

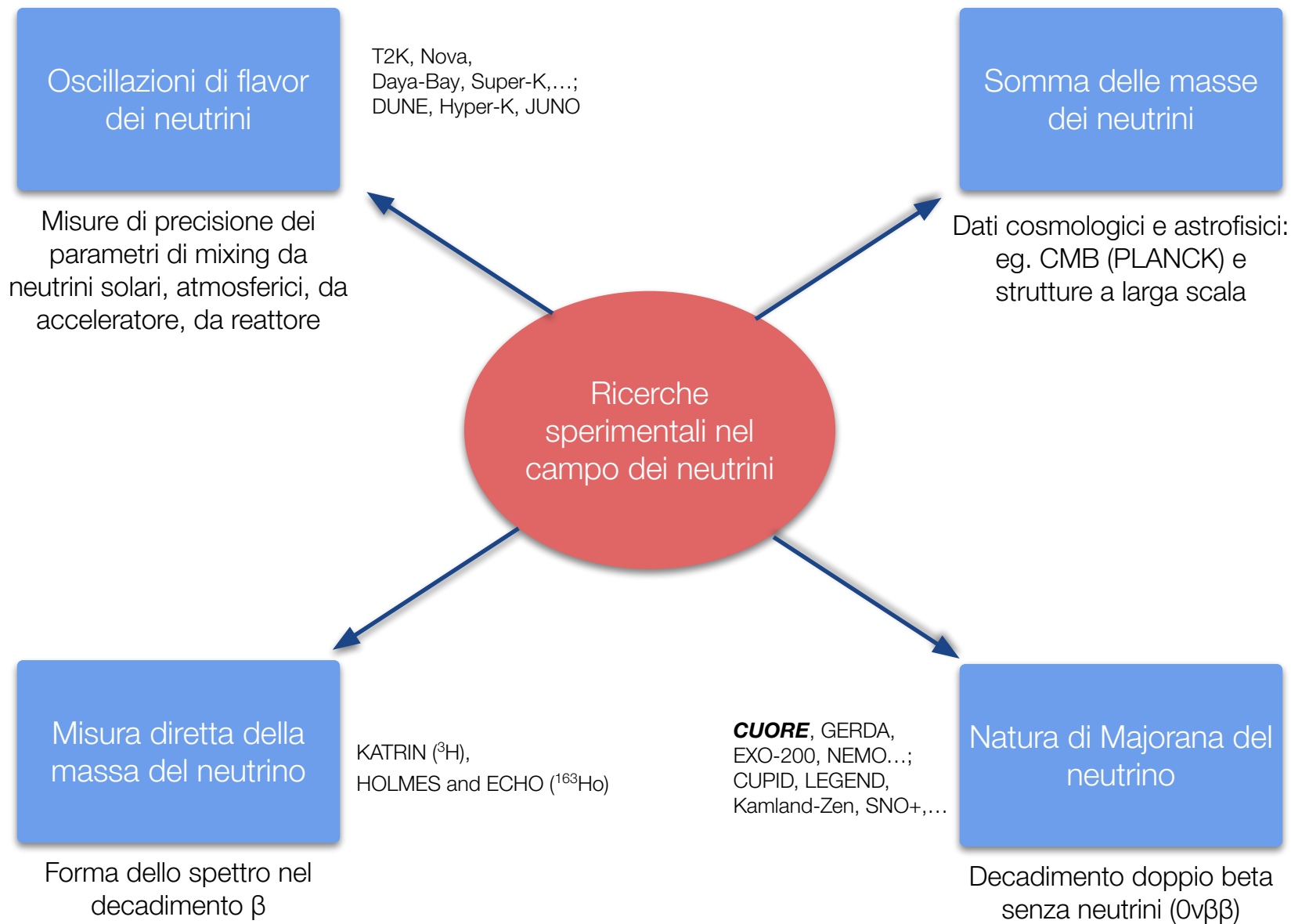
CUORE

*Oltre il modello standard, verso la conferma dell'ipotesi di
Majorana sulla natura del neutrino*

Irene Nutini e Stefano Pozzi

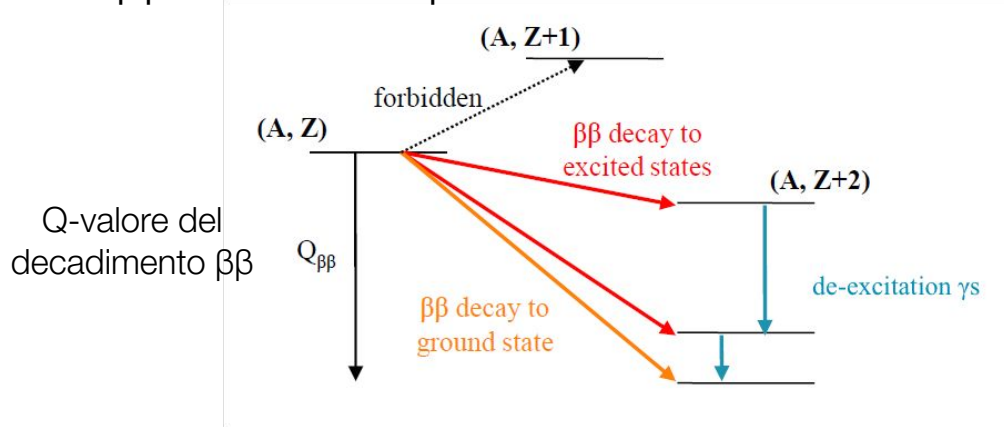


Seminari di Gruppo II @ UniMiB
4 Febbraio 2020



Decadimento doppio beta

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

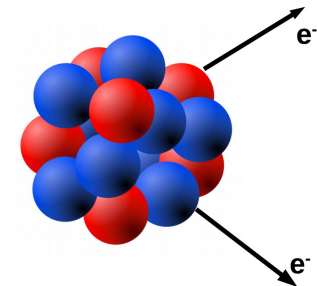
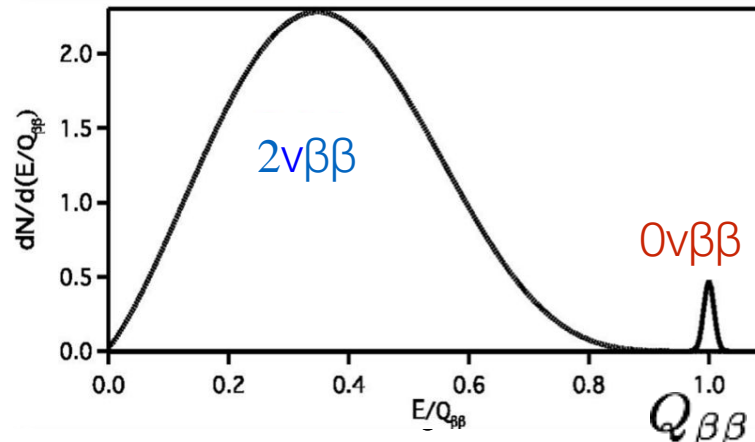
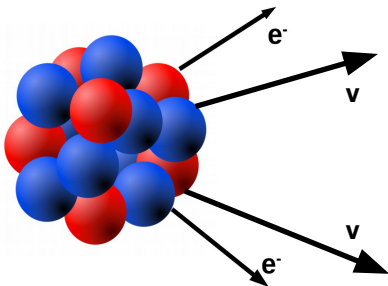


Decadimento doppio beta con emissione di neutrini **$2\nu\beta\beta$**

- Processo del 2° ordine consentito dal Modello Standard
- Osservato un vari nuclei: $T^{1/2}_{0\nu\beta\beta} \sim 10^{18-24}$ yr

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

- Processo che viola il numero leptonico ($\Delta L = 2$)
- Non ancora osservato $T^{1/2}_{0\nu\beta\beta} > 10^{24-26}$ yr



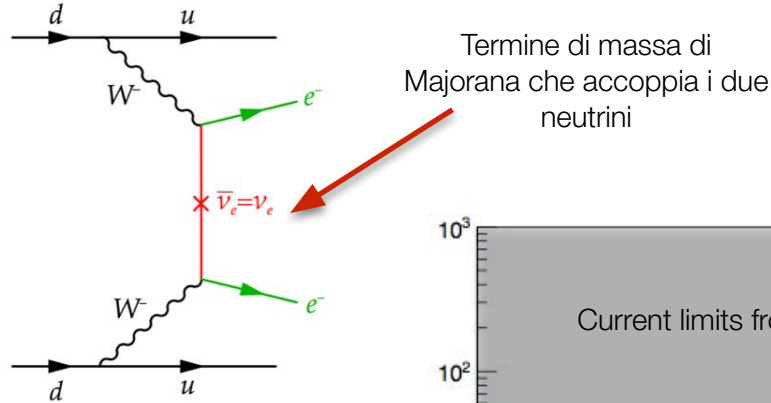
Decadimento $0\nu\beta\beta$ e massa del neutrino

L'osservazione del decadimento $0\nu\beta\beta$ implicherebbe:

- Violazione del numero leptonico
- Indicazioni sull'origine dell'asimmetria materia/antimateria
- Presenza di un termine di Majorana per la massa del neutrino
- Vincoli sulla gerarchia e sulla scala di massa del neutrino

Meccanismo $0\nu\beta\beta$:

Light Majorana neutrino exchange



Dalla **misura della rate di decadimento $0\nu\beta\beta$** , si può desumere il termine di massa efficace del neutrino

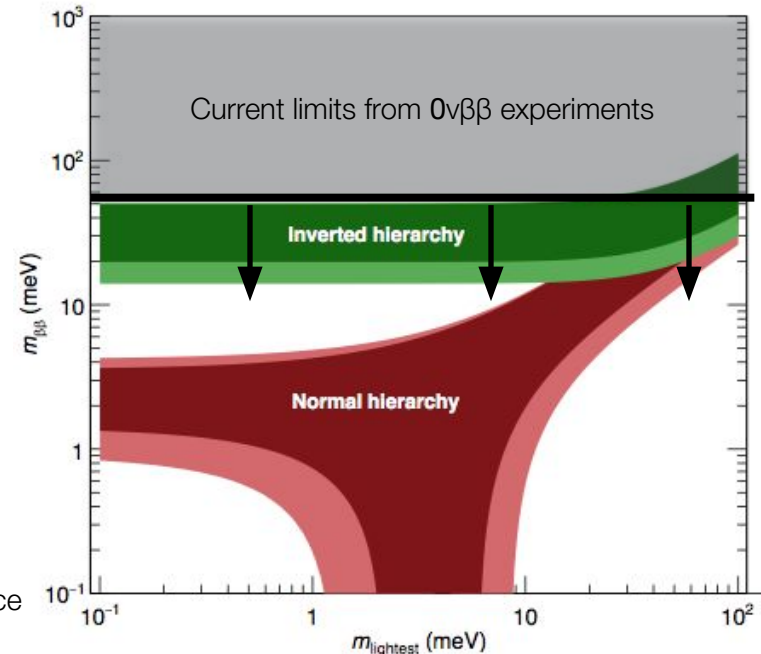
$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} \propto G(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{nucl}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

Integrale dello spazio delle fasi

Elemento di Matrice Nucleare (NME)

Termine di massa efficace del neutrino

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i m_{\nu_i} U_{ei}^2 \right|$$



Sensibilità sperimentale per il decadimento $0\nu\beta\beta$



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

Nuclei candidati per decadimento $\beta\beta$:

^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd ,

^{130}Te , ^{128}Te , ^{136}Xe ...

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

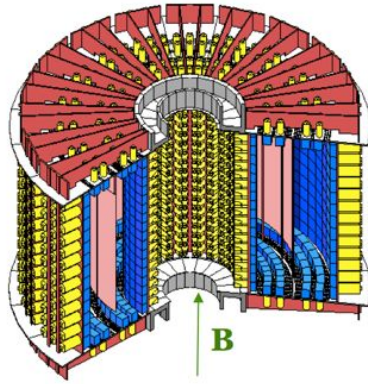
Esposizione

- Rivelatori di grande massa (M)
- Alto live-time

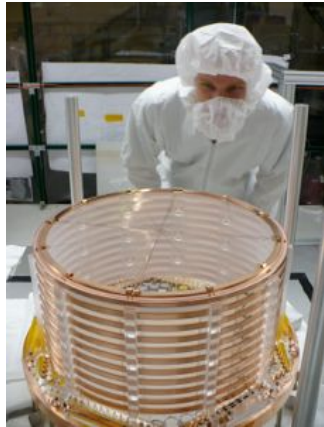
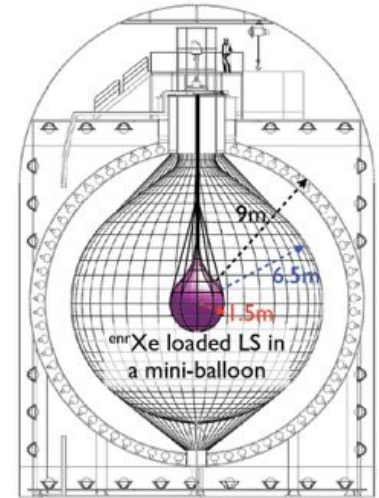
Calorimetri	Sorgente esterna
<ul style="list-style-type: none">+ Massa (~10kg → tons)+ Efficienza ($\epsilon \sim 1$)+ Risoluzione energetica ($\Delta E \sim 0.015\%$ with Ge-diodes, bolometers)+ Basso background- Limitazioni nel tipo di rivelatori- Particle Id: nessuna/parziale	<ul style="list-style-type: none">+ Particle Id e ricostruzione topologia degli eventi+ Numerosi candidati $\beta\beta$ studiabili con lo stesso rivelatore- Piccole masse di isotopo sorgente (< kg)- Limitata efficienza e risoluzione energetica

Tecniche sperimentali per la ricerca dello $0\nu\beta\beta$

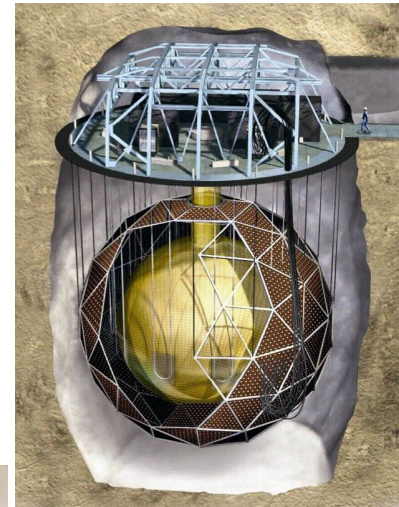
NEMO-3
Tracking detector for $2\nu\beta\beta$ and $0\nu\beta\beta$
10 kg of enriched material in foils
(several $\beta\beta$ isotopes)



KamLAND-ZEN
400 kg of enriched Xe (^{136}Xe) gas dissolved in KAMLAND liquid scintillator



