

I risultati dell'esperimento CUORE

Alice Campani per la collaborazione CUORE

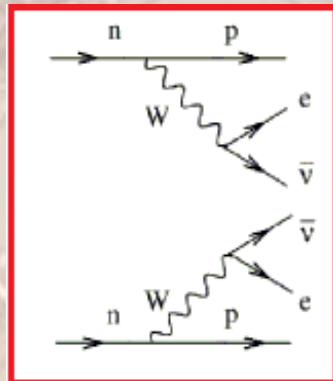
IFAE 2018, Milano - 6 Aprile 2018

La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

$2\nu\beta\beta$

$$(A, Z) \rightarrow (A - 2, Z + 2) + 2 e^- + 2 \bar{\nu}_e$$

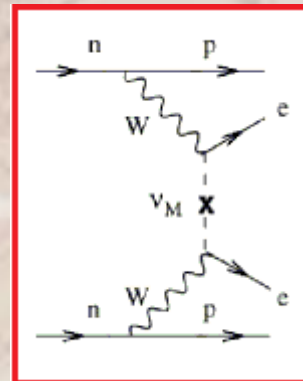
- Processo nucleare ammesso dal MS
- Possibile soltanto per nuclei pari-pari
- Previsto nel 1935 da M. G. Mayer e osservato in molti nuclei tra cui ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{130}Te , ^{136}Xe
- Vita media $\tau \sim 10^{19} - 10^{21}$ anni



$0\nu\beta\beta$

$$(A, Z) \rightarrow (A - 2, Z + 2) + 2 e^- + 2 \bar{\nu}_e$$

- Viola la conservazione del numero leptonico ($\Delta L = 2$) oltre il MS
- Possibile soltanto per neutrini massivi dotati di massa di Majorana o nuova fisica
- Non ancora osservato sperimentalmente
- Limiti sulla vita media $\tau > 10^{24} - 10^{26}$ anni



La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

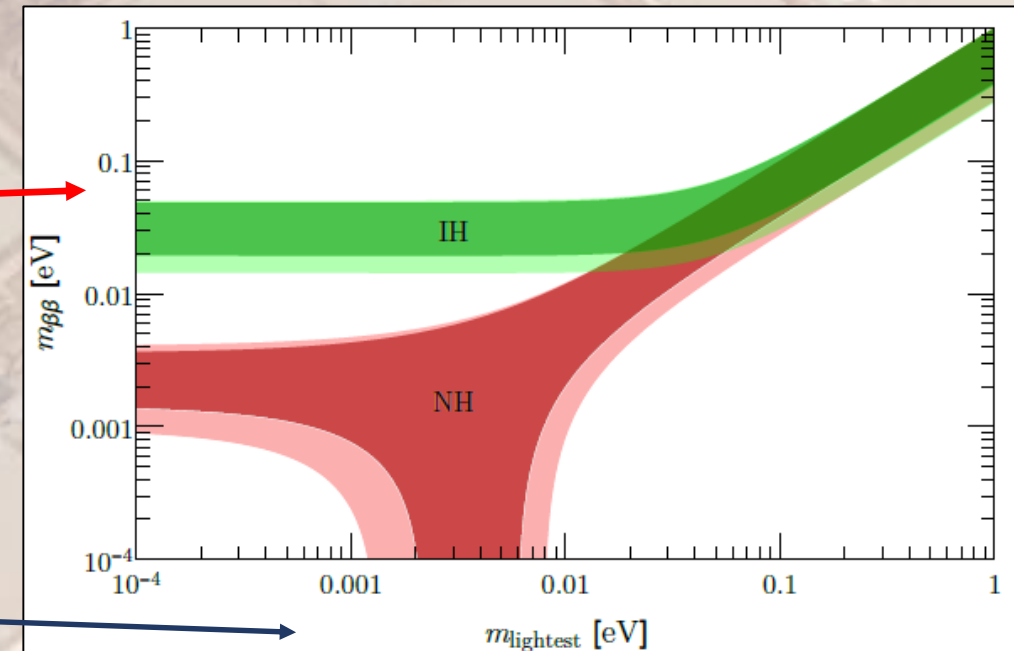
L'importanza del $0\nu\beta\beta$ per la fisica delle particelle e l'astrofisica

- Il rate di decadimento è $\Gamma_{0\nu\beta\beta} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \frac{m_{\beta\beta}}{m_e}$

con $m_{\beta\beta} = \left| \sum_{i=1,2,3} U_{ei}^2 m_i \right|$

massa efficace di Majorana

- (Se osservato) permette di stabilire un vincolo per i valori ammessi di $m_{\beta\beta}$
- Via diretta per stabilire l'ordinamento delle masse dei neutrini (gerarchia diretta o inversa) e la scala assoluta
- $m_{\beta\beta}$ è l'unica osservabile in cui compaiono esplicitamente le fasi di Majorana



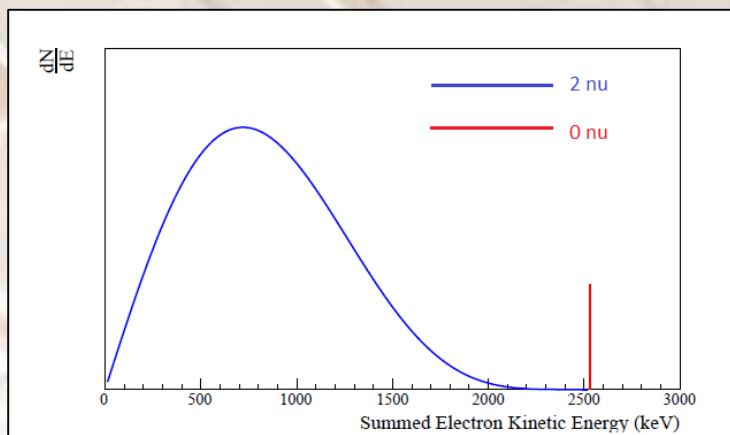
I requisiti di un esperimento per la ricerca del $0\nu\beta\beta$

$$S^{0\nu}_{1/2}(n\sigma) = \ln(2) \cdot \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Efficienza del rivelatore}}}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{n\sigma} \cdot \frac{x\eta N_A}{M_A} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot T}{B \cdot \Delta}} \cdot \text{sensibilità sulla vita media rispetto al } 0\nu\beta\beta$$

