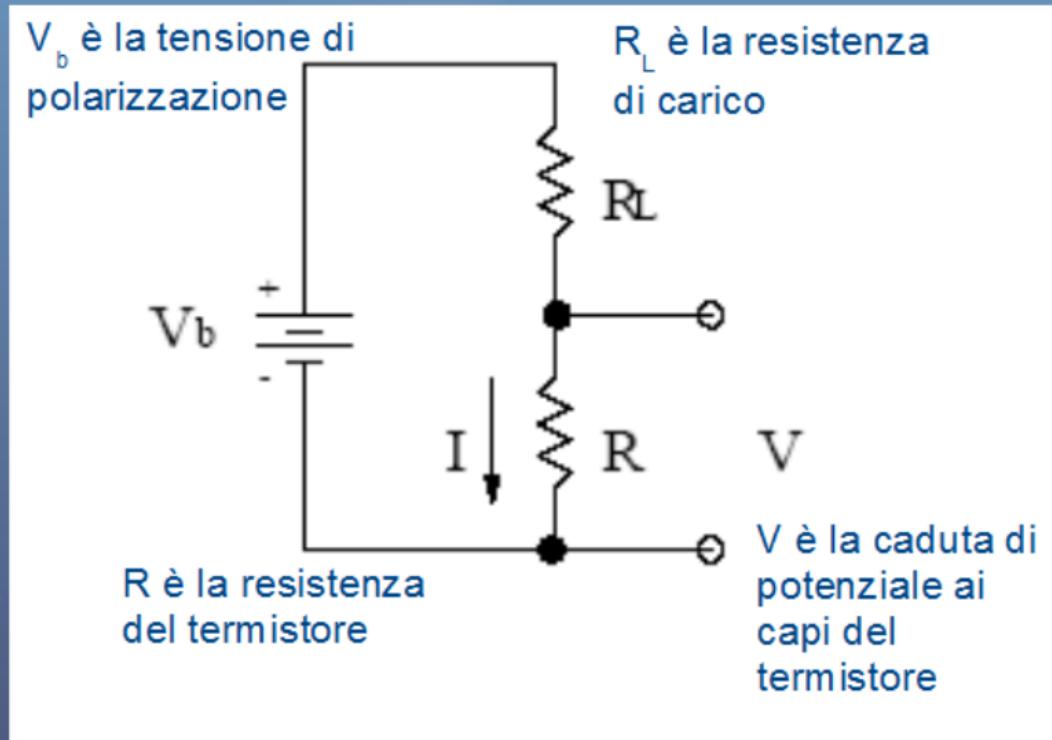
$$\Delta E^{FWHM} \sim 5 \text{ keV} @ 2615 \text{ keV}$$

$$\tau_R \sim 50 \text{ ms}; \tau_D \sim 200 \text{ ms}$$

OTTIMA RISOLUZIONE ENERGETICA (ordine del permille!!), ma sono rivelatori lenti...

Circuito di polarizzazione

Per leggere la resistenza (e quindi la temperatura), si usa un circuito di polarizzazione di questo tipo



dove si sceglie $R_L \gg R$ in modo da avere una corrente costante (importante per il feedback elettrotermico)

Sensori

Nei decenni sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che misurano non solo la temperatura, vedremo come...).

Qua vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno conosciuto maggior espansione e applicazioni

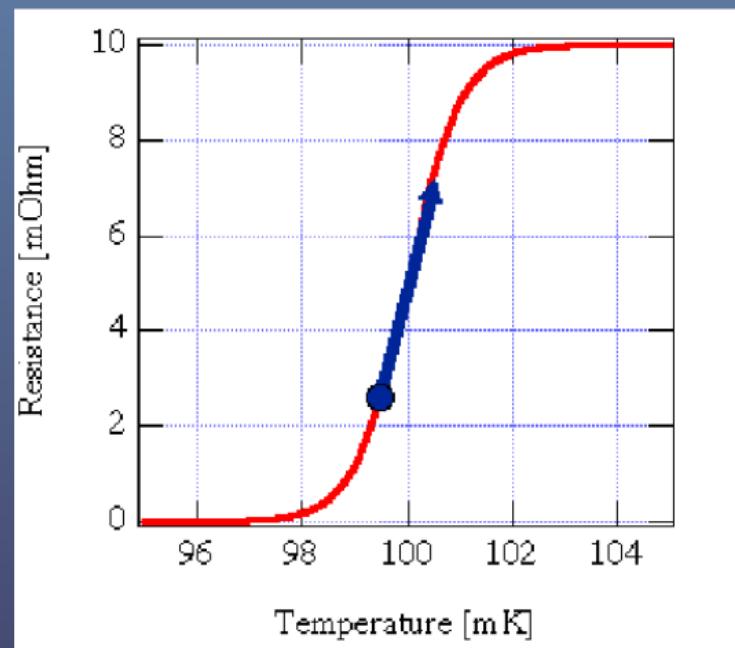
- Rivelatori a semiconduttore*
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Transition Edge Sensors (TES)*
- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC)
- Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID)*
- Rivelatori termici con scintillazione*

*vengono usati e/o sviluppati in questa università (i.e. ci sono possibilità di tesi)

TES

Sfruttano la forte pendenza della resistenza vs temperatura sulla transizione superconduttriva

Come per i semiconduttori, viene misurata una variazione di resistenza, ma in questo caso è una dipendenza molto più forte, che consente di raggiungere altissime risoluzioni. Intrinsicamente veloci (dipende dal circuito di lettura), il loro punto debole risiede nella loro dinamica limitata.



Sensori

Nei decenni sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che misurano non solo la temperatura, vedremo come...).

Qua vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno conosciuto maggior espansione e applicazioni

- Rivelatori a semiconduttore*
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Transition Edge Sensors (TES)*
- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC)
- Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID)*
- Rivelatori termici con scintillazione*

*vengono usati e/o sviluppati in questa università (i.e. ci sono possibilità di tesi)

MMC

Invece di misurare una resistenza misuro la magnetizzazione

Anche la magnetizzazione di alcuni materiali sono funzione della temperatura, risulta quindi possibile fare un termometro basato su questa grandezza fisica.

Il materiale più usato attualmente è l'oro, la cui magnetizzazione viene misurata con l'uso di particolari amplificatori molto sensibili ai campi magnetici (SQUID).

Il grande vantaggio di questi rivelatori è la velocità, con tempi di risposta dell'ordine dei 100 ns . La risoluzione energetica è paragonabile a quella dei TES



Sensori

Nei decenni sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che misurano non solo la temperatura, vedremo come...).

