

Risultati e prospettive degli esperimenti CUORE e CUPID

Massimo Girola

Dottorando presso l'Università degli Studi di Milano-Bicocca

INFN – sez. Milano-Bicocca



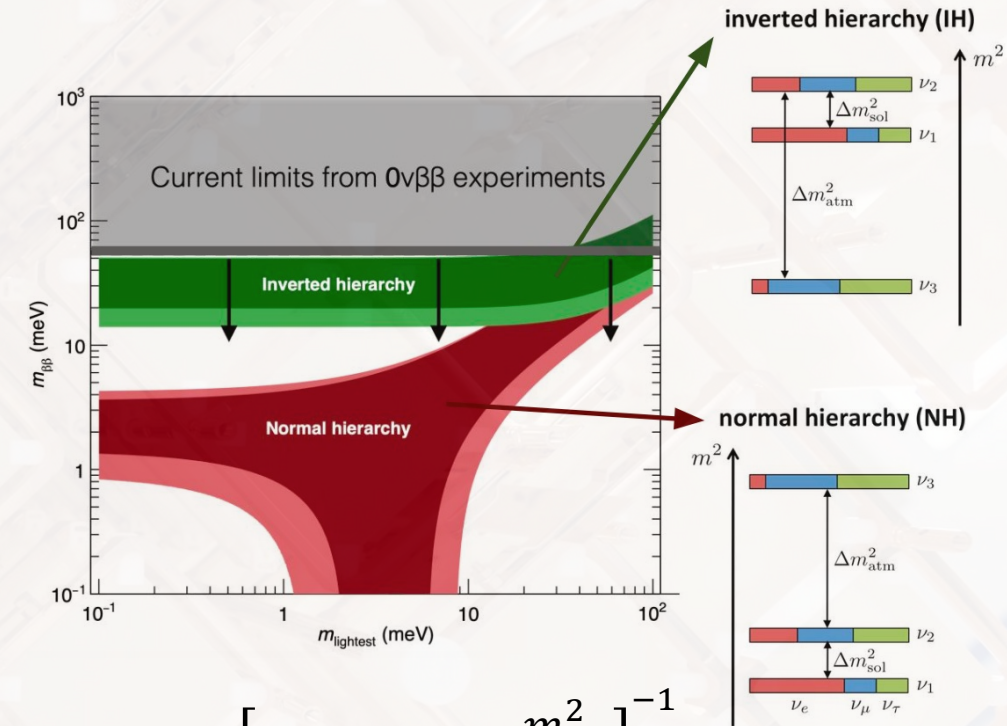
Doppio decadimento beta

• $2\nu\beta\beta$

- $(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^{\mp} + 2\bar{\nu}_e (\nu_e)$
- processo nucleare debole del second'ordine consentito dal MS
- osservato in 14 isotopi per i quali il decadimento β è energeticamente impossibile
- $T_{1/2}^{2\nu} \sim 10^{18} - 10^{22}$ yr

• $0\nu\beta\beta$

- $(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^{\mp}$
- proibito dal MS
- non ancora osservato: $T_{1/2}^{0\nu} > 10^{24} - 10^{26}$ yr
- indizi di Nuova Fisica:
 - implicherebbe $\Delta L = 2$
 - natura di Majorana del ν
 - vincoli sulla scala di masse dei ν e relativa gerarchia

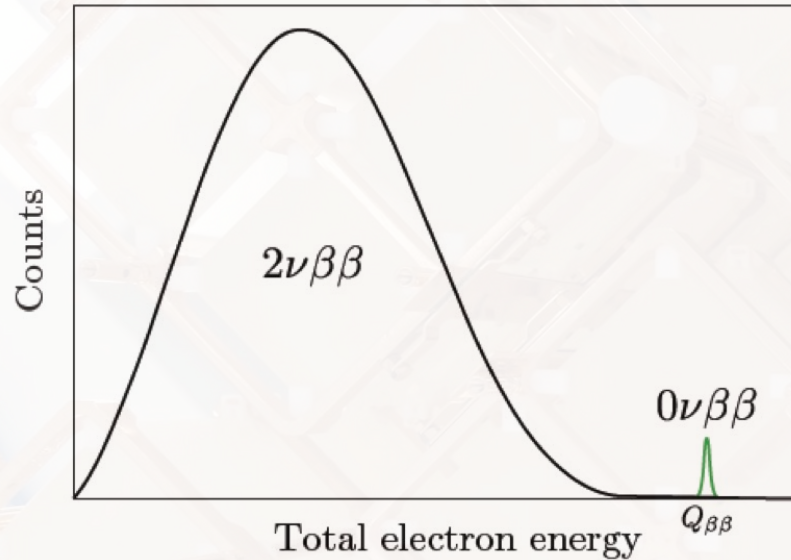


$$T_{1/2}^{0\nu} = \left[G_{0\nu} g_A^4 |M_{0\nu}|^2 \frac{m_{\beta\beta}^2}{m_e^2} \right]^{-1}$$

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{k=1,2,3} U_{ek}^2 m_k \right| \quad \text{massa efficace di Majorana}$$

Sensibilità sperimentale a $0\nu\beta\beta$

Firma del processo



- Rivelatori di grossa scala
- Ottima risoluzione energetica
- Fondi ultra-bassi nella regione di interesse

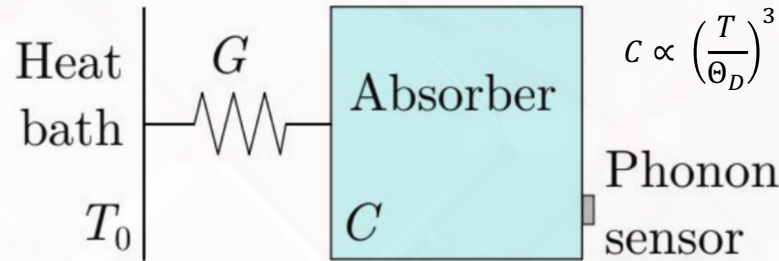
In presenza di fondo radioattivo nella ROI:

$$S^{0\nu} \propto \ln 2 \frac{\overset{\text{efficienza di}}{\underset{\text{rivelazione}}{\epsilon x \eta}} \overset{\text{abbondanza}}{\underset{\text{isotopica}}{N_A}}}{M_A} \sqrt{\frac{\overset{\text{esposizione}}{\underset{\text{(massa totale } M \times \text{ tempo di osservazione } T)}{MT}}}{\underset{\text{risoluzione energetica nella ROI}}{B\Delta}}} \underset{\text{background index nella ROI}}{B\Delta}$$

In assenza di fondi nella ROI (i.e. $MTB\Delta \sim \mathcal{O}(1)$):

$$S^{0\nu} \propto \ln 2 \frac{\epsilon x \eta N_A}{M_A} MT$$

Rivelazione con calorimetri criogenici



Principio di funzionamento:

Cristallo dielettrico e diamagnetico mantenuto a $T_0 \sim 10$ mK

Termometro molto sensibile accoppiato al cristallo (ad es. termistore con grande $\frac{dR}{dT}$)

Deposizione energetica $\Delta E \Rightarrow \Delta T(t) \sim \frac{E}{C} e^{-t/\tau}$ con $\tau = \frac{G}{C}$

Caratteristiche:

✓ Ottima **risoluzione energetica** (qualche keV @ 1 MeV)

