
Doppio Decadimento Beta:

CUORE / CUPID

GERDA / LEGEND

Irene Nutini

Presentazione tesi magistrali 2021
Dip.Fisica - UniMiB
21 Maggio 2021

Il neutrino, questo sconosciuto

Tra le particelle elementari del Modello Standard il neutrino è a tutt'oggi quello di cui si conoscono meno le proprietà

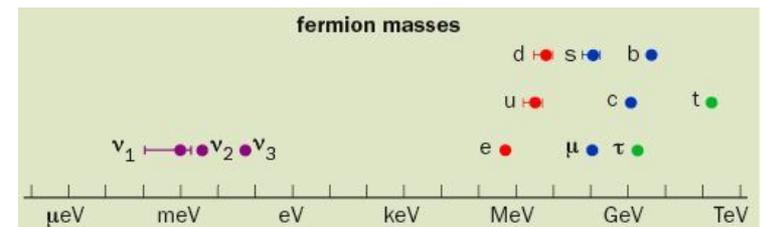
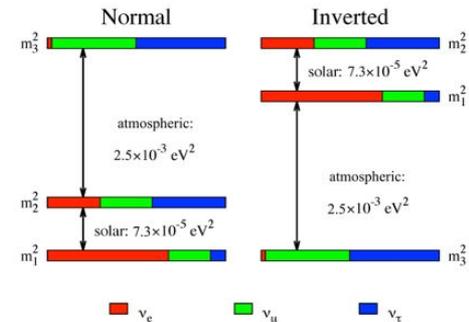


- 3 flavour di neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ)
- Oscillazioni di flavor \rightarrow il neutrino è una particella a massa non nulla (3 stati di massa)

E' necessario estendere la formulazione minima del Modello Standard per tenere in conto di neutrini massivi.

Ci sono ancora delle domande aperte:

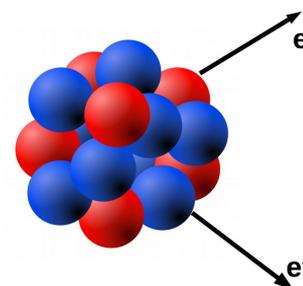
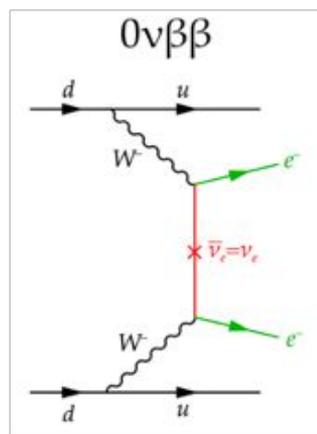
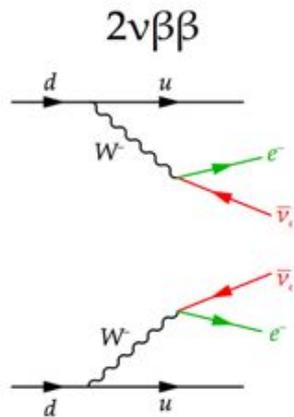
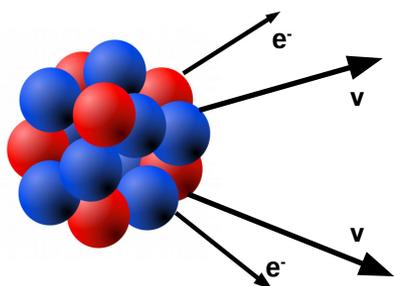
- Come sono ordinati gli stati di massa dei neutrini? (normal/inverted hierarchy)
- Quali sono i valori assoluti di massa del neutrino?
- Perchè la massa del neutrino è così piccola rispetto a quella delle altre particelle del Modello Standard
- I neutrini, leptoni neutri, sono particelle di Dirac o di Majorana?