Qua vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno conosciuto maggior espansione e applicazioni

- Rivelatori a semiconduttore*
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Transition Edge Sensors (TES)*
- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC)
- Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID)*
- Rivelatori termici con scintillazione*

*vengono usati e/o sviluppati in questa università (i.e. ci sono possibilità di tesi)

MKID

La più recente di queste tecnologie

Non vengono sempre usati come termometri, sono nati e si sono sviluppati principalmente per fare bolometria e ora si affacciano alle rivelazioni di singola particella. Misurano la quantità di coppie di Cooper di un superconduttore.

Quando un'energia E viene assorbita, avvengono processi che portano alla rottura di coppie di Cooper in una quantità proporzionale a E . Come si può misurare questo incremento?

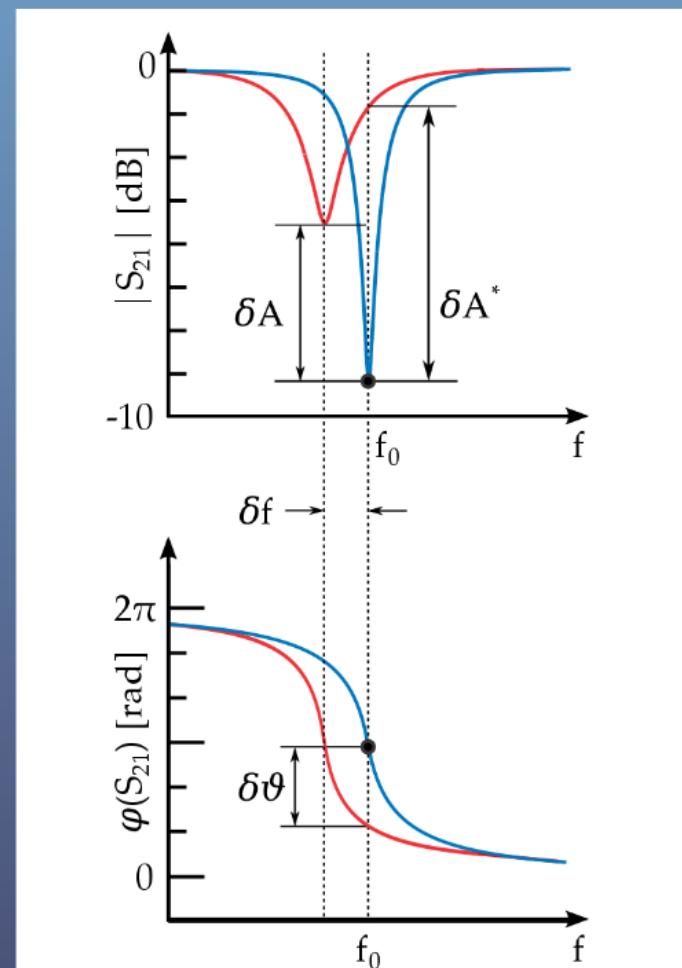
Dalla teoria della supercondutività impariamo che alle coppie i Cooper viene associata una impedenza non nulla. Misurando l'impedenza di un circuito che contiene un superconduttore siamo quindi in grado di determinare il numero di coppie presenti, e quindi l'energia deposita.

MKID/2

Lo si può fare facendo un circuito risonante costituito da superconduttore. La frequenza di risonanza sarà data da $f_r \sim (LC)^{1/2}$. Assorbendo energia, cambia il numero di coppie di Cooper, quindi L, e quindi la f di risonanza.

Vantaggi: veloci, alta risoluzione teorica (energia coppia Cooper è dell'ordine del meV) ma soprattutto possono lavorare molti con una sola linea di lettura

Svantaggi: difficili da far risolvere...



Sensori

Nei decenni sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che misurano non solo la temperatura, vedremo come...).

Qua vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno conosciuto maggior espansione e applicazioni

- Rivelatori a semiconduttore*
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Transition Edge Sensors (TES)*
- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC)
- Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID)*
- Rivelatori termici con scintillazione*

*vengono usati e/o sviluppati in questa università (i.e. ci sono possibilità di tesi)

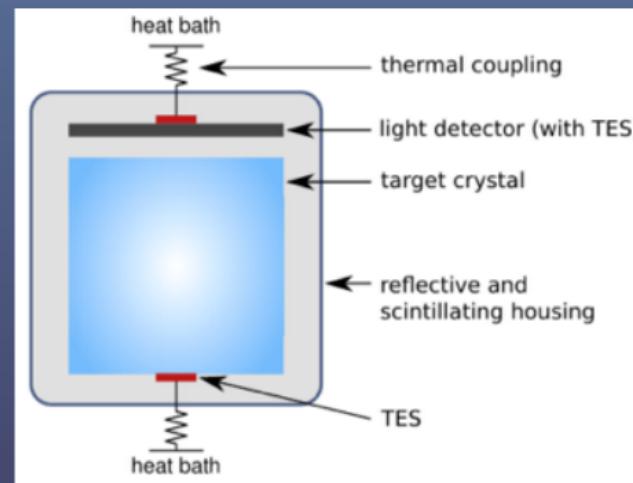
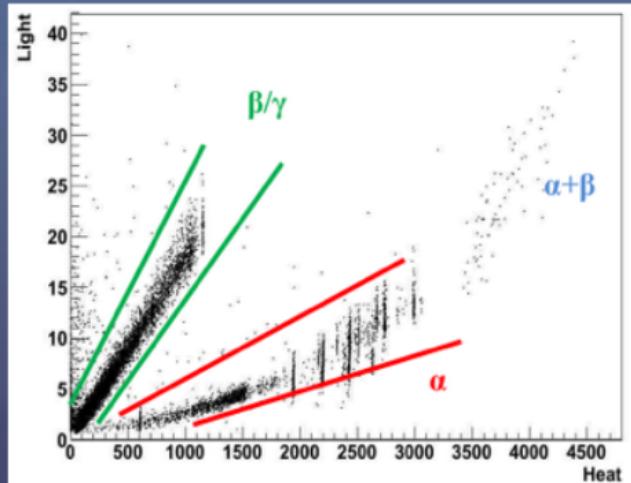
Cristalli scintillanti

Il futuro della fisica degli eventi rari?

Non viene modificata la tecnologia di rivelazione, che può essere basata sulle tecniche mostrate finora.

Viene utilizzato però come assorbitore un materiale scintillante e un rivelatore (ancora termico) di luce.

In seguito all'interazione di una particella si sviluppano un segnale termico sul cristallo che si sta studiando + un segnale di luce. Misurando il rapporto tra il segnale di luce e quello di calore è possibile distinguere tra beta/gamma e alfa, riuscendo a discriminare eventi che non interessano dal punto di vista fisico.



Ricapitolando...perché usare rivelatori a bassa T?

Abbiamo visto che i vantaggi sono legati a

- eccellente risoluzione energetica
- ampia scelta di materiali (anche per forme e dimensioni)
- volume completamente attivo, no strati morti*
- possibilità di raggiungere elevata radiopurezza

Per contro questi rivelatori sono relativamente lenti e necessitano di basse temperature (ordine di decine di mK).