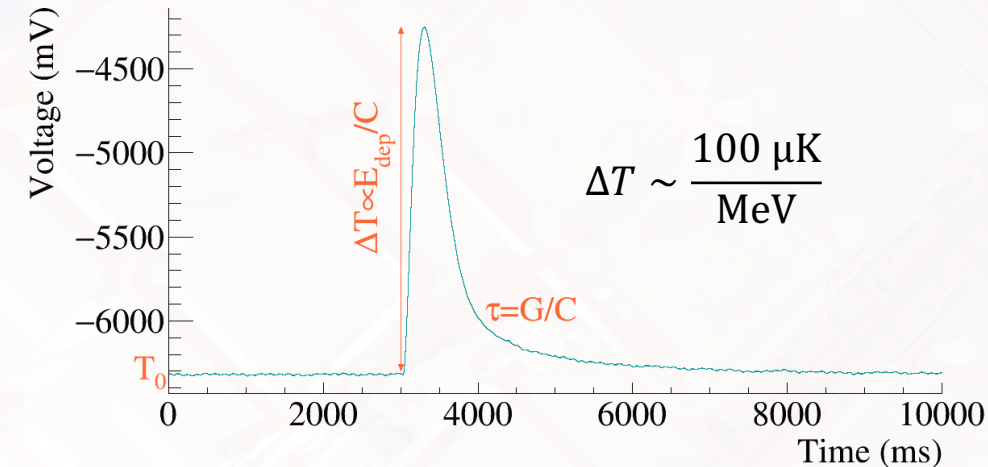
✓ **Scalabilità**

✓ Grande varietà di assorbitori disponibili

✓ Possibilità di integrare la sorgente del decadimento nel volume attivo del rivelatore

✓ Rivelatori lenti, adatti solo in condizioni di basso tasso di conteggi

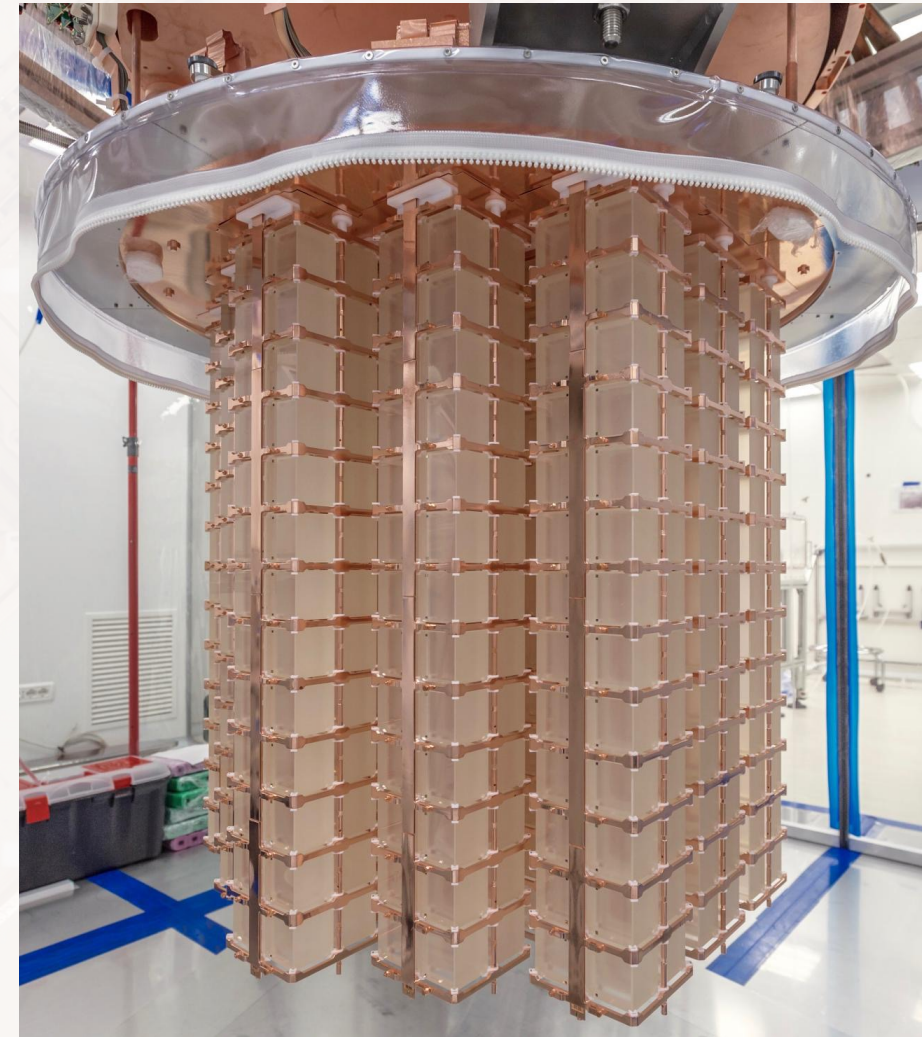
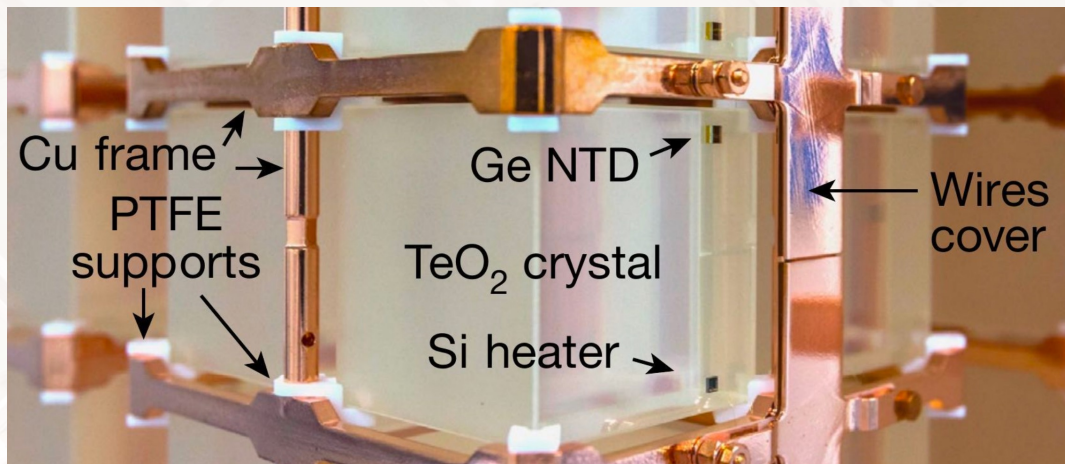
$$S^{0\nu} \propto \ln 2 \frac{\epsilon x \eta N_A}{M_A} \sqrt{\frac{MT}{B\Delta}}$$



L'esperimento CUORE

CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)

- scopo primario: ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te ($Q_{\beta\beta} = 2527.5$ keV)
- 988 cristalli ($5\times 5\times 5$ cm³) di $^{\text{nat}}\text{TeO}_2$ (abbondanza naturale ^{130}Te 34%)
- massa totale: 742 kg di TeO_2 - **206 kg di ^{130}Te**
- temperatura di base ~ 15 mK
- lettura termica con termistori a semiconduttore Ge-NTD
- operato *underground* presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Le conquiste di CUORE

$$S^{0\nu} \propto \ln 2 \frac{\epsilon x \eta N_A}{M_A} \sqrt{\frac{MT}{B\Delta}}$$

Esposizione

- esperimento su scala della tonnellata
- raccolta dati ininterrotta da marzo 2019
- dati pubblicati per **1 ton·yr di TeO₂**
288.8 kg·yr di ¹³⁰Te ([Nature 604, 53-58 \(2022\)](#))
- ad oggi **raccolti > 2 ton·yr** (analisi in corso)

Background Index nella ROI

- collocazione *underground* ai LNGS
- grande attenzione alla radiopurezza dei cristalli e dei materiali circostanti
- schermature passive per abbattere i restanti fondi radioattivi