$\frac{M \cdot T}{B \cdot \Delta}$ → $\frac{\text{Massa del rivelatore} \cdot \text{tempo di acquisizione}}{\text{indice di fondo} \cdot \text{risoluzione energetica}}$

$\frac{x\eta N_A}{M_A}$ → Nuclei che decadono $\beta\beta$

- Esposizione elevata: massa attiva (**CUORE ~ 742 kg**) e tempo di acquisizione (**5 anni**)
- Riduzione del fondo (naturale e non) (**0.01 conteggi/keV/kg/anno**)
- Risoluzione energetica adeguata: il segnale di $0\nu\beta\beta$ è un picco monocromatico (**5 keV**)



- Scelta accurata dell'isotopo (^{130}Te)

↓

Q-valore lontano dalla radioattività naturale (α o γ)

↓

Elevata abbondanza isotopica (no operazioni di arricchimento)

L'esperienza Cuore per la ricerca del $0\nu\beta\beta$

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

Cosa?

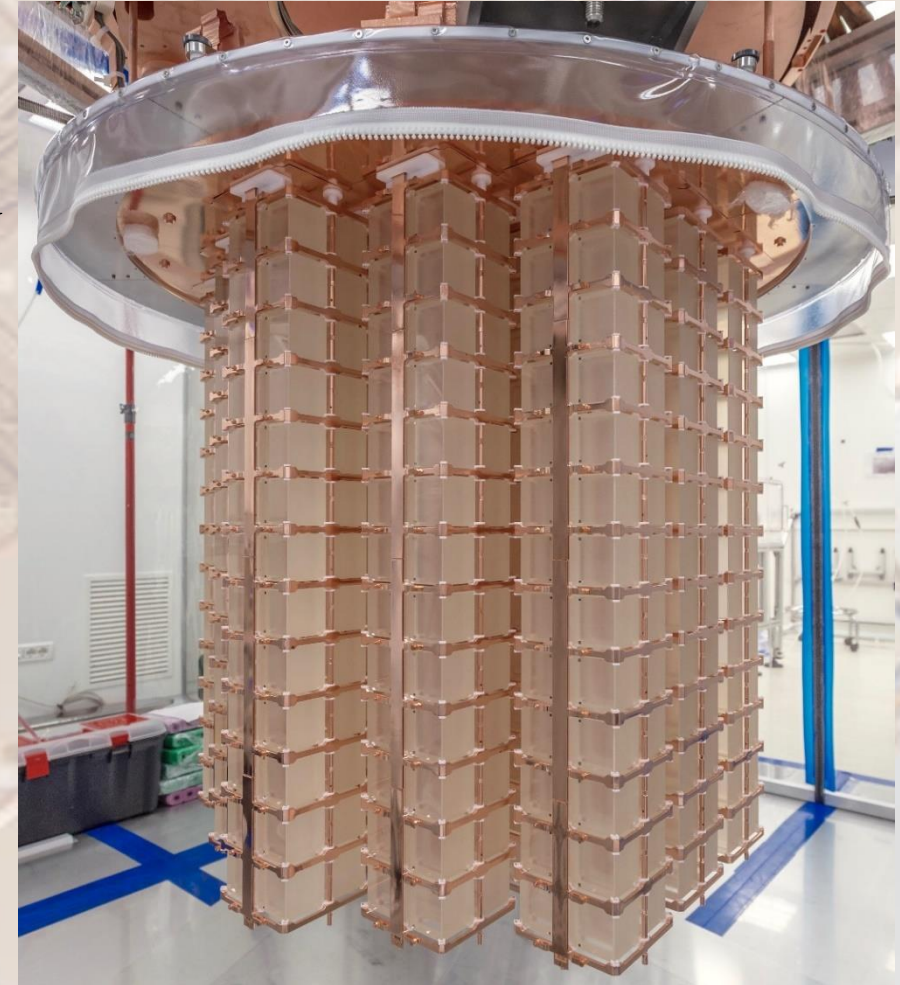
- $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te
 - a. i. 34.17 %
 - Sorgente = rivelatore
 - $Q_{\beta\beta} = (2527.515 \pm 0.013) \text{ keV}$

Come?

- 988 cristalli di TeO_2 in 19 torri di 13 piani (massa di $^{130}\text{Te} \sim 206 \text{ kg}$)
- Rivelatore con tecnica bolometrica su larga scala (una lunga storia, dal 1995 a oggi)

Dove?