Il gas che si liquefa a più bassa T di tutti è l'elio, con una temperatura di circa 4.2 K. Se lo si pompa si può anche scendere a circa 1 K. Come si fa ad andare più in basso?

Inoltre: i segnali termici dei nostri rivelatori possono essere dell'ordine del centinaio di microkelvin, quindi è necessaria una stabilità in T pari al permille (o anche di più!)

Criostati a diluizione (cenni)

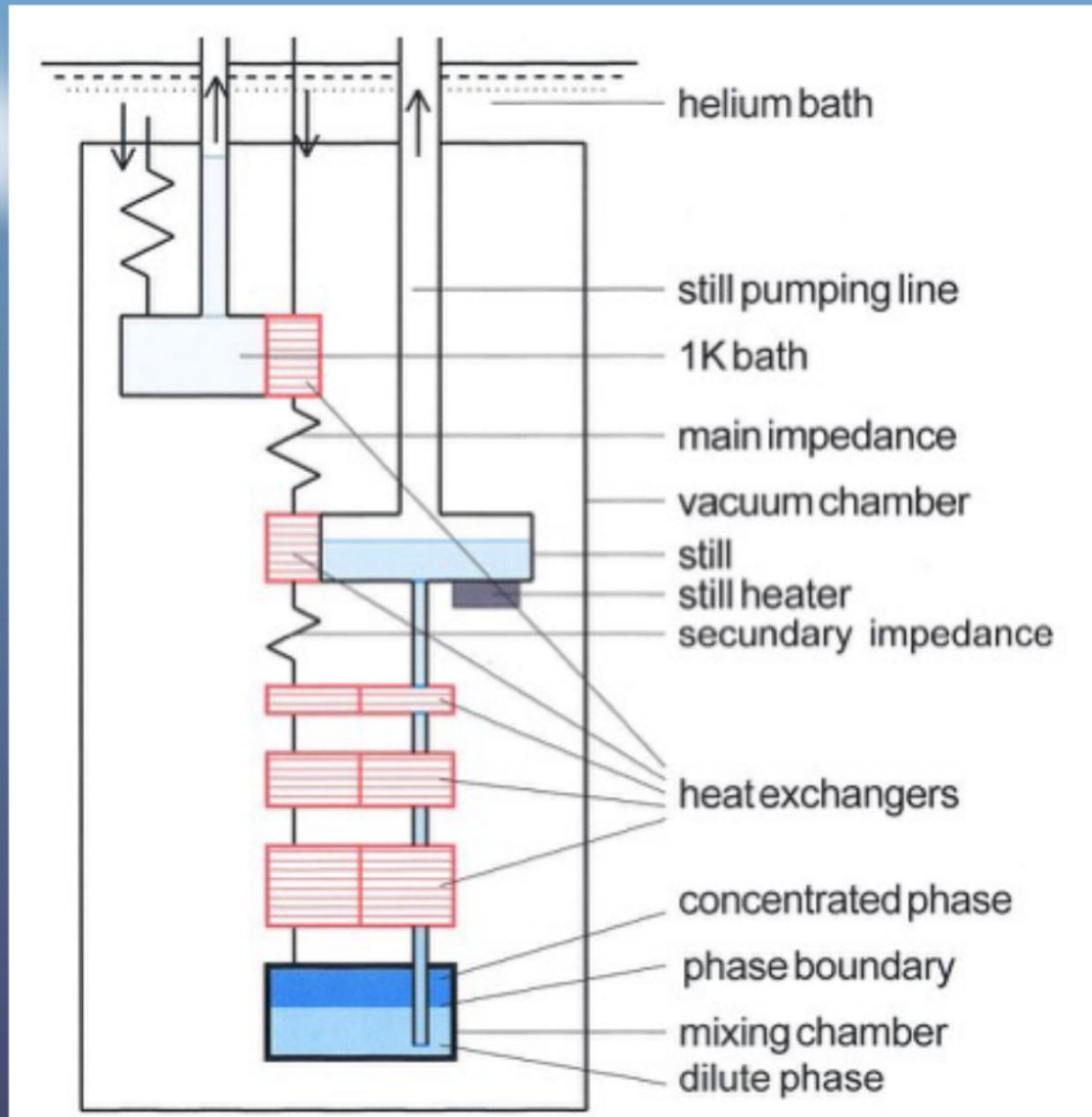
CRIOSTATO = macchina in grado di raggiungere e mantenere temperature criogeniche

- serie di volumi definiti da schermi concentrici (a cipolla);
- in ogni volume isolato da alto vuoto ($< 10^{-6}$ mbar) per evitare conduzione e convezione;
- 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

Criostati a diluizione (cenni)



Criostati a diluizione (cenni)

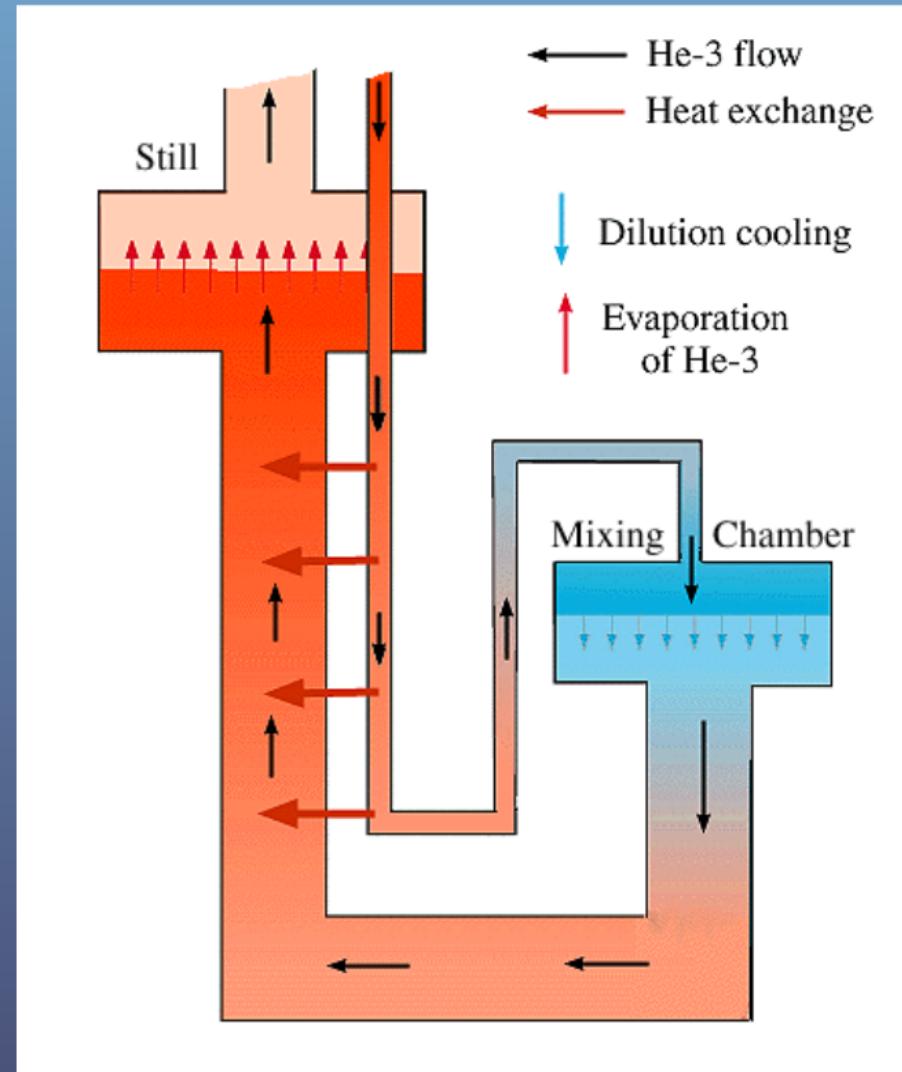
Una miscela He₃/He₄ viene fatta condensare tra la mixing chamber e lo still

