



106° CONGRESSO NAZIONALE
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

14-18 settembre 2020

Ricerca di doppio decadimento beta senza neutrini con bolometri

Irene Nutini

Università degli Studi Milano Bicocca

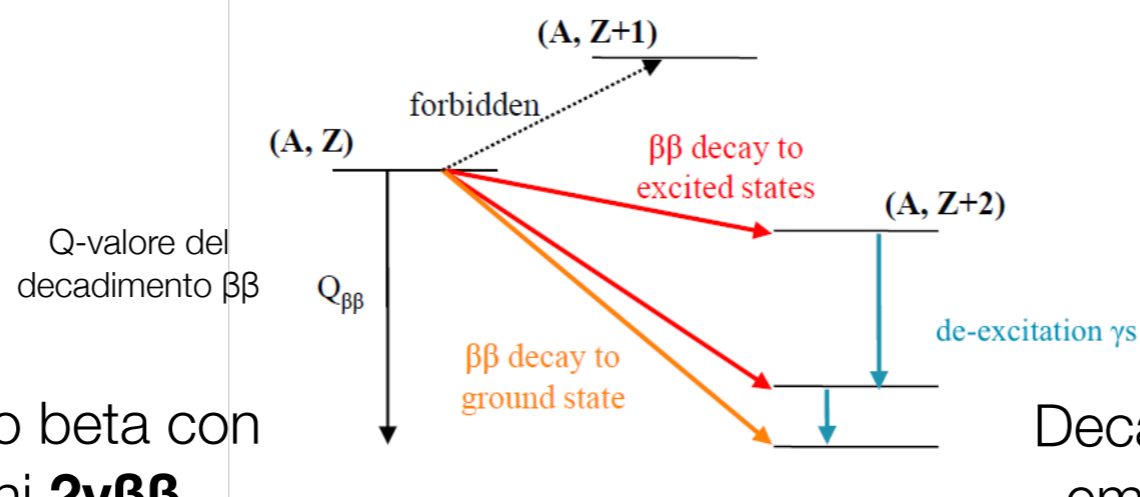
INFN Milano Bicocca



- Decadimento doppio beta
- Metodi sperimentali per la ricerca del decadimento doppio beta
- La tecnica bolometrica: rivelatori termici
- Esperimenti bolometrici:
 - CUORE: rivelatori in TeO_2 su larga scala
 - CUPID: calorimetri scintillanti (ZnSe , LiMoO_4)
 - AMoRE

Decadimento doppio beta

Il decadimento doppio beta è un processo nucleare molto raro: $(N, Z) \rightarrow (N-2, Z+2)$

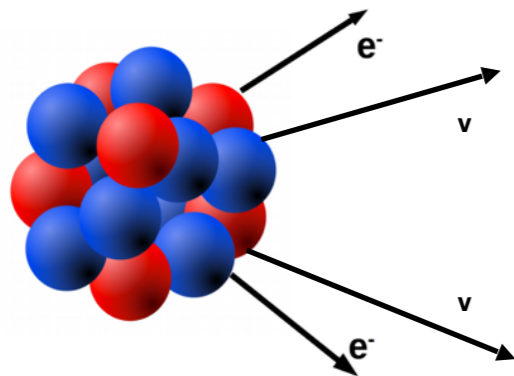


Decadimento doppio beta con emissione di neutrini **$2\nu\beta\beta$**

- Processo del 2° ordine consentito dal Modello Standard

- Osservato in vari nuclei:

$$T^{1/2}_{2\nu\beta\beta} \sim 10^{18-24} \text{ yr}$$



Nuclei candidati per decadimento $\beta\beta$:

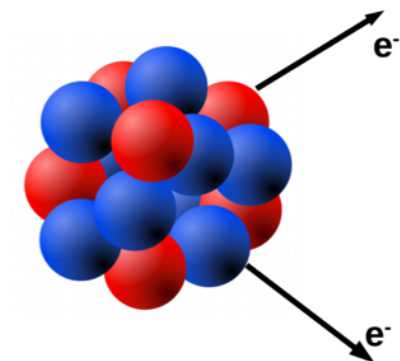
^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{128}Te , ^{136}Xe ...

Decadimento doppio beta senza emissione di neutrini **$0\nu\beta\beta$**

- Processo che viola il numero leptonic ($\Delta L = 2$)

- Non ancora osservato

$$T^{1/2}_{0\nu\beta\beta} > 10^{24-26} \text{ yr}$$



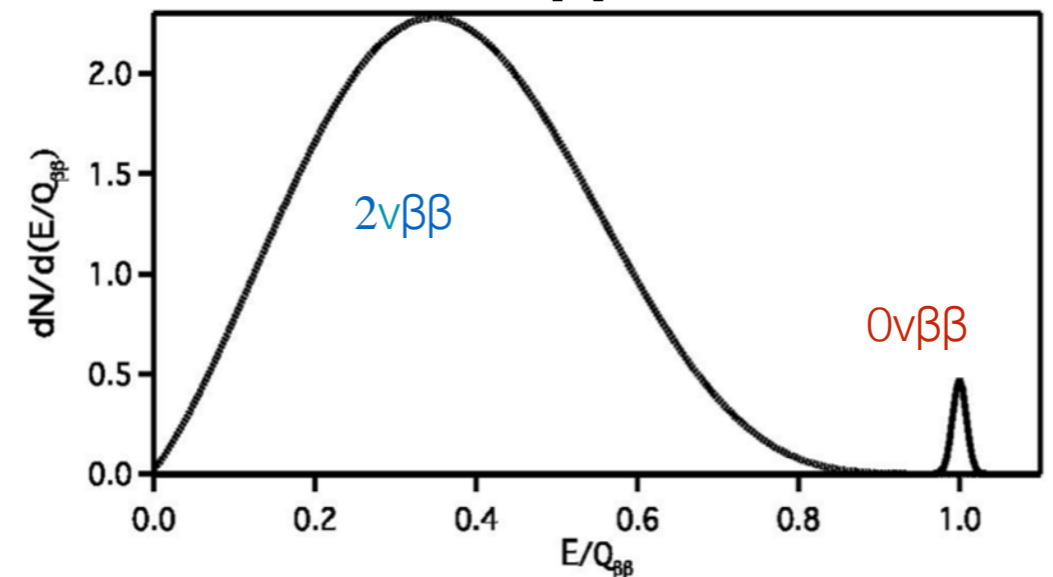
[Talk F. Vissani]

Metodi sperimentali

Segnatura sperimentale e sensibilità per il decadimento $0\nu\beta\beta$

Osservabili del decadimento doppio beta:

- Parametri cinematici dei due elettroni emessi
 - Energia somma dei due elettroni costante
 - Ricostruzione delle singole tracce degli elettroni
- Rivelazione del nucleo-figlio in forma di ione++



Il numero di decadimenti osservabili è limitato dalle fluttuazioni dei conteggi di fondo nell'intorno di $Q_{\beta\beta}$ (regione di interesse, ROI)

'Finite background'

$$S_{0\nu} \propto \eta \cdot \epsilon \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T}{\Delta \cdot B}}$$

'Zero background' ($B \cdot \Delta \cdot M \cdot \bar{T}$) $\ll 1$

$$S_{0\nu} \propto \eta \cdot \epsilon \cdot M \cdot T$$

Scelta dell'isotopo

- Alta abbondanza isotopica naturale o arricchimento
- Alto Q-valore, $Q_{\beta\beta}$

Tecnologia del rivelatore

- Alta efficienza: sorgente $\beta\beta$ integrata nell'assorbitore
- Risoluzione energetica eccellente

Esposizione

- Rivelatori di grande massa (M)
- Alto tempo vivo (T)

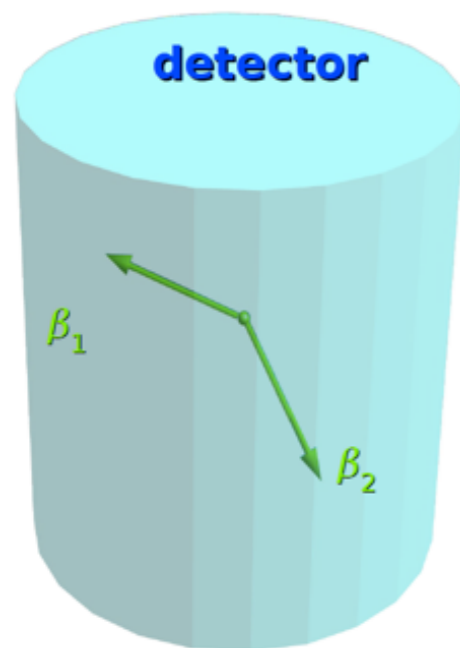
Metodi sperimentali

Approccio calorimetrico

- Sorgente e rivelatore sono coincidenti: alta efficienza ($\epsilon \sim 1$)
- Particle ID: nessuna/parziale
- Misura dell'energia somma dei due elettroni emessi nel decadimento $\beta\beta$

Fattore limitante alla sensibilità sperimentale: background - fondo

- Fondo irriducibile del $2\nu\beta\beta$ nella ROI \rightarrow necessaria alta risoluzione energetica, necessari rivelatori veloci e/o scelta di candidati $\beta\beta$ con più basse rate di decadimento $2\nu\beta\beta$
- Raggi cosmici e radioattività ambientale \rightarrow laboratori sotterranei (e veti attivi/passivi per i muoni), schermi passivi attorno al rivelatore
- Attivazione dei materiali e dei rivelatori in superficie (contaminazioni superficiali) \rightarrow alta radiopurezza durante la costruzione e lo stoccaggio

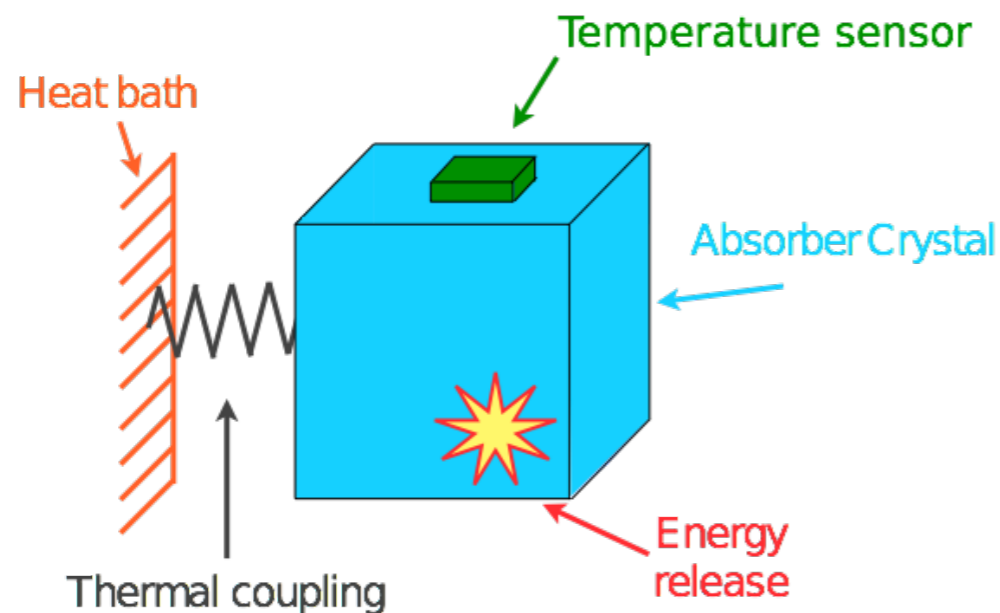


- Rivelatori a alta risoluzione energetica (FWHM/E $\sim 0.15\%$ al $Q_{\beta\beta}$), masse attive $\sim 10\text{kg} \rightarrow \sim 1\text{ ton}$
 - Ge-diodes (^{76}Ge) [*Talk L.Pandola*]
 - Rivelatori termici a bassa temperatura (LTD): approccio calorimetrico applicabile per ogni isotopo candidato $\beta\beta$
- Scintillatori su larga scala, masse attive $\gg 1\text{ ton}$, alta radiopurezza, limiti di risoluzione energetica:
 - Scintillatori con ^{136}Xe

La tecnica bolometrica

Rivelatori termici

Calorimetri ideali: un cristallo assorbitore è connesso a un 'bagno termico', mantenuto ad una temperatura di ~qualche mK, ed è instrumentato con un sensore che misura la variazione di temperatura indotta da un piccolo rilascio di energia.