- Situato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso

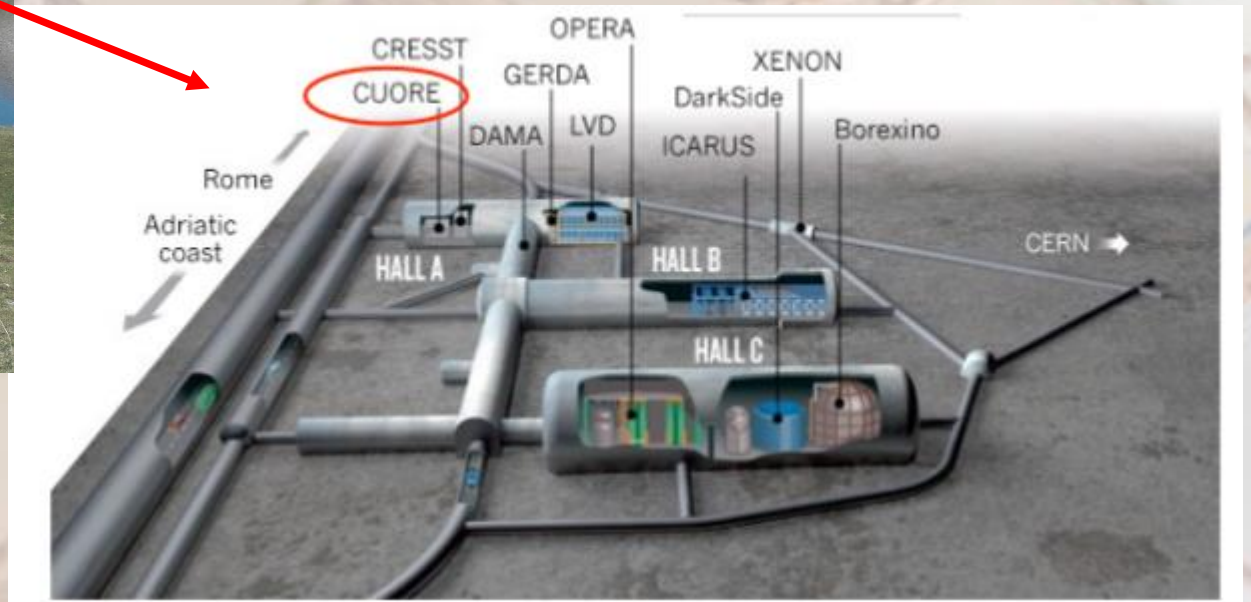


L'esperienza Cuore per la ricerca del $0\nu\beta\beta$



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

- Profondità equivalente a una colonna d'acqua di 3600 m
- $\phi_{\mu} \cong 3 \cdot 10^{-8} / (cm^2 \cdot s)$ 6 ordini di grandezza in meno rispetto al livello del mare
- $\phi_{\gamma} \cong 0.73 / (cm^2 \cdot s)$
- $\phi_n \cong 4 \cdot 10^{-6} / (cm^2 \cdot s)$

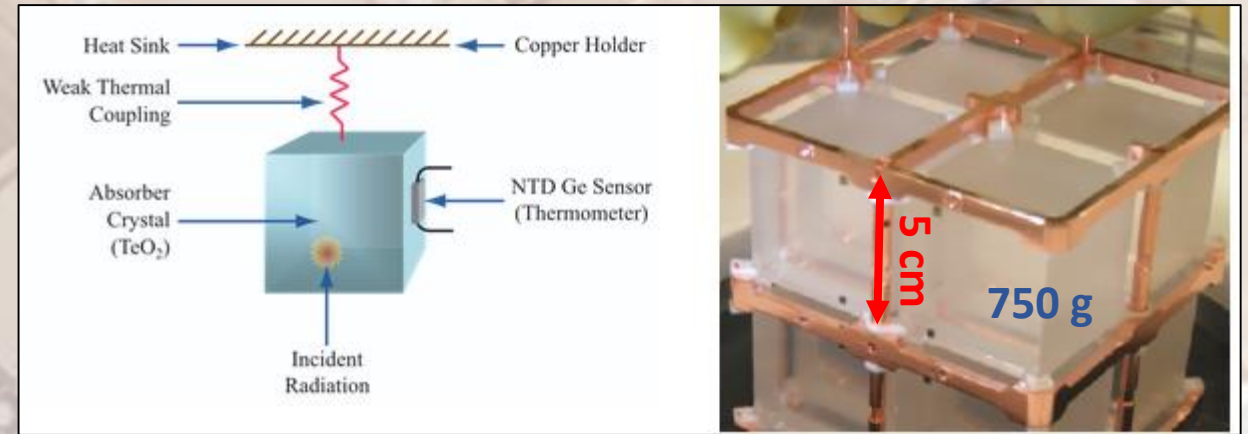


Cos'è un bolometro? La tecnica bolometrica in CUORE

Calorimetro che misura l'energia depositata in un'interazione mediante l'innalzamento della temperatura

Si compone di

- un assorbitore (cristallo di TeO_2),
- un sensore di T (termistore al germanio NTD),
- un bagno termico per riportare il sistema a T_0 (rame della struttura di sostegno meccanico)



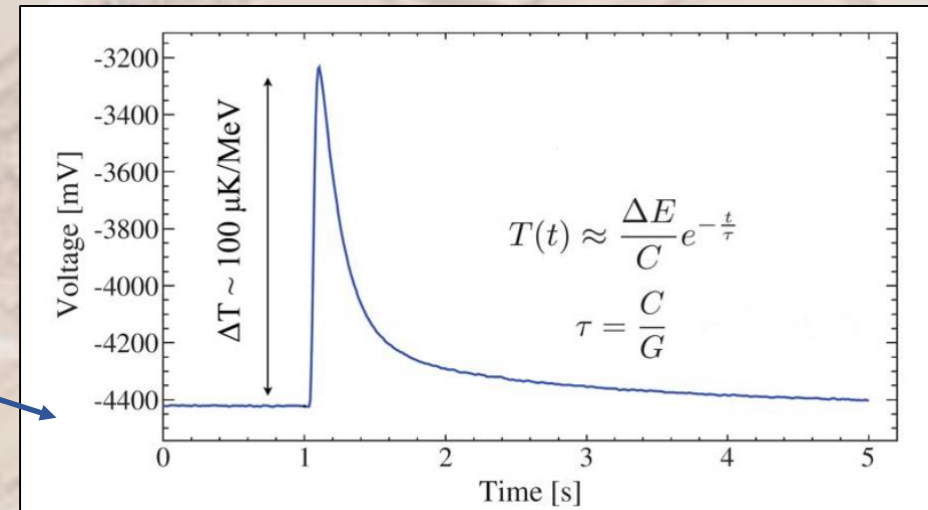
Un criostato a diluizione mantiene il sistema a $T \cong 10 - 15$ mK