Nello still L'He₃ viene continuamente pompato

L'He₃ viene reimmesso nella mixing chamber dal condenser

Nella MC avviene un separamento di fasi (fase concentrata e fase diluita)

Il passaggio dell'He₃ tra le due fasi causa un abbassamento di T, come se fosse del liquido che diventa gassoso



Criostati a diluizione (cenni)



Questo per quel che riguarda la "teoria" di questi rivelatori

Prima domanda...

Perché i rivelatori termici?

Termalizzazione... non è finita

Assorbimento e termalizzazione

Una sola condizione di rivelatore: essere in grado di assorbire il tutto il fascio di particelle prima di arrivare al rivelatore.

I boschi servono molto energia solare. Ma non che siano decisamente inferiori alle batterie. Infatti il loro tempo di ricarica è molto più corto.

$$\Delta T = E/C$$

Radiazione termica
creazione di calore propagazione per circa
1 cm → $\Delta T \approx 10^3 K$

Radiazione non termica
intensità diretta proporzionale

$$\left\langle \frac{dE}{dp} \right\rangle \approx 10^{-10} \text{ pW}$$

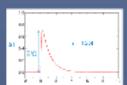
$$\text{Per dfr: } \left\langle \frac{dE}{dp} \right\rangle \approx 1 \text{ eV}$$

Cosa sono



Recupero della temperatura

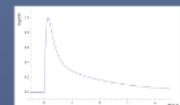
Il rivelatore termico G serve il segnale termico, trasducente di capacità termica, rispetto ai segnali termici, mentre i segnali termici sono generati da un riscaldamento.



Con qualche dettaglio in più...

Temperatura del filo
termico di rivelazione: $\Delta T_{\text{term}} \approx 10^3 K$, L'idea: limitare le
scorrerie elettroniche

Scorrerie non perturbante operante
soltanto di alcune decine di millisecondi: scorrere dell'onda
d'onda d'onda - scorrere termico più breve (e) e tendere alla riconciliazione



Risoluzione energetica

Abbiamo visto che i potenti di interazione sono basati con energia indebolita

che potrebbe essere utilizzata per la risoluzione energetica

$$\Delta E = \sqrt{\lambda \rho_0 T_0} \sqrt{Q_0}$$

che per una particella di carica N e di massa M, si ha

$$\Delta E = \sqrt{N Q_0 M} \sqrt{T_0}$$

Nella realtà non viene effettuato

Risoluzione energetica/2

La risoluzione energetica dei rivelatori termici è limitata dalla capacità di risciacquo del filo termico di rivelazione, mantenuto cioè la sua temperatura a una certa temperatura

$$\Delta E = \sqrt{\lambda \rho_0 T_0} \sqrt{Q_0}$$

dove λ è un coefficiente matematico che dipende dalla resistività del metallo e dalla tensione dell'alta tensione

$$Q_0 = \frac{T_0}{\rho_0} \cdot \frac{A}{L} \cdot \frac{V}{2}$$

Dunque, che la risoluzione energetica ΔE dipende dal valore di Q_0 , se poniamo, ad esempio, nella metà fa così non avremo più abbastanza di calore per di cui avremo una scarsa energia, non molto, ecc.

Sensori

Nel docente sono stati inventate tipologie di sensori di temperatura (e alcuni che rilevano non solo la temperatura, vediamo come...).

Qui vengono riportate solo le categorie di rivelatori che ad oggi hanno trovato maggiori applicazioni e applicazioni:

- Resistore a variazione di resistenza
- Superconducting Tunnel Junction (STJ)
- Quantum Wire Sensors (QWS)
- Metal-Magnetic Multilayer (MMI)
- Microresonator Inductive Sensors (MIRS)
- Resistor metallici con semiconduttori

Rivelatori termici

Ricapitolando... perché usare rivelatori a bassa T?

Abbiamo visto che i vantaggi sono legati a

- eccellenza insieme energetica
- ampia scia di materiali (anche per forme e dimensioni)
- volume completamente attivo, no scia morta*
- possibilità di raggiungere elevata calibrazione

Per contro questi modellini sono relativamente lenti e necessari di bassa temperatura fredda (di 40 K).

Il gas che si raffredda a più bassa T di tutti è l'elio, con uno scorrimento di 4 K. Per questo i rivelatori termici si arrebatranno a circa 1 K. Come si fa allora più in basso?

Nonostante sia collegato in gran parte (che si sono già visti)

Criostati a diluizione (cenni)

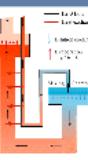
Una ressa di fili
viste forte condensazione tra
la corrente elettrica e i fili

Nello STJ (Hayashi)
utilizzando un filo di nichel

Una ressa di fili
vista forte condensazione
nella corrente elettrica del
condensatore

Nella MM, avendo un
impedimento di bassa frequenza
connesso a due fili

è facile che la corrente
che fluisce nel filo
si arrebatranno a circa 1 K
e quindi la corrente
che fluisce nel filo che
è sotto zero



Criostati a diluizione (cenni)

CRIOSTATO = macchina in grado di raggiungere e
mantenere temperature molto basse

- serie di valori definiti di basso concentrazione (esponenziali)
- in ogni volume iniziale di aria stazionaria ($T_c = 10^3 K$) per
ogni dei quali si raffredda

gli schermi concentrici e a percentuale decrescente servono
a raffreddare l'impianto (legge di Stefan-Boltzmann)

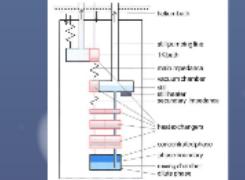
→ per questo i rivelatori termici sono molto più
piccoli che rimangono attivamente caldi nelle parti più
interne del criostato