EXO-200
TPC of 200 kg enriched liquid Xenon (^{136}Xe)

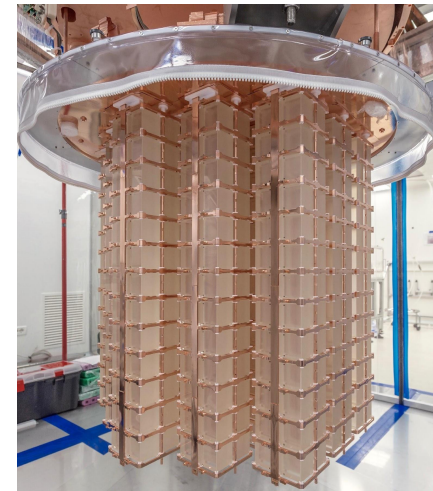


SNO+
SNO detector filled with ^{130}Te -loaded liquid scintillator

GERDA
Array of enriched Ge (^{76}Ge) diodes operated in liquid argon
First phase: 18 kg
Second phase: 40 kg



CUORE
742 kg of TeO_2 (206 kg of ^{130}Te) crystals operated at ~ 10 mK



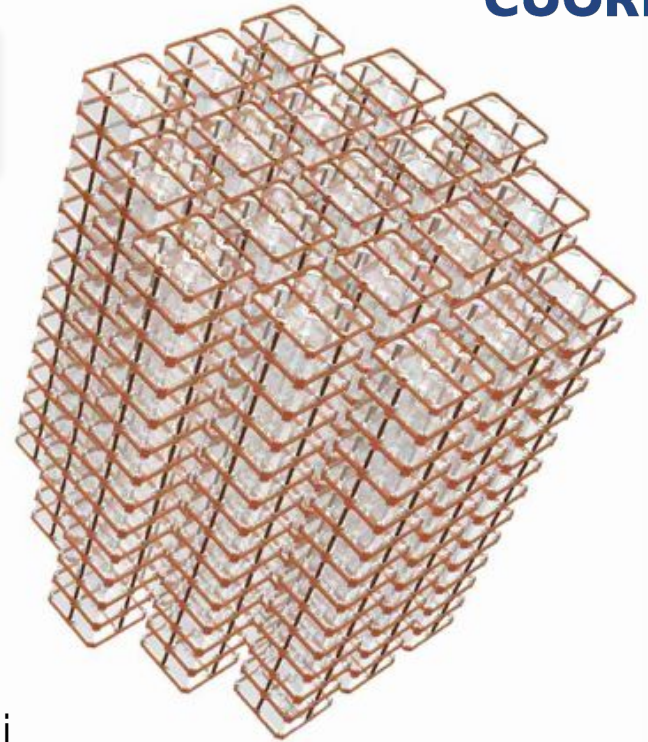
L'esperimento CUORE



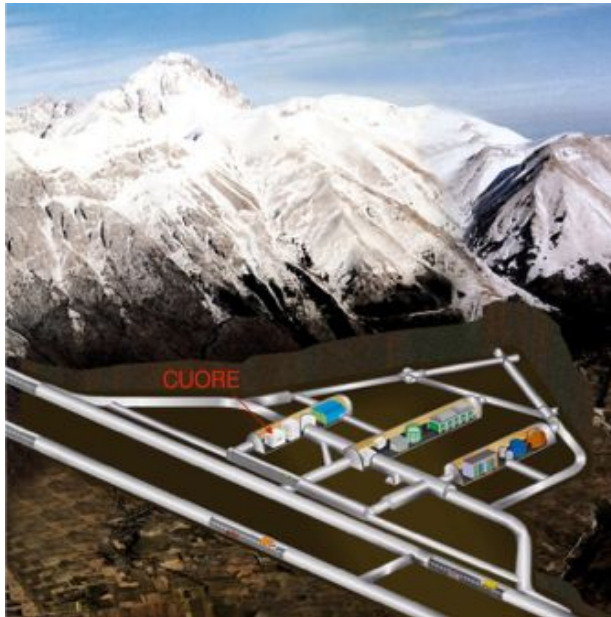
CUORE

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

Esperimento criogenico con rivelatore di scala ~1 ton
Si utilizzano 988 cristalli in $^{(\text{nat})}\text{TeO}_2$ operati a ~10 mK
- grande massa e alta segmentazione -



L'esperimento si trova ai
Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)



Sensibilità di CUORE per il decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{130}Te :
 $T_{1/2}^{0\nu} \sim 9 \times 10^{25}$ yr (90% C.L.) in 5 anni di live-time
 $m_{\beta\beta} < 50\text{-}130$ meV

La sfida tecnologica dell'esperimento CUORE



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

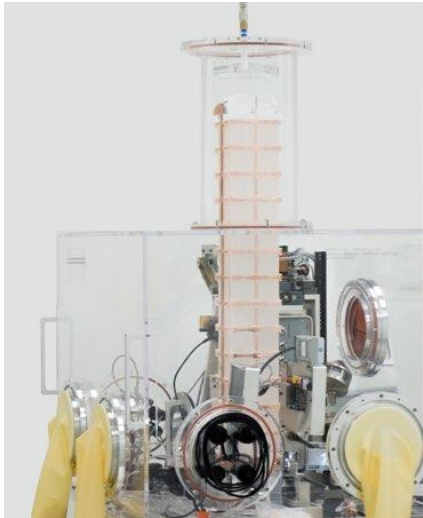
nella regione di interesse (ROI) intorno a $Q_{\beta\beta}$

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

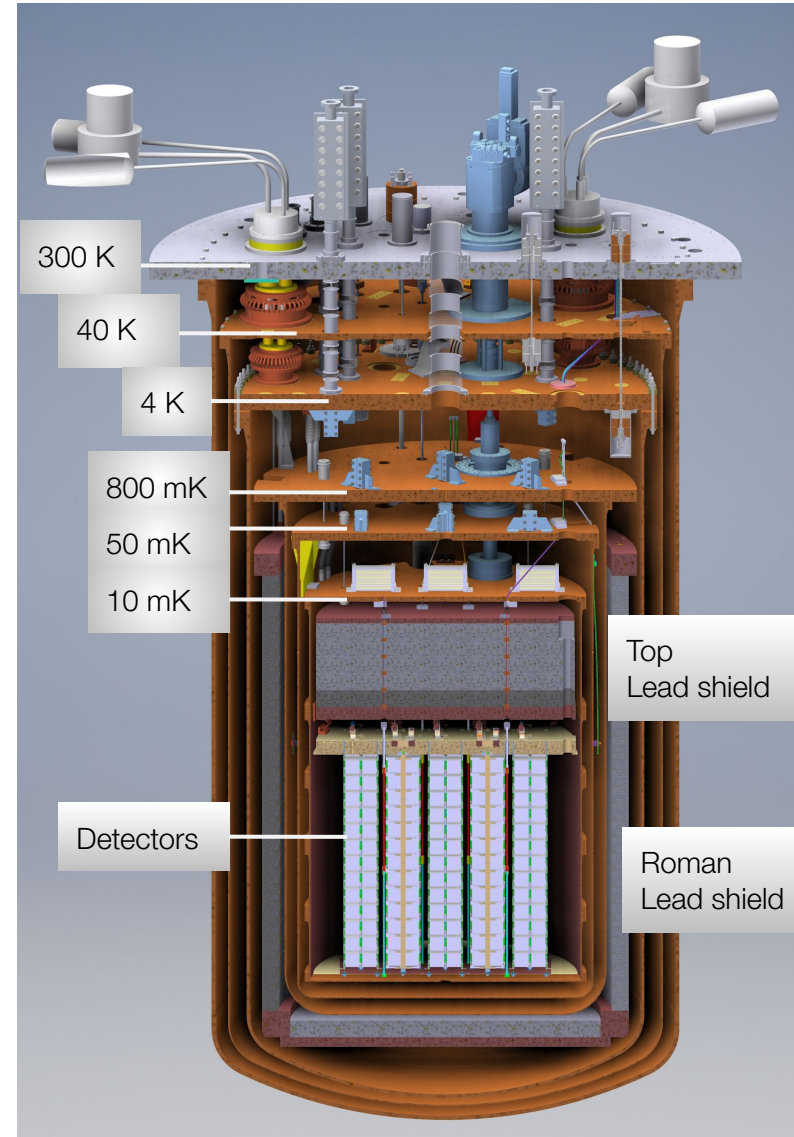
Target energy resolution 5 keV FWHM

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

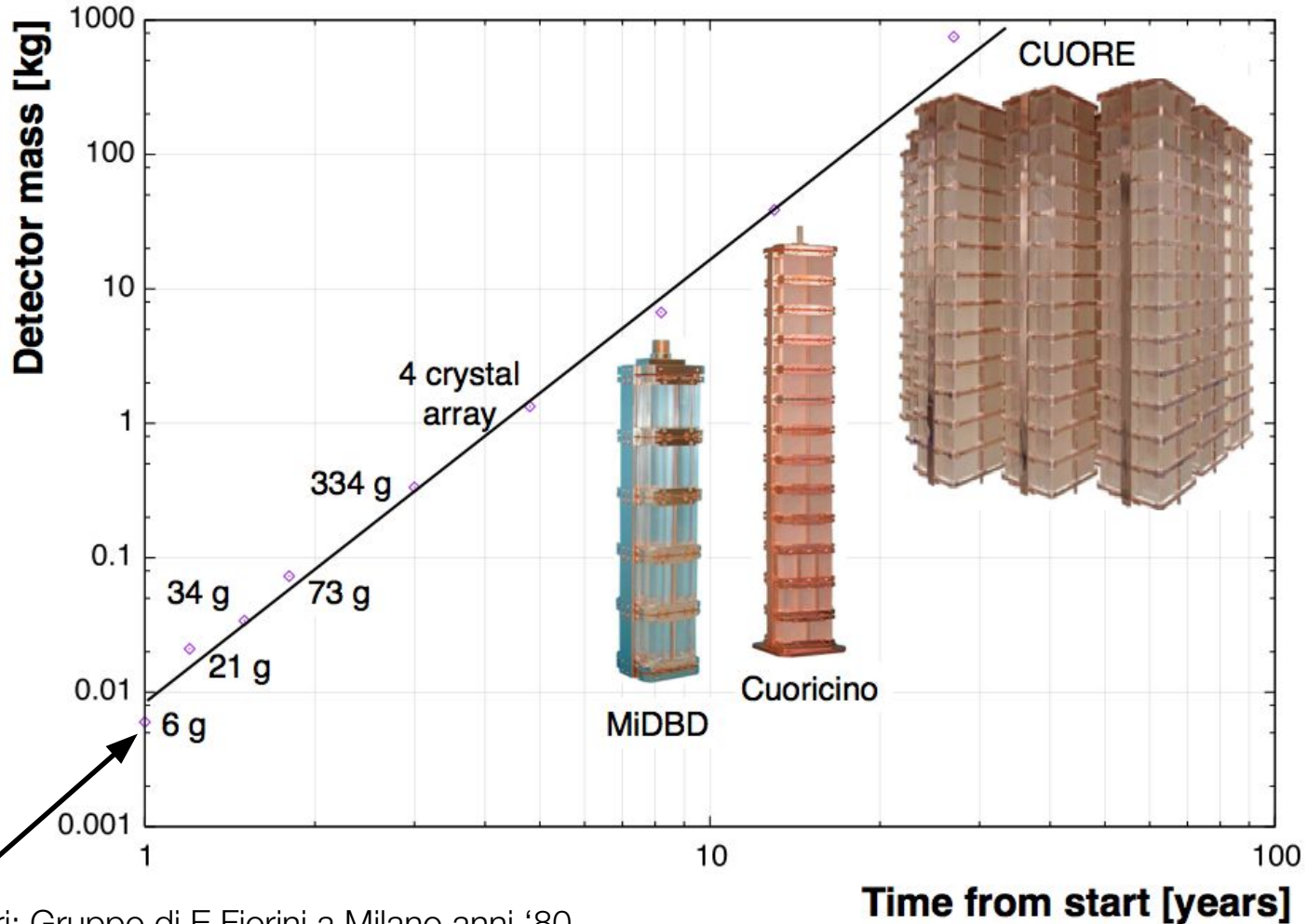


Schermo di piombo romano (depleto in ^{210}Pb) @ 4K



Macro-calorimetri in TeO_2 per la ricerca dello $0\nu\beta\beta$

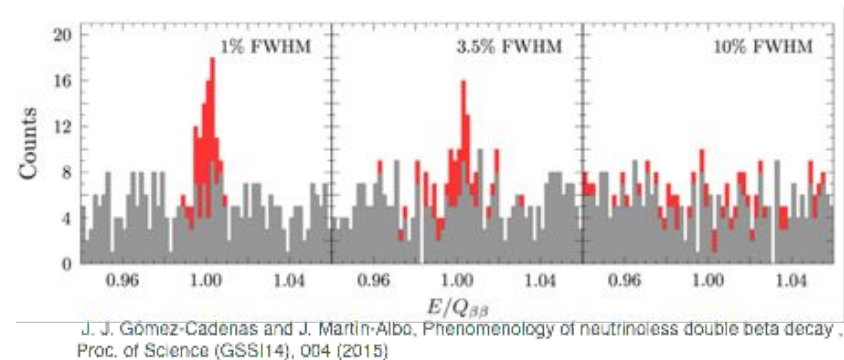
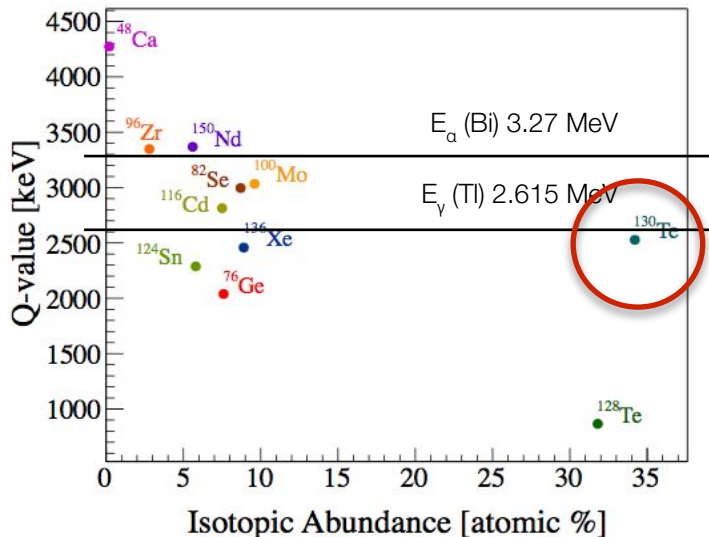
Calorimetri criogenici per la ricerca del decadimento doppio beta: da pochi grammi alla tonnellata