- $R_{NTD}(T) = 1 \Omega \exp\left(\frac{3K}{T}\right)^{1/2}$
- $C_{\text{TeO}_2}(T) \propto T^3$ (legge di Debye)

Tipico segnale di CUORE

a $T_0 \sim 10$ mK $\Delta T \cong 1\%$

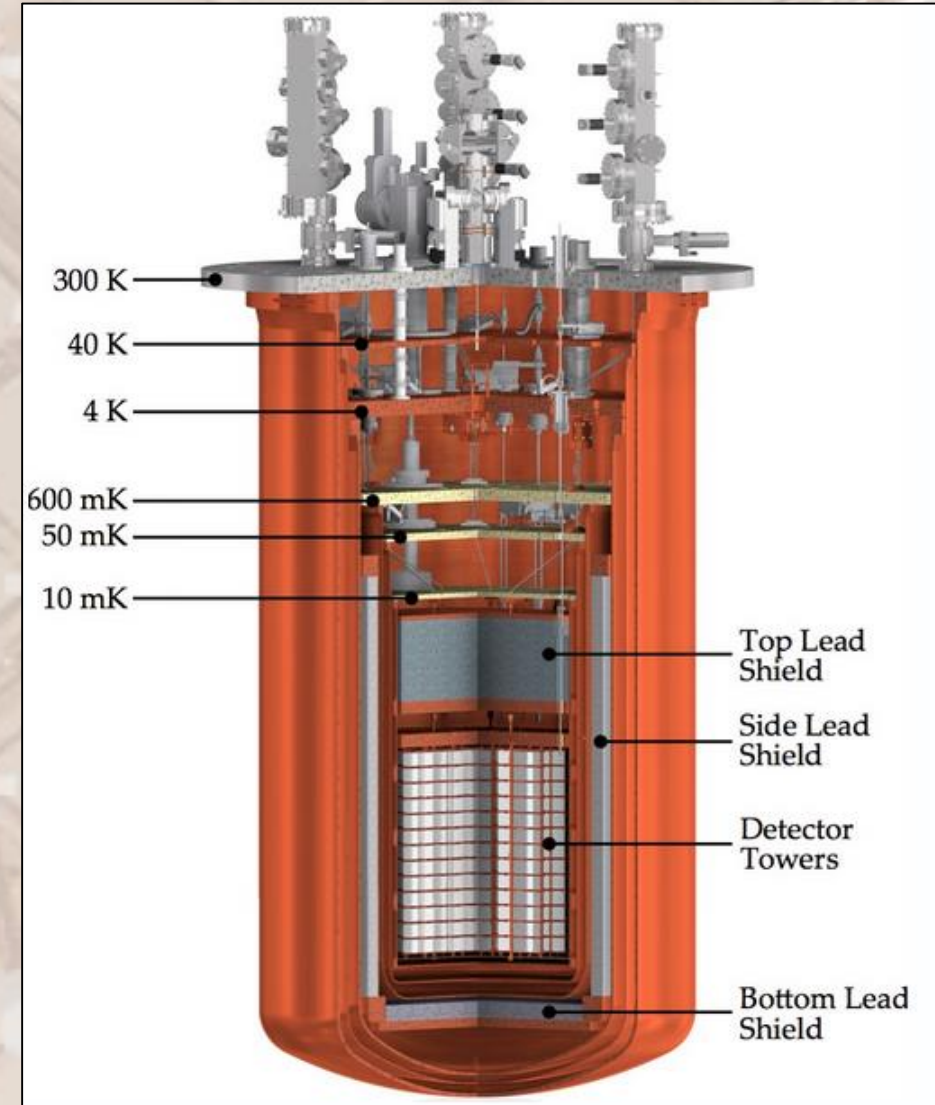
per $R_0 \sim 200$ M Ω $|\Delta R| = 5-10\%$



La struttura di CUORE: criostato e schermature

Criostato a diluizione unico nel suo genere

- Miscela ^3He - ^4He per raggiungere $T_0 \cong 10$ mK
- Tecnologia a *pulse tube* e *fast cooling system*: circa 22 giorni per raffreddare il sistema a 4 K
- Deve mantenere stabilmente $V \sim 1$ m³ ($M \sim 15$ tonnellate) a $T < 4$ K
- Isolato meccanicamente (rumore indotto da vibrazioni)
- Requisiti stringenti di radiopurezza dei materiali
- All'interno due schermi in piombo per la radioattività naturale e le contaminazioni superficiali
- Due schermature esterne per i raggi gamma ambientali e i neutroni



Le previsioni sul fondo di CUORE

FONDO: eventi nella regione di interesse per il $0\nu\beta\beta$ (2465-2575) keV

Sorgenti principali:

- Decadimenti delle catene di ^{238}U , ^{232}Th
- Isotopi da attivazione cosmogenica ^{60}Co , ^{110}Ag
- μ, γ, n ambientali (Φ notevolmente ridotto)

Provenienti da:

- Elementi del criostato
- Rame della struttura di supporto
- Cristalli di TeO_2

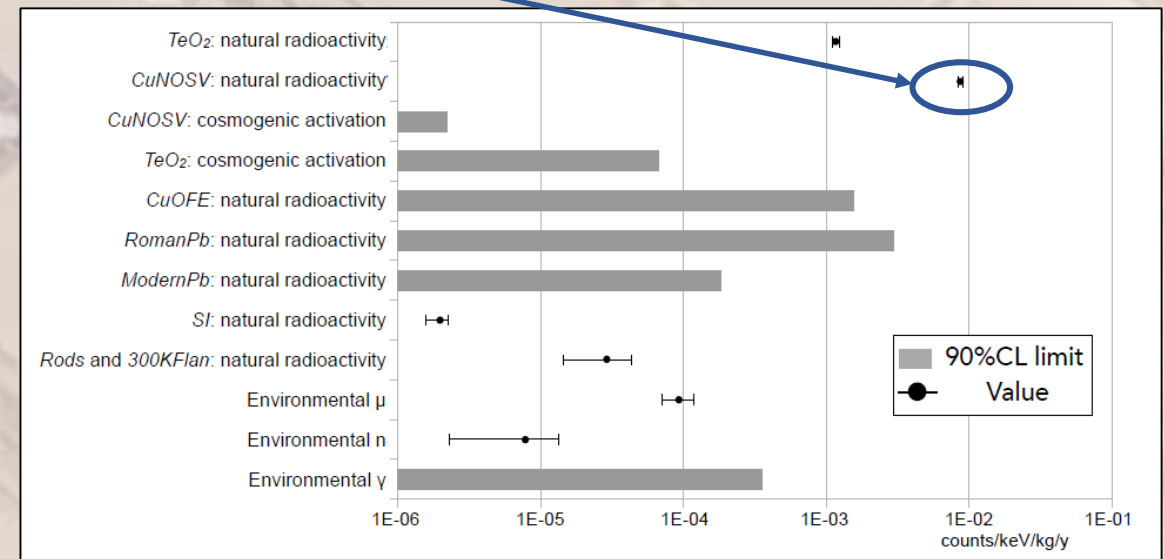
Valutazione dei contributi:

- Analisi dei materiali
- Spettro di energia dei dati di CUORE 0

Simulazione Monte Carlo per ciascun bolometro

Contributo dominante:

Decadimenti α superficiali (struttura di supporto)



$$BI = [1.00 \pm 0.03(\text{stat.}) \pm_{-0.10}^{+0.23}(\text{syst.})] 10^{-2} \frac{\text{conteggi}}{\text{KeV} \cdot \text{kg} \cdot \text{anno}}$$

[Alduino, C., Alfonso, K., Artusa, D.R. et al. Eur. Phys. J. C \(2017\) 77: 13.](#)

[Alduino, C., Alfonso, K., Artusa, D.R. et al. Eur. Phys. J. C \(2017\) 77: 543.](#)

Dal completamento del rivelatore ai primi dati di CUORE

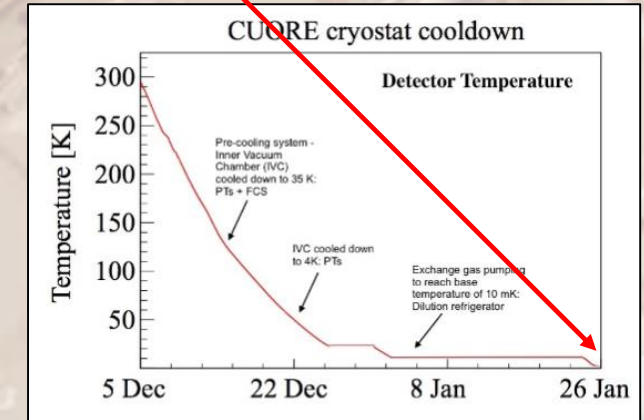
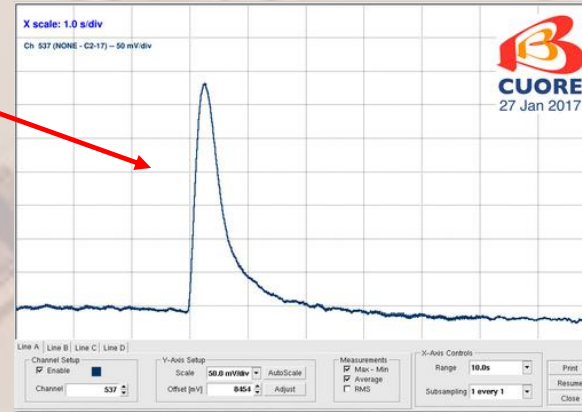
- Conclusione dell'assemblaggio delle torri il 26/8/2016
- Raffreddamento del rivelatore dal 5/12/2016 al 26/1/2017 (raggiunta $T = 6.3$ mK)

- Il **primo impulso** il 27/1/2017

- Due periodi di acquisizione:

maggio-giugno 2017 1° set di dati

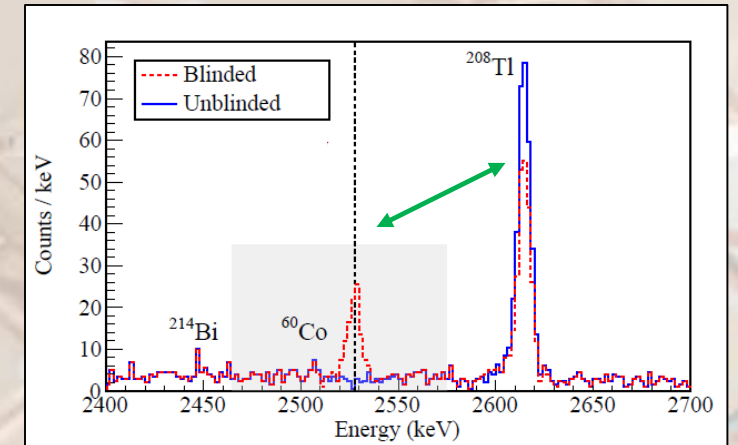
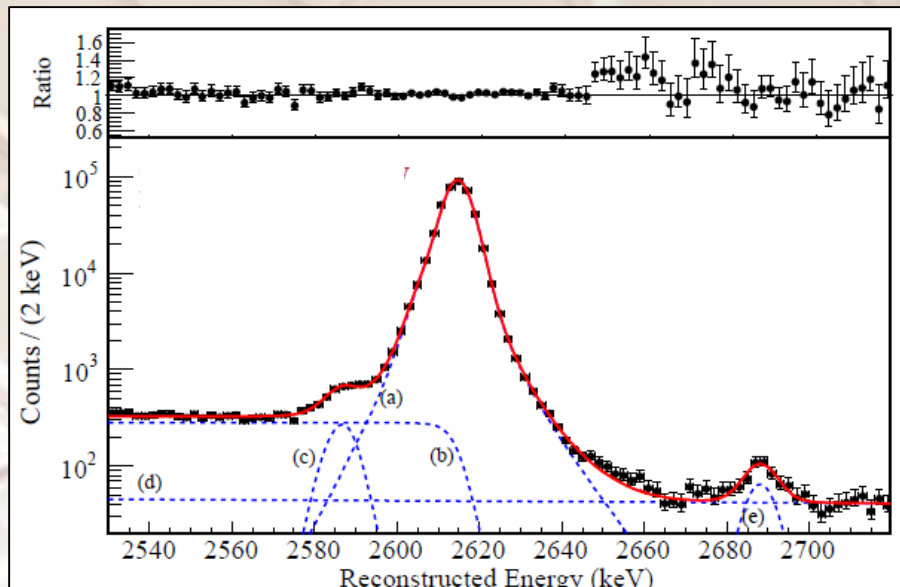
agosto-settembre 2017 2° set di dati