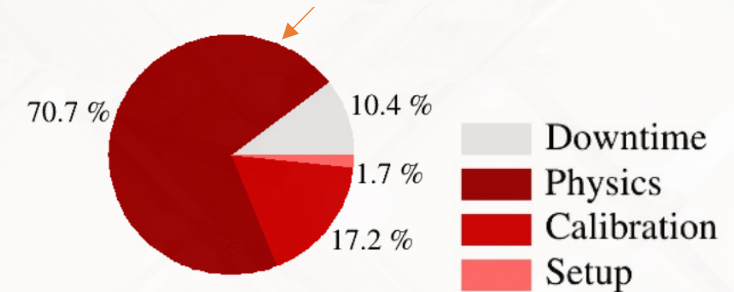
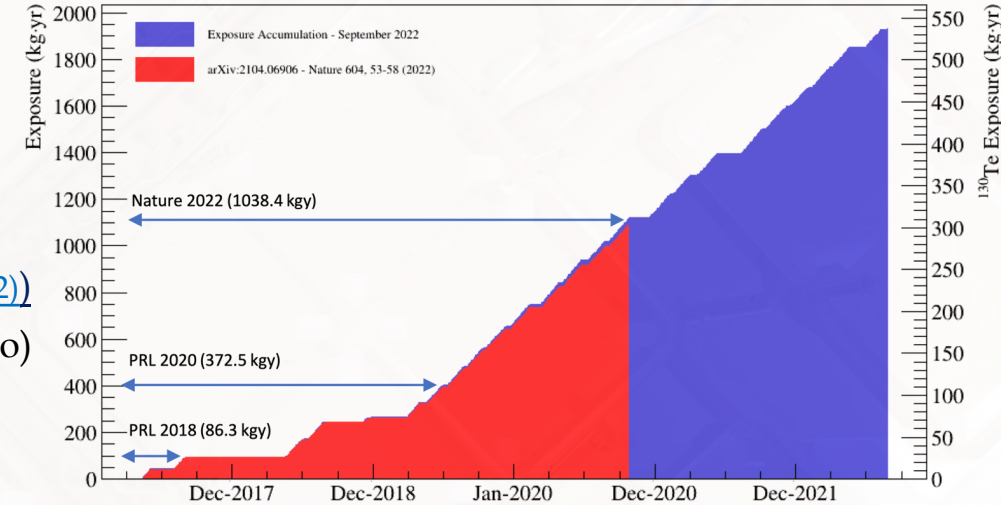
$$B = 1.49(4) \times 10^{-2} \text{ counts}/(\text{keV} \cdot \text{ton} \cdot \text{yr})$$

Risoluzione energetica nella ROI

- ottima risoluzione energetica intrinseca grazie alla tecnica di rivelazione
- correzioni per instabilità termiche
- tecniche di riduzione del rumore

$$\text{FWHM}(Q_{\beta\beta}) = (7.8 \pm 0.5) \text{ keV}$$

$$\text{FWHM}(Q_{\beta\beta})/Q_{\beta\beta} = 0.3 \%$$

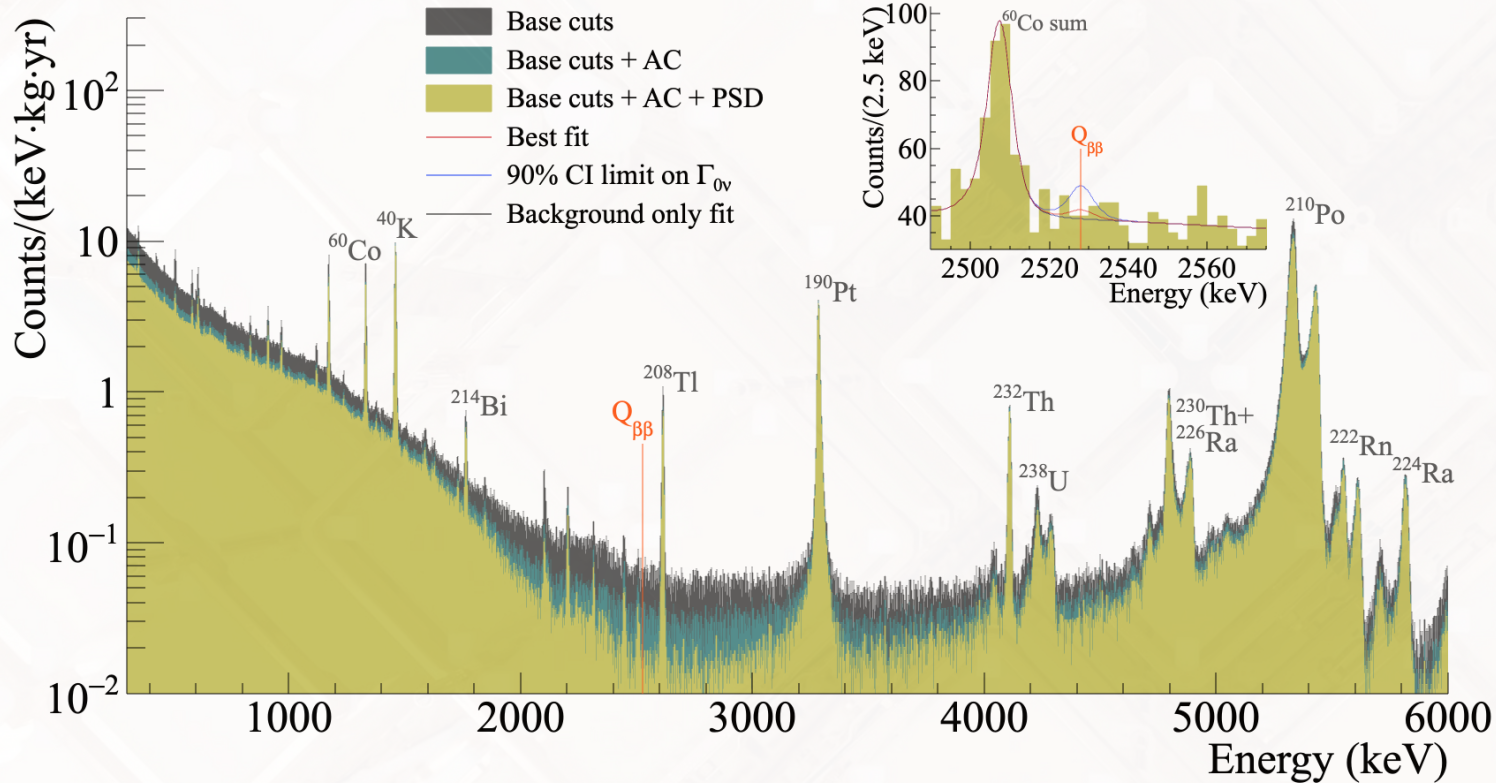


[Alduino C. et al. \(CUORE collaboration\), Phys. Rev. Lett. 120, 132501, \(2018\)](#)

[Alduino C. et al. \(CUORE collaboration\), Phys. Rev. Lett. 124, 122501, \(2020\)](#)

[Adams D. et al. \(CUORE collaboration\), Nature 604 \(2022\) 7904, 53-58](#)

Il risultato di CUORE sul $0\nu\beta\beta$



CUORE ([Nature 604, 53–58 \(2022\)](#)):