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

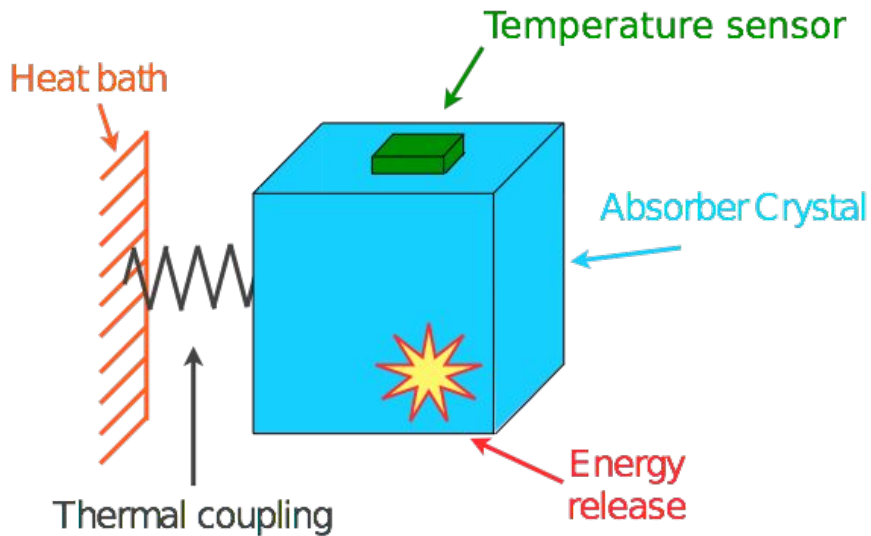
Ricerca di $0\nu\beta\beta$ con rivelatori in TeO_2

- ^{130}Te ha la più alta abbondanza isotopica naturale tra gli emettitori $\beta\beta$ ($\eta = 34.167\%$); si crescono cristalli naturali, non sono necessari processi di arricchimento
- Il Q-valore del processo, $Q_{\beta\beta}(^{130}\text{Te}) = 2527.518 \text{ keV}$, è più alto di gran parte dei fondi di radioattività naturale
- L'isotopo ^{130}Te è contenuto nel rivelatore/assorbitore in TeO_2 (alta efficienza di rivelazione, $\varepsilon \sim 90\%$)
- Crescita riproducibile di un altro numero di cristalli di alta purezza e qualità: rivelatori di grande massa (cristalli $\sim 1 \text{ kg}$, ~ 1000 cristalli)
- Rivelatori a bassa temperatura ($\sim \text{mK}$) in TeO_2 : ottima risoluzione energetica Δ ($\sim 0.1\text{-}0.2\%$ a $Q_{\beta\beta}$); migliore ricostruzione dello spettro di fondo e riduzione del fondo irriducibile del $2\nu\beta\beta$ attorno a $Q_{\beta\beta}$



Rivelatori criogenici in TeO_2

I rivelatori in TeO_2 di CUORE sono utilizzati come calorimetri criogenici (conversione dell'energia depositata in fononi)

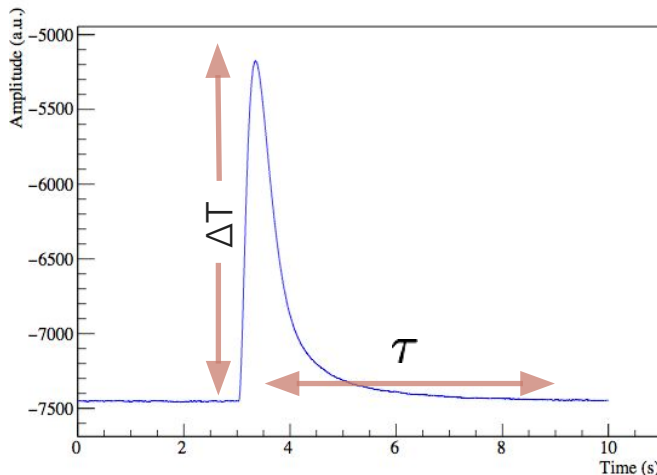


- Assorbitore a $T \sim 10$ mK
 - Deposizione di energia in assorbitore (E_{dep}): scattering di particelle su nuclei o elettroni \rightarrow produzione di fononi atermici \rightarrow degradazione di energia \rightarrow fononi termici/calore $\rightarrow \Delta T$
- Modello termico semplificato:*
 Capacità termica del cristallo, C
 Link termico G tra cristallo e bagno termico

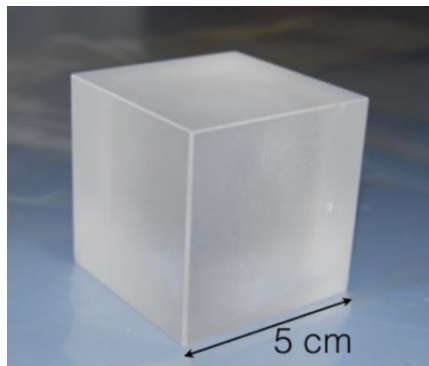
$$\Delta T \propto \frac{E_{dep}}{C} \quad \tau = \frac{G}{C}$$

- Sensore di fononi - Termistore NTD: forte variazione di resistenza al variare di T (ΔR) \rightarrow generazione di segnale elettrico impulsivo proporzionale all'energia dei fononi in eccesso

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

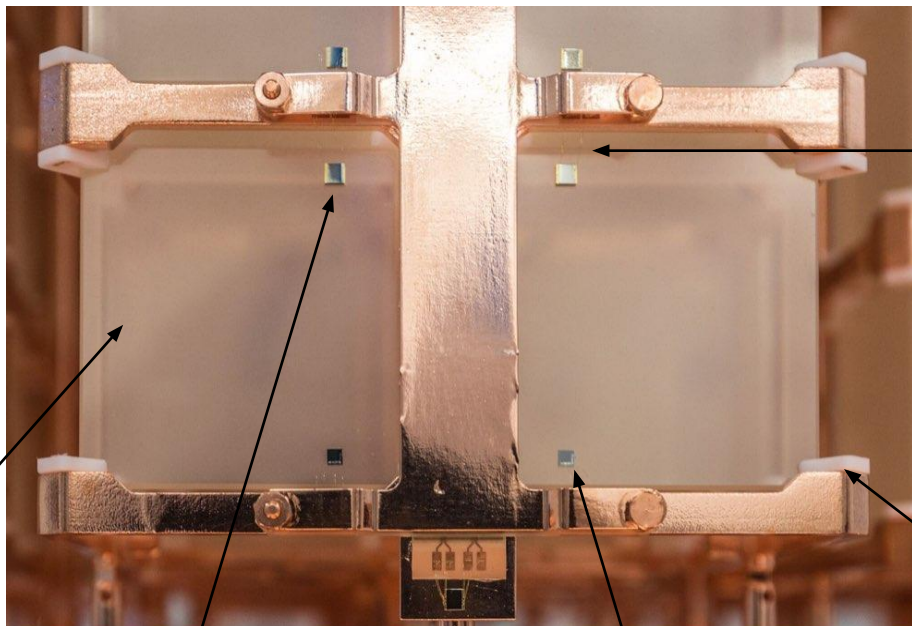


I rivelatori di CUORE



Cristallo $(^{nat})\text{TeO}_2$
Assorbitore = sorgente $0\nu\beta\beta$
 $5.0 \times 5.0 \times 5.0 \text{ cm}^3$, massa 750 g

Assorbitore TeO_2

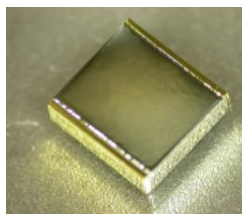


Bonding con
fili d'oro su
strips di
rame per il
read-out

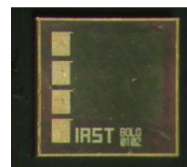
Ge-NTD

Si-heater

Supporti in PTFE



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



Heater in Silicio
 $2.3 \times 2.4 \times 0.5 \text{ mm}^3$
Si inietta periodicamente una
potenza fissata per
stabilizzare il guadagno
intrinseco per variazioni di
temperatura di base

Caratterizzazione dei rivelatori di CUORE



Cristallo TeO_2

Capacità termica: $C \propto (V \cdot T^3)$

$C \sim 2.3 \times 10^{-9} \text{ J/K (@ 10 mK)}$

$\Delta T_{\text{crystal}} \sim 100 \mu\text{K/MeV}$

NTD

Resistenza: $R(T) = R_0 \exp\sqrt{(T_0/T)}$

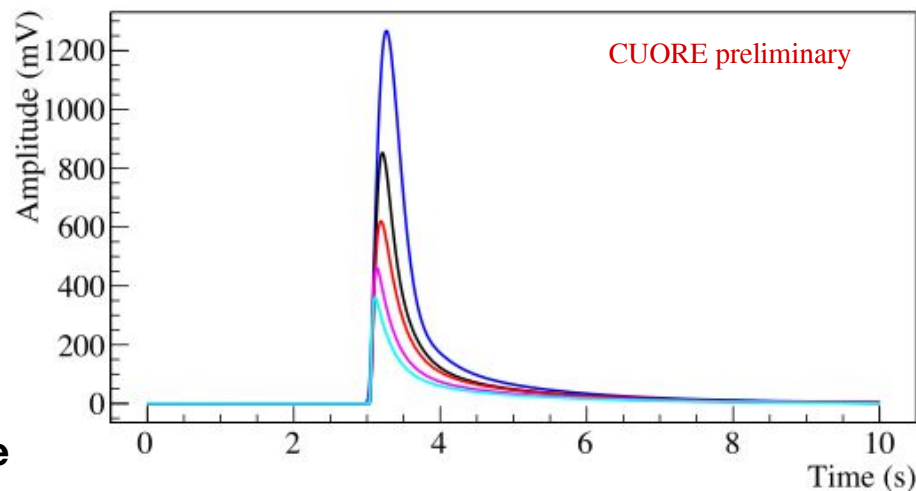
$R_{\text{wp}} \sim 100 \text{ M}\Omega - 1 \text{ G}\Omega$

$\Delta V_{\text{NTD}} \sim 400 \mu\text{V/MeV (@10 mK)}$

Banda di segnale: $\sim (0 - 10) \text{ Hz}$

Variazione di forma e ampiezza impulsi al variare della T di base

- $\tau_{\text{rise}} \sim$ accoppiamento RC tra resistenza NTD, $R(T)$, e capacità parassita dei link elettrici
- $\tau_{\text{decay}} \sim$ Capacità termica dei cristalli, $C(T)$
- Ampiezza $\sim E_{\text{dep}}/C$
guadagno intrinseco del cristallo a data T



Ottimizzare le performance in termini di scelta di T di lavoro, di caratteristiche cristalli, di caratteristiche NTDs

Caratterizzazione dei rivelatori di CUORE



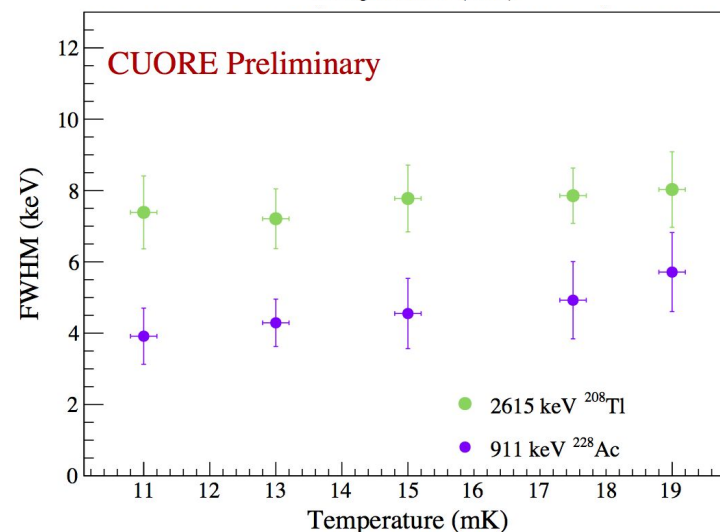
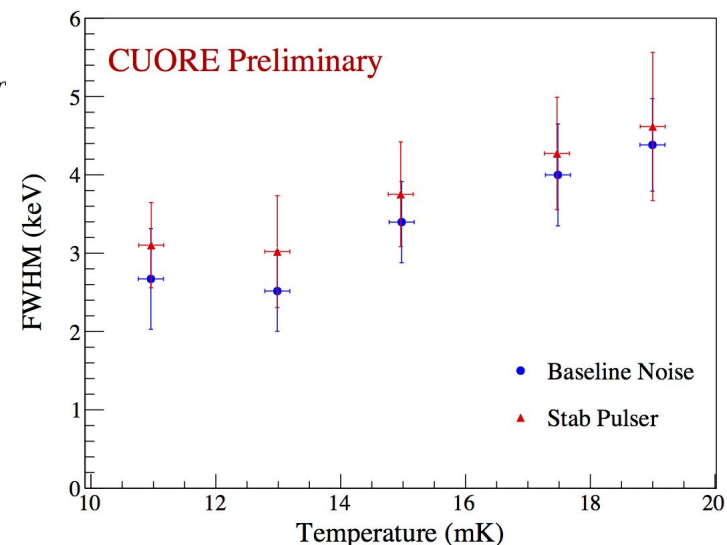
Risoluzione energetica dei macro-calorimetri

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

- Fluttuazioni termodinamiche del sistema:
 $FWHM_{thermal} \propto \sqrt{C \cdot T^2} \sim 30-100 \text{ eV}$
- $FWHM_{noise}$:
 - Rumore intrinseco su R_{load} di circuito bias NTD ($< 1 \text{ keV}$)
 - Rumore esterno (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 (?)