Indagare la natura di del neutrino attraverso il decadimento doppio beta

Si possono studiare particolari processi nucleari, in cui appaiono nuove transizioni permesse in date estensioni oltre il modello standard in cui si considera il neutrino come particella di Majorana.

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



Decadimento doppio beta con emissione di neutrini **2νββ**

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

Decadimento doppio beta senza emissione di neutrini **0νββ**

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

Dal decadimento $0\nu\beta\beta$ alla 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

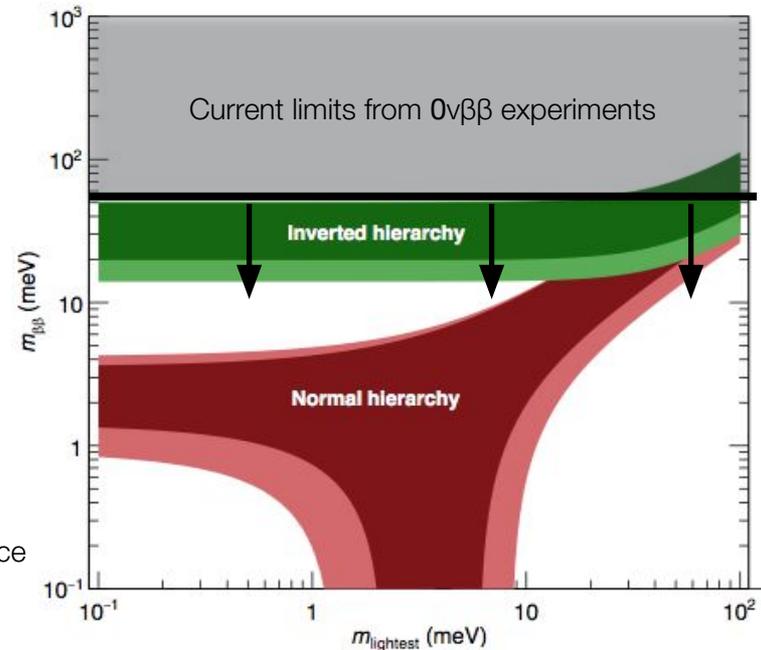
$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} \propto G(Q_{\beta\beta}, Z) |M_{nucl}|^2 |m_{\beta\beta}|^2$$

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 $0\nu\beta\beta$

Osservabili del decadimento doppio beta:

Parametri cinematici dei due elettroni emessi

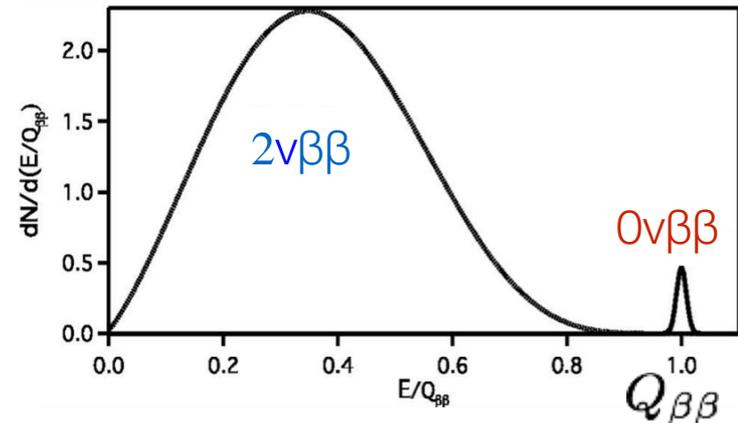
- Energia somma dei due elettroni costante
- Ricostruzione delle singole tracce degli elettroni

Rivelazione del nucleo-figlio in forma di ione $^{++}$

Nuclei candidati per decadimento $\beta\beta$:

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

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



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

Si definisce una **sensibilità sperimentale** sul tempo di dimezzamento del processo di interesse ($0\nu\beta\beta$)

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

Scelta dell'isotopo (η , $Q_{\beta\beta}$)