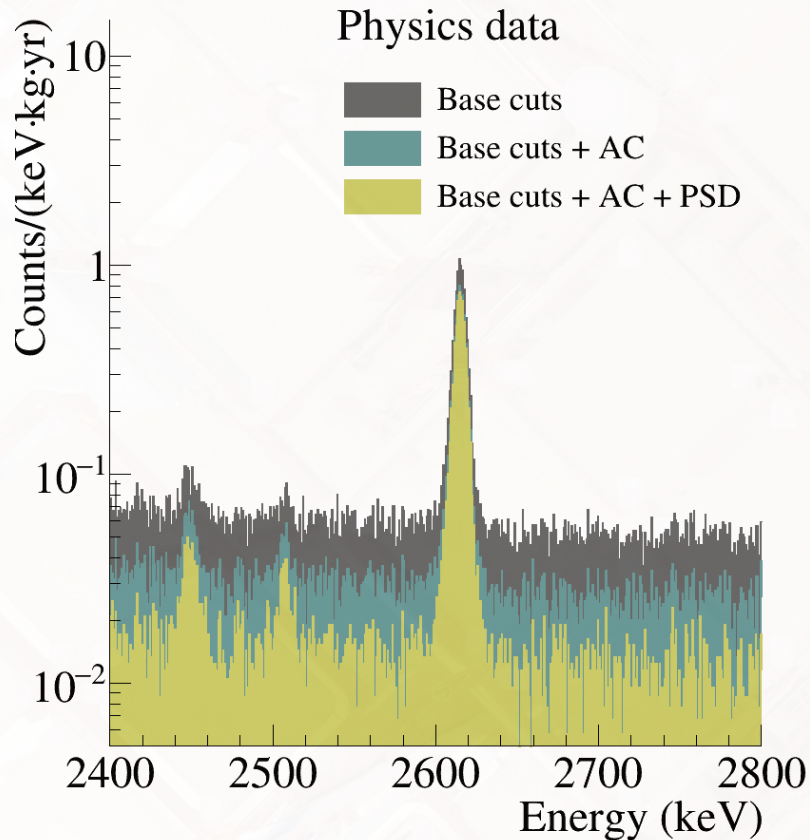
- Esposizione 1038.4 kg·yr
- Nessuna evidenza di $0\nu\beta\beta$
- Miglior limite sul $T_{1/2}^{0\nu}$ nel ^{130}Te :

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.2 \times 10^{25} \text{ yr (90\% C.I.)}$$

- Limite superiore sulla massa efficace di Majorana

$$m_{\beta\beta} < 90 - 350 \text{ meV (90\% C.I.)}$$

Verso un esperimento di prossima generazione



Limiti alla sensibilità di CUORE dovuti a fondi:

$$S^{0\nu} \propto \ln 2 \frac{\epsilon x \eta N_A}{M_A} \sqrt{\frac{MT}{B\Delta}}$$

➤ Particelle α degradate

- da decadimenti radioattivi (superficiali) nei materiali circostanti i rivelatori
- da decadimenti radioattivi (superficiali) in cristalli
- costituiscono il fondo dominante (contributo del 90% nel *background index*)

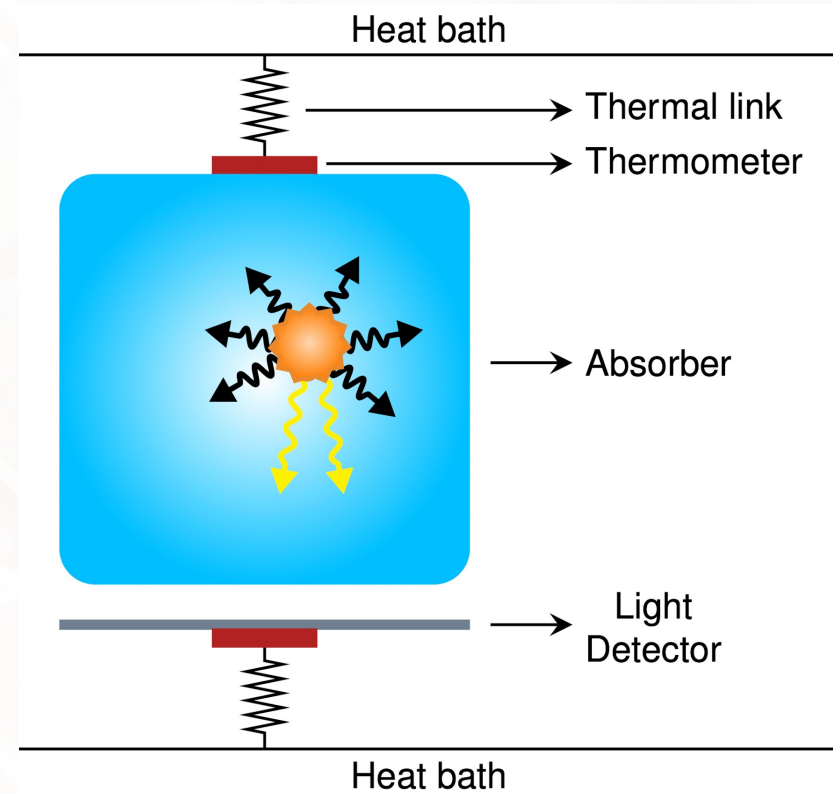
➤ Altri fondi

- Da catene $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ dovute a contaminazioni nei cristalli e nei materiali circostanti

L'esperimento CUPID (CUORE Upgrade with Particle Identification)

Calorimetri criogenici scintillanti:

- sfruttano cristalli scintillanti di Li_2MoO_4
- sistema a doppia lettura (luce + calore)
- lettura calorimetrica della luce di scintillazione

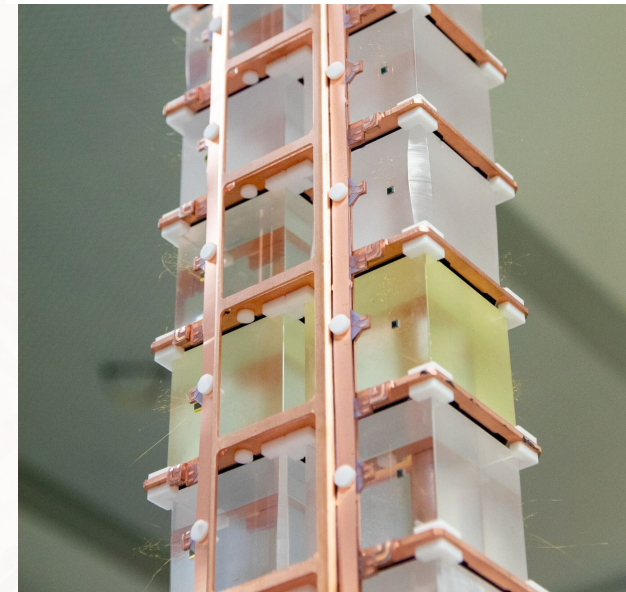
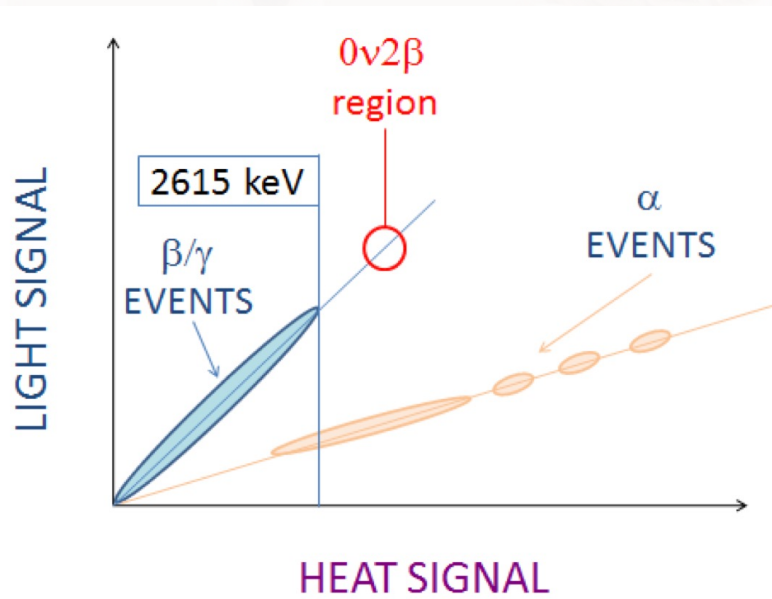
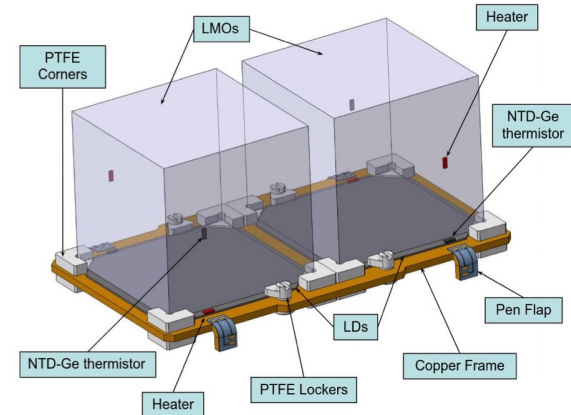