Caratterizzazione di rumore esterno e tecniche di riduzione hardware & software

$FWHM_{intr}$: dominante nella risoluzione degli eventi di particella. Caratterizzare questo termine e capire se/dove si può agire per ridurlo



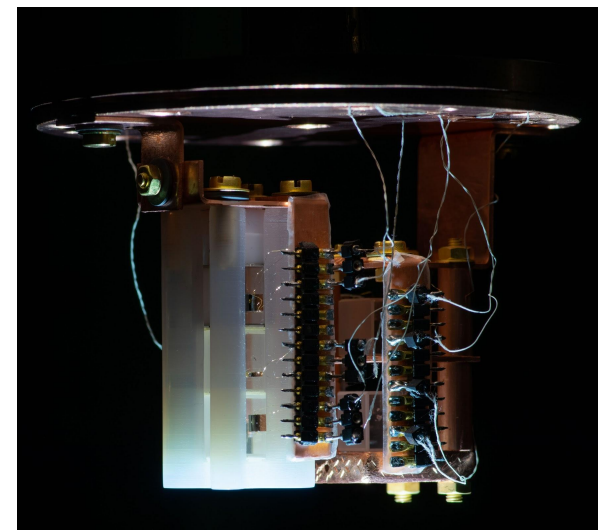
Caratterizzazione dei rivelatori di CUORE



Rivelatori di CUORE e setup simili (@MiB)

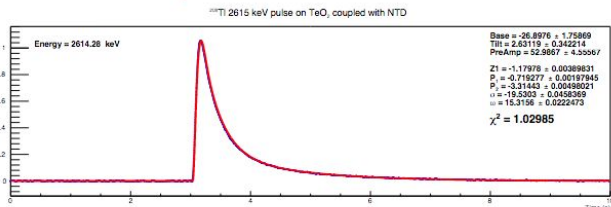
- Caratterizzazione statica degli NTD: misura di parametri caratteristici degli NTD, identificazione conduttanze principali
- Caratterizzazione dinamica di impulsi da macro-calorimetri letti con NTD: sviluppo di modello per ricostruire impulsi di particella/heater a diverse energie/temperature
- Analisi di risoluzione energetica e backgrounds

Costruzione di un modello elettro-termico predittivo per i macro-calorimetri

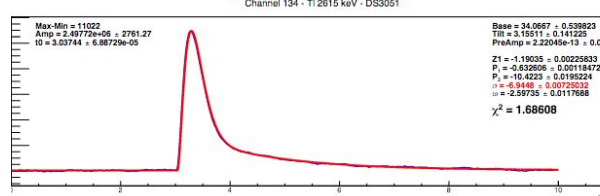


Setup MiB (nov-dic 2019)
Cristalli TeO_2 1 cm³ - diversi montaggi e NTDs

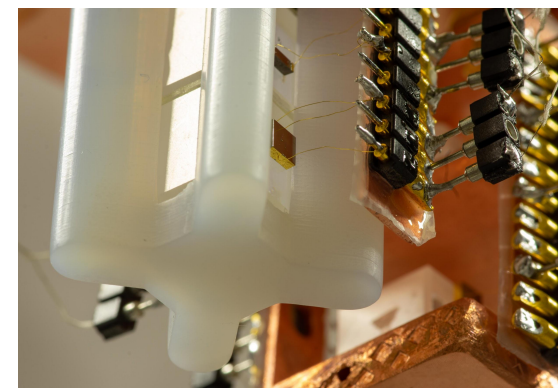
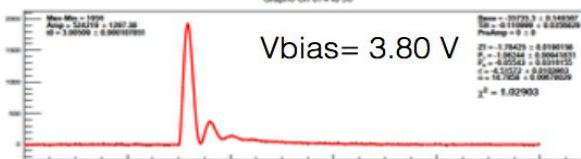
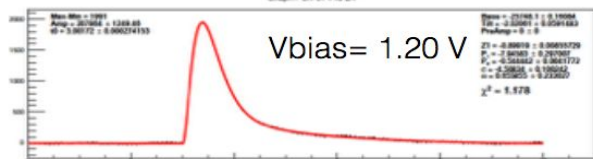
TI 2615 keV pulse - ds3021 - 15 mK



TI 2615 keV pulse - ds3051 - 11.8 mK



Heater pulses at different Vbias (NTD) at 11 mK



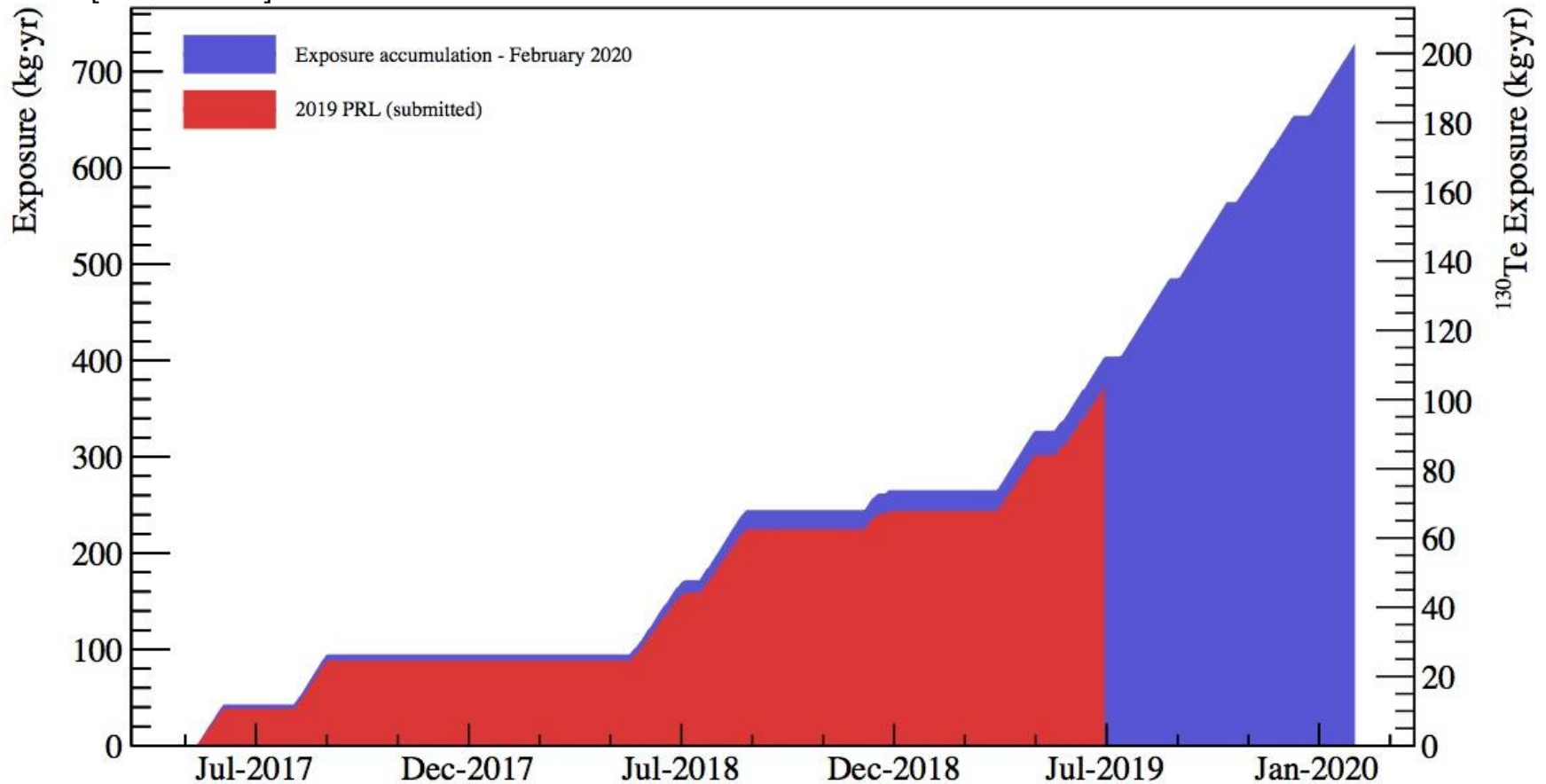
CUORE Data-taking

Exposure attuale di CUORE

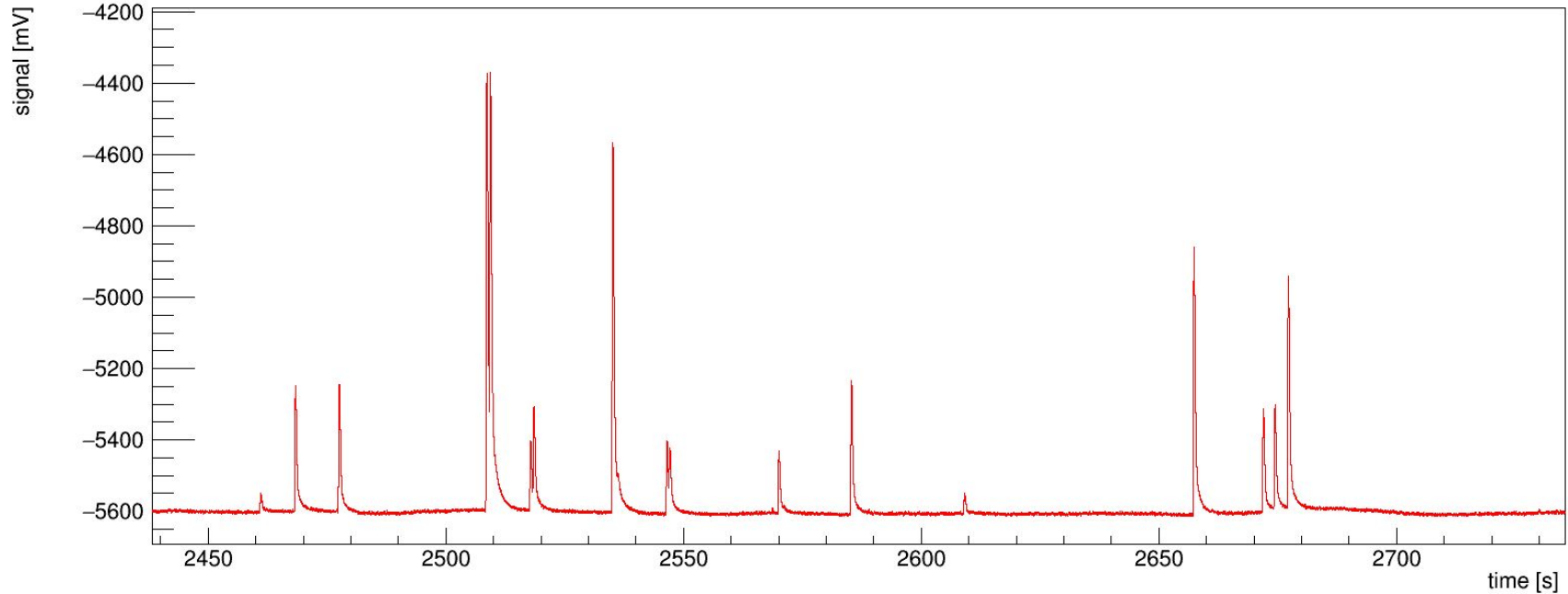
Background exposure (TeO_2): 691.6 kg · yr

Background exposure (TeO_2) analizzata: 372.5 kg · yr (103.6 kg · yr ^{130}Te)

[PRL-2019]



Acquisizione e analisi dati

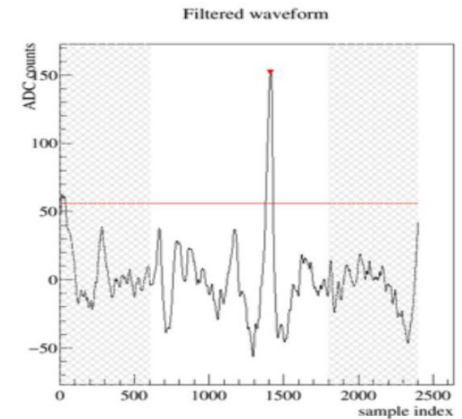
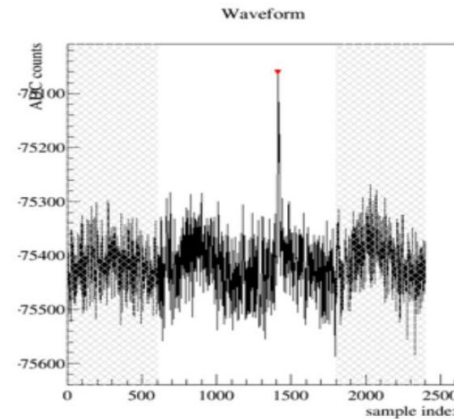
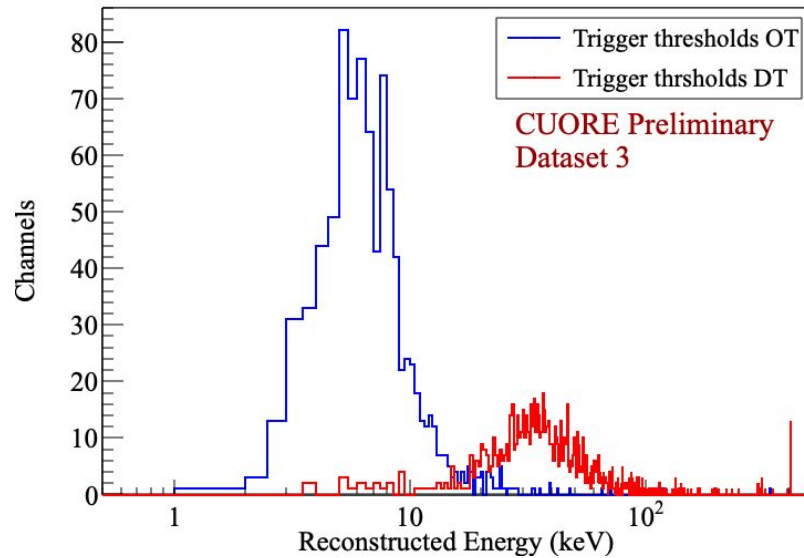
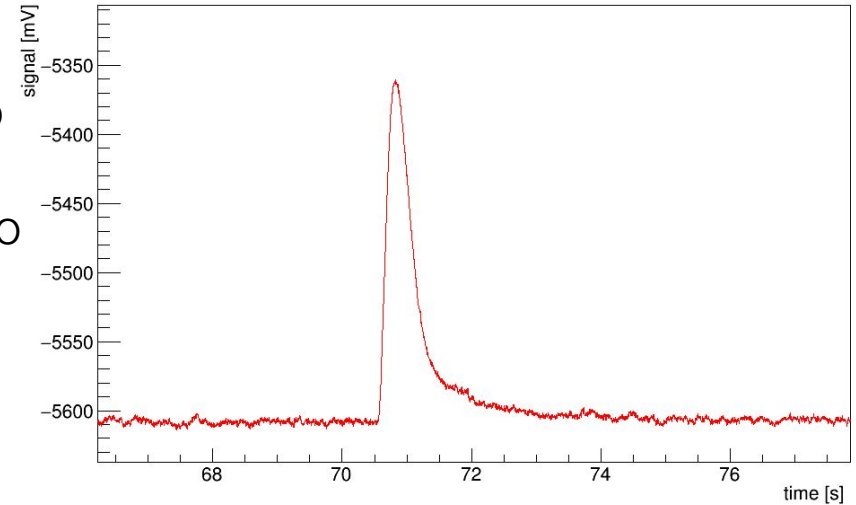


La tensione su ogni cristallo viene misurata con una frequenza di 1 kHz e memorizzata sotto forma di *stream* di dati

Il ruolo della procedura di analisi è identificare gli impulsi, misurarne l'ampiezza (energia) e mantenere solo quelli formati correttamente