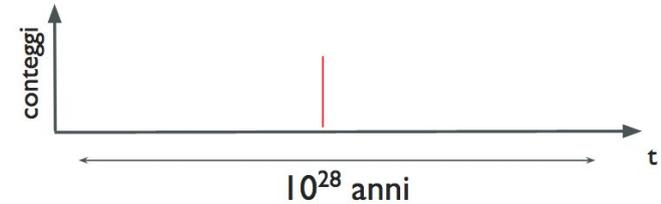
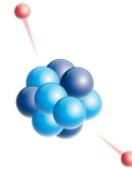
Tecnologia del rivelatore (ϵ , Δ , B)

Esposizione (M, T)

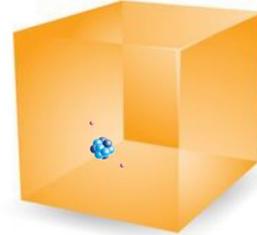
Ricerca di eventi rari: massimizzare l'exposure

Cerchiamo di misurare un processo con $T_{1/2} > 10^{26}$ anni

Se abbiamo 1 solo nucleo sotto osservazione....



Se abbiamo 10^{27} nuclei sotto osservazione
(es. CUORE: 742 kg TeO_2 , 206 kg ^{130}Te
 $\rightarrow \sim 10^{27}$ nuclei ^{130}Te)



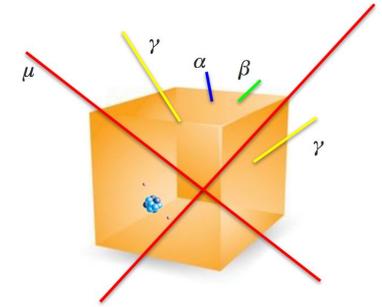
Nelle ricerche di fisica degli eventi rari, come ad esempio per il decadimento doppio beta, si cerca di massimizzare l'**esposizione (exposure) dell' esperimento**:
 M (massa di isotopo attivo $\beta\beta$) x T (tempo vivo)

Ricerca di eventi rari: riduzione del fondo e fisica underground

Non è sufficiente avere solo un'alta esposizione.

Radioattività ambientale e raggi cosmici - fondo (B)

→ eventi spuri che possono simulare l'evento cercato ($N_{\text{ev.spuri}} \propto M_{\text{rivelatore}}$)



Tecniche di riduzione del fondo:

- Schermi attivi/passivi
- Alti livello di radiopurezza dei rivelatori e dei materiali dei setup
- Laboratori sotterranei →
es. Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS):
riduzione di flusso μ cosmici di fattore 10^6

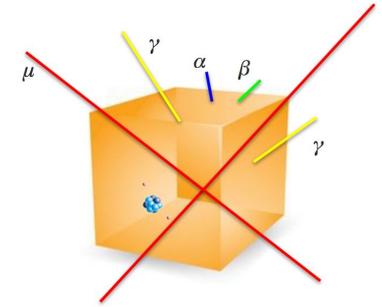


Ricerca di eventi rari: riduzione del fondo e fisica underground

Non è sufficiente avere solo un'alta esposizione.