$0\nu\beta\beta$ del ^{100}Mo $Q_{\beta\beta} = 3034 \text{ keV}$

- ✓ Diverse tipologie di particelle interagenti hanno diverse rese in luce (*light yield*)
- ✓ Strategia attiva di identificazione delle particelle interagenti basata sulla luce misurata dal LD

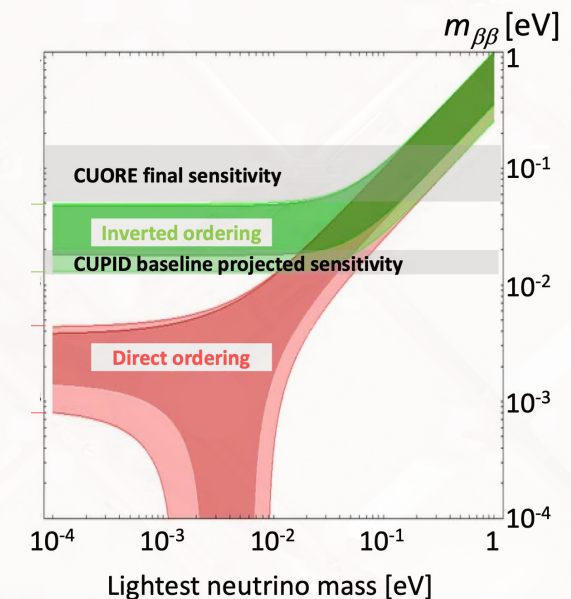


Optimization of the first CUPID detector module



Conclusioni

- CUORE dimostra la fattibilità di esperimenti criogenici (~ 10 mK) su scala della tonnellata
- I dati finora raccolti consentono di porre il limite più stringente sul $T_{1/2}^{0\nu}$ del ^{130}Te
- Il fondo dominante è dovuto all'impossibilità di discriminare fondi da α degradate
- Un esperimento che integri una strategia attiva di identificazione delle particelle interagenti può abbattere il fondo dominante
- CUPID attuerà una identificazione attiva delle particelle grazie all'utilizzo di calorimetri criogenici scintillanti combinati con LD



Grazie per l'attenzione!