Calorimetri criogenici: conversione dell'energia depositata in fononi

- Assorbitore a $T \sim 10$ mK
- Deposizione di energia in assorbitore (E_{dep}): scattering di particelle su nuclei o elettroni \rightarrow produzione di fononi atermici \rightarrow degradazione di energia \rightarrow fononi termici/calore $\rightarrow \Delta T$
- Sensore di fononi - Termistore NTD: forte variazione di resistenza al variare di T (ΔR) \rightarrow generazione di segnale elettrico proporzionale all'energia dei fononi in eccesso

Risoluzione energetica intrinseca dei calorimetri criogenici - Fluttuazioni termodinamiche del sistema:

$$\text{FWHM}_{\text{thermal}} \propto \sqrt{C \cdot T^2} \sim 30\text{-}100 \text{ eV per basse capacità termiche } C \text{ dell'assorbitore}$$

La tecnica bolometrica

Rivelatori termici: Assorbitore

Cristallo assorbitore:

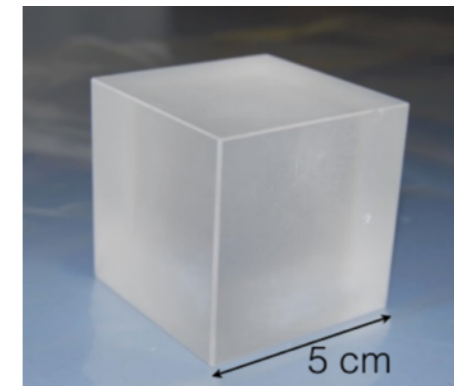
- **Contenga l'isotopo candidato $\beta\beta$**
 - Materiali in forma metallica o composti (ossidi - TeO_2 , LiMoO_4 , sali - ZnSe)
 - Materiali con candidato $\beta\beta$ con alta abbondanza isotopica (eg. ^{130}Te , ^{128}Te) o necessario arricchimento
 - Materiali con alto A (massa molecolare) e/o dove il candidato $\beta\beta$ domina la massa molecolare
- **Basso calore specifico c del materiale a basse temperature** \rightarrow capacità termica $C = m \cdot c$ (m, massa del cristallo)

$$c(T) = c_l(T) + c_e(T) + c_m(T)$$

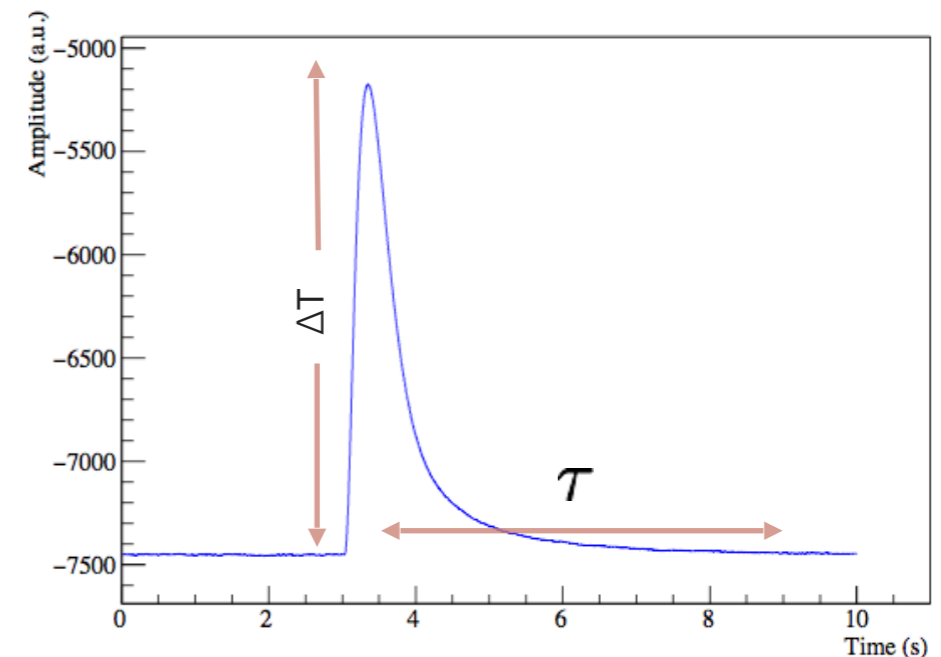
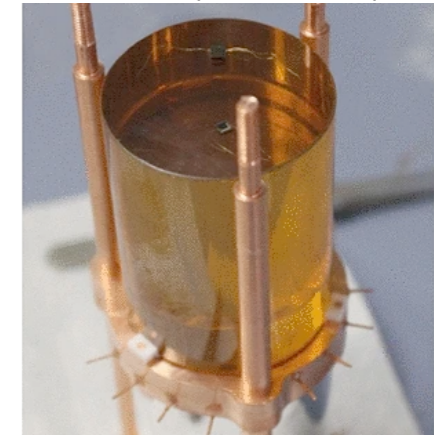
$$c_l \propto \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3$$

$$c_e^m \propto T, \quad c_e^{sc} \propto e^{-2\frac{T_c}{T}}; \quad c_m \propto \frac{1}{T^2}$$
 - \rightarrow preferibili materiali dielettrici e diamagnetici
- Link termico G tra cristallo e bagno termico: regola i tempi di termalizzazione del sistema e la risposta temporale del segnale termico di particella

(nat) TeO_2 (CUORE)



ZnSe (CUPID-0)



Ampiezza dell'impulso $\propto \Delta T \propto$ Energia depositata

$$\Delta T \propto \frac{E_{dep}}{C} \quad \tau = \frac{G}{C}$$

La tecnica bolometrica

Rivelatori termici: Sensore di fononi

Conversione dei fononi generati nell'assorbitore in un segnale elettrico

Sensibilità logaritmica - variazione di resistenza: $A = \left| \frac{d \log R}{d \log T} \right|$

- Sensori di fononi fuori-equilibrio

- $A \sim 100-1000$, risposta veloce ($\sim \mu\text{s}-\text{ms}$)

- Transition Edge Sensors (TES):

- Transizione superconduttiva per variazioni di temperatura per energia depositata in assorbitore

- Metallic Magnetic Calorimeters (MMC):

- Forte variazione della magnetizzazione di un sensore metallico paramagnetico, posto in un piccolo campo magnetico, per variazione di temperatura per energia depositata in assorbitore

- Necessario pre-amplificatore a freddo con SQUID

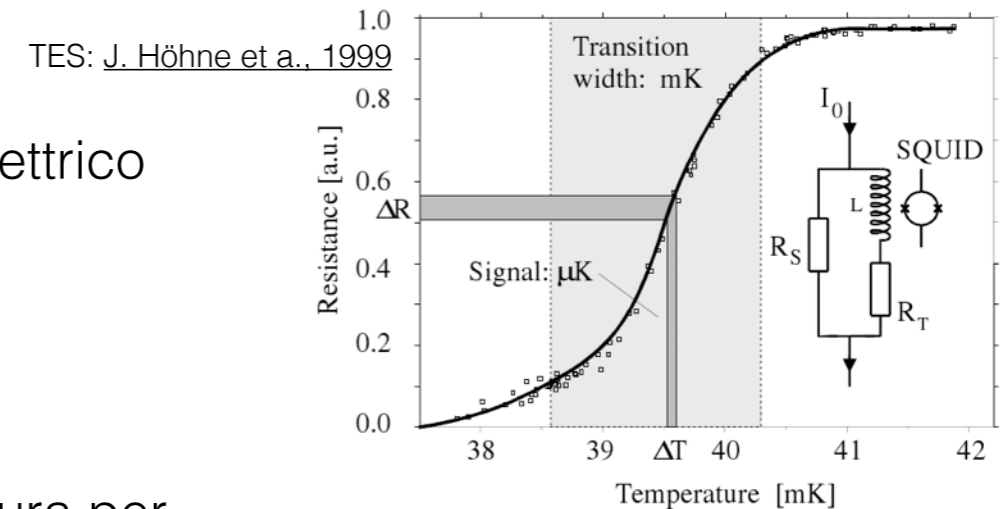
- Termistori a semiconduttore: Sensori di fononi termici

- Forte variazione della resistività in funzione della temperatura: $\rho(T) = \rho_0 e^{\left(\frac{T_0}{T}\right)^\gamma}$

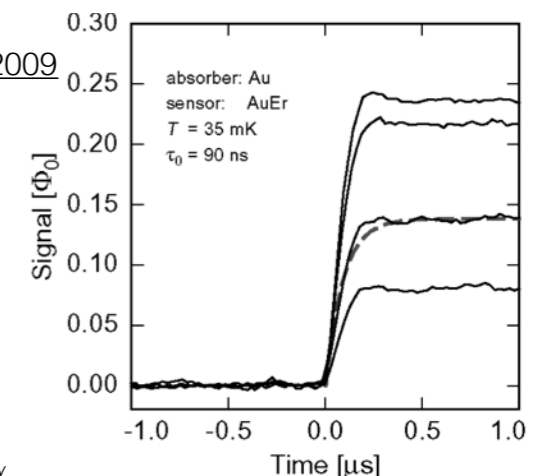
- $A \sim 1-10$, risposta lenta ($\sim \text{s}$)

- Neutron Transmutation Doping (NTD) in Ge/Si

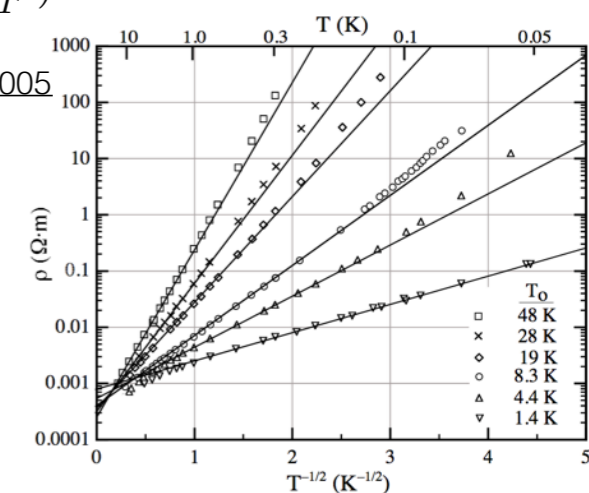
- Circuito di bias/read-out a T_{room} per il termistore



MMC: Fleischmann et al., 2009



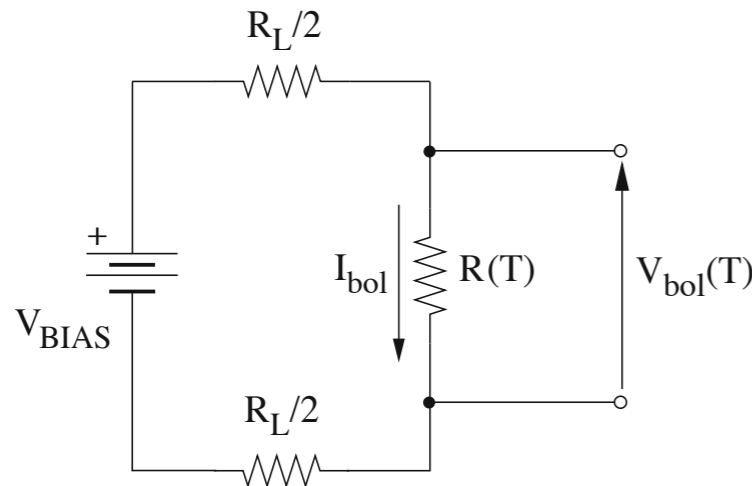
Si-NTD: McCammon, 2005



La tecnica bolometrica

Rivelatori termici: Sensore di fononi

- Termistori a semiconduttore con Neutron Transmutation Doping (NTD)
 - Chip in Ge/Si irradiati con neutroni, t.c. la concentrazione dei dopanti porta il chip quasi alla transizione metallo-isolante. A bassa T ($< K$), conduzione per tunnel di portatori di carica tra i siti dei dopanti, assistita da scambio di fononi

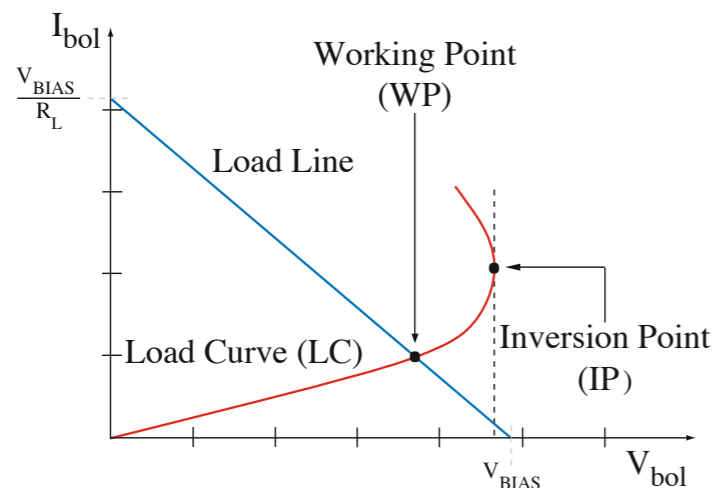


$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}$$

Circuito di bias/read-out: punto ottimo di lavoro V_{bias} su curva I-V (load curve) t.c. la variazione di R_{NTD} per energia depositata induce generazione di un impulso elettrico ma non modifica risposta statica di NTD

Se $R_L \gg R(T)$: I_{bol} costante.

Caduta di potenziale sul termistore: $V_{bol} = I_{bol} \cdot R(T)$



Feedback elettro-termico:

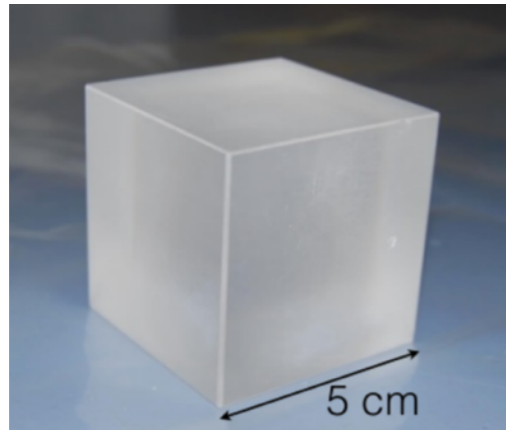
Dissipazione di potenza $P = I_{bol} \cdot V_{bol}$

che aumenta la temperatura del termistore: $T_s = T_b + \frac{P}{G}$
 Diminuisce il valore della resistenza R_{NTD} .