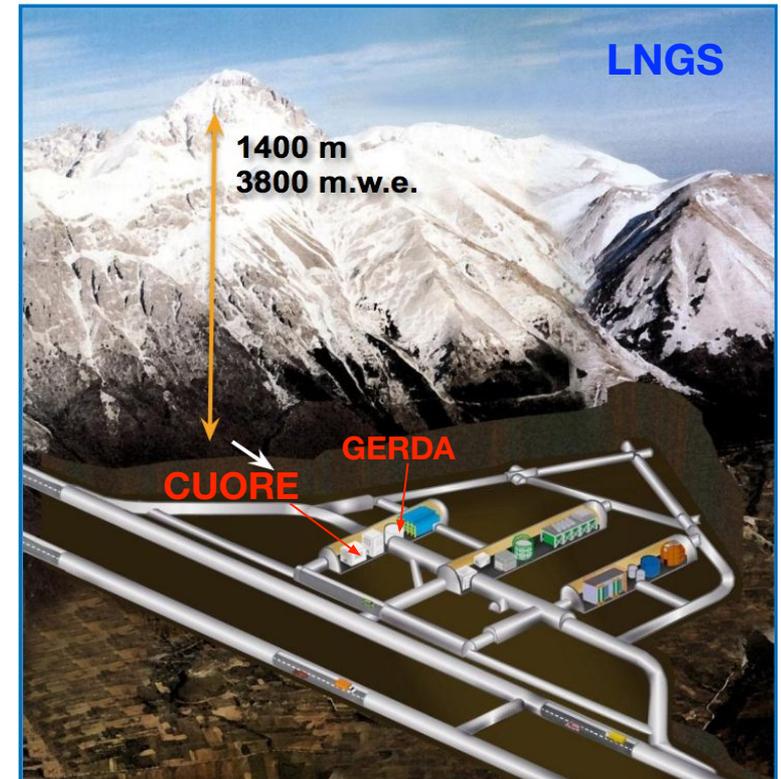
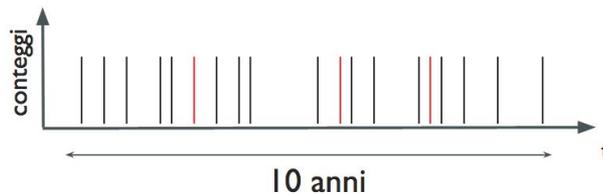
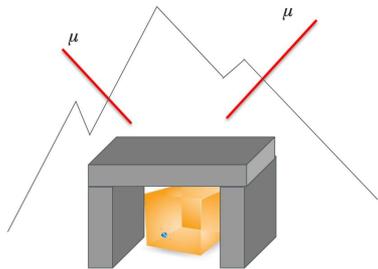
Radioattività ambientale e raggi cosmici - fondo (B)

→ eventi spuri che possono simulare l'evento cercato ($N_{\text{ev.spuri}} \propto M_{\text{rivelatore}}$)