Identificazione degli impulsi: trigger

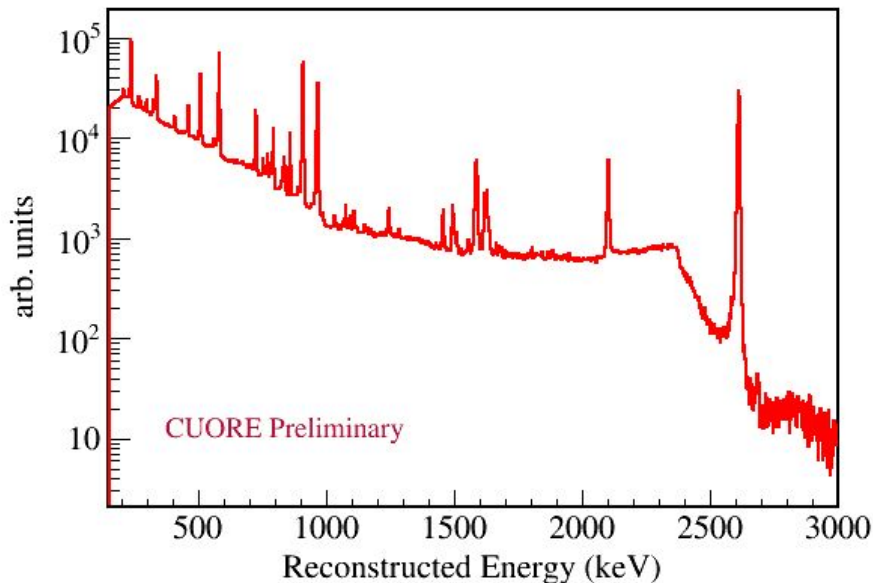
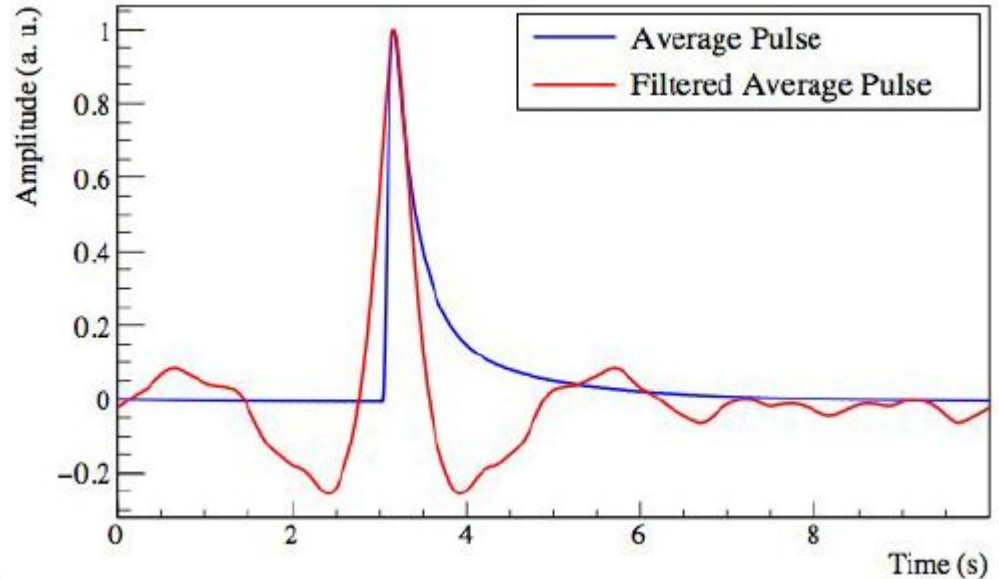
- Gli impulsi vengono identificati dall'algoritmo di *trigger*
- Trigger online: soglia sulla derivata dello stream di dati
- Trigger ottimo (OT): identifica un impulso utilizzando un *template* (forma attesa dell'impulso)
- Soglia: da ~ 50 a < 10 keV



Ampiezza ed energia dell'impulso

L'ampiezza di ogni impulso viene determinata con un algoritmo analogo a quello di trigger (Optimum Filter)

Massimizza il rapporto segnale/rumore e da una stima precisa dell'ampiezza



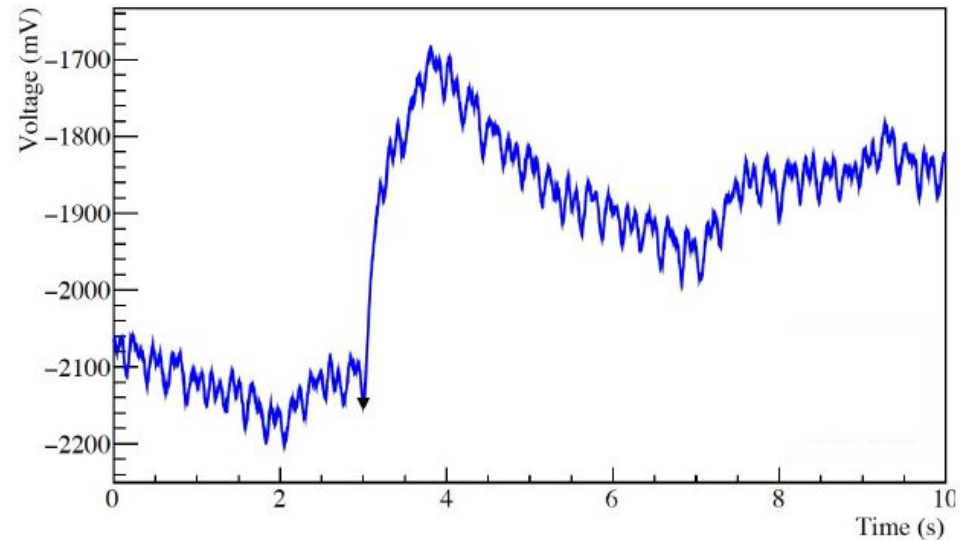
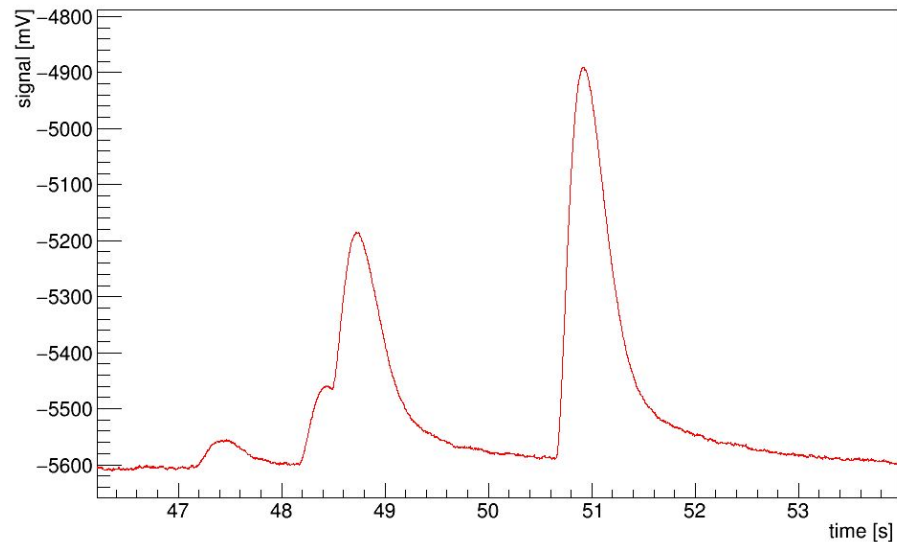
La calibrazione è ottenuta usando righe γ di energia nota

Usiamo una combinazione di sorgenti di ^{232}Th e ^{60}Co per calibrare lo spettro tra 500 e 2600 keV

Reiezione di eventi

Per migliorare la qualità dei dati vengono eliminati impulsi che non rispettano determinati criteri di qualità

Questi includono, ad esempio, pile-up o eventi non fisici



Analisi principali

0 ν $\beta\beta$ del ^{130}Te

Obiettivo principale di CUORE

Ricerca di un picco all'energia corrispondente al Q-valore del decadimento

Background model

Determinazione delle principali sorgenti di fondo radioattivo influenti su CUORE

Permette la misura del decadimento $2\nu\beta\beta$ del ^{130}Te

Inoltre:

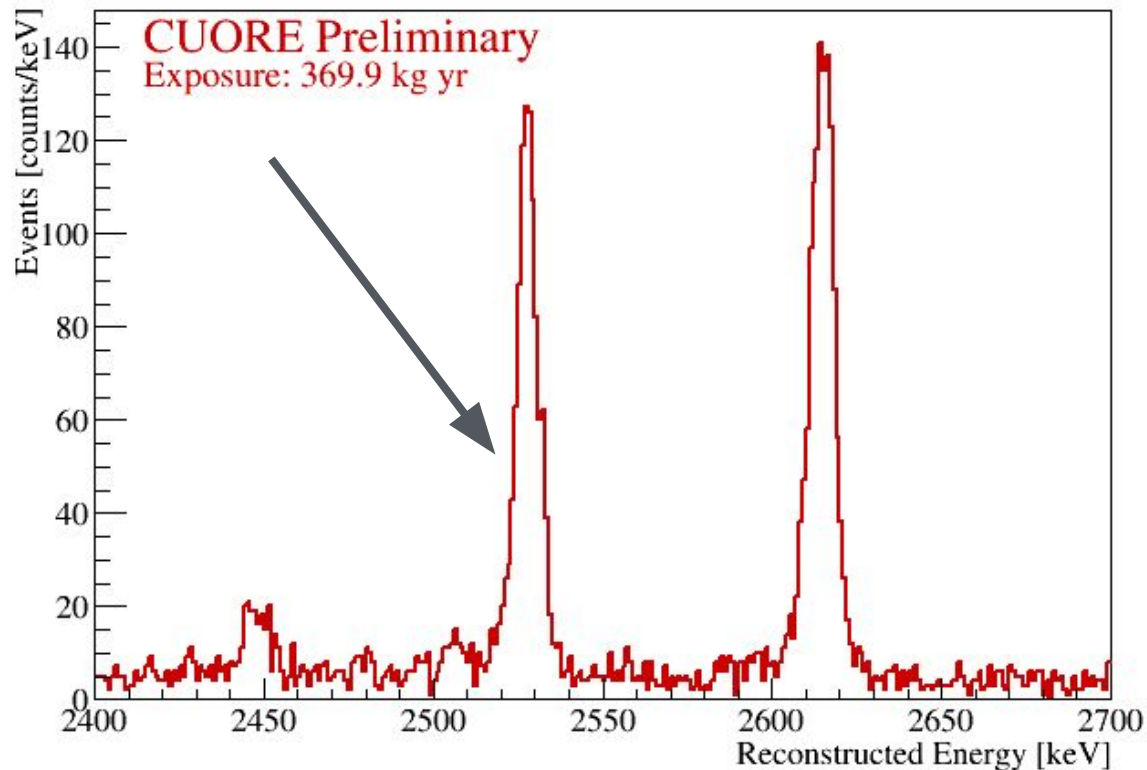
- Ricerca di altri decadimenti rari (decadimenti su stati eccitati, ^{120}Te , ^{128}Te , ...)
- Eventi di bassa energia (dark matter, assioni...)
- $0\nu\beta\beta$ con emissione di Majoroni, violazione CPT nel $2\nu\beta\beta$, ...
- ...

$0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te

Ricerca di un picco all'energia corrispondente al Q-valore del decadimento (2527 keV)

Analisi *blind*: la regione di interesse (ROI) viene coperta con un picco fittizio, tutta la procedura di analisi è fatta senza sapere cosa c'è sotto

Summed Spectrum (Blinded)



$0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te : risoluzione e *lineshape*

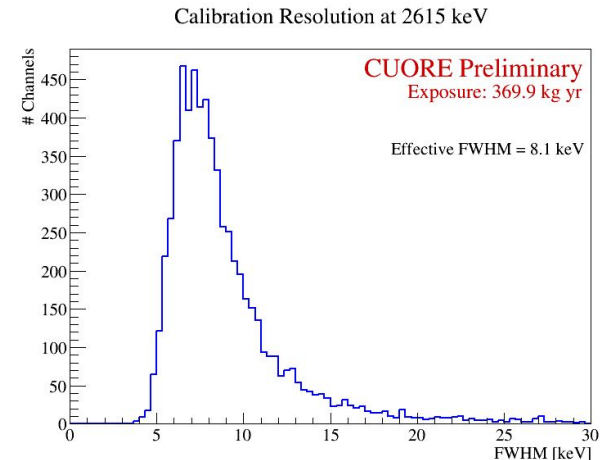
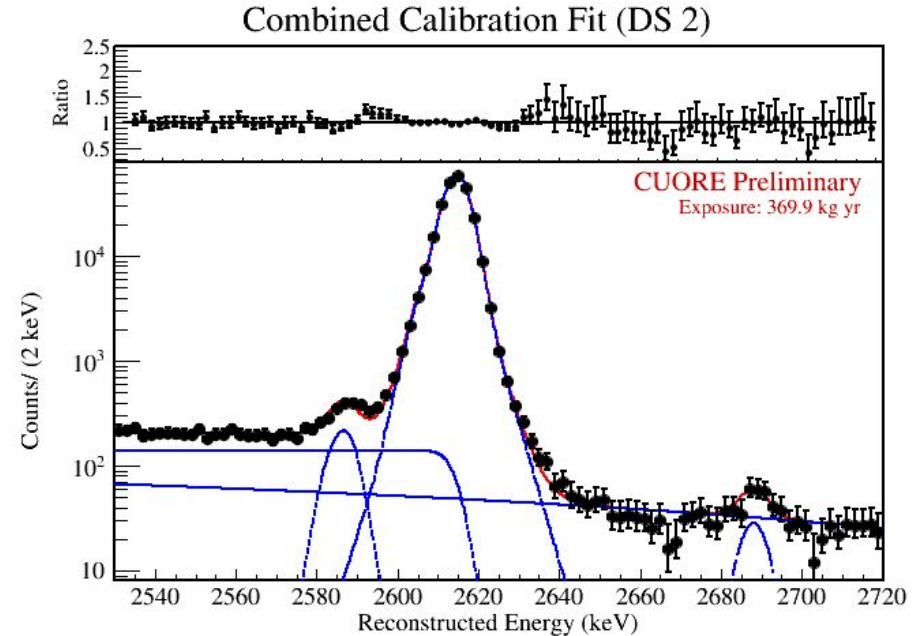
Determinazione della forma attesa per il picco del $0\nu\beta\beta$ (*lineshape*)

Necessario per massimizzare la capacità di identificare il picco al di sopra del fondo

Usiamo la riga γ del ^{208}Tl , a 2615 keV
Vicina al Q-valore e molto intensa nelle misure di calibrazione