Load Curve: relazione I-V, devia dalla linearità e porta a un comportamento non ohmico

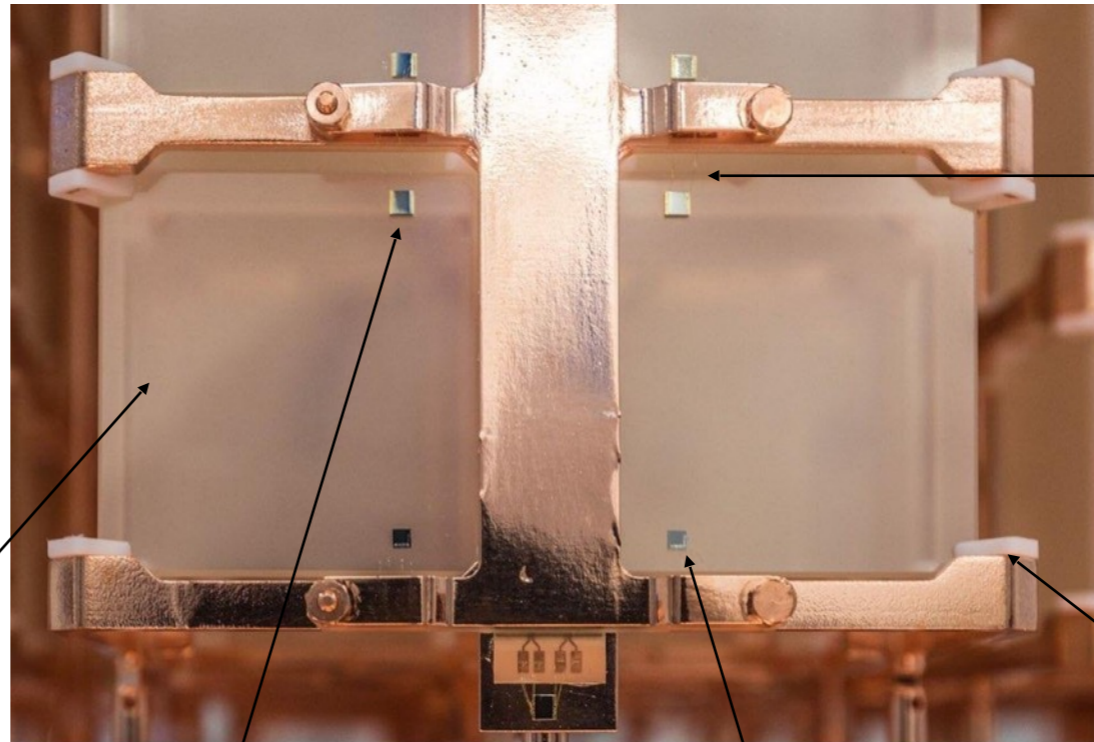
La tecnica bolometrica

Rivelatori termici: un esempio - i rivelatori di CUORE



Cristallo $^{(nat)}\text{TeO}_2$
Assorbitore = sorgente $\beta\beta$
 $5.0 \times 5.0 \times 5.0 \text{ cm}^3$, massa 750 g

Assorbitore TeO_2

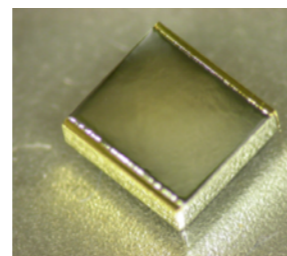


Ge-NTD

Si-heater

Supporti in PTFE

Bonding con
fili d'oro su
strips di rame
per il read-out



Termistore NTD al Germanio
 $3.0 \times 2.9 \times 0.9 \text{ mm}^3$

CUORE-0 detector paper

Alduino C. et al. (CUORE collaboration), J. Inst. 11(07), P07009, (2016)

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/p07009>

La tecnica bolometrica

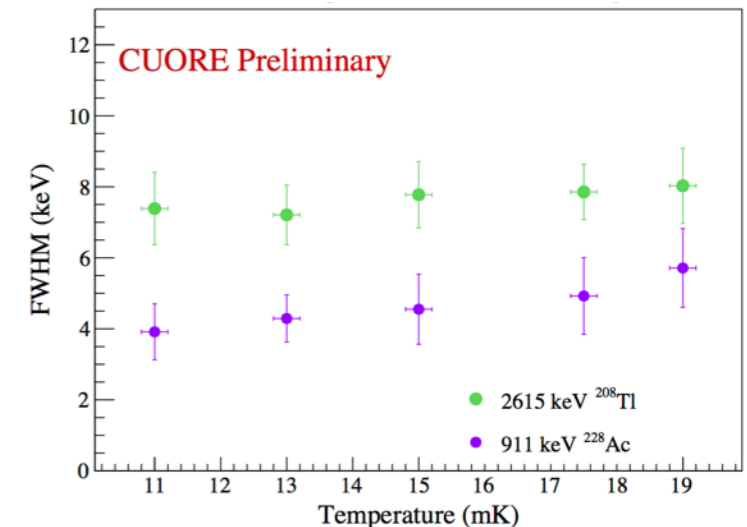
Rivelatori termici: Risoluzione nei macro-calorimetri

FWHM al $Q_{\beta\beta} \sim 5-20$ keV (per diversi cristalli, dimensioni, temperature)

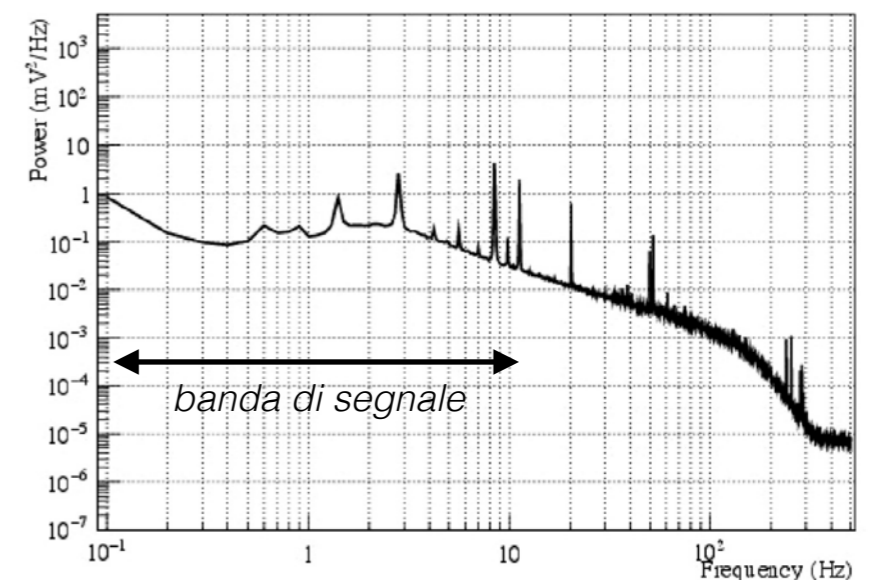
Contributi alla risoluzione:

$$FWHM^2 = FWHM_{thermal}^2 + FWHM_{Noise}^2 + FWHM_{Intr}^2$$

- Fluttuazioni termodinamiche del sistema: $FWHM_{thermal} \sim 30-100$ eV
- $FWHM_{noise}$:
 - Rumore intrinseco su R_{load} di circuito bias NTD (< 1 keV)
 - Rumore esterno: disturbi elettromagnetici e instabilità/vibrazioni dell'apparato criogenico trasmesse ai cristalli - frequenze caratteristiche presenti nella banda di segnale
- $FWHM_{intr}$: fluttuazioni intrinseche di deposizione energia e produzione/raccolta di fononi (?)



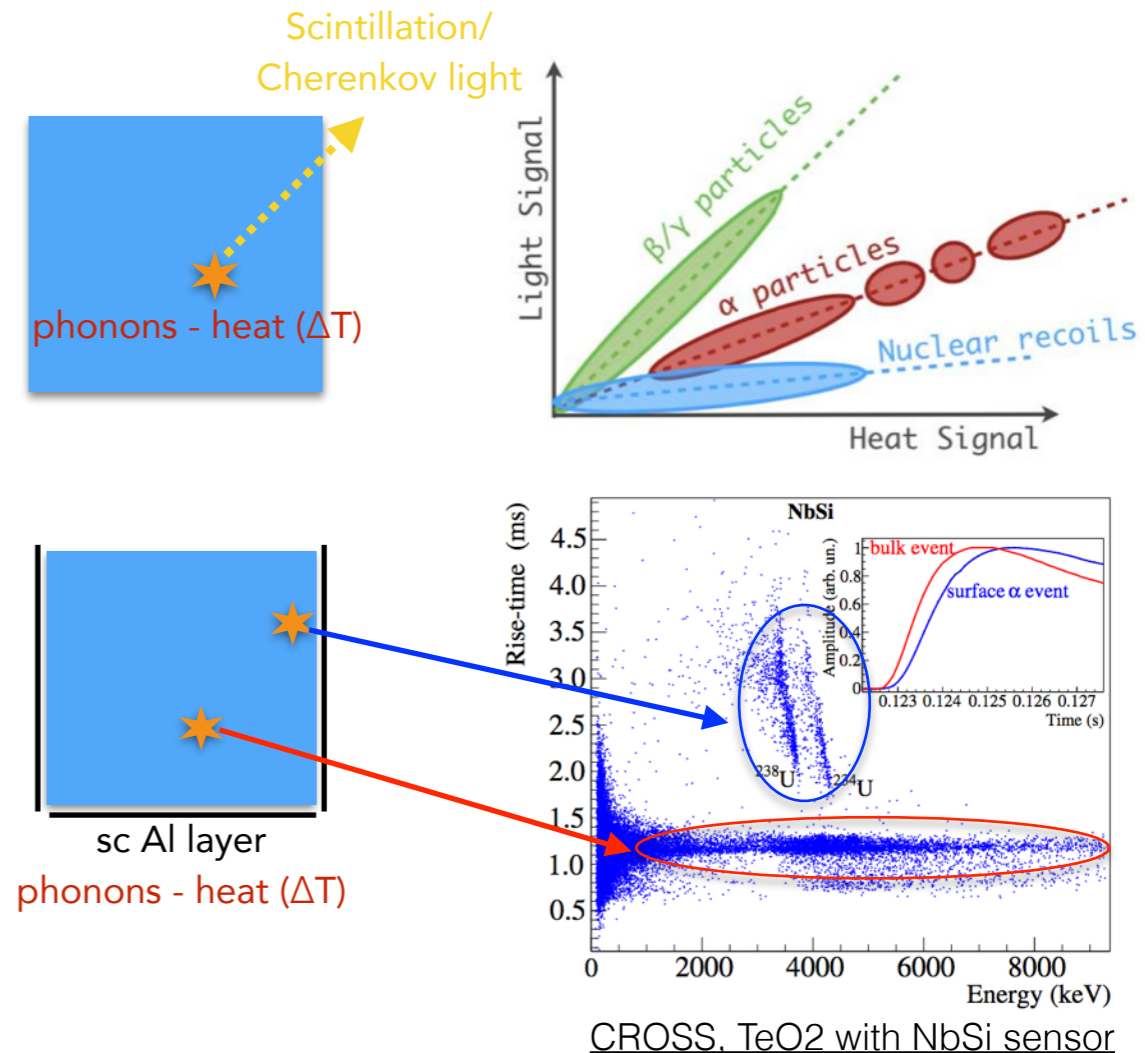
cristalli TeO_2 in CUORE



La tecnica bolometrica

Rivelatori termici: Backgrounds nei macro-calorimetri

- Contaminazioni radioattive superficiali dei rivelatori o dei materiali vicini
 - Procedura di pulizia dei materiali
 - Identificare la natura delle particelle depositanti energia (α vs β/γ):
 - Signal shape nei calorimetri
 - Scintillazione/Cherenkov light negli assorbitori
 - Identificare particelle che attraversano le superfici:
 - Sottile strato di Al sulle superfici dell'assorbitore: signal shape per distinguere eventi di bulk/superficie
 - Strato di materiale scintillante sulle superfici dell'assorbitore: luce di scintillazione emessa da particelle che lo attraversano
- **Pile-up**: Lentezza della risposta dei rivelatori termici - segnali che vengono generati entro la finestra temporale del rise-time dell'impulso termico vengono integrati e possono contribuire ai conteggi nella ROI