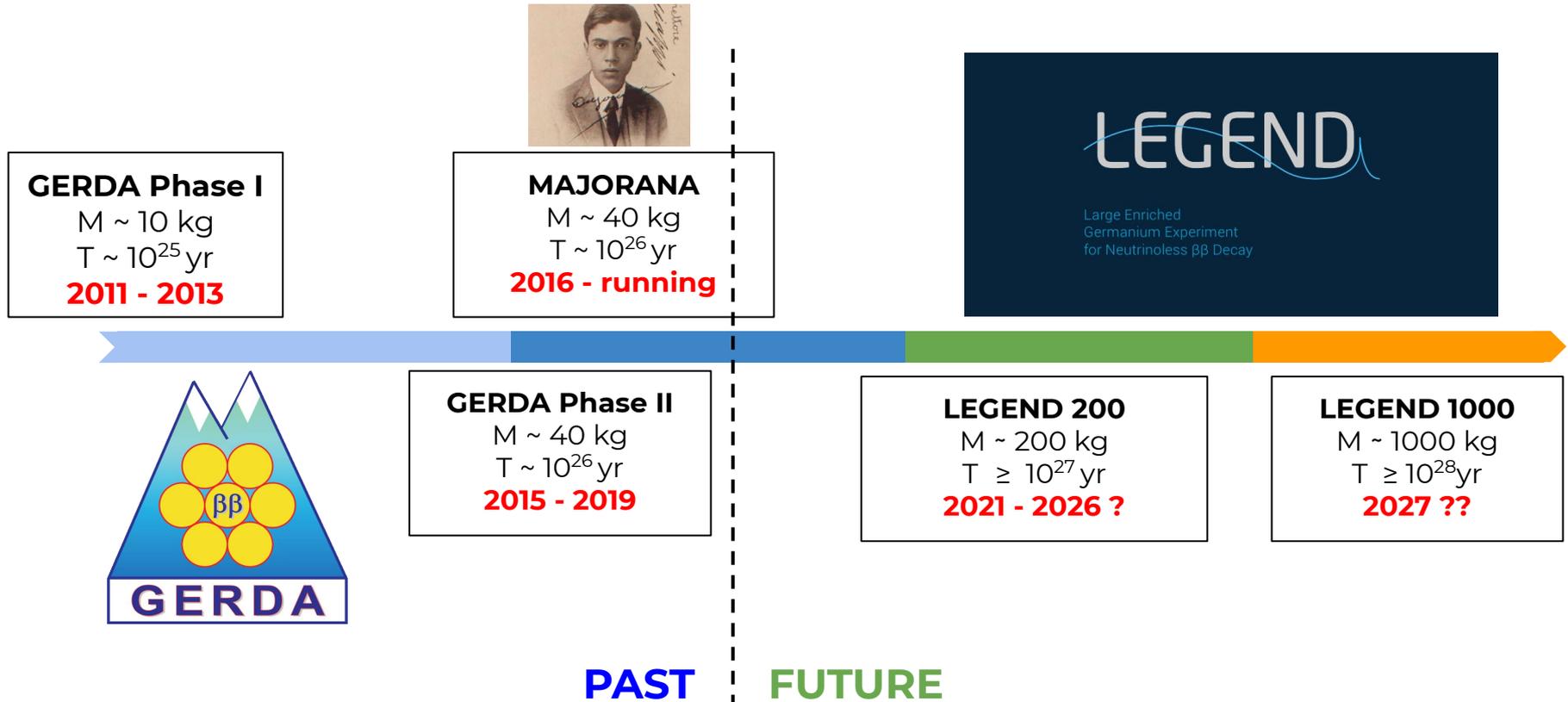


Tecniche di riduzione del fondo:

- Schermi attivi/passivi
- Alti livelli di radiopurezza dei rivelatori e dei materiali dei setup
- Laboratori sotterranei →
es. Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS):
riduzione di flusso μ cosmici di fattore 10^6