UNICO CRIOSTATO = è l'unica domanda rimanente in
grado di generare potenza refrigerante
costante a temperatura dell'ordine del millesimo
di grado Celsius

- a temperature sufficientemente basse la resistenza è di circa
100 ohm e perciò il passaggio del corrente si divide in
una serie di processi indipendenti

Criostati a diluizione (cenni)

Criostati a diluizione (cenni)



Ora una breve carrellata su alcuni esperimenti di fisica



Esperimento Michelson-Morley



Esperimenti sul doppio beta

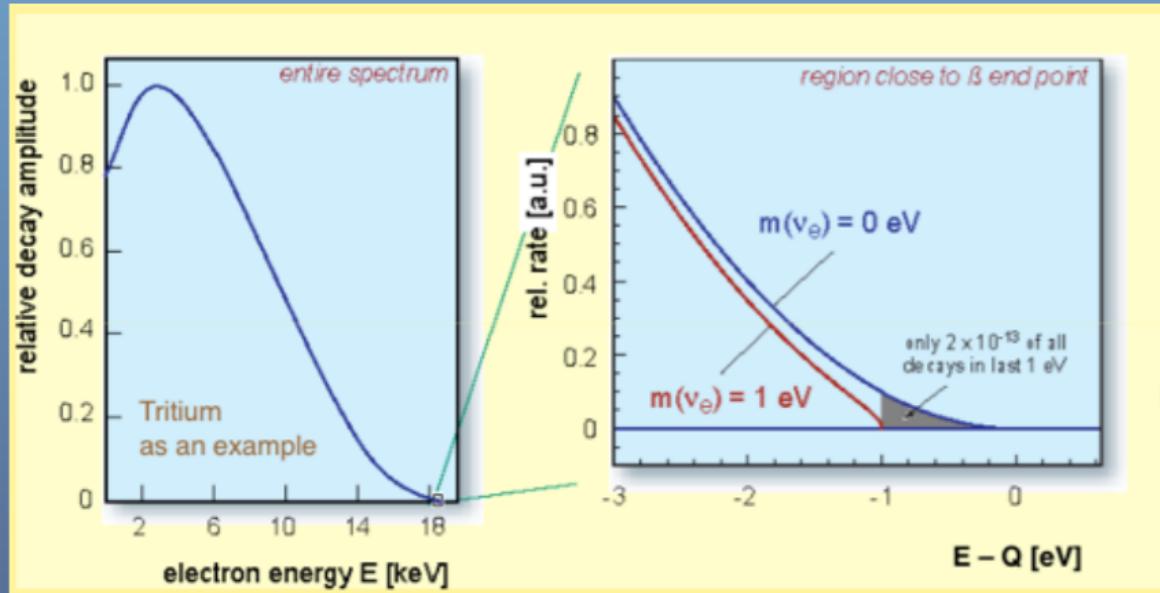


LHC (Large Hadron Collider)



Spazio (Planck)

Esperimenti per la misura della massa del neutrino



- 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
- necessario un alto numero di rivelatori funzionanti in parallelo (....)

I cristalli in questo caso sono molto piccoli, dell'ordine delle decine di centinaia di microgrammi

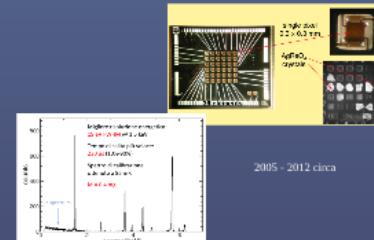
Milano, <2005



Genova

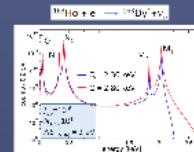


Milano Bicocca + Genova (+ altri...)



HOLMES: 2013-in corso

- sorgente: elio in impianto nell'assorbitore
- massa dell'ordine dei mg
- array di molti rivelatori (~1000)
- sensori: TES (ottima risoluzione, velocità)
- lettura a microvoci



- 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
- necessario un alto numero di rivelatori funzionanti in parallelo (....)

I cristalli in questo caso sono molto piccoli, dell'ordine delle decine/centinaia di microgrammi

Milano, <2005

MIBETA

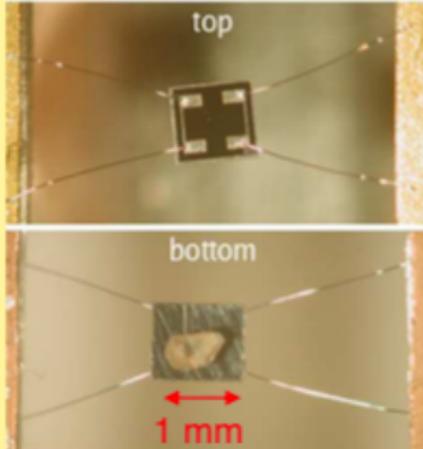


Assorbitori

- Cristalli singoli di AgReO_4
- attività $^{187}\text{Re} \approx 0.54 \text{ Hz/mg}$
- $M \approx 0.25 \text{ mg} \Rightarrow A \approx 0.13 \text{ Hz}$

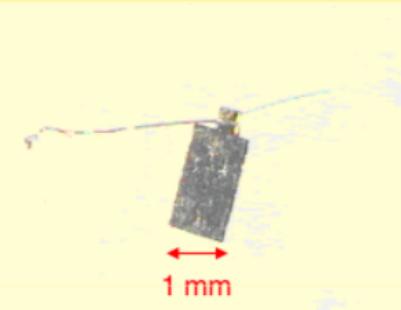
Sensori fononici

- termistori di Si impiantati
- alta riproducibilità -> array
- possibilità di microlavorazione