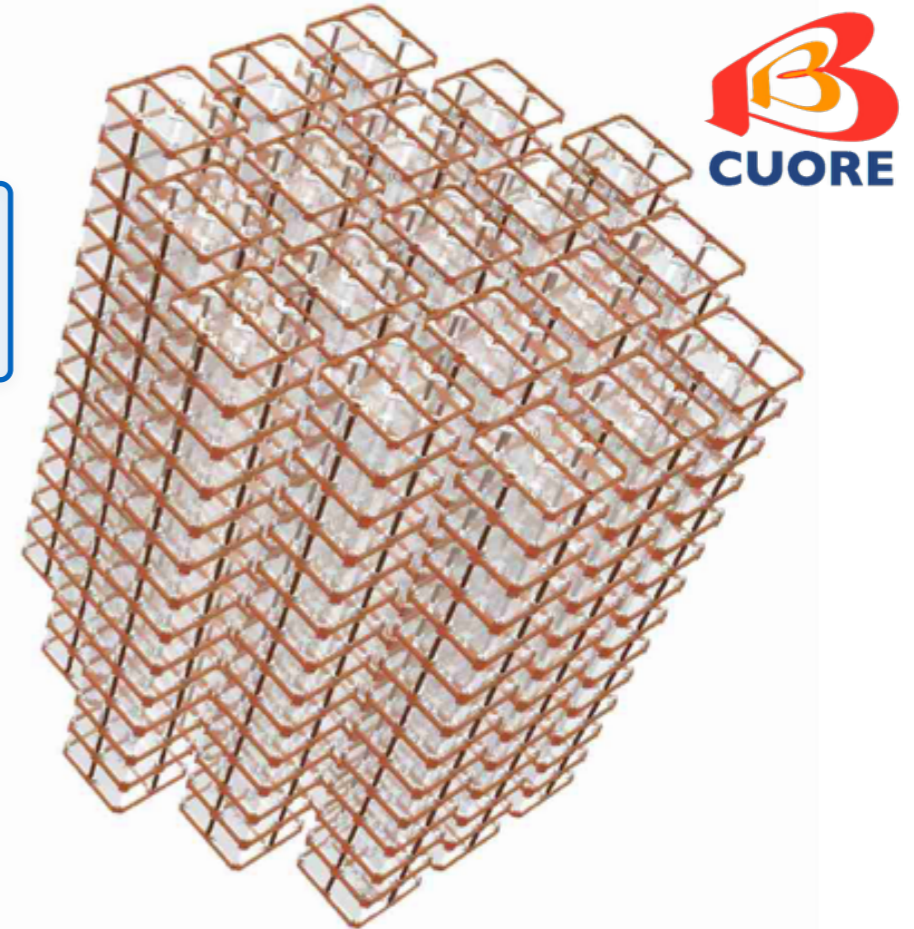
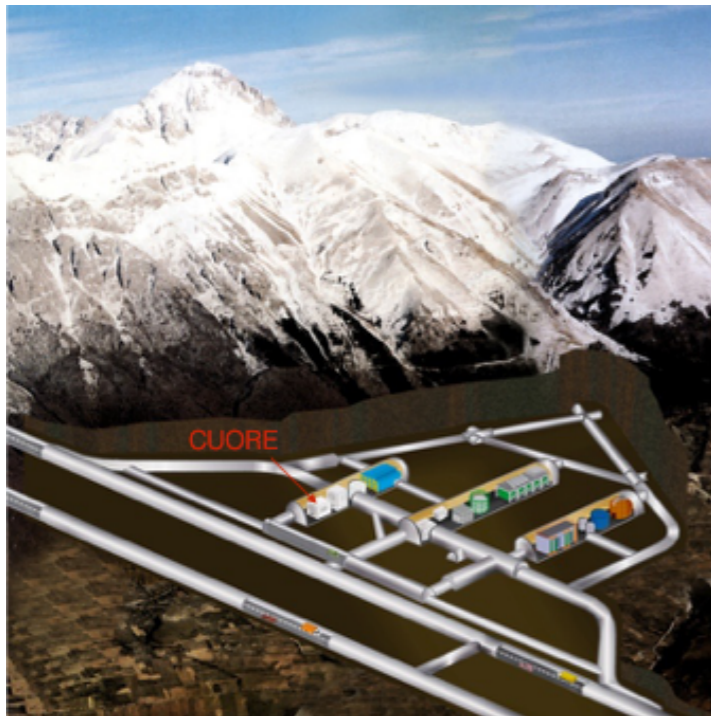


Esperimenti bolometrici: CUORE

CUORE: rivelatori in TeO_2 su larga scala

CUORE
Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

Esperimento per la fisica degli eventi rari, in particolare ricerca del $0\nu\beta\beta$, con rivelatore a bassa temperatura di scala ~1 ton
Si trova ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)



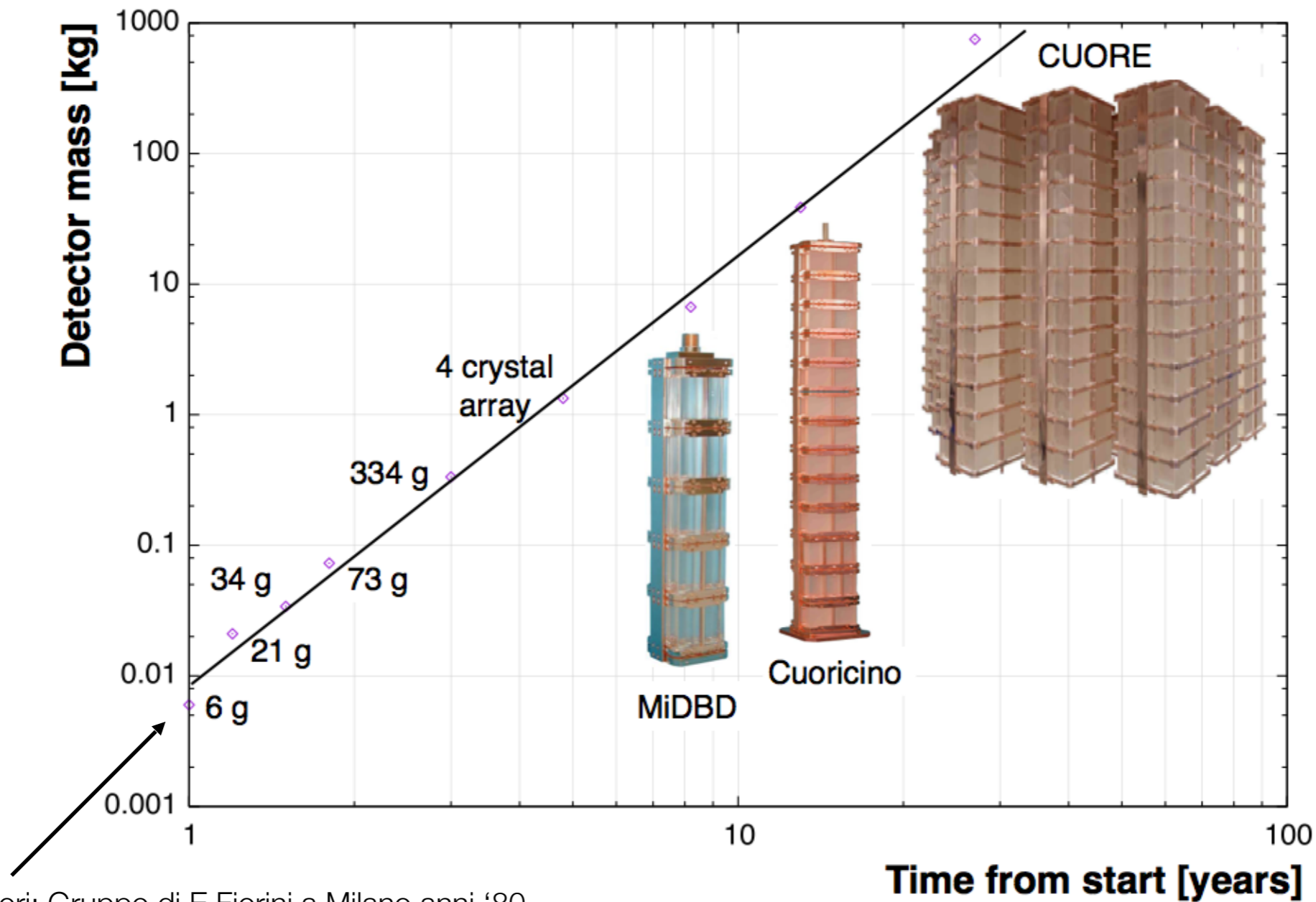
Si utilizzano **988 cristalli in $^{nat}\text{TeO}_2$** operati a ~10 mK
- grande massa e alta segmentazione -
742 kg di TeO_2 , corrispondenti a 206 kg di ^{130}Te

^{130}Te - candidato $\beta\beta$:

- alto $Q_{\beta\beta}$ (2527.518 keV)
- alta abbondanza isotopica naturale (34.167%), non è necessario arricchire i cristalli

Esperimenti bolometrici: CUORE

Calorimetri criogenici in TeO_2 per la ricerca del decadimento doppio beta: da pochi grammi alla tonnellata



Primi rivelatori: Gruppo di E.Fiorini a Milano anni '80

Esperimenti bolometrici: CUORE

La sfida tecnologica dell'esperimento CUORE

Background goal: 10^{-2} c/(keV·kg·yr)

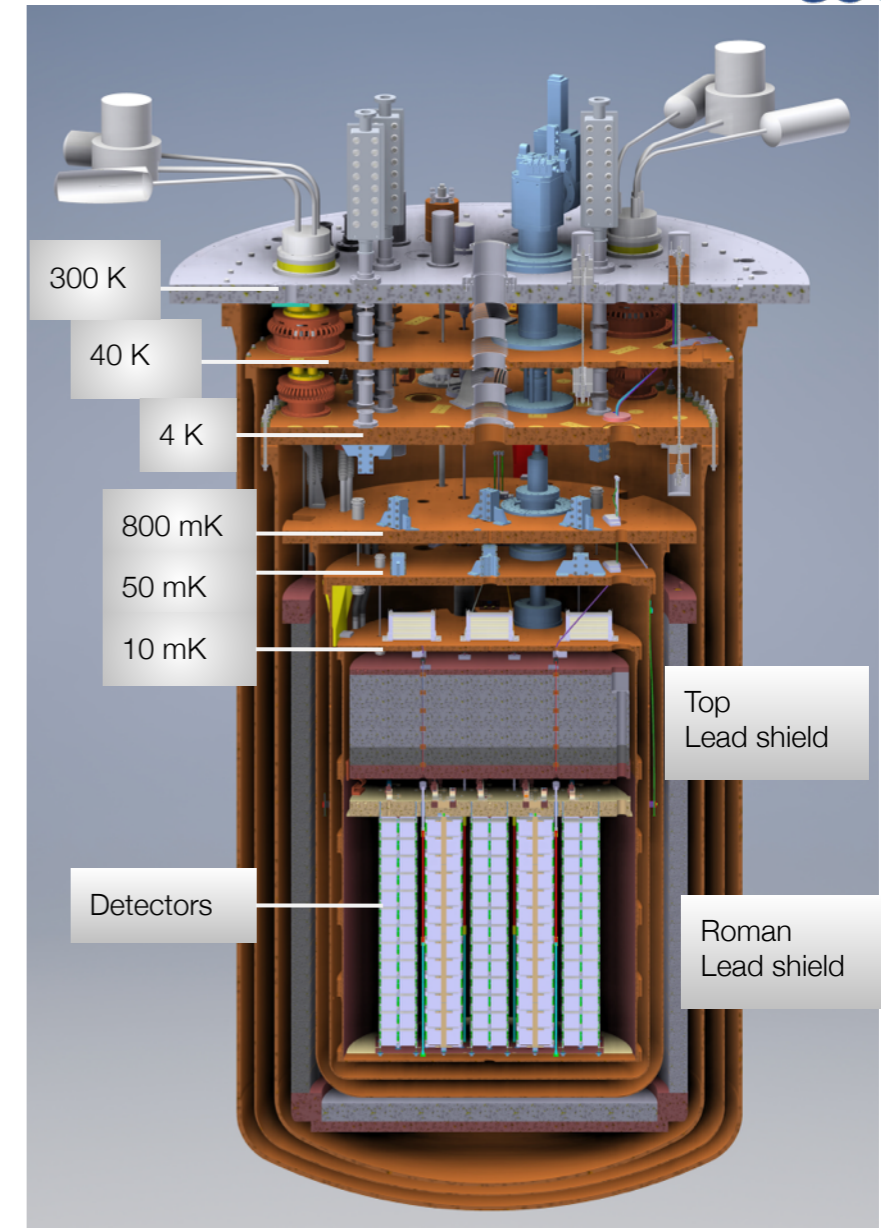
nella regione di interesse (ROI) intorno a $Q_{\beta\beta}$

Underground, schermi in Pb, detector self-shielding, controlli di radio-purezza durante assemblaggio e costruzione

Target di risoluzione energetica 5 keV FWHM

nella regione di interesse (ROI) intorno a $Q_{\beta\beta}$

I rivelatori in TeO_2 devono essere utilizzati a $T \sim 10$ mK \rightarrow infrastruttura criogenica dedicata + minimizzazione delle vibrazioni meccaniche



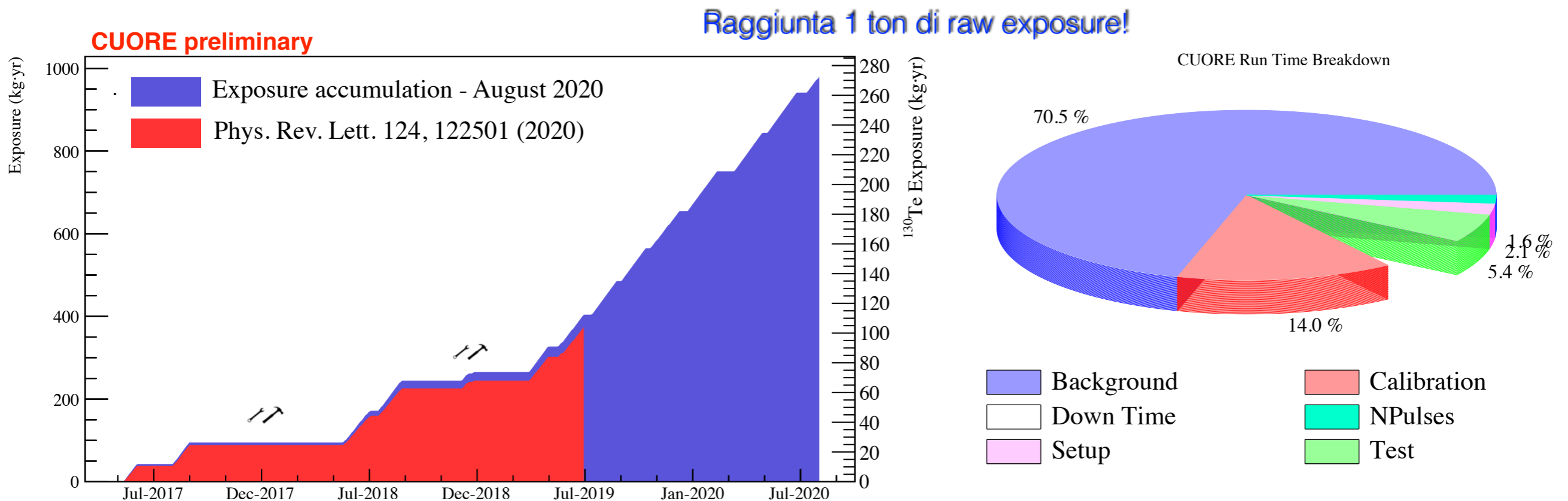
The CUORE cryostat. Dell'Oro S. et al., Cryogenics 102, 9, (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.06.011>