- Ciascun periodo include una fase di calibrazione e la fase di ricerca di $0\nu\beta\beta$ (*run di fisica*)
- Frequenza di campionamento 1 kHz, finestre di 10 s; forme d'onda in assenza di impulso per caratterizzare il rumore del rivelatore e impulsi di energia nota iniettati per la stabilizzazione
- 984/988 bolometri funzionanti
- Soglie di trigger da ~ 20 a poche centinaia di keV
- Rate di eventi medio 50 mHz durante la calibrazione, 6 mHz nelle run di fisica
- Esposizione totale: TeO_2 86.3 kg · anno (37.6+48.7), ^{130}Te 24.0 kg · anno

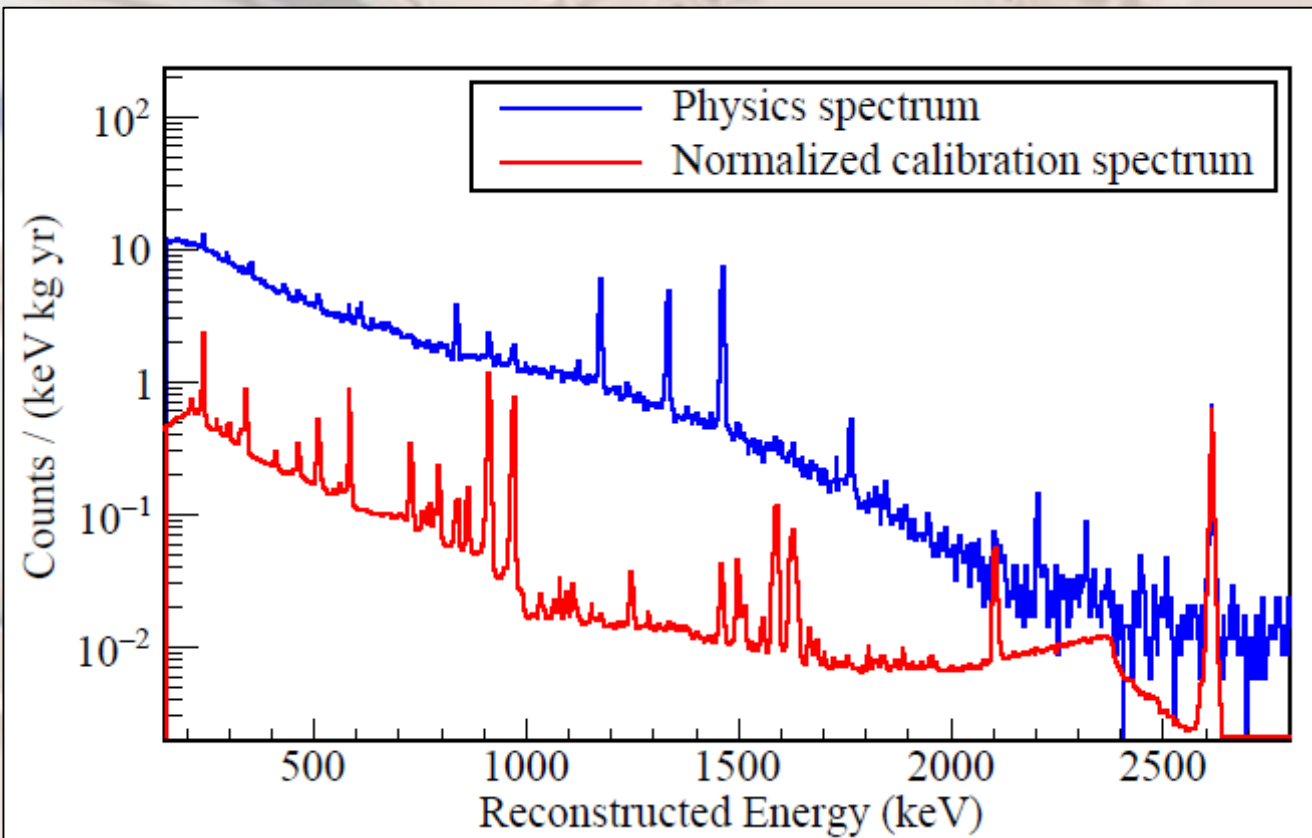
L'analisi dei dati: dagli impulsi allo spettro

- Stima dell'ampiezza di ciascun impulso (*filtro ottimo* per migliorare il SNR)
- Stabilizzazione della risposta del rivelatore rispetto a cambiamenti della temperatura
- Calibrazione: relazione ampiezza-energia con 6 righe dello spettro gamma del ^{232}Th
- Blinding dei dati: la procedura di fit viene definita senza conoscere lo spettro nella ROI per il $0\nu\beta\beta$
- Rimozione delle coincidenze: selezione degli eventi che coinvolgono un solo cristallo