Materiale aggiuntivo

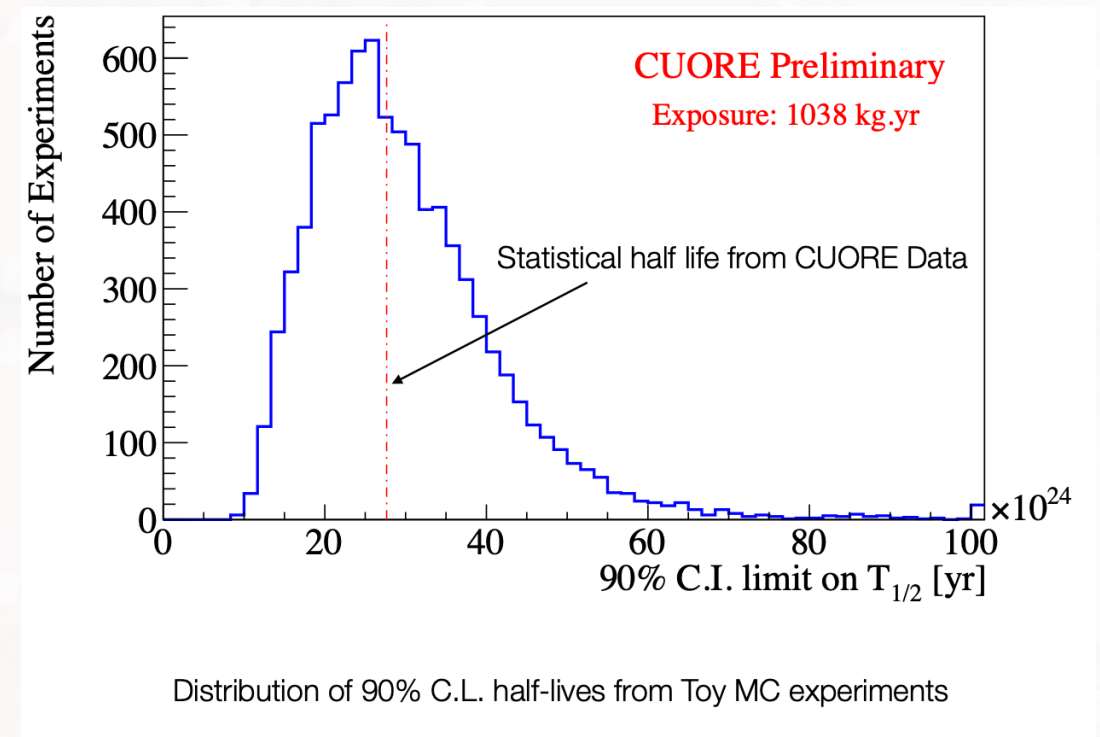


Limite e sensibilità

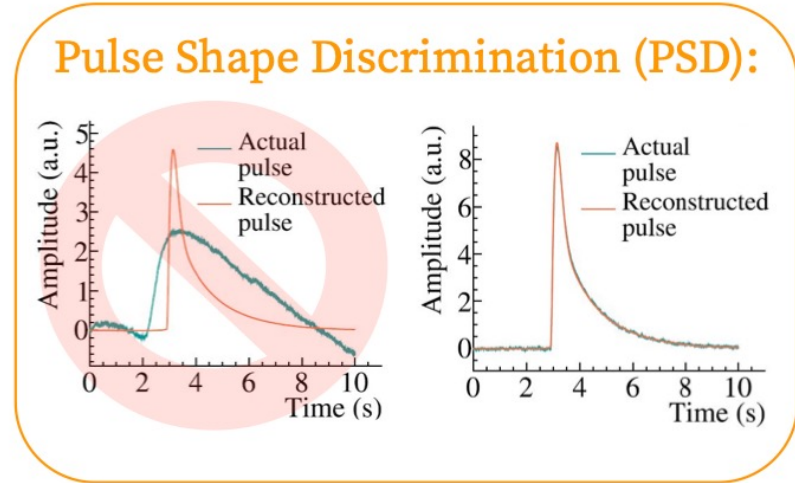
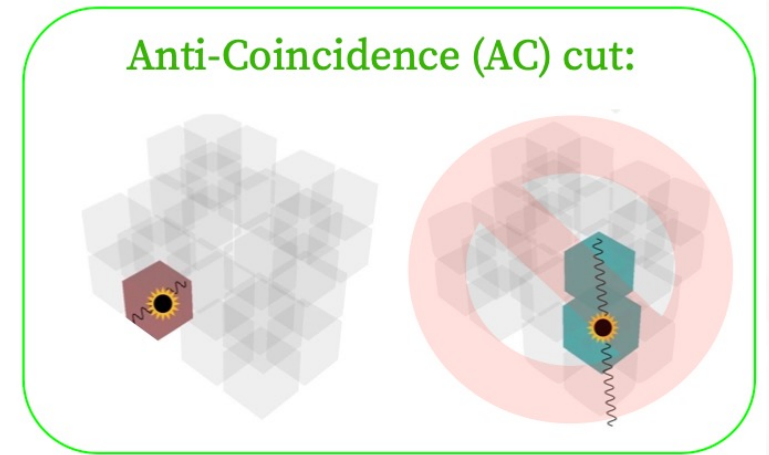
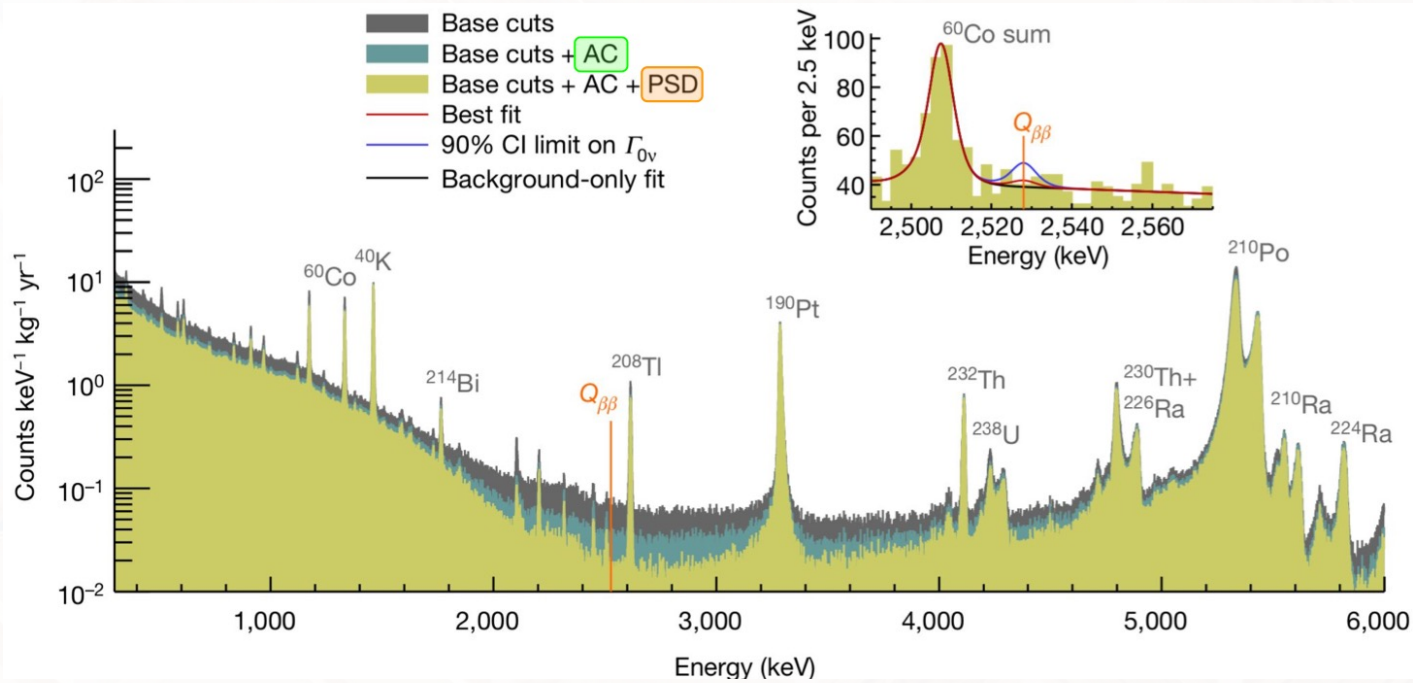
$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.2 \times 10^{25} \text{ yr (90\% C.I.)}$$

$$T_{1/2}^{0\nu} (^{130}\text{Te}) > 2.8 \cdot 10^{25} \text{ yr (90\% C.I.)}$$

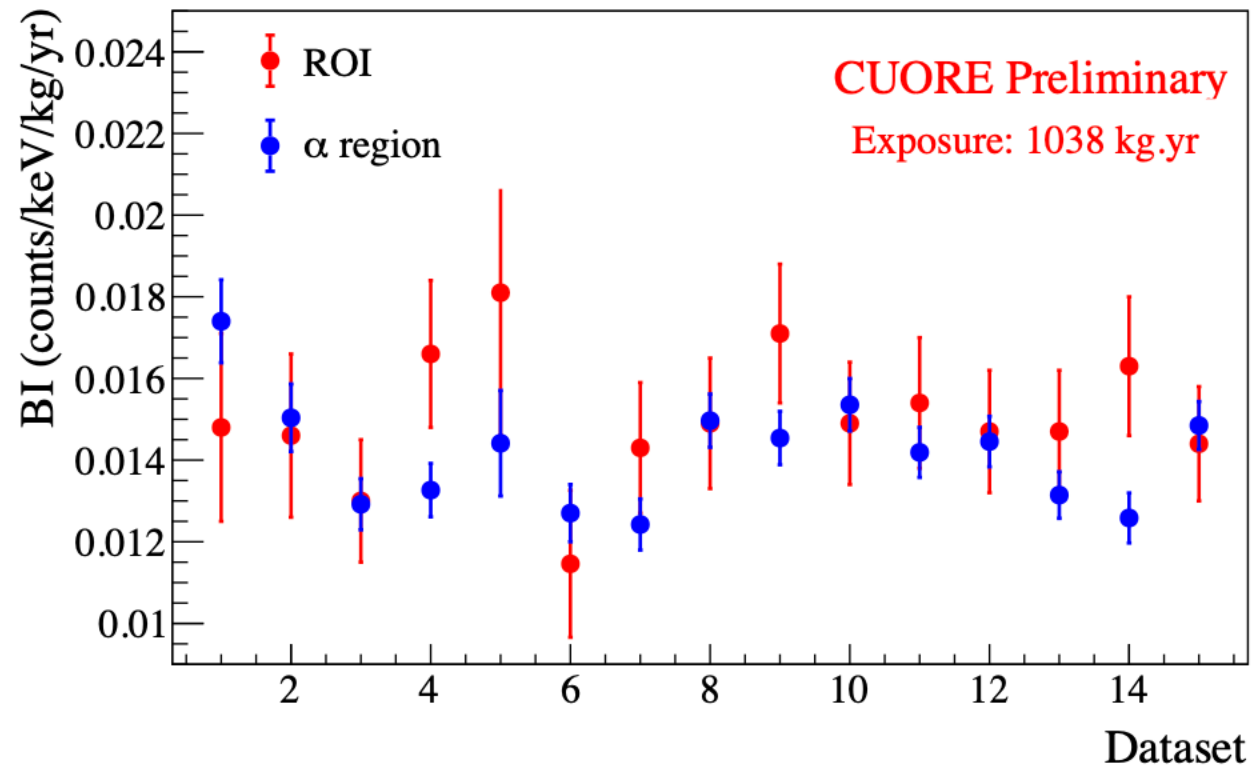
probabilità del 72% di ottenere un limite più forte data la sensibilità ottenuta