Descriviamo la lineshape con una combinazione di 3 gaussiane

I parametri della lineshape vengono riscalati per ottenere la forma attesa al Q-valore



0νββ del ^{130}Te : efficienza

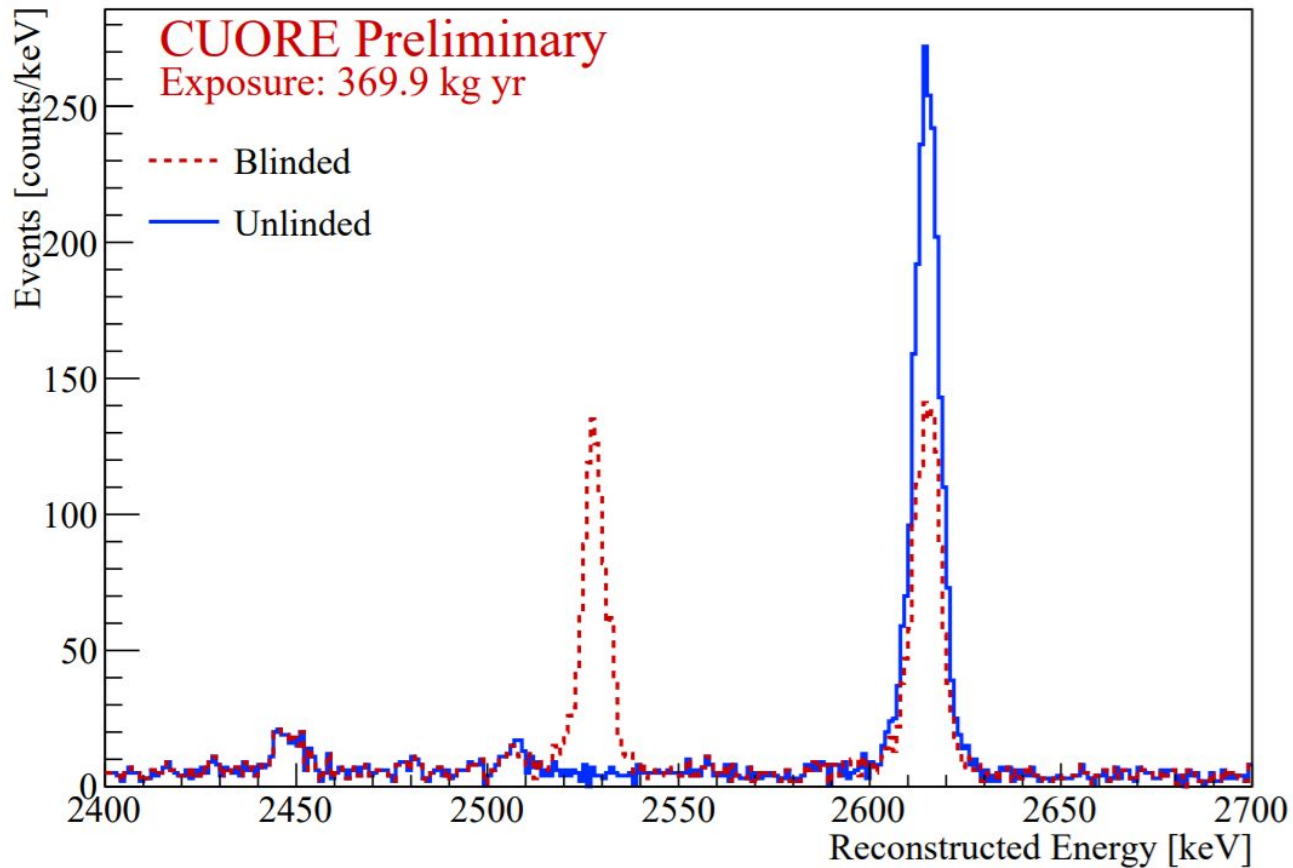
Efficienza: probabilità che, dato un evento da 0νββ, questo venga identificato correttamente

Ricostruzione Probabilità che un evento sia triggerato e ricostruito all'energia corretta	95.958 ± 0.003%
Anti-coincidenza Probabilità di identificare un evento che coinvolge più cristalli	98.954 ± 0.015 %
Pulse shape Reiezione di eventi deformati o non fisici	92.037 ± 0.108 %
Contenimento Probabilità che un evento 0νββ sia contenuto in un singolo cristallo	88.350 ± 0.090 %

$0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te : *unblinding*

Dopo aver fissato la procedura di analisi lo spettro viene *sblindato*

Summed Spectrum



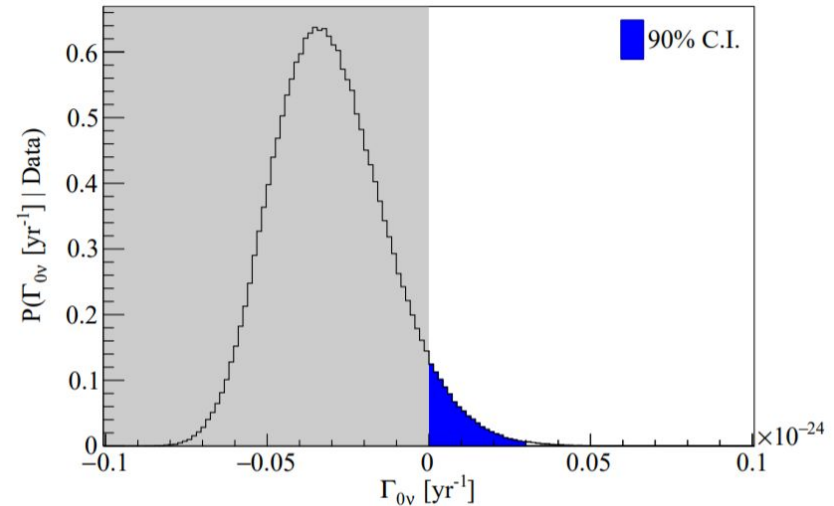
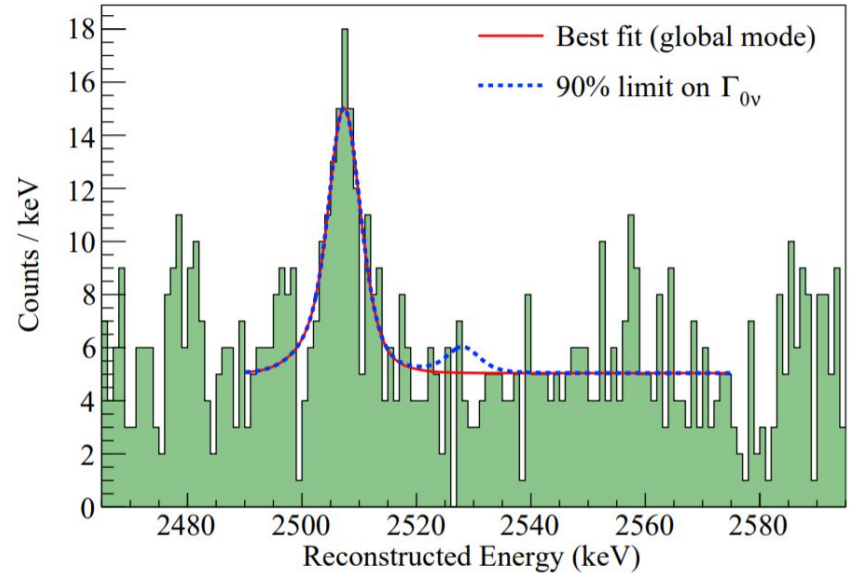
$0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te : fit della ROI

La regione di interesse (ROI) viene fittata con una combinazione di due picchi ($0\nu\beta\beta$ e ^{60}Co), entrambi descritti dalla lineshape, e di un fondo piatto

Non c'è evidenza di un segnale

Possiamo definire un limite superiore per il rate di decadimento:

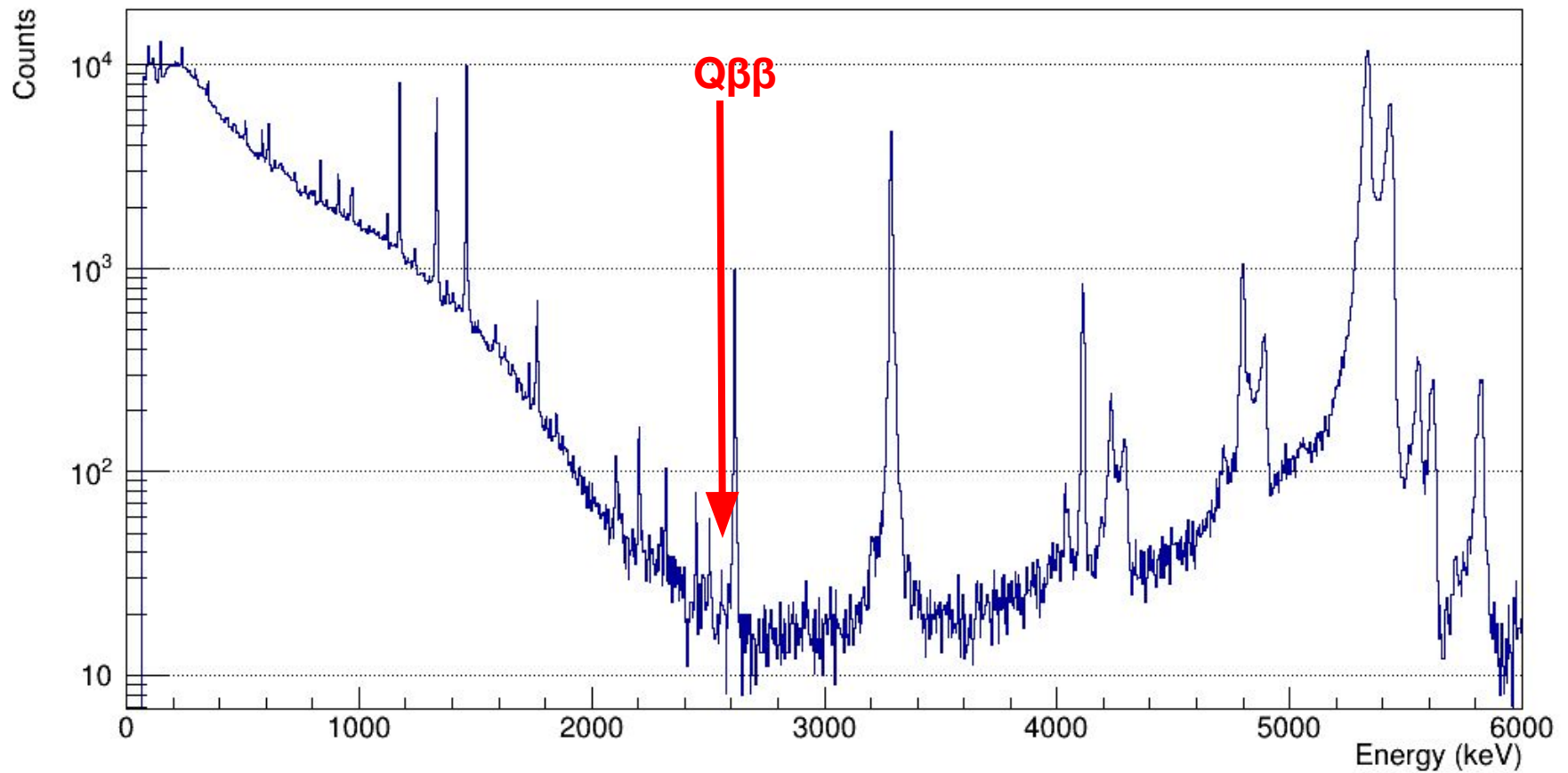
$$\Gamma_{0\nu} < 2.2 \times 10^{-26} \text{ yr}^{-1} \text{ (90\% C.I.)}$$



Background model

Obiettivo: identificare le principali sorgenti di fondo radioattivo

CUORE - Multiplicity 1



Background model

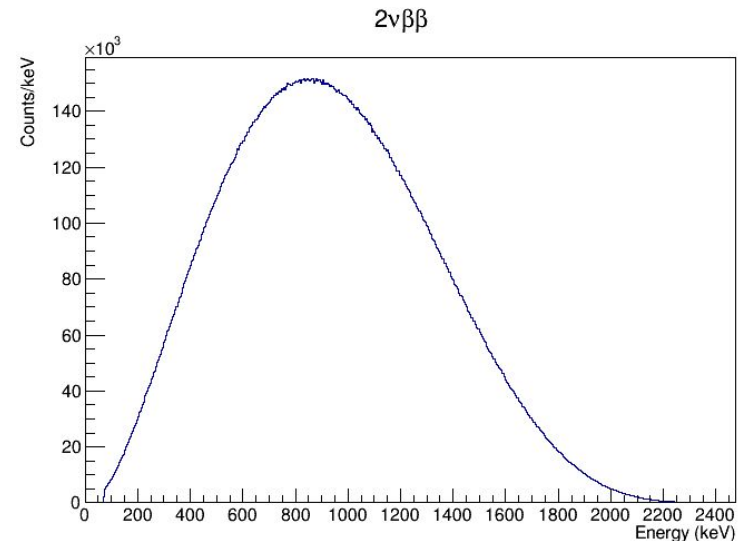
Obiettivo: identificare le principali sorgenti di fondo radioattivo

Perchè?