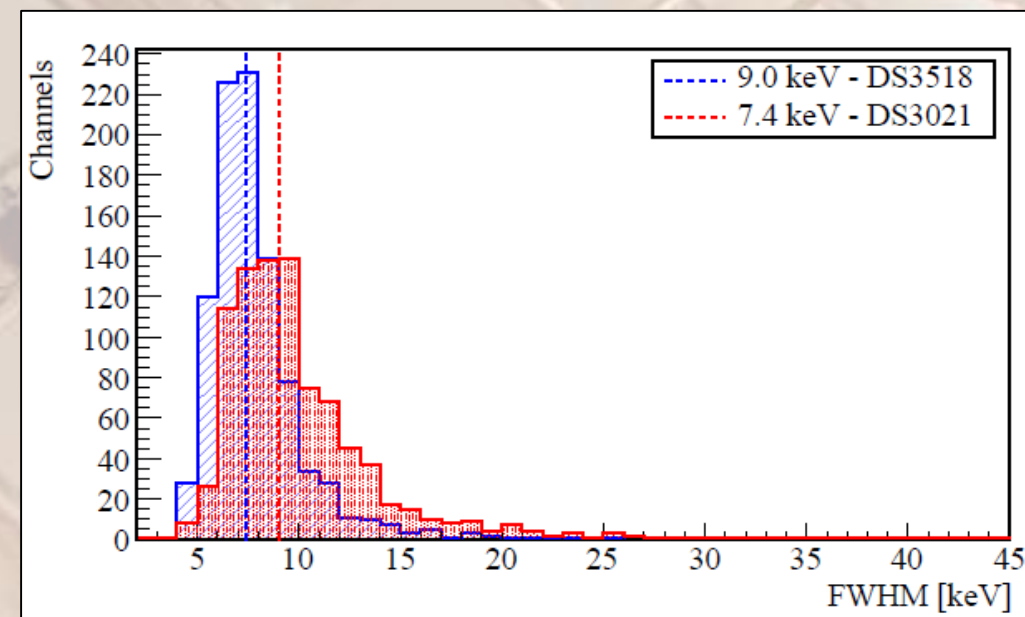
- Modello della funzione di risposta del rivelatore sugli eventi del picco a 2615 keV (^{208}Tl): tre componenti gaussiane, contributo di scattering Compton multiplo, picco X del tellurio e termine di fondo lineare

Lo spettro di CUORE e la risoluzione



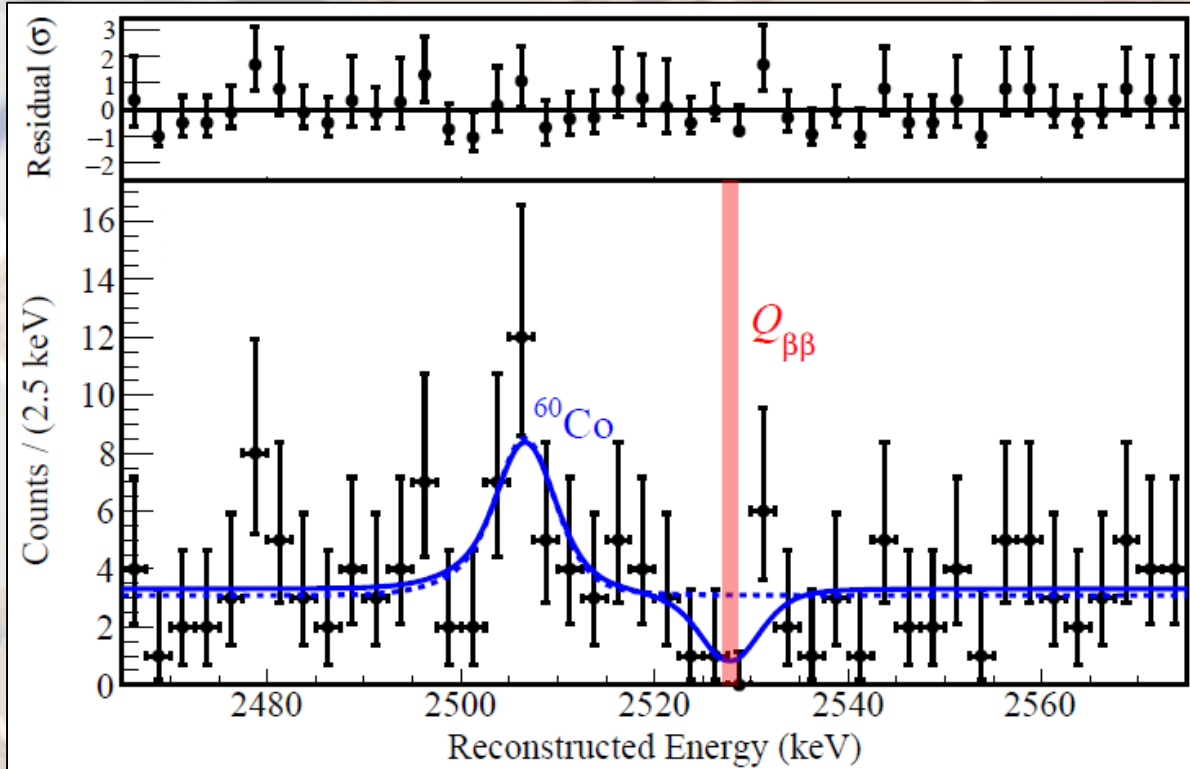
Risoluzione energetica (FWHM):

- 1° set di dati (8.3 ± 0.4) keV
- 2° set di dati (7.4 ± 0.7) keV
- Media pesata (7.7 ± 0.5) keV



Spettro delle run di fisica (per la ricerca del $0\nu\beta\beta$)
e spettro di calibrazione (normalizzato alla riga gamma del tallio a 2615 keV)

I primi risultati di CUORE



Fit nella ROI (2465-2575) keV

155 eventi candidati

- Picco di $0\nu\beta\beta$
- Picco della coincidenza dei γ del ^{60}Co (1173+1332 keV)
- Fondo piatto