Esperimenti bolometrici: CUORE



CUORE data-taking

- Presa dati di CUORE iniziata nel 2017
- Sforzo significativo per una migliore comprensione del sistema criogenico e dei rivelatori e per l'ottimizzazione delle condizioni di presa dati
- Da Marzo 2019, presa dati continuativa con > 90% tempo vivo
- CUORE "data set": ~1 mese di background runs (dati di fisica) con qualche giorno di calibrazione all'inizio e alla fine



Esperimenti bolometrici: CUORE

CUORE: ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{130}Te

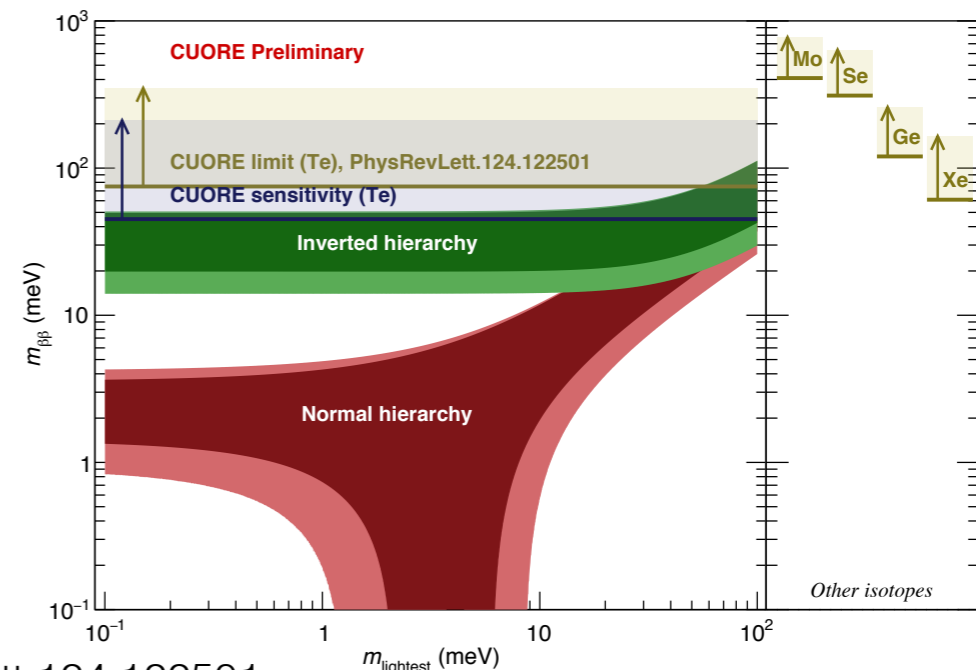
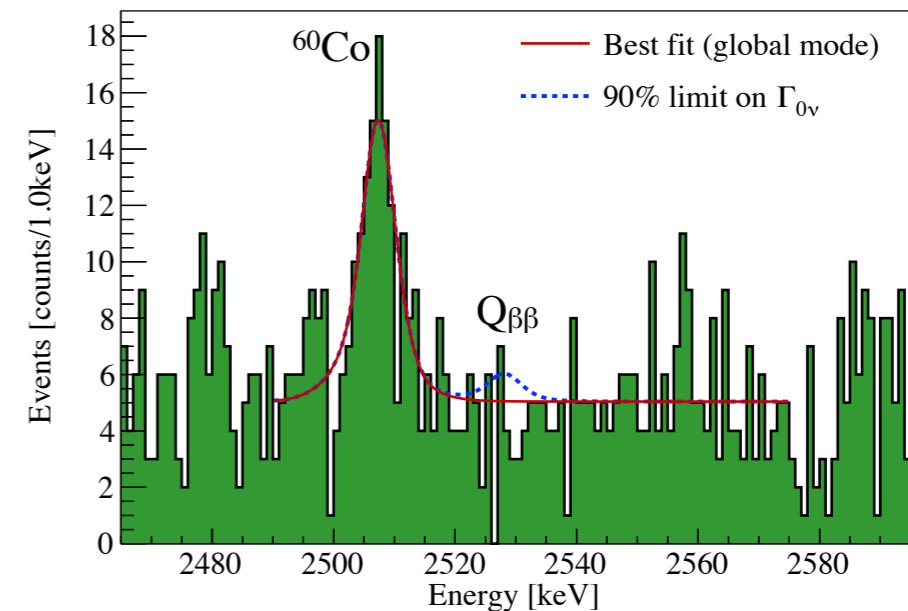


Esposizione totale per la ricerca del $0\nu\beta\beta$
 $372.5 \text{ kg yr } ^{\text{nat}}\text{TeO}_2$, $103.6 \text{ kg yr } ^{130}\text{Te}$

- Risoluzione energetica al $Q_{\beta\beta}$: $(7.0 \pm 0.4) \text{ keV FWHM}$
- Indice del background nella ROI
 $B = (1.38 \pm 0.07) \times 10^{-2} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$

Limite sul tempo di dimezzamento del $0\nu\beta\beta$ in ^{130}Te
 $T_{0\nu}^{1/2} (^{130}\text{Te}) > 3.2 \times 10^{25} \text{ yr}$ (90% C.I. including syst.)

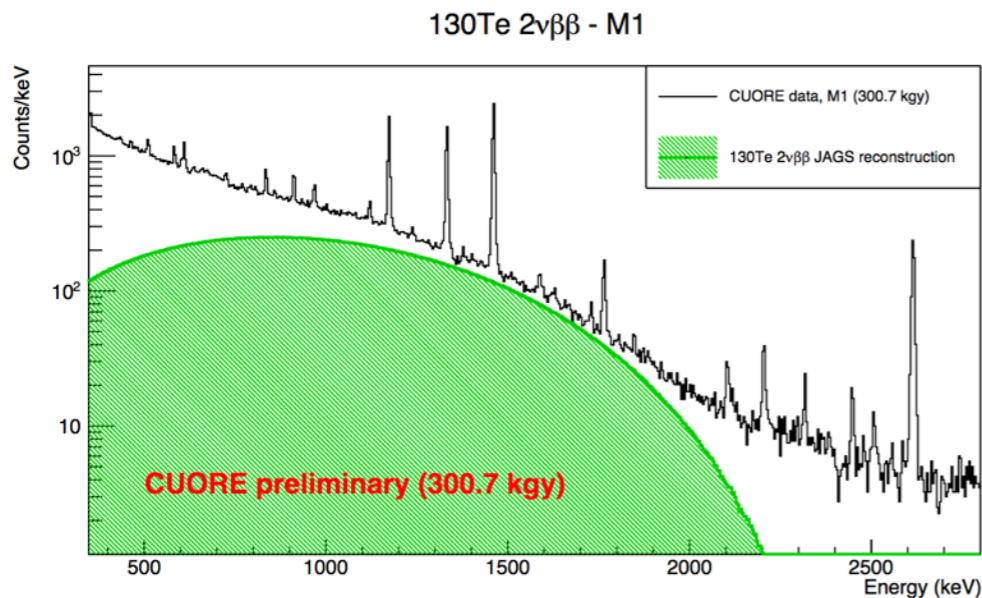
Limite sul tempo di dimezzamento dello $0\nu\beta\beta$
 e interpretazione nel contesto di scambio di
 neutrini di Majorana 'leggeri':
 $m_{\beta\beta} < 75 - 350 \text{ meV}$ at 90% C.I.



Alduino C. et al. (CUORE collaboration), Phys. Rev. Lett. 122, 122501, (2020), <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.122501>

Esperimenti bolometrici: CUORE

CUORE: decadimento $2\nu\beta\beta$ di ^{130}Te , stati eccitati et al.

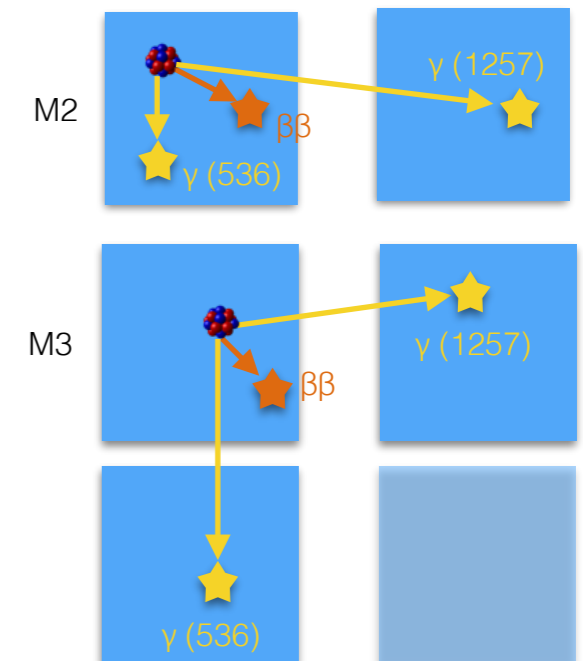
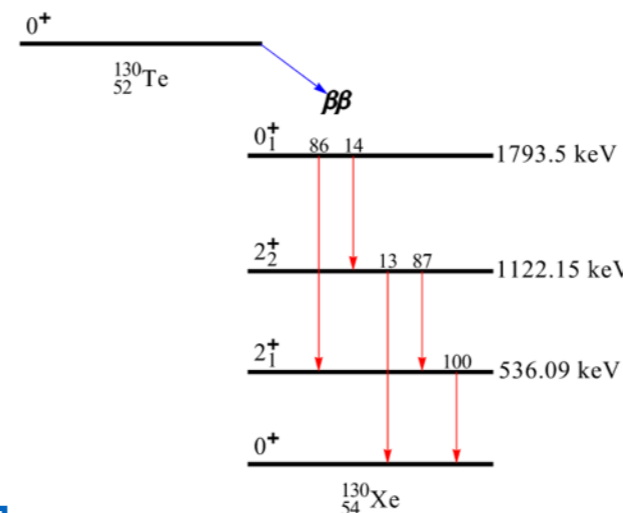


Misura del tempo di dimezzamento del $2\nu\beta\beta$ di ^{130}Te
 $T_{2\nu}^{1/2} (^{130}\text{Te}) = [7.71^{+0.08}_{-0.06}(\text{stat})^{+0.17}_{-0.15}(\text{syst})] \times 10^{20} \text{ yr}$

Limite sul tempo di dimezzamento del $\beta\beta$ del ^{130}Te sul primo stato eccitato 0^+ di ^{130}Xe
 $0\nu\beta\beta: (T^{1/2})^{0\nu}_{0^+} > 5.9 \times 10^{24} \text{ yr (90\% C.I.)}$
 $2\nu\beta\beta: (T^{1/2})^{2\nu}_{0^+} > 1.3 \times 10^{24} \text{ yr (90\% C.I.)}$

Altre analisi:

- Ricerca di altri decadimenti rari (^{120}Te , ^{128}Te , ...)
- Eventi di bassa energia (dark matter, assioni...)
- $0\nu\beta\beta$ con emissione di Majoroni, violazione CPT nel $2\nu\beta\beta$, ...