- Determinazione delle sorgenti di fondo nella ROI $0\nu\beta\beta$
 - Necessario per pianificare esperimenti futuri
 - Spesso impossibile usare altri metodi: lo strumento più sensibile per misurare il fondo di CUORE è CUORE stesso

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

- Misura di decadimenti a spettro continuo
 - Processi che non generano picchi (e.g. decadimenti β , $\beta\beta$...)
 - Parzialmente o totalmente “coperti” dagli spettri di altre contaminazioni

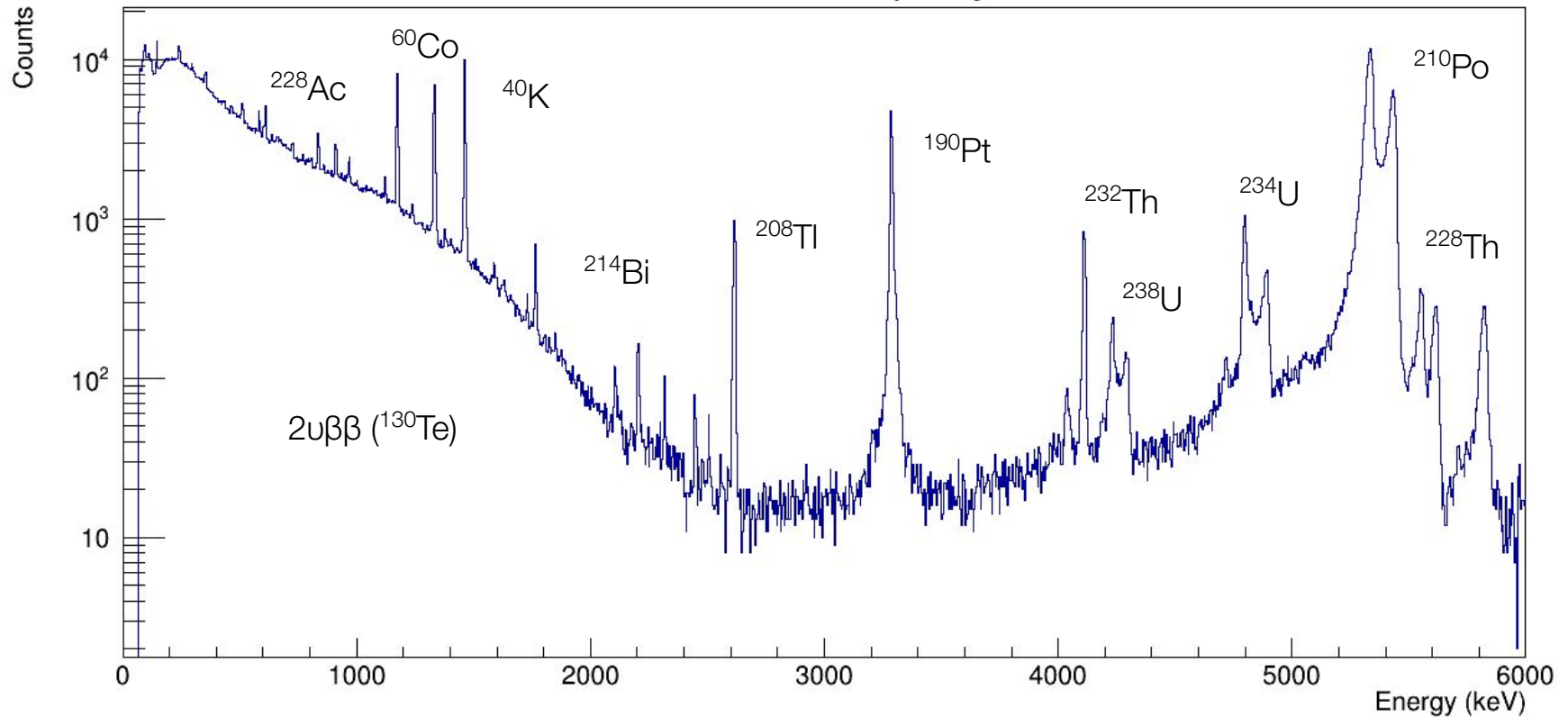


Background model

Quante e quali sorgenti possiamo aspettarci?

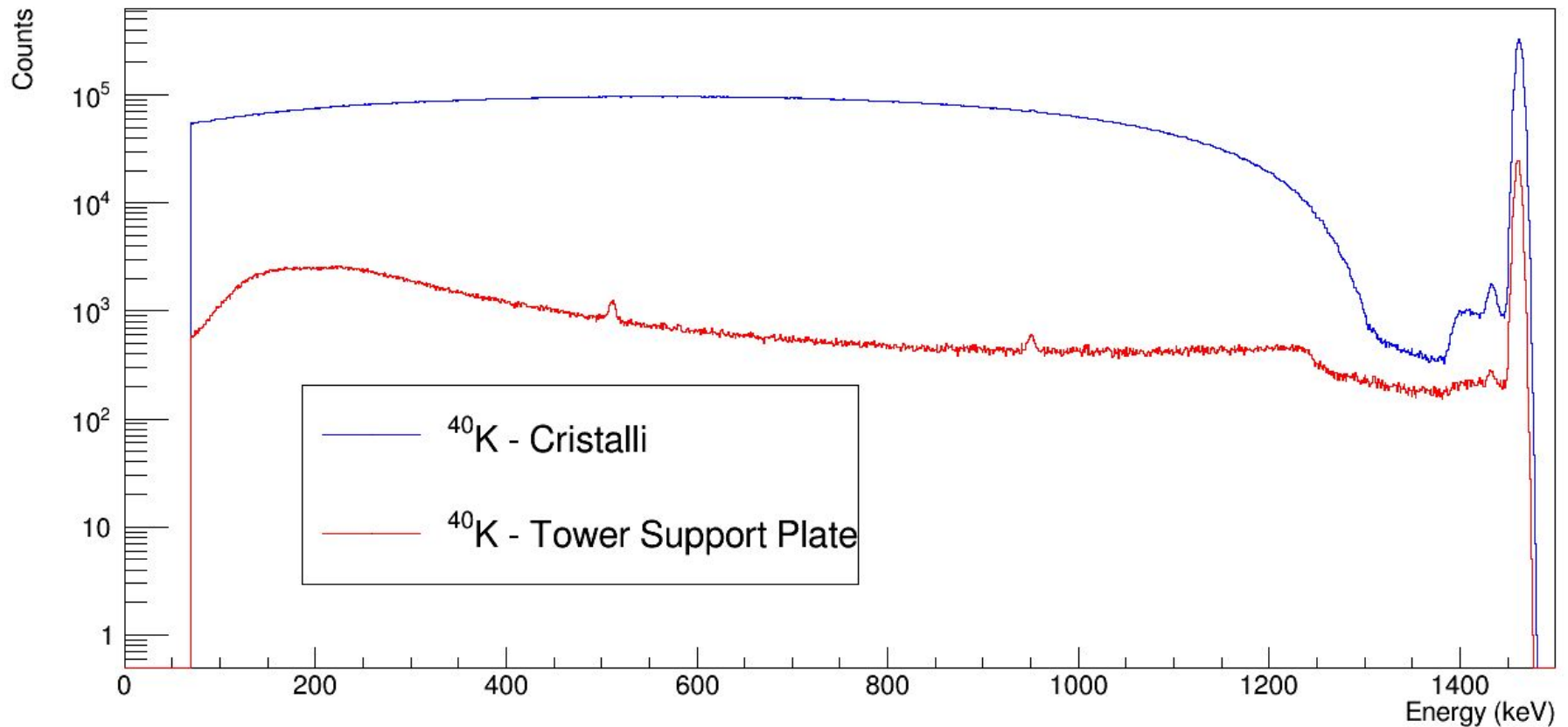
Isotopi naturali (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K , ^{60}Co ...), fallout (^{137}Cs ...), ^{130}Te , ...

CUORE - Multiplicity 1



Background model

Lo stesso radioisotopo può contaminare diverse parti del criostato, producendo talvolta uno spettro osservato completamente diverso

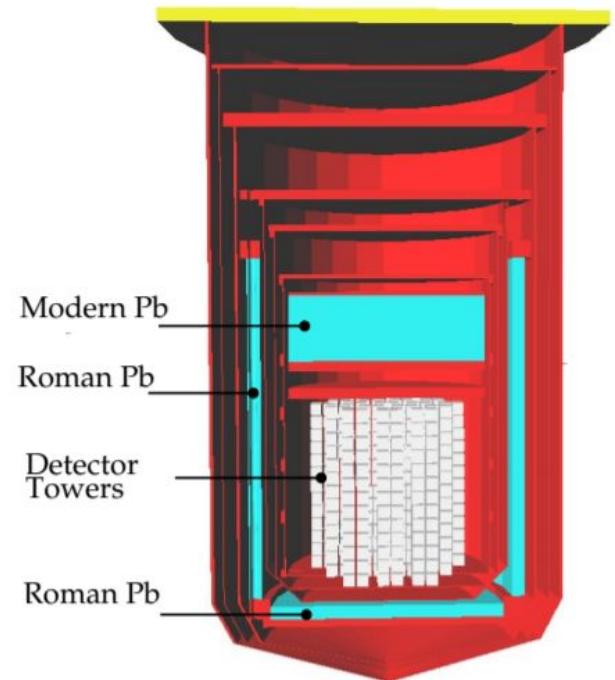


Background model

Obiettivo: identificare le principali sorgenti di fondo radioattivo

Come?

- Identificazione delle potenziali sorgenti di fondo
 - Sorgente: combinazione di contaminazione e volume contaminato
- Simulazione Monte Carlo dei possibili contributi
 - Modello dettagliato dell'intero criostato
- Fit combinato di tutte le simulazioni
 - Fit Bayesiano: possibile utilizzare misure precedenti per vincolare le contaminazioni
 - Risultato: migliore combinazione delle sorgenti simulate per ricostruire lo spettro osservati



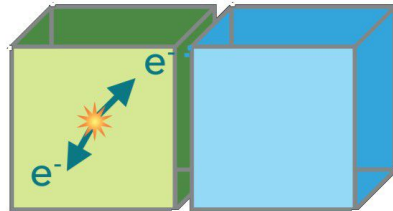
Background model

Sorgenti:

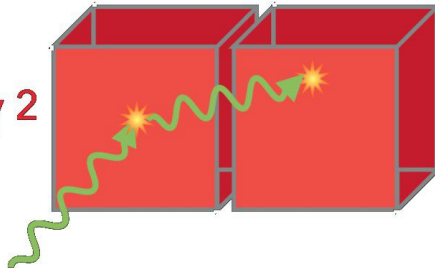
60 sorgenti distinte, distribuite su tutti gli elementi del criostato

Volume	Type	Components
TeO ₂	Bulk	$2\nu\beta\beta$, ²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²²⁸ Ra- ²⁰⁸ Pb, ²³⁸ U- ²³⁰ Th, ²³⁰ Th, ²²⁶ Ra- ²¹⁰ Pb, ⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ¹²⁵ Sb, ¹⁹⁰ Pt
TeO ₂	Surface (0.01 μm)	²³² Th, ²²⁸ Ra- ²⁰⁸ Pb, ²³⁸ U- ²³⁰ Th, ²²⁶ Ra- ²¹⁰ Pb, ²¹⁰ Pb
TeO ₂	Surface (1 μm)	²¹⁰ Pb
TeO ₂	Surface (10 μm)	²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
CuNOSV	Bulk	²³² Th, ²³⁸ U, ⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ⁵⁴ Mn
CuNOSV	Surface (0.01 μm)	²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
CuNOSV	Surface (1 μm)	²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
CuNOSV	Surface (10 μm)	²¹⁰ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
Roman lead	Bulk	²³² Th, ²³⁸ U, ^{108m} Ag
Top lead	Bulk	²³² Th, ²³⁸ U, ²¹⁰ Bi
Ext. lead	Bulk	²¹⁰ Bi
CuOFE	Bulk	²³² Th, ²³⁸ U, ⁶⁰ Co
External	-	Cosmic muons

Multiplicity 1



Multiplicity 2



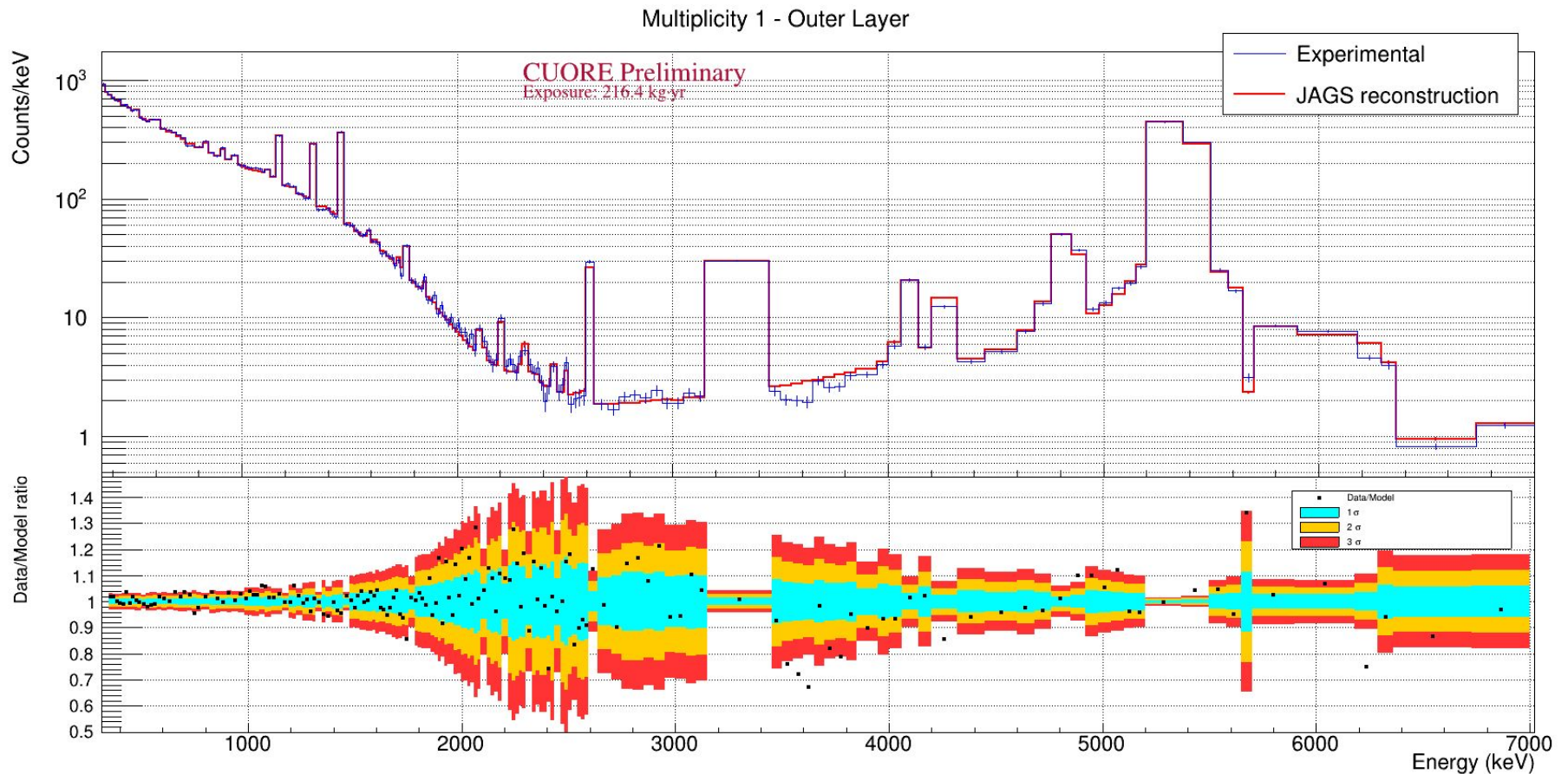
Spettri:

Suddivisione in base a:

- *Molteplicità* degli eventi
- Posizione dei cristalli nel detector
 - Esterni: sensibili al criostato
 - Interni: sensibili a cristalli e frame