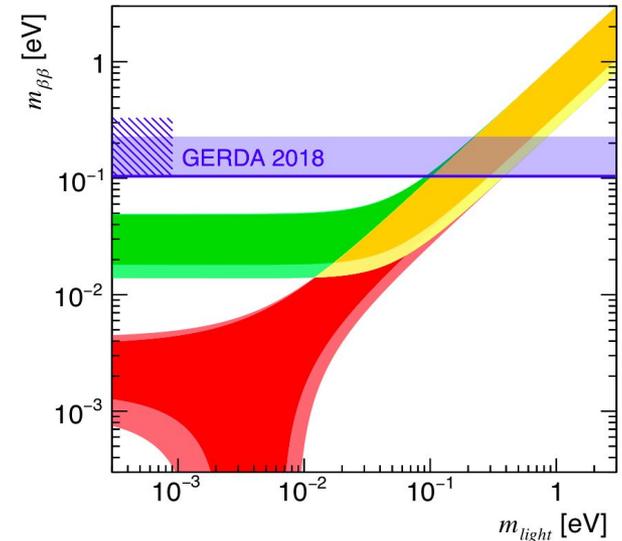
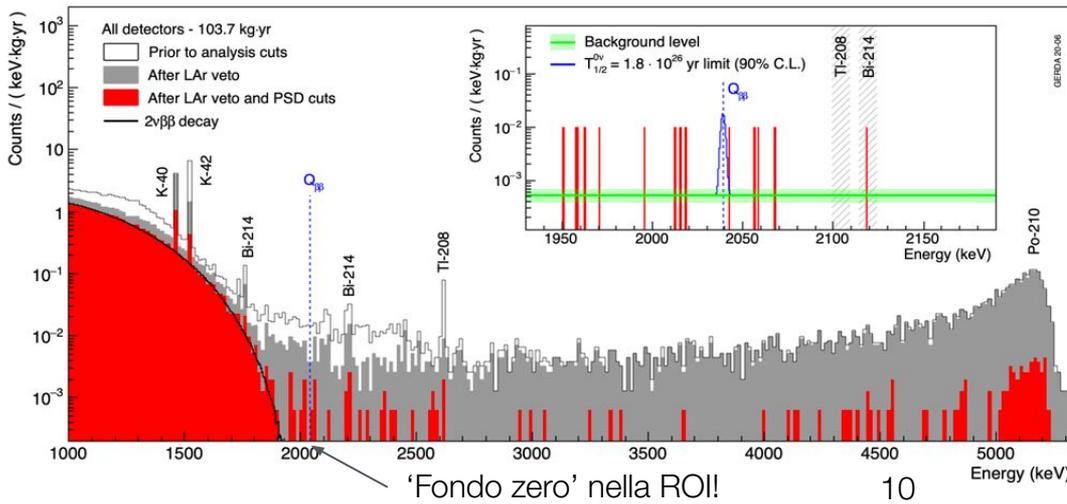
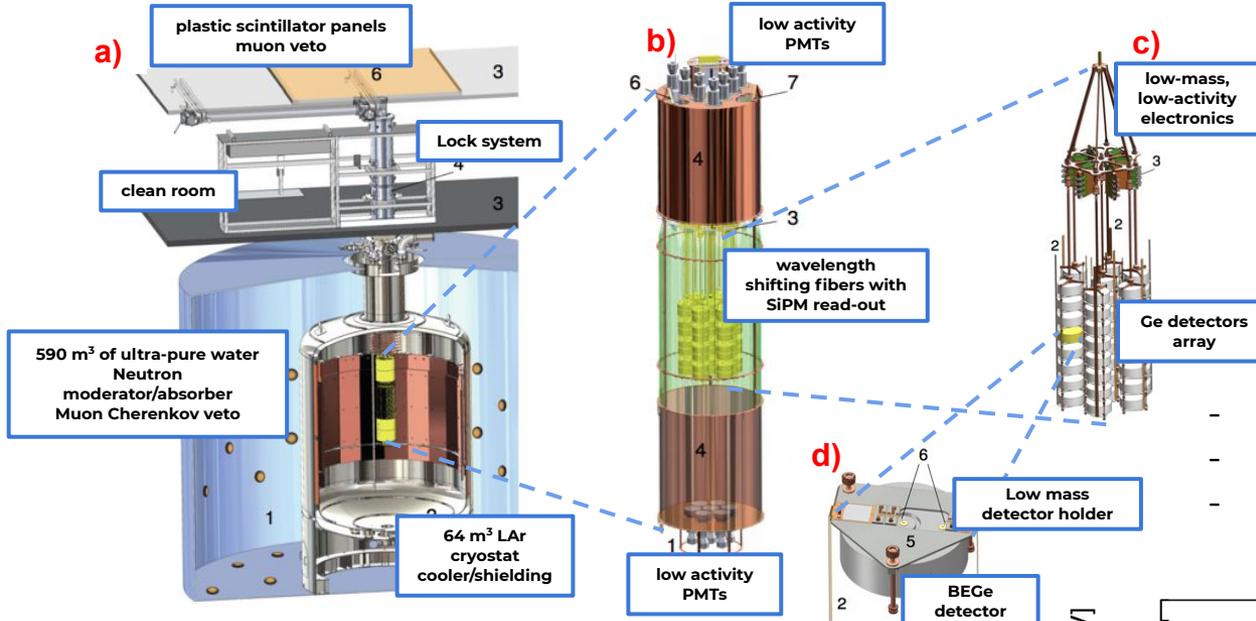