“CUORE Results and the CUPID Project” at Neutrino 2020 conference, https://indico.fnal.gov/event/43209/contributions/187866/attachments/129542/159294/CUORE_CUPID_Nu2020.pdf *Papers in preparation*

Esperimenti bolometrici: CUPID

Da CUORE a CUPID

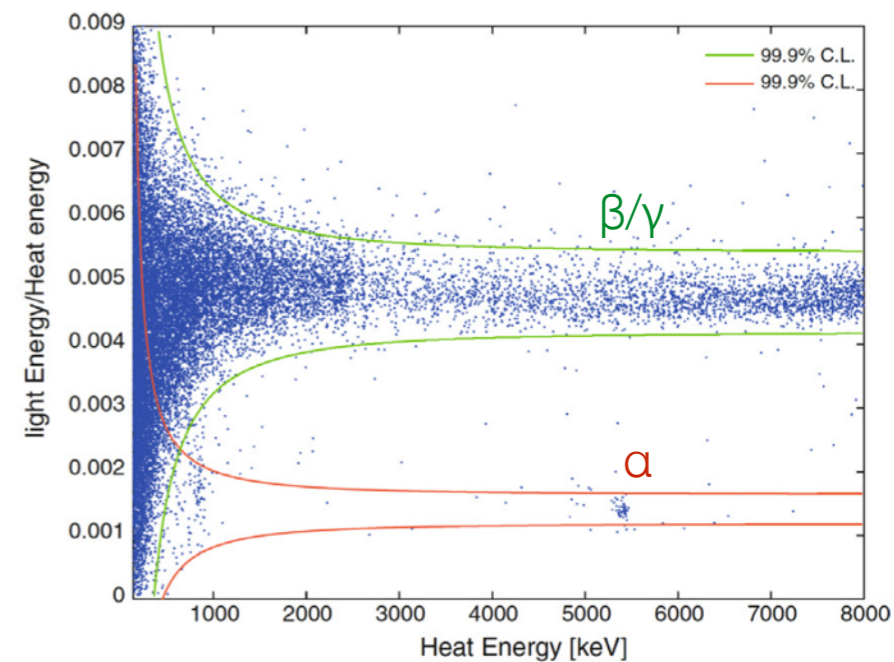
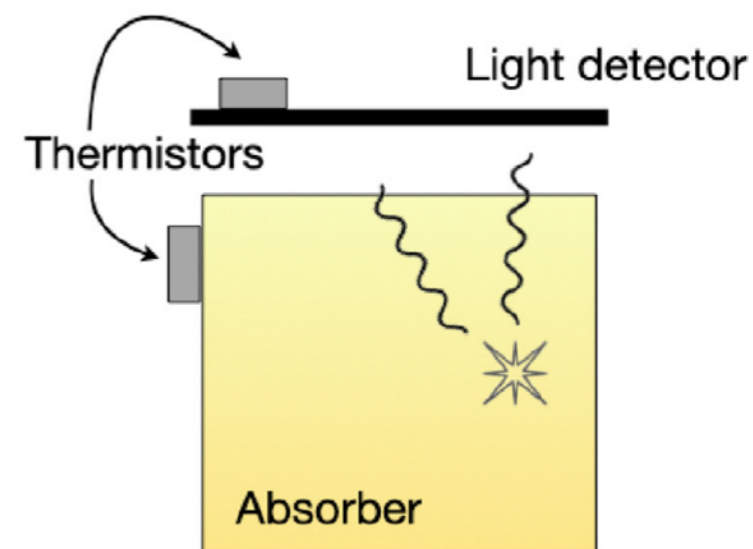
- CUORE è il primo esperimento che utilizza rivelatori bolometrici di scala una tonnellata per la ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$.
- **Backgrounds in CUORE - rivelatori in TeO_2 :**
 - **Particelle α degradate** provenienti da decadimenti vicini ai rivelatori o sulla loro superficie, che depositano una frazione variabile della loro energia nei rivelatori costituiscono il principale (~90%) contributo all'indice di B nella ROI di CUORE.
 - Il restante contributo nella ROI sono multi-Compton di γ dalle catene $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ e muoni cosmici.
- CUORE è un calorimetro puro. Nei rivelatori in TeO_2 , con il calore soltanto, non si discriminano eventi α da β/γ . Necessari **approcci ibridi per ridurre/discriminare il contributo α nella ROI**
 - Utilizzo di altri isotopi $\beta\beta$ (^{48}Ca , ^{82}Se , ^{100}Mo) che hanno alti $Q_{\beta\beta}$ e composti scintillanti

CUPID (CUORE Upgrade with Particle Identification)

Esperimenti bolometrici: CUPID

CUPID: calorimetri scintillanti a bassa temperatura

- Data una deposizione di energia in assorbitore, una frazione di essa è convertita in luce di scintillazione che è rilevata dal rivelatore di luce (wafer di Si/Ge), il restante è convertito in calore. Resa in Luce (Light Yield, LY) dipende da natura di particella.
- Rivelatori ibridi con composti di ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{100}Mo ; scelta del migliore composto dipende da costo, purezza e riproducibilità
- I calorimetri scintillanti hanno raggiunto la maturità per una implementazione su larga scala: CUPID-0, CUPID-Mo

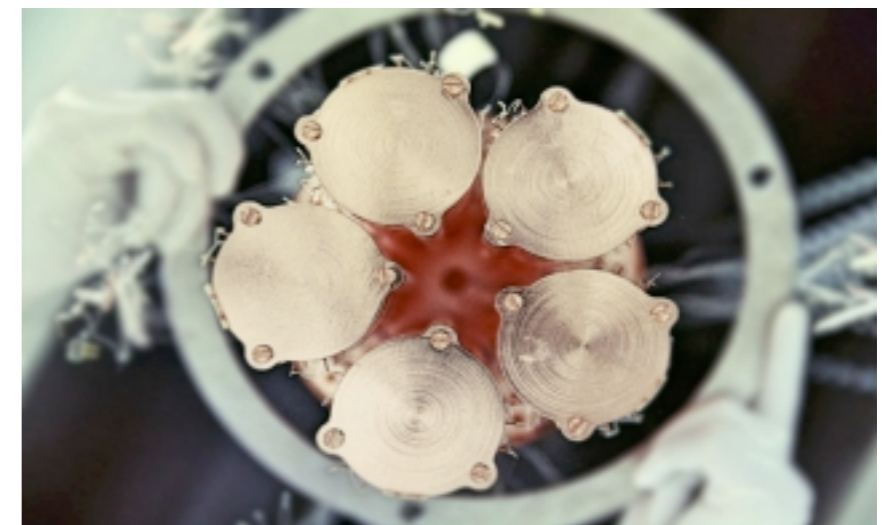
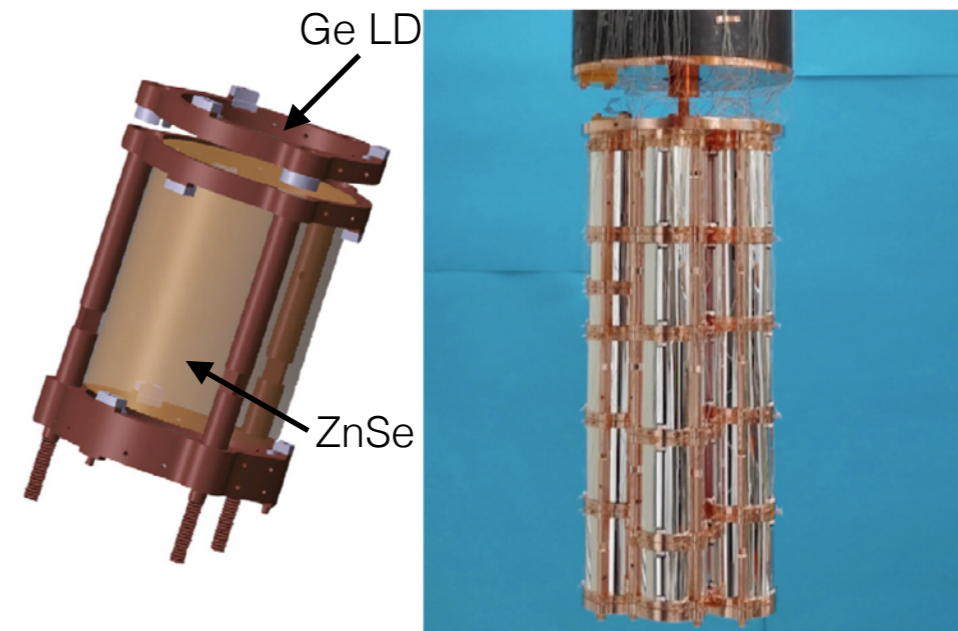


LUMINEU, ZnMoO₄ crystals with Ge LDs

Esperimenti bolometrici: CUPID

CUPID-0

- Pilot experiment in criostato ex-CUORE-0 (sala A) a LNGS con **cristalli bolometrici scintillanti in ZnSe** (da progetto LUCIFER) operati a ~ 10 mK
- ZnSe: alto contenuto in Se, alto $Q_{\beta\beta}$ di ^{82}Se (2998 keV), alto LY di scintillazione (6.5 keV/MeV per β/γ , 27 keV/MeV per α)
- 24 cristalli ZnSe arricchiti al 95% in ^{82}Se , 2 cristalli naturali di $\text{Zn}^{(\text{nat})}\text{Se}$: **10.2 kg ZnSe, 5.2 kg ^{82}Se**
- Rivelatori di luce (top/bottom): dischi di Ge con coating in SiO_2 letti con NTD, come per gli assorbitori
- Fase I (2017-2018): foglietto riflettente attorno ai rivelatori, per aumentare efficienza di raccolta di luce. **5.3 kg yr ^{82}Se exposure**
- Fase II (2019-2020): rimossi i foglietti riflettenti per studio contaminazioni di bulk e superficiali nei cristalli, muon veto

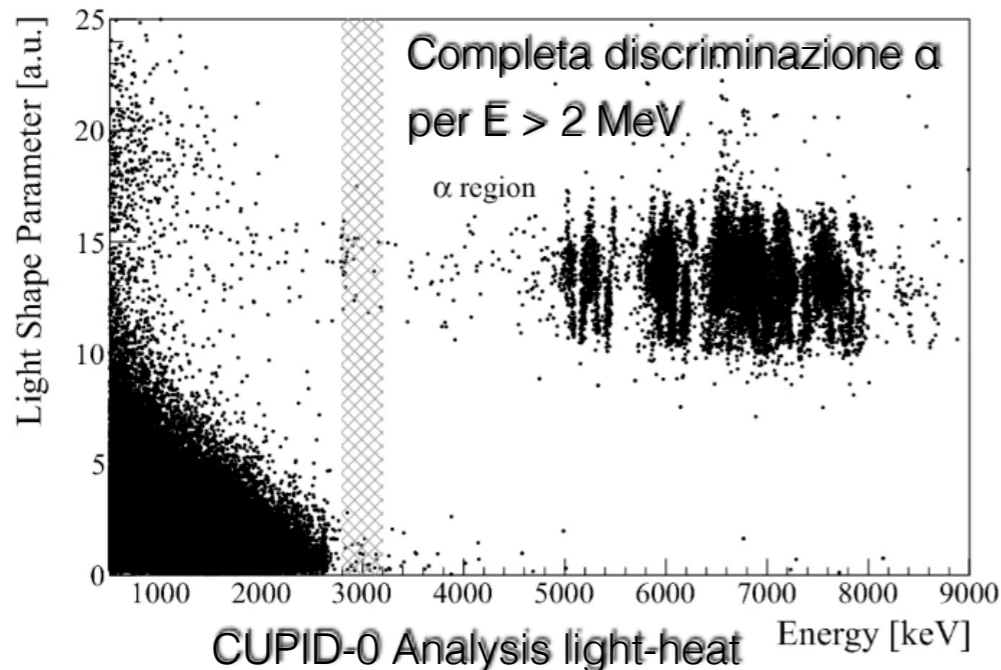


CUPID-0, detector paper

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-5896-8>

Esperimenti bolometrici: CUPIID

CUPIID-0: risultati di fase I

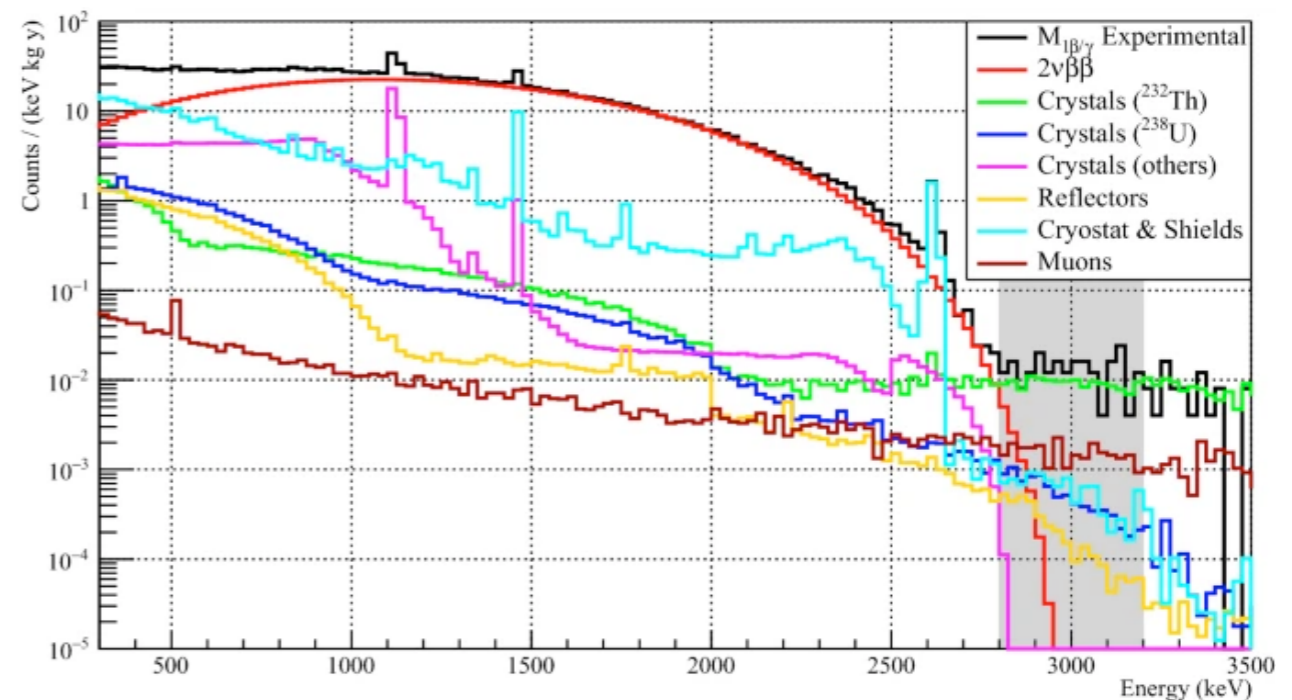


<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-018-6202-5>

Risoluzione energetica: 20.05 keV FWHM nella ROI

Indice di background nella ROI: $B = (3.5^{+1}_{-0.9}) \times 10^{-3} \text{ c}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{yr})$