Genova

MANU



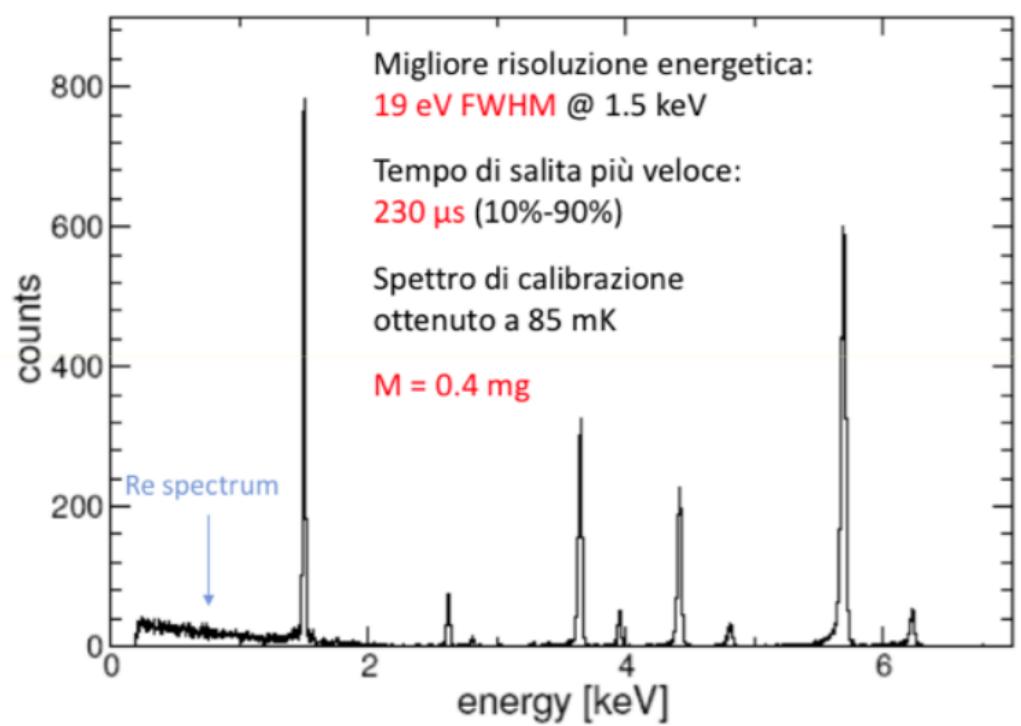
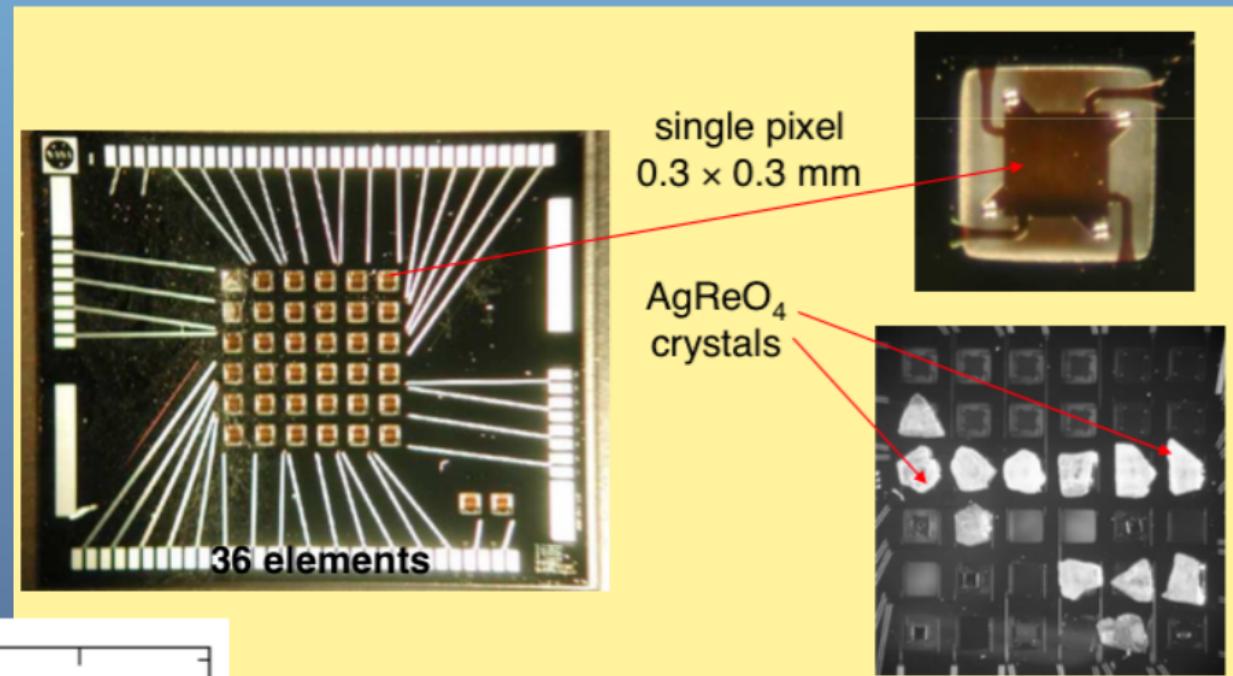
Assorbitori

- Cristalli singoli di Re metallico
- $M \approx 1.5 \text{ mg} \Rightarrow A \approx 1.5 \text{ Hz}$

Sensori fononici

- Termistori NTD Ge
- Dimensioni = $0.1 \times 0.1 \times 0.23 \text{ mm}^3$

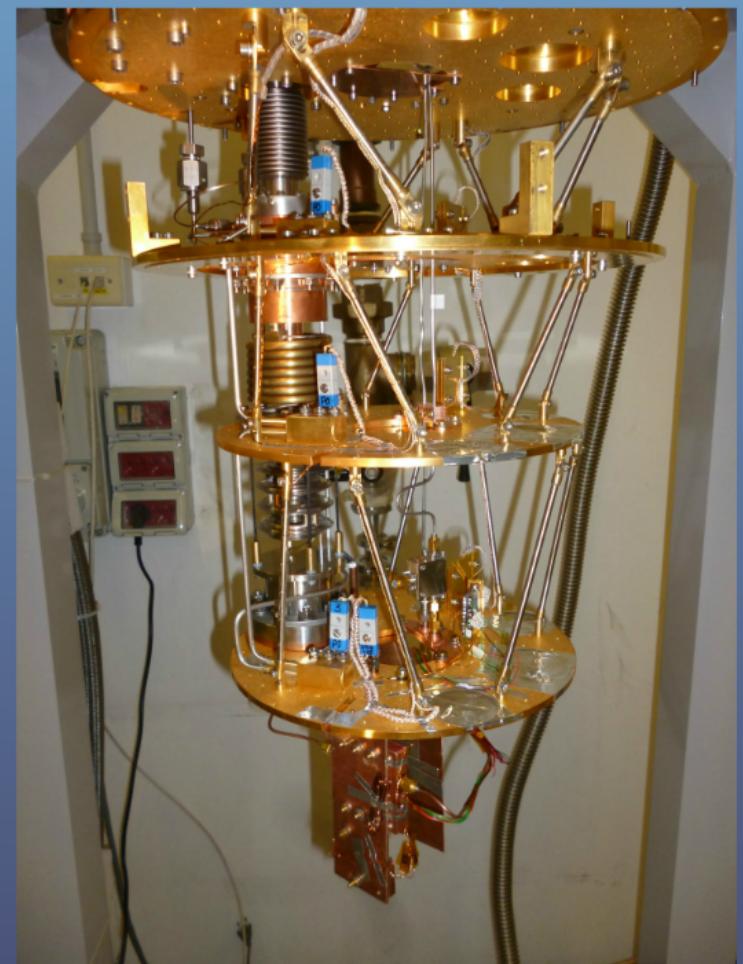
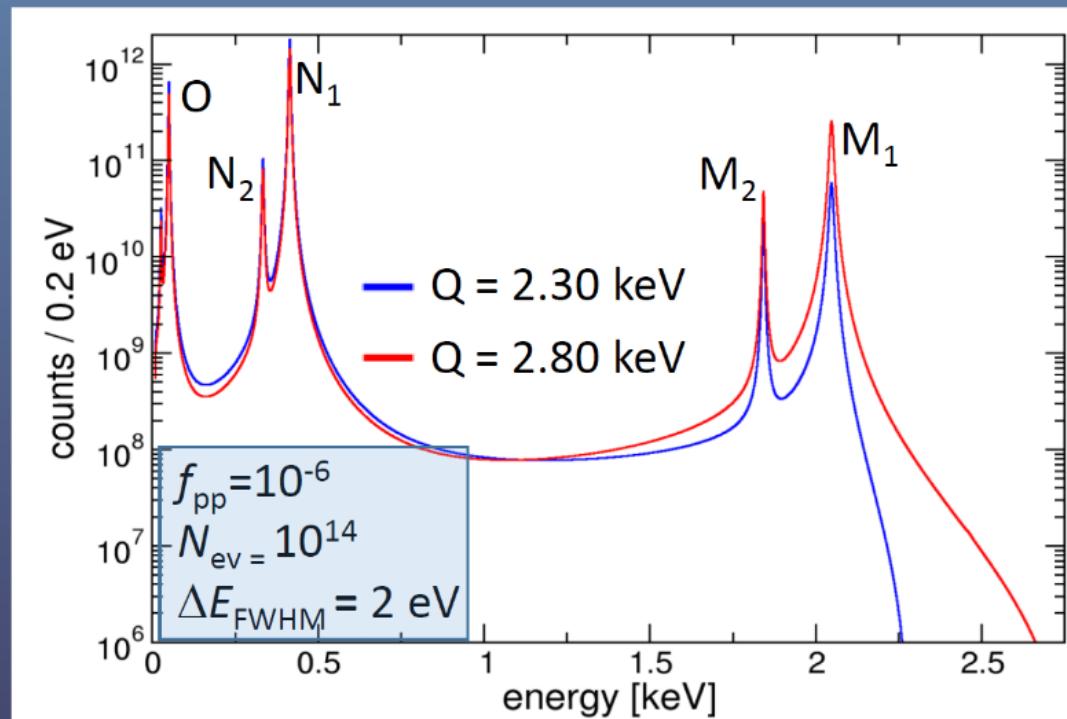
Milano Bicocca + Genova (+ altri...)