Background model

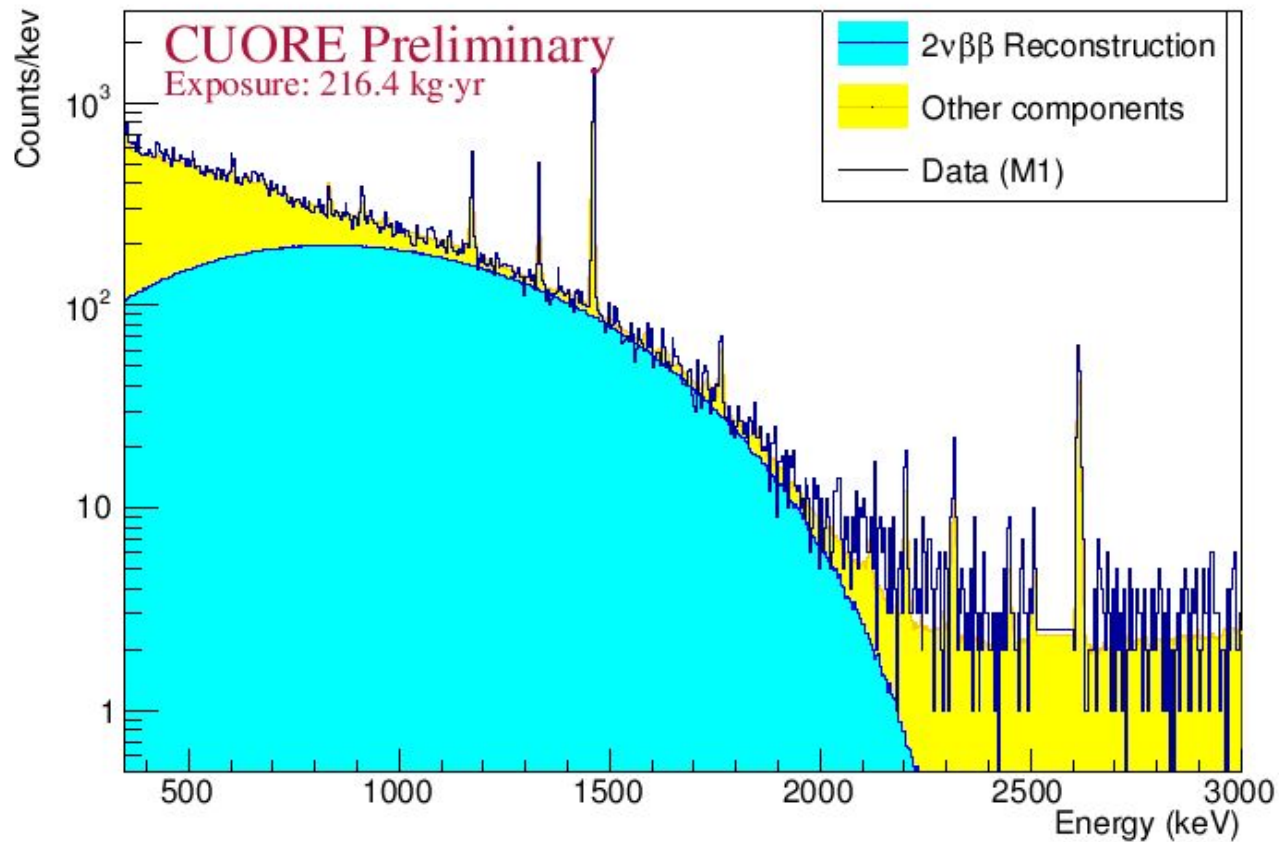
Nel layer più interno, sensibile alle contaminazioni dei cristalli, possiamo isolare il contributo del decadimento $2\alpha\beta\beta$ del ^{130}Te



Background model: $2\nu\beta\beta$

Nel layer più interno, sensibile alle contaminazioni dei cristalli, possiamo isolare il contributo del decadimento $2\nu\beta\beta$ del ^{130}Te

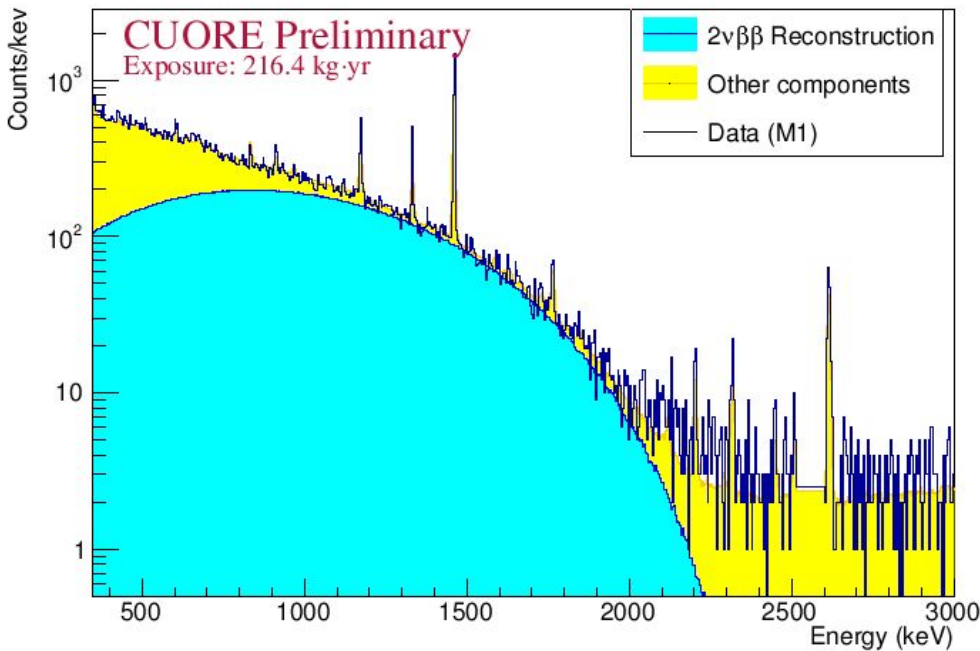
Multiplicity 1 - Inner Layer



Background model: $2\nu\beta\beta$

Possiamo determinare con grande precisione la vita media per il decadimento $2\nu\beta\beta$ del ^{130}Te

Multiplicity 1 - Inner Layer



$$T_{1/2}^{2\nu} = (8.2 \pm 0.1 \text{ (stat.)}) \times 10^{20} \text{ y}$$

(Preliminary)

$$T_{1/2}^{2\nu} = (8.2 \pm 0.2 \text{ (stat.)} \pm 0.6 \text{ (syst.)}) \times 10^{20} \text{ y} \quad (\text{CUORE-0})$$

$$T_{1/2}^{2\nu} = (7.0 \pm 0.9 \text{ (stat.)} \pm 1.1 \text{ (syst.)}) \times 10^{20} \text{ y} \quad (\text{NEMO-3})$$

Conclusioni

- CUORE è il primo esperimento che utilizza rivelatori bolometrici di scala una tonnellata per la ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$.
- Abbiamo presentato i risultati più recenti di CUORE per la ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{130}Te . I dati di CUORE ci permettono inoltre di misurare con precisione la vita media del decadimento $2\nu\beta\beta$ di ^{130}Te e caratterizzare le sorgenti di background. CUORE ha inoltre il potenziale per la ricerca di altri eventi rari e/o fisica oltre il Modello Standard
- L'esperimento CUORE è attualmente in presa dati con l'obiettivo di raggiungere 5 anni di run-time
- CUORE dimostra la fattibilità di rivelatori bolometrici su larga scala. Questa stessa tecnologia e infrastruttura saranno utilizzate per CUPID → *Seminario CUPID, 17 marzo ore 12.30, L.Pagnanini*

Grazie per l'attenzione

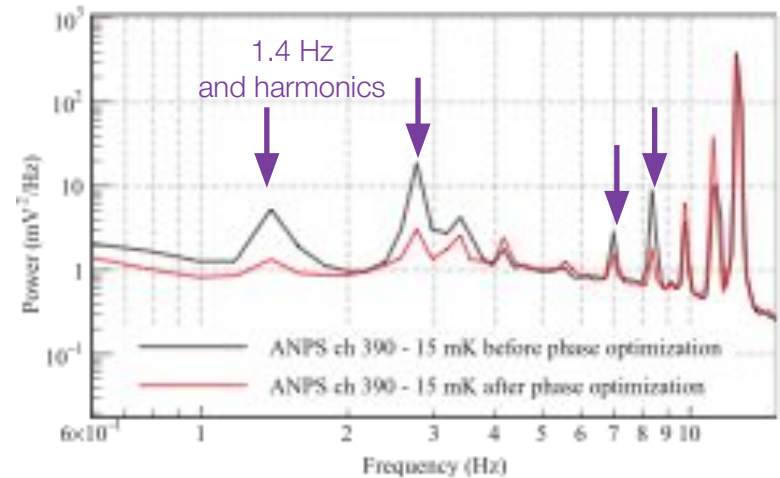
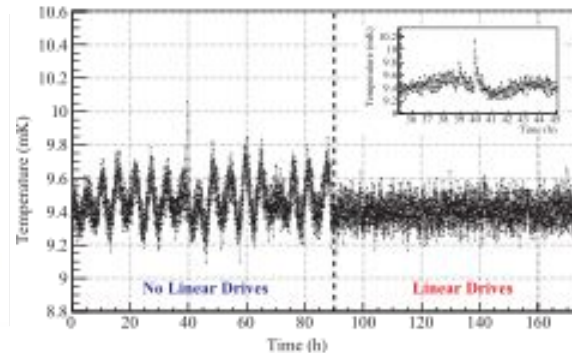
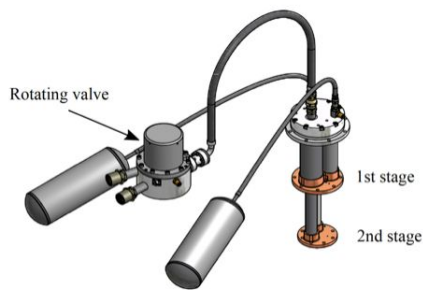


Backup

CUORE optimization

Noise reduction

- Pulse Tubes induced vibrations: **Pulse Tube active noise cancellation**
- Linear Drives: precise control of the PTs motor-head rotation frequency
- Control the relative phases of the pressure oscillations in the Pulse Tubes and set the detectors minimum noise phase configuration



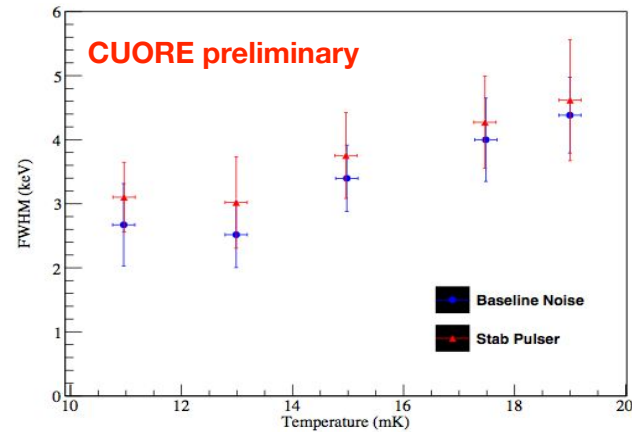
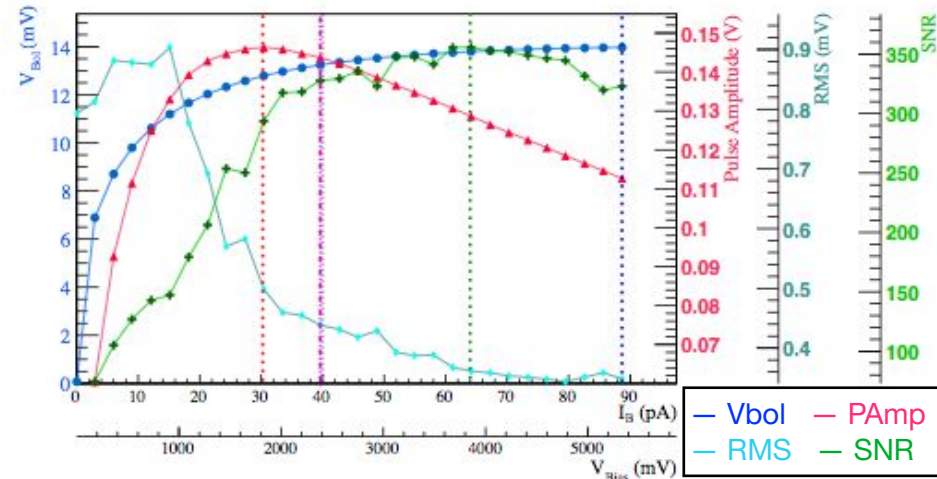
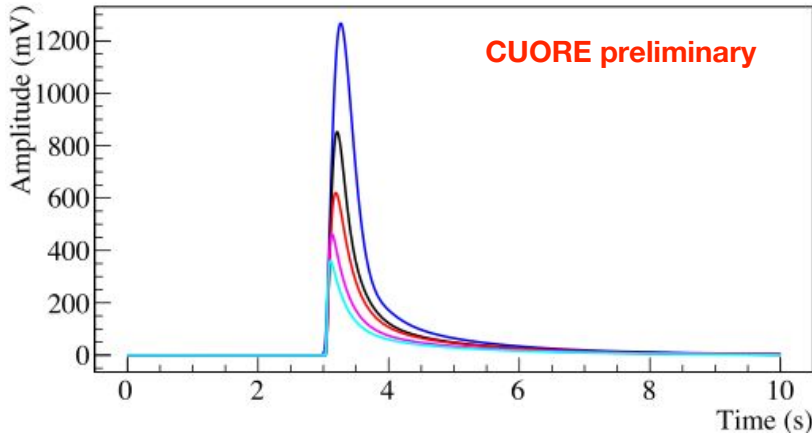
CUORE optimization

Load Curves, Working Points & Temperature scans

Achieve high quality detector readout with a good signal-to-noise ratio

Dedicated procedures and algorithms in CUORE to automate the load curve measurement and the working point identification at each T_{base} .

- T 11 mK, rise time (10%-90%) 0.148 s, fall time (90%-30%) 0.303 s
- T 13 mK, rise time (10%-90%) 0.102 s, fall time (90%-30%) 0.340 s
- T 15 mK, rise time (10%-90%) 0.090 s, fall time (90%-30%) 0.408 s
- T 17 mK, rise time (10%-90%) 0.055 s, fall time (90%-30%) 0.407 s
- T 19 mK, rise time (10%-90%) 0.039 s, fall time (90%-30%) 0.422 s



$0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te : fit della ROI

Limite $T^{1/2}$

$T^{1/2} > 3.2 \times 10^{25}$ yr (90% C.I.)

Median sensitivity: 1.7×10^{25} yr

Probabilità di avere un limite più strigente: ~3%