- Half-life limit del $0\nu\beta\beta$ in ^{82}Se (DOI:10.1103/PhysRevLett.123.032501)
 $T_{0\nu}^{1/2} (^{82}\text{Se}) > 3.5 \times 10^{24}$ yr (90%C.I including syst.)
- SSD dominance in $2\nu\beta\beta$ (DOI:10.1103/PhysRevLett.123.262501):
 $T_{2\nu}^{1/2} (^{82}\text{Se}) = 8.6 \times 10^{19}$ yr
- Violazione CPT nel $2\nu\beta\beta$ (DOI:10.1103/PhysRevD.100.092002),
- Ricerca $0\nu\beta\beta$ in ^{64}Zn e ^{70}Zn (DOI:10.1140/epjc/s10052-020-8280-4)



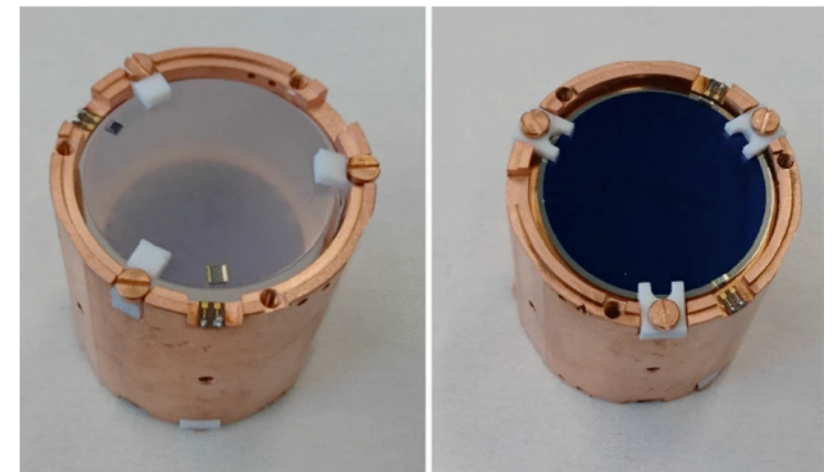
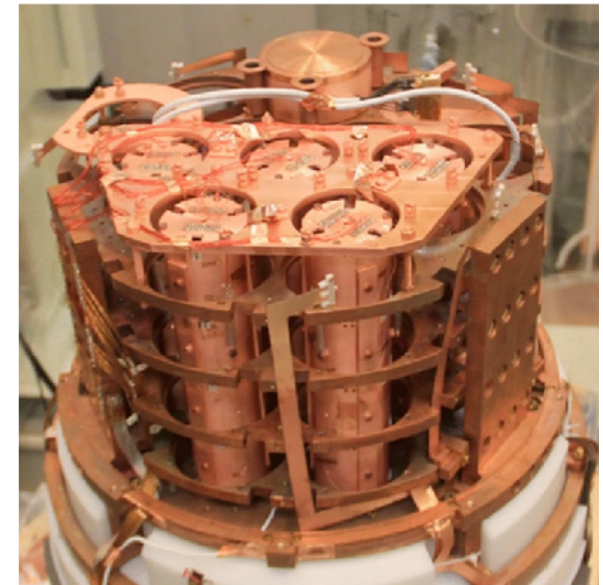
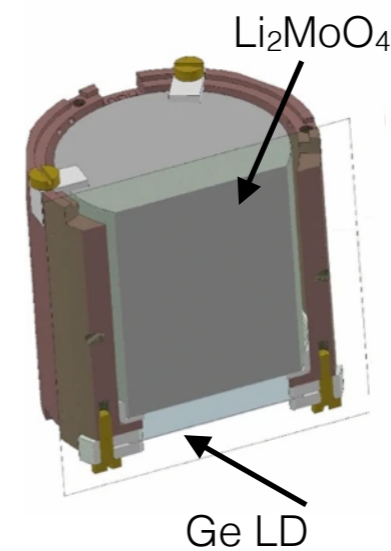
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7078-8>

| Source | ROI Background Index |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| ROI = 2.8 - 3.2 MeV | [10^{-4} counts/(keV·kg·y)] |
| $2\nu\beta\beta$ ^{82}Se | 6.0 ± 0.3 |
| ZnSe Crystals | $11.7 \pm 0.6^{+1.6}_{-0.8}$ |
| Detector Material | $2.1 \pm 0.3^{+2.2}_{-1.0}$ |
| Cryostat & Shields | $5.9 \pm 1.3^{+7.2}_{-2.9}$ |
| Muons | $15.3 \pm 1.3 \pm 2.5$ |
| Total | $41 \pm 2^{+9}_{-4}$ |

Esperimenti bolometrici: CUPID

CUPID-Mo

- Pilot experiment in criostato EDELWEISS a LSM con **cristalli bolometrici scintillanti in Li_2MoO_4** (da progetto LUMINEU) operati a ~ 20 mK
- Li_2MoO_4 : alto $Q_{\beta\beta}$ di ^{100}Mo (3034 keV) ma half-life del $2\nu\beta\beta$ di ^{100}Mo più breve (rispetto a ^{82}Se , ^{130}Te), medio LY di scintillazione (~ 0.6 keV/MeV),
- 20 cristalli Li_2MoO_4 arricchiti al 97% in ^{100}Mo (~ 210 g per cristallo): **2.26 kg ^{100}Mo**
- Rivelatori di luce: dischi di Ge letti con (piccoli) NTD, come per gli assorbitori
- Rivelatori-NTD letti con circuito di bias in AC (a 500Hz) per riduzione rumore in alta frequenza del sistema di raffreddamento del criostato
- Presa dati (2019-2020): **2.17 kg yr ^{100}Mo exposure**

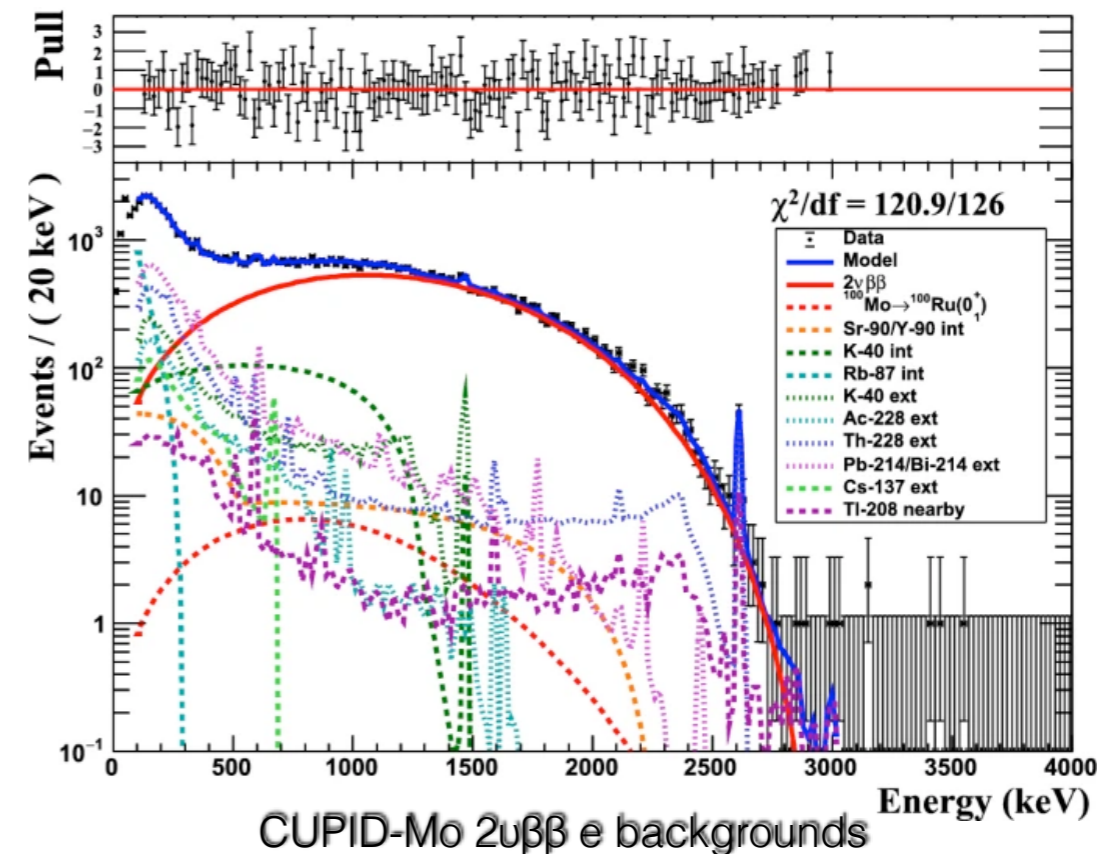
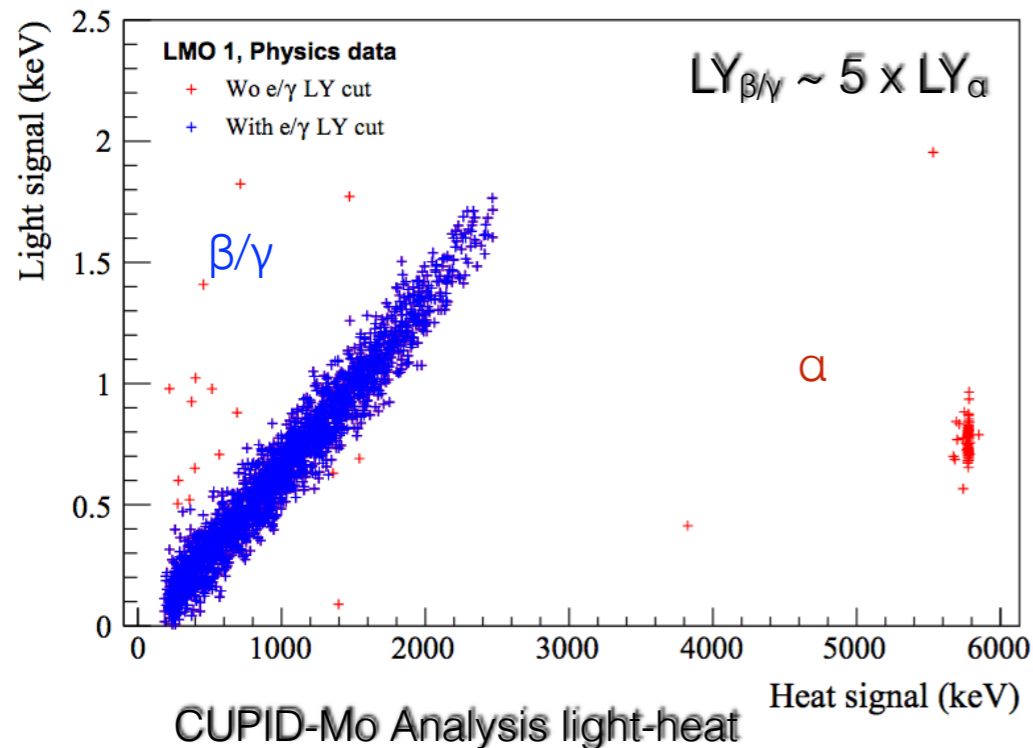


CUPID-Mo, detector paper

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7578-6>

Esperimenti bolometrici: CUPID

CUPID-Mo: risultati



Risoluzione energetica:

6.7 keV FWHM a picco TI 2615 keV,
estrapolata ~ 8 keV FWHM a $Q_{\beta\beta}$

Ottima radiopurezza (^{210}Po , $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$) dei cristalli
in Li_2MoO_4 , migliore dei cristalli in ZnSe

Indice di background nella ROI:

$$B = (4 \pm 2) \times 10^{-3} \text{ c}/(\text{keV} \cdot \text{kg} \cdot \text{yr})$$

- Half-life limit del $0\nu\beta\beta$ in ^{100}Mo (“CUORE Results and the CUPID Project” at Neutrino 2020 conference)
 $T_{0\nu}^{1/2} (^{100}\text{Mo}) > 1.4 \times 10^{24} \text{ yr}$ (90% C.I including syst.)
- Decadimento $2\nu\beta\beta$ (DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-8203-4):
 $T_{2\nu}^{1/2} (^{100}\text{Mo}) = 7.12 \times 10^{18} \text{ yr}$