Esperimenti Ge-based con tecnologia a semiconduttore



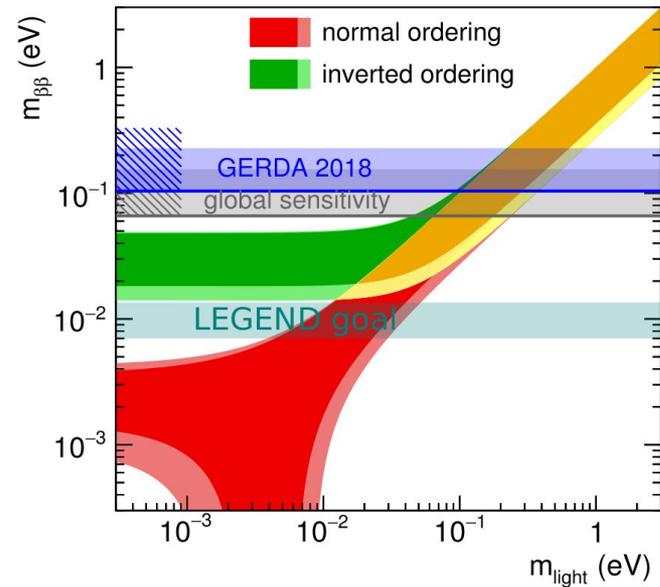
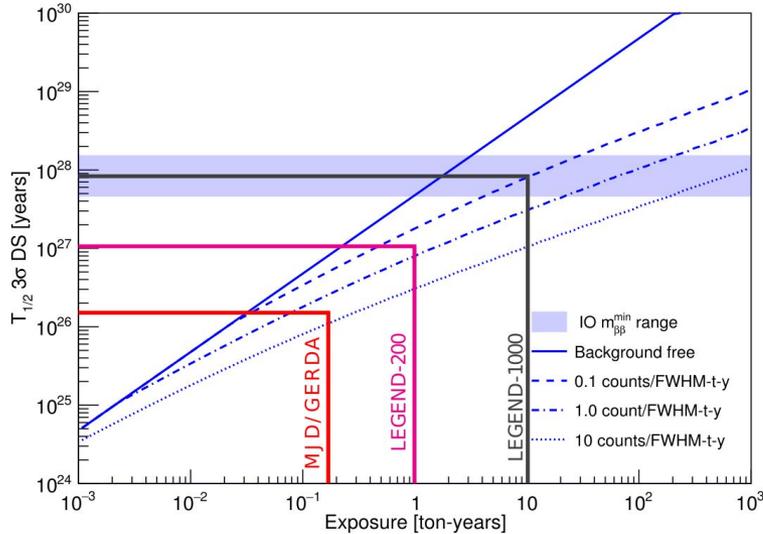
L'esperimento GERDA

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{76}Ge

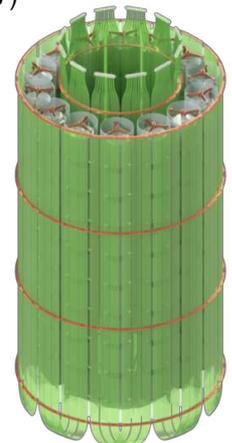
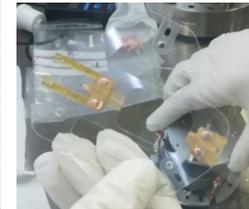
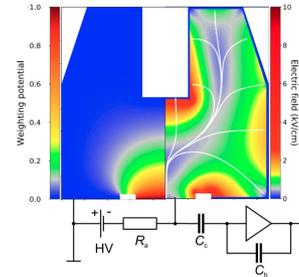