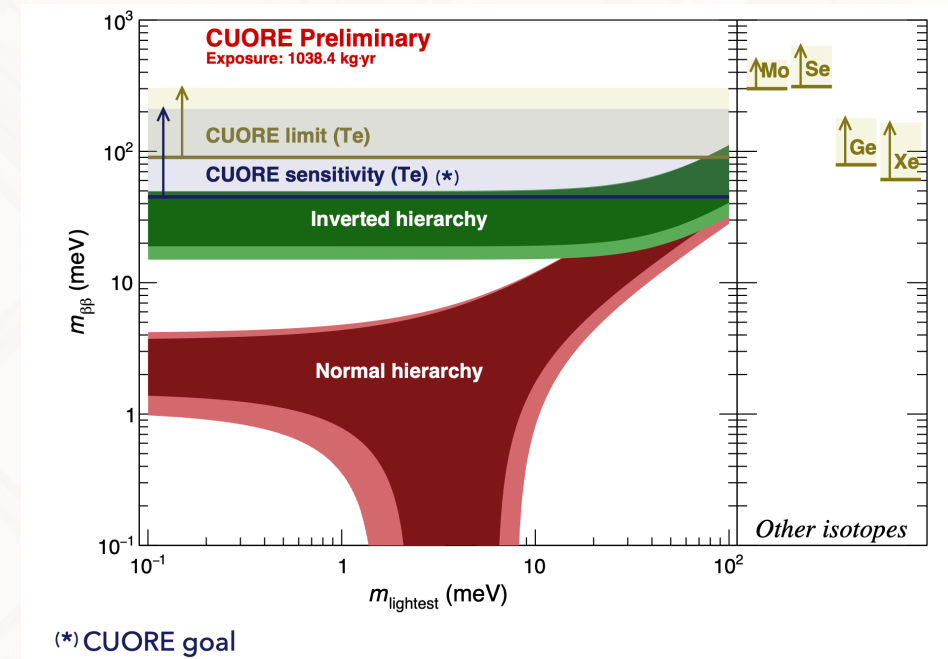
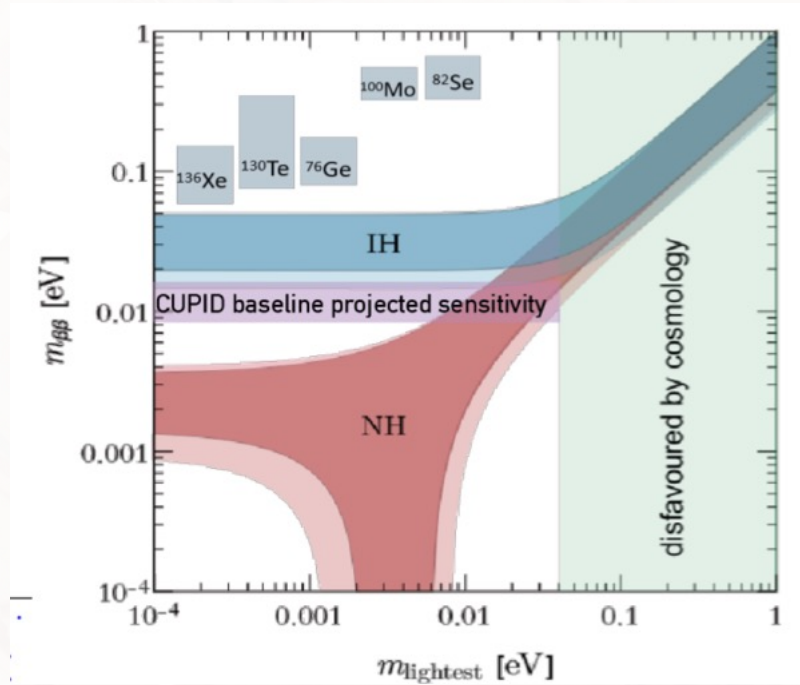
AC cut – PSD cut



Background index



Lobster Plot



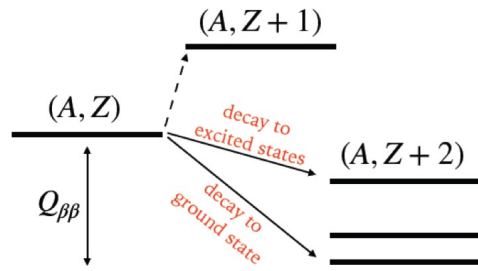
$$T_{1/2}^{0\nu} = \left[G_{0\nu} g_A^4 |M_{0\nu}|^2 \frac{m_{\beta\beta}^2}{m_e^2} \right]^{-1}$$

Incertezze nella conoscenza dell'elemento di matrice nucleare

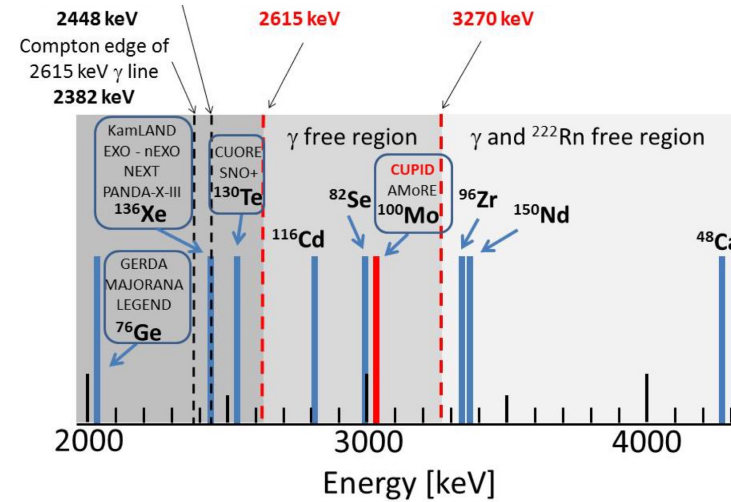
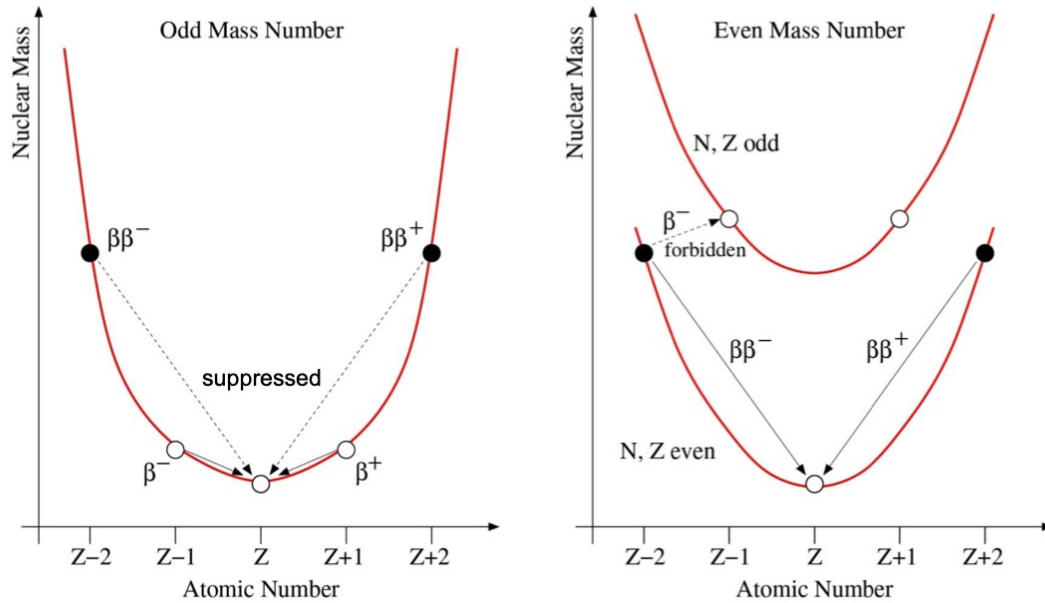
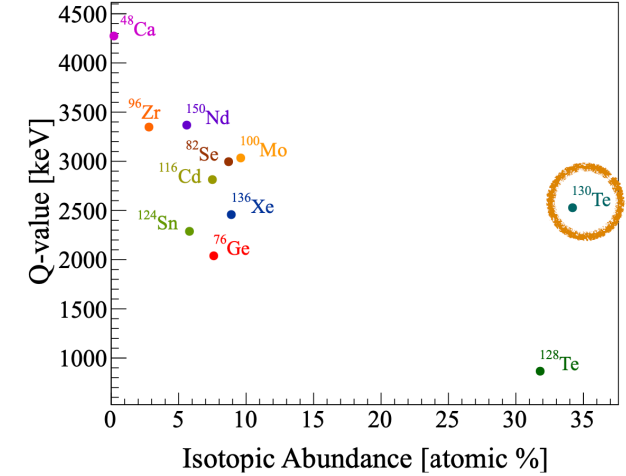