Nessuna evidenza di $0\nu\beta\beta$

Fissiamo un limite sulla vita media del ^{130}Te

$$\Gamma_{0\nu\beta\beta} = (-1.0_{-0.3}^{+0.4}(\text{stat.}) \pm 0.1(\text{syst.})) 10^{-25} \text{ yr}^{-1} \quad \tau_{1/2}^{0\nu} > 1.3 \cdot 10^{25} \text{ yr (90 \% C.L.)}$$

	Indice di fondo ($10^{-2}/\text{keV}/\text{kg}/\text{anno}$)	Efficienza (%)
1° set di dati	$1.49_{-0.17}^{+0.18}$	75.7 ± 3.0
2° set di dati	$1.35_{-0.18}^{+0.20}$	83.0 ± 2.6

I primi risultati di CUORE: il limite su $m_{\beta\beta}$

Limite sull'emivita del ^{130}Te rispetto al $0\nu\beta\beta$ ottenuto combinando i risultati di

CUORE (24 kg · anno),

CUORE-0 (9.8 kg · anno),

K. Alfonso, D. R. Artusa, F. T. Avignone et al., Phys.Rev.Lett. 115 (2015) no.10, 102502

Cuoricino (19.8 kg · anno)

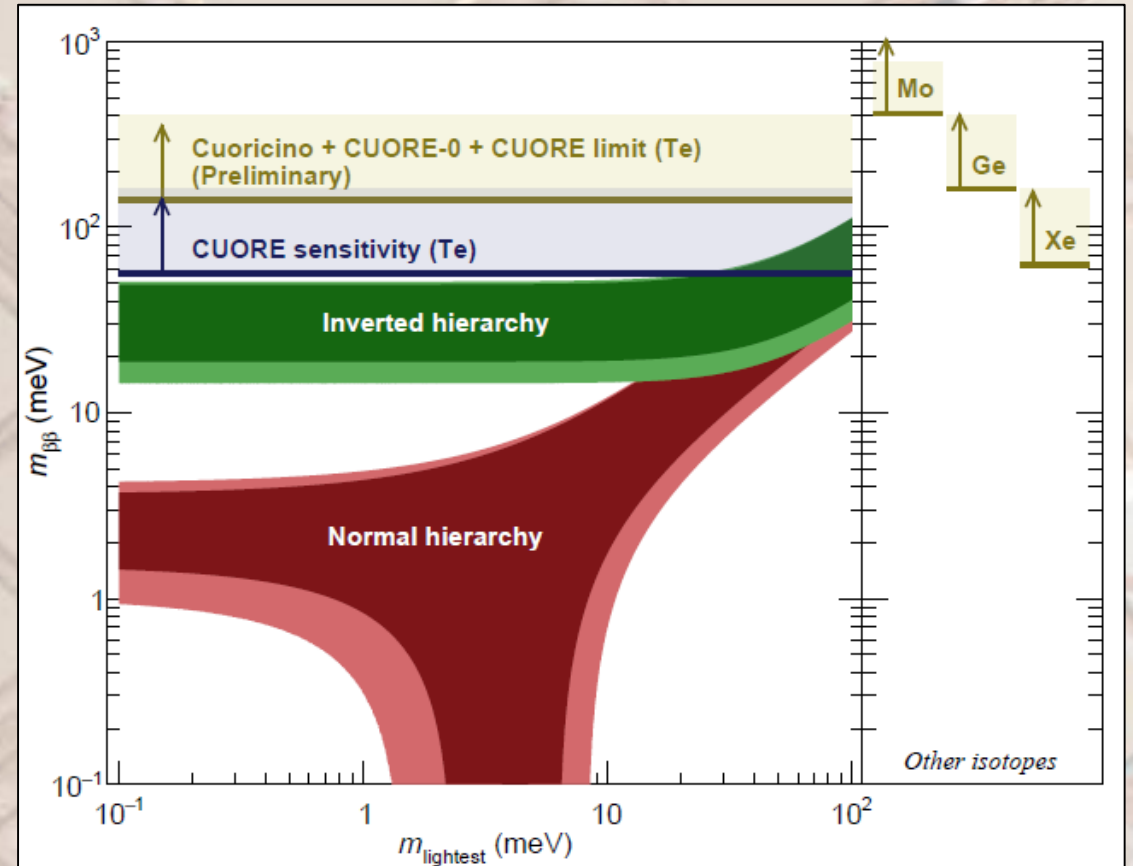
E.Andreotti, C. Arnaboldi, F.T. Avignone et al., Astropart. Phys. 34 (2011) 822-831

$$\tau_{1/2}^{0\nu} > 1.5 \cdot 10^{25} \text{ yr (90 \% C.L.)}$$

Il limite su $m_{\beta\beta}$

(se mediato dallo scambio di neutrini di Majorana leggeri)

$$m_{\beta\beta} < (140 - 400)\text{meV}$$



Sensibilità prevista per Cuore (5 anni):

$$\tau_{1/2}^{0\nu} > 9.0 \cdot 10^{25} \text{ yr (90 \% C.L.)}$$

$$m_{\beta\beta} < (56 - 160)\text{meV}$$

Conclusioni e prospettive

- CUORE è il primo rivelatore sulla scala delle tonnellate per la ricerca del $0\nu\beta\beta$, apre la strada allo studio di processi rari con tecnica bolometrica
- Eccezionali prestazioni del criostato: 17 tonnellate a $T < 4\text{K}$
- I risultati ottenuti in questi primi due mesi mostrano che gli obiettivi fissati sono alla portata dell'esperimento
- Al momento CUORE è in fase di raffreddamento - sospensione legata al miglioramento delle condizioni di lavoro del rivelatore
...Il meglio deve ancora venire!



**Grazie a nome
di tutta la
collaborazione!**