2005 - 2012 circa

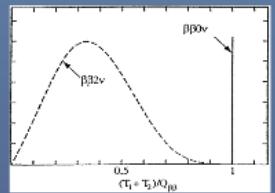
HOLMES: 2013-in corso

- sorgente: olmio impiantato nell'assorbitore
- masse dell'ordine dei mg
- array di molti rivelatori (~1000)
- sensori: TES (ottima risoluzione, velocità)
- lettura a microonde



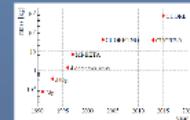
Esperimenti sul doppio beta

Doppio beta senza neutrini



Richieste:

- Alta risoluzione per discriminare il doppio beta con neutrini
- Alta massa
- Elevatissima radiopurezza



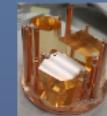
Macrocalorimetri di TeO₂ di 750g ciascuno, per una massa totale di circa 1 ton



Futuro: Cupid

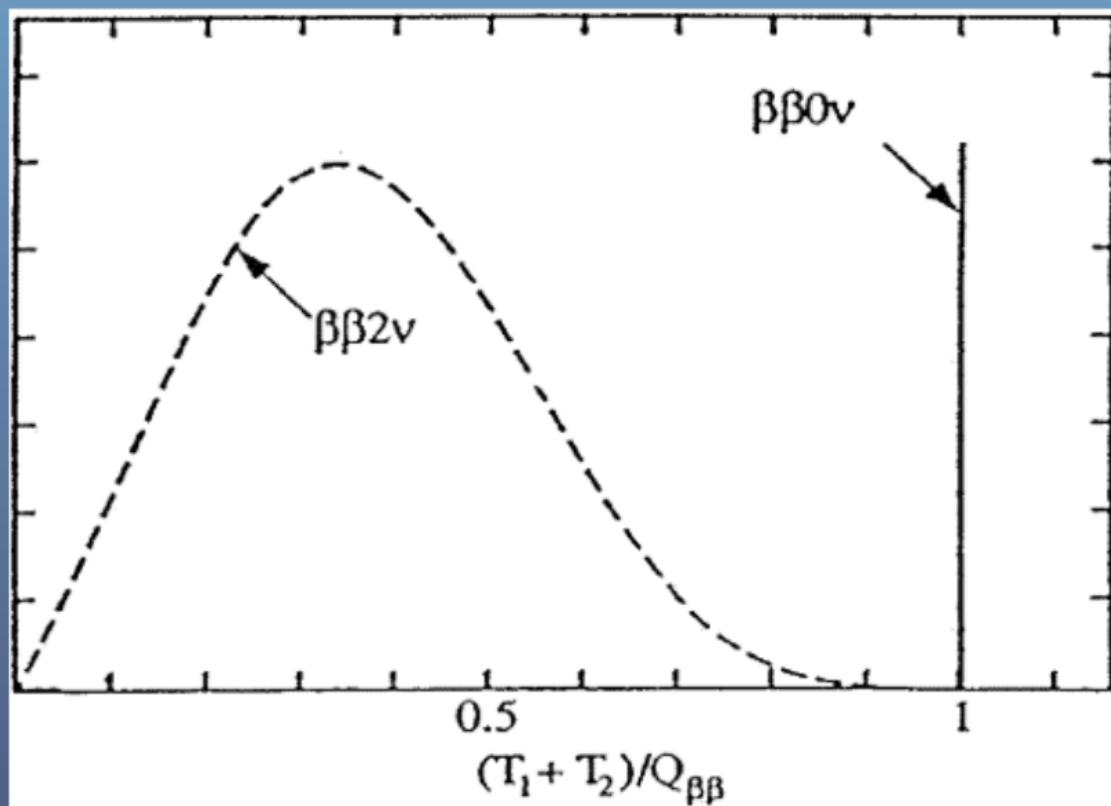
Rivelatori termici scintillanti

- zero fondo nella ROI
- discriminazione particelle
- necessaria minor massa



ZnSe...?

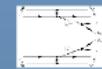
Doppio beta senza neutrini



- NCP prevista dal SM (permette legge del vidro)
- mai osservato sperimentalmente
- contiene importanti informazioni sulla flusso dei neutrini (permette Dirac o Majorana?)