grande intervallo di valori per limiti su $m_{\beta\beta}$

Decadimento doppio beta



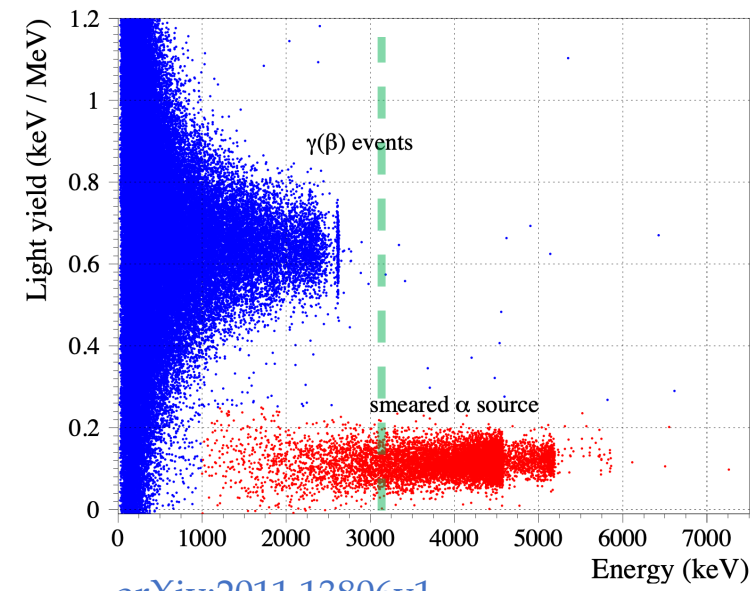
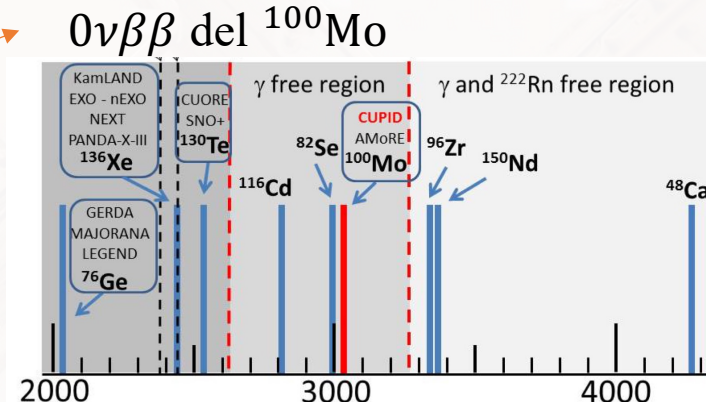
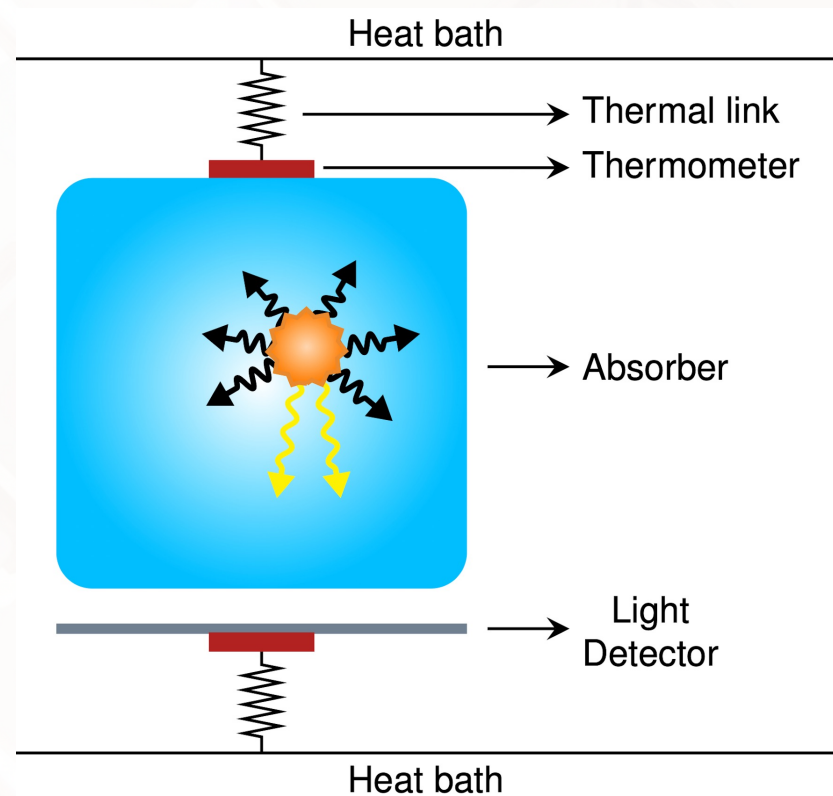
$\beta\beta$ Decay Reaction	Isotopic Abundance [atomic %]	Q-value [keV]
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	0.2	4274
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	7.6	2039
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	8.7	2996
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	2.8	3348
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	9.6	3034
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	7.5	2814
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	5.8	2288
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	31.8	866
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	34.2	2528
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	8.9	2458
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	5.6	3368



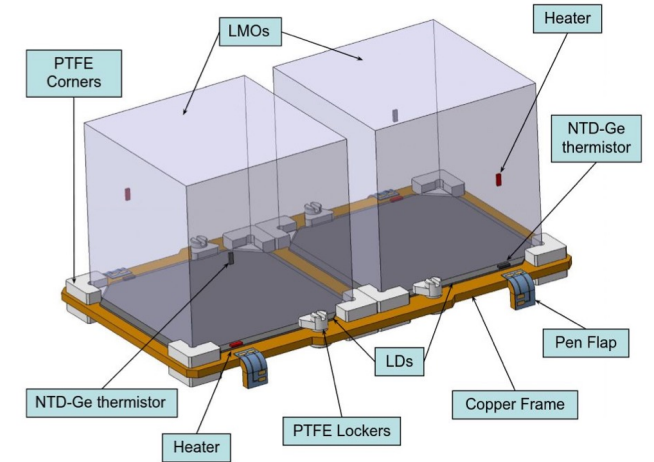
L'esperimento CUPID (CUORE Upgrade with Particle Identification)

Calorimetri criogenici scintillanti:

- sfruttano cristalli scintillanti di Li_2MoO_4
- sistema a doppia lettura (luce + calore)
- lettura calorimetrica della luce di scintillazione



[arXiv:2011.13806v1](https://arxiv.org/abs/2011.13806v1)



- ✓ Diverse tipologie di particelle interagenti hanno diverse rese in luce (*light yield*)
- ✓ Strategia attiva di identificazione delle particelle interagenti basata sulla luce misurata dal LD