Il progetto LEGEND

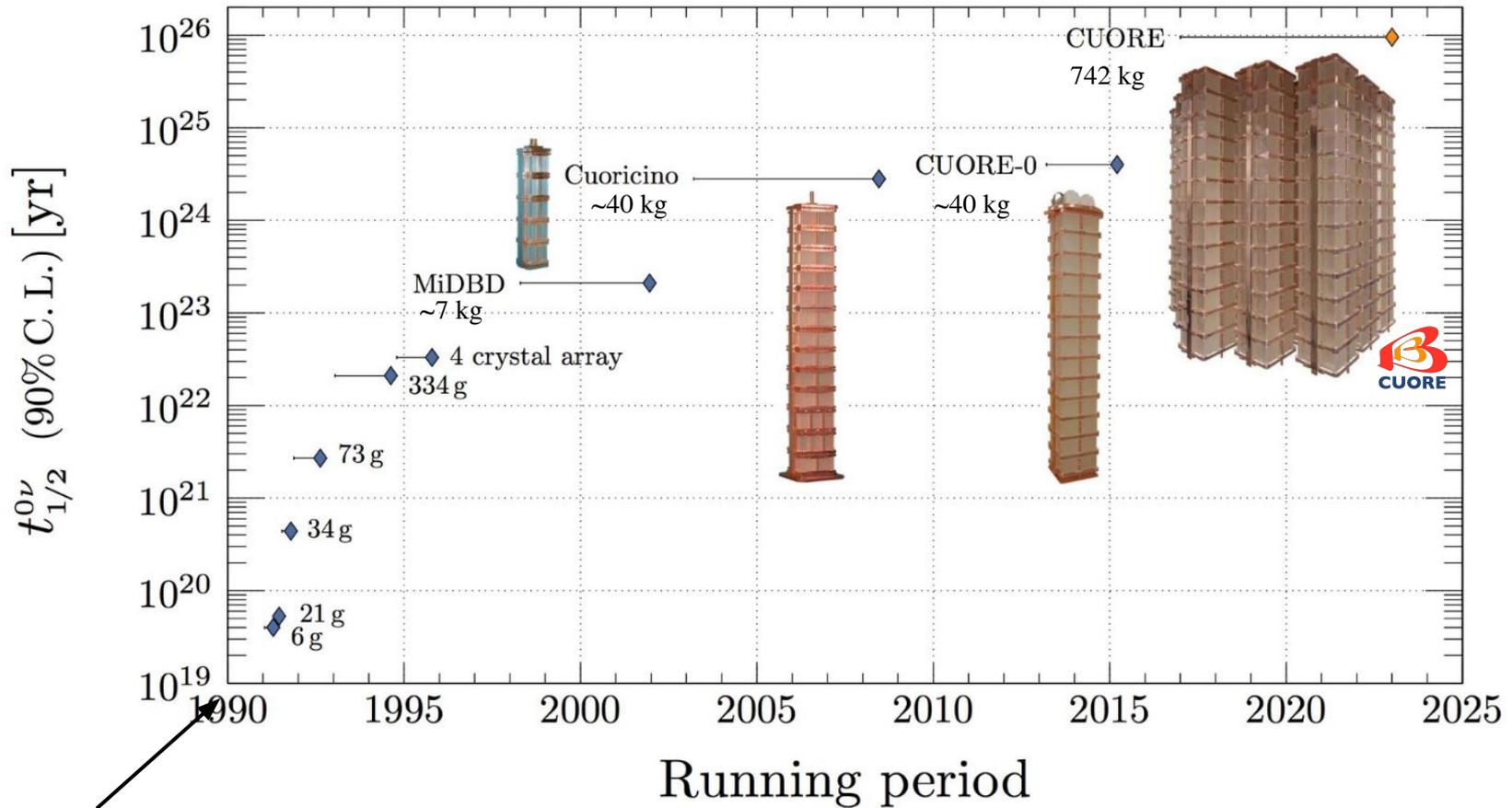
LEGEND si propone di riuscire a spingere la sua sensibilità tanto da coprire tutta la regione di gerarchia inversa per $m_{\beta\beta}$



- New Inverted Coaxial Point-Contact Ge detectors, large active mass up to 3 kg
- Improved LAr veto system, optimization of light collection
- PEN based detector unit parts
- Low Mass electronics with underground electroformed Cu