Esperimenti bolometrici: CUPID

CUPID: 1 ton di rivelatori scintillanti in LiMoO_4

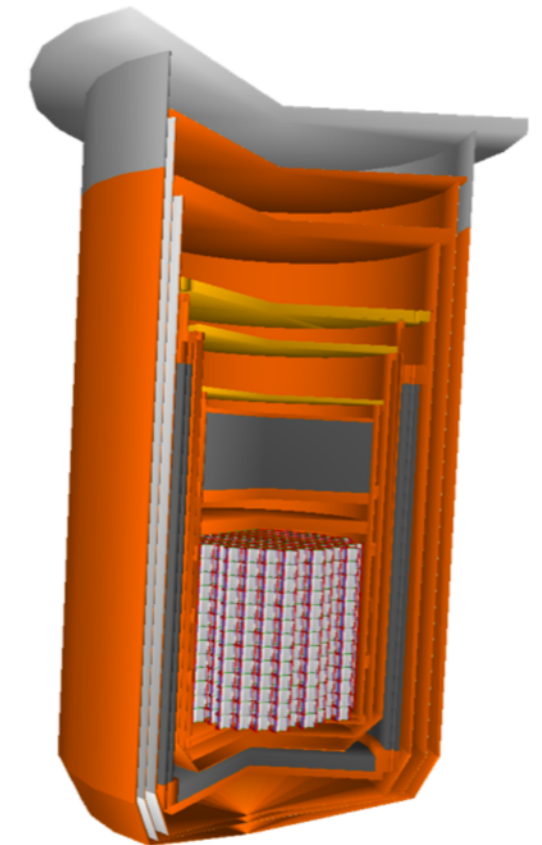
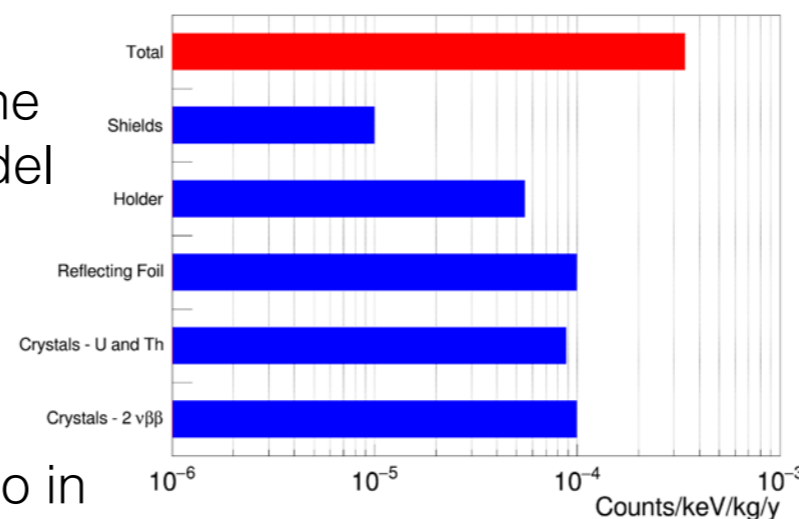
Esperimento di prossima generazione per la ricerca dello $0\nu\beta\beta$

- Rivelatore con ~1500 calorimetri scintillanti in Li_2MoO_4
- Cristalli arricchiti a > 95% in ^{100}Mo (~250 kg di ^{100}Mo)
- Cristalli affacciati a lettori di luce in Ge; entrambi letti con NTD
- Rivelatore di CUPID sarà posizionato nel criostato di CUORE alla fine della sua presa dati

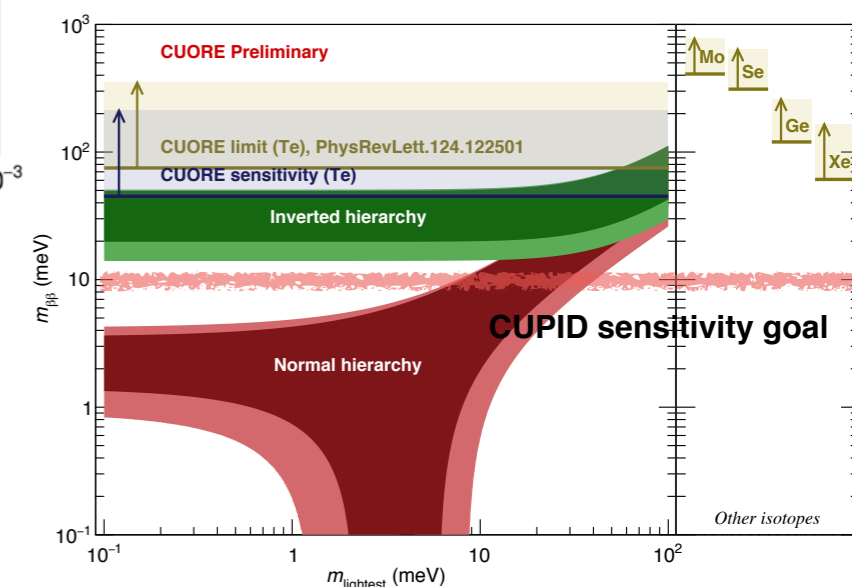
Background goal:

$B \sim 10^{-4} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$ nella ROI

- Particle ID (α vs β/γ) con scintillazione
- Possible discriminazione di pile-up del $2\nu\beta\beta$ dalla pulse-shape
- Riduzione dei background:
 - underground location a LNGS, schermi passivi (Pb/Cu)
 - procedure di pulizia e stoccaggio in clean room di rivelatori e materiali [da esperienza di CUORE assembly]
 - muon veto
 - utilizzo di granularità del rivelatore



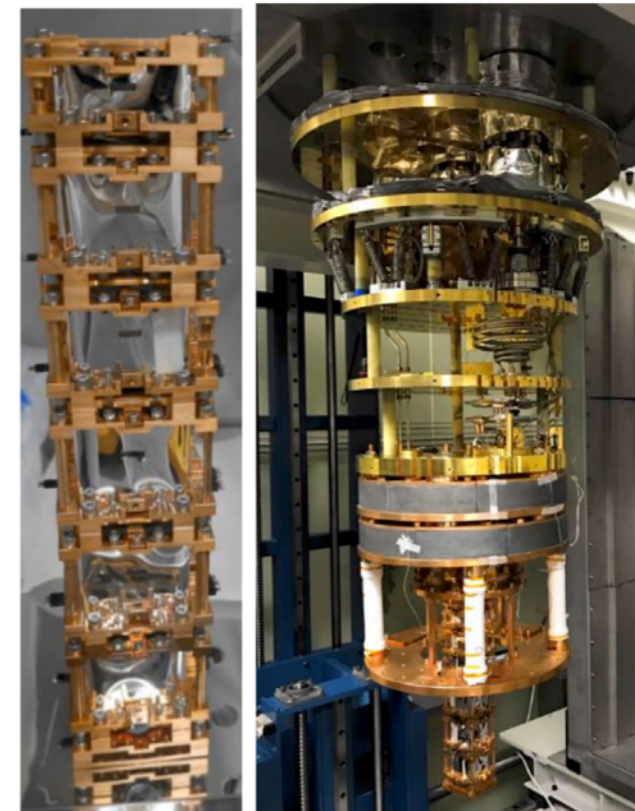
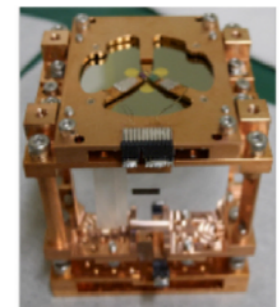
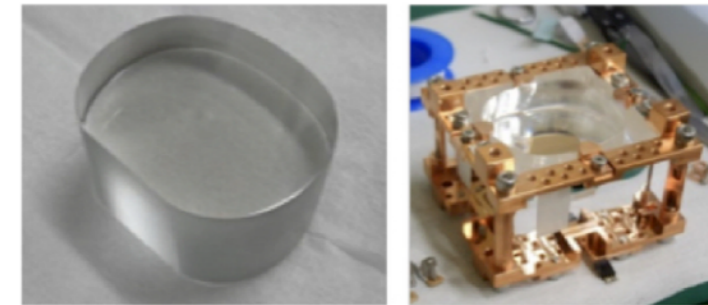
CUPID pre-CDR - arXiv:1907.09376



Esperimenti bolometrici: AMoRE

AMoRE: Advanced Mo based Rare process Experiment

- Esperimento per la ricerca dello $0\nu\beta\beta$ di ^{100}Mo che sarà ospitato nel Yangyang underground laboratory Y2L in Corea
- Utilizzo di cristalli bolometrici scintillanti, composti del Mo
- Approccio in 3 fasi:
 - **AMoRE-pilot (kg-scale detector):**
 - 6 cristalli di CaMoO_4 , arricchiti in ^{100}Mo e depleti in ^{48}Ca , foglio riflettente attorno ai cristalli, rivelatore di luce in Ge,
 - Metallic Magnetic Calorimeters (MMCs) come sensori di fononi per assorbitore e LD, lettura con SQUID
 - Ottimizzazione del sistema criogenico e degli schermi
 - massa totale 1.89 kg, 886 g ^{100}Mo ; operato a 20 mK; exposure $\sim 0.14 \text{ kg}\cdot\text{yr}$; background index $0.55 \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$ nella ROI, risoluzione energetica (heat) 10-15 keV a $Q_{\beta\beta}$
 - **AMoRE-I:**
5 kg detector, cristalli CaMoO_4 , background goal $\sim 10^{-3} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$ nella ROI
 - **AMoRE-II:**
 $\sim 200 \text{ kg}$ detector, background goal $\sim 10^{-4} \text{ c}/(\text{keV}\cdot\text{kg}\cdot\text{yr})$ nella ROI, composto del Mo (XMoO_4) da definire



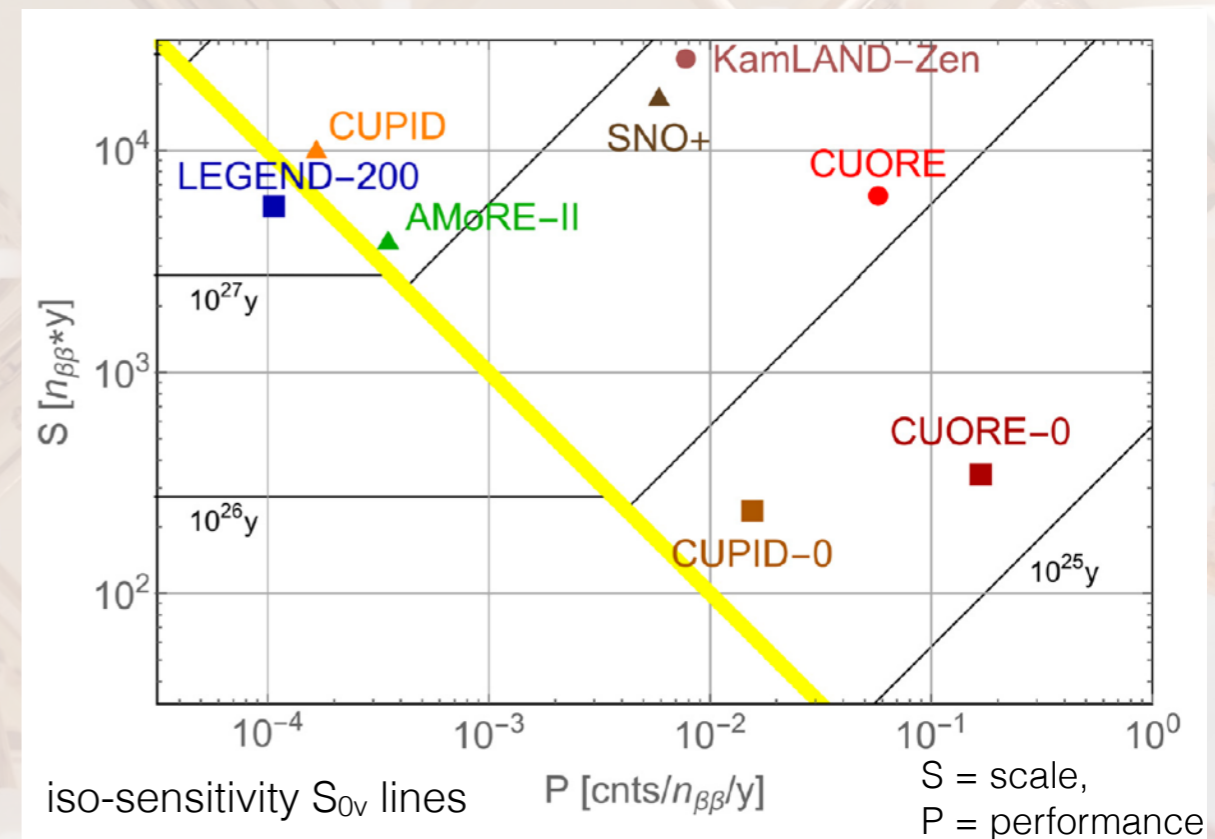
AMoRE-pilot: first results

<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7279-1>

Conclusioni

Stato dell'arte e prospettive future degli esperimenti bolometrici per lo $0\nu\beta\beta$

- CUORE dimostra la fattibilità di rivelatori bolometrici su scala 1 ton per la ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$. Questa stessa tecnologia sarà utilizzata per CUPID e per AMoRE, con l'aggiunta della particleID tramite luce di scintillazione
- La tecnologia dei rivelatori bolometrici si dimostra competitiva con le altre tecniche calorimetriche per performance (risoluzione energetica, riduzione del background,...) e per scalabilità, in quanto a sensibilità per il decadimento $0\nu\beta\beta$. Inoltre, offre la possibilità di sviluppare facilmente rivelatori con cui testare diversi isotopi $\beta\beta$



“Search for neutrino-less double beta decay with thermal detectors”
M.Biassoni, O.Cremonesi (2020)
<https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2020.103803>

Contributi su esperimenti bolometrici per $0\nu\beta\beta$ a 106° Congresso SIF

- “Modellizzazione della forma degli impulsi nei rivelatori termici”, S.Quitadamo (Univ. Milano Bicocca)
- “La plastica per la fisica degli eventi rari”, S.Ghislandi (Univ. Milano Bicocca)
- “Search for neutrinoless double beta decay with scintillating bolometers”, E.Celi (GSSI)
- “Ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini con calorimetri criogenici in CUPID”, A.Ressa (Univ. Roma La Sapienza)