Vita utile per un'ide decadimento
molto elevata ($> 10^{26}$ anni)

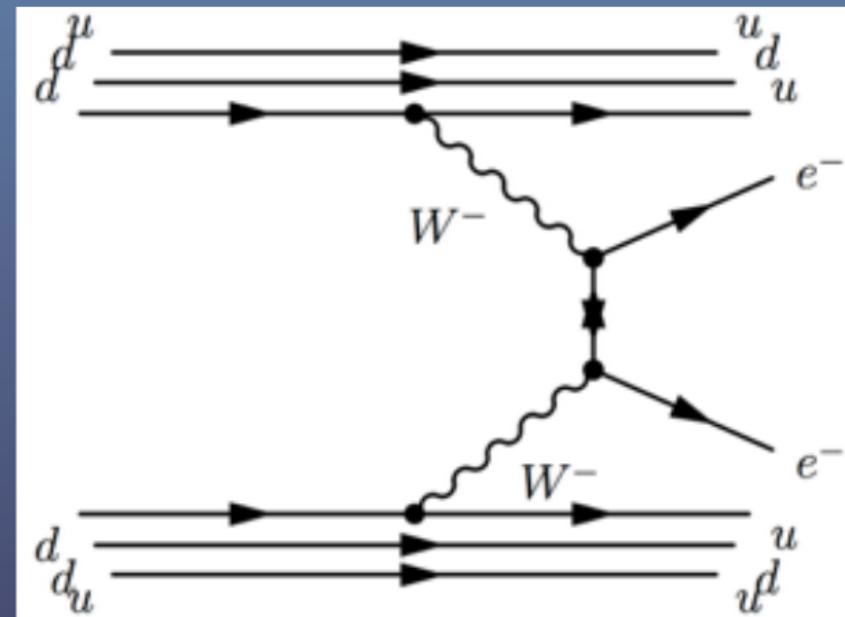


Richieste:

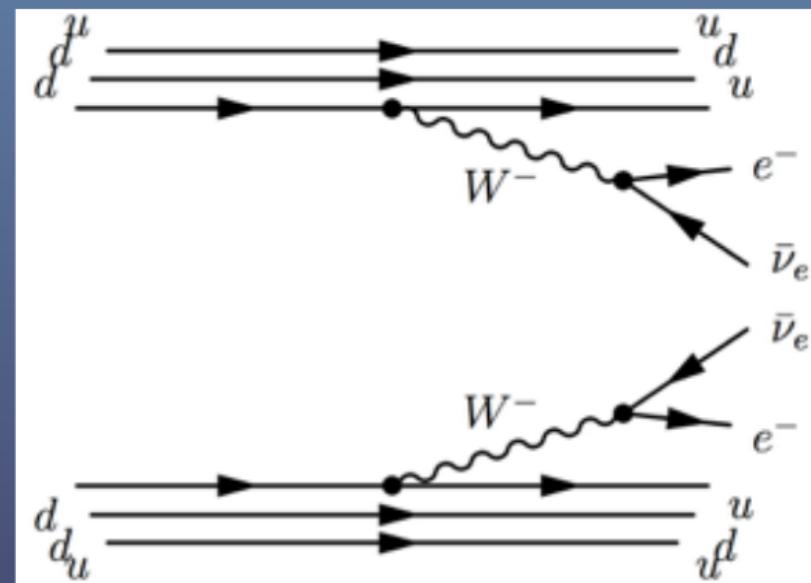
- Alta risoluzione per discriminare il dobbio beta con neutrini
- Alta massa
- Elevatissima radiopurezza

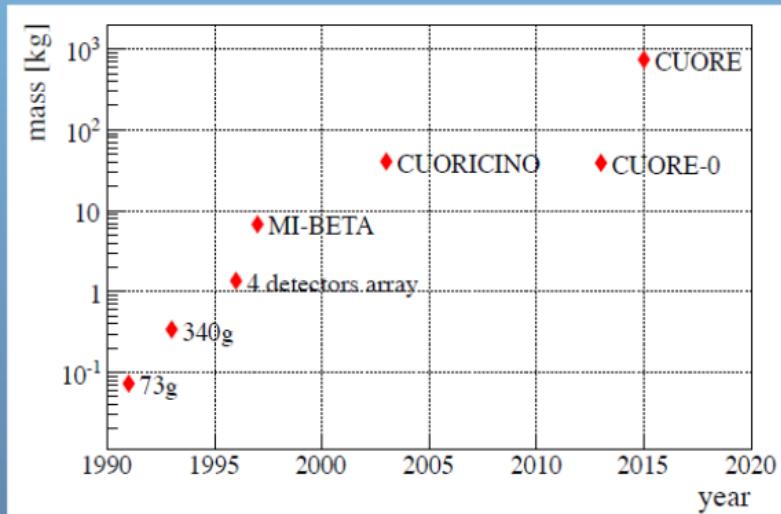
- NON previsto dal SM (numero leptonico violato)
- mai osservato sperimentalmente
- contiene importanti informazioni sulla fisica del neutrino (neutrino Dirac o Majorana?)

Vita attesa per un tale decadimento
molto elevata ($>10^{26}$ anni)



doppio decadimento beta con emissione di neutrini:
decadimento (raro) permesso, osservato, costituisce
fondo per il nostro esperimento



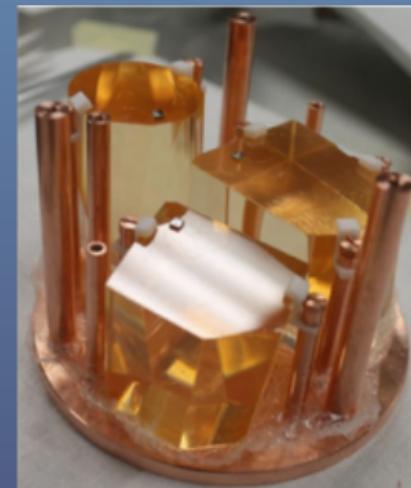


Macrocalorimetri di TeO_2 di 750g ciascuno, per una massa totale di circa 1 ton

Futuro: Cupid

Rivelatori termici scintillanti

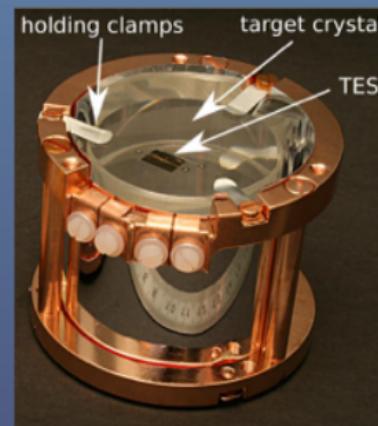
- zero fondo nella ROI
- discriminazione particelle
- necessaria minor massa



ZnSe...?

Dark matter (CRESST)

- Fondo zero a bassa energia
- discriminazione particelle
- grande massa



CaWO₄

Dark matter (CDMS)

- Fondo zero a bassa energia
- discriminazione particelle
- grande massa
- lettura di calore+carica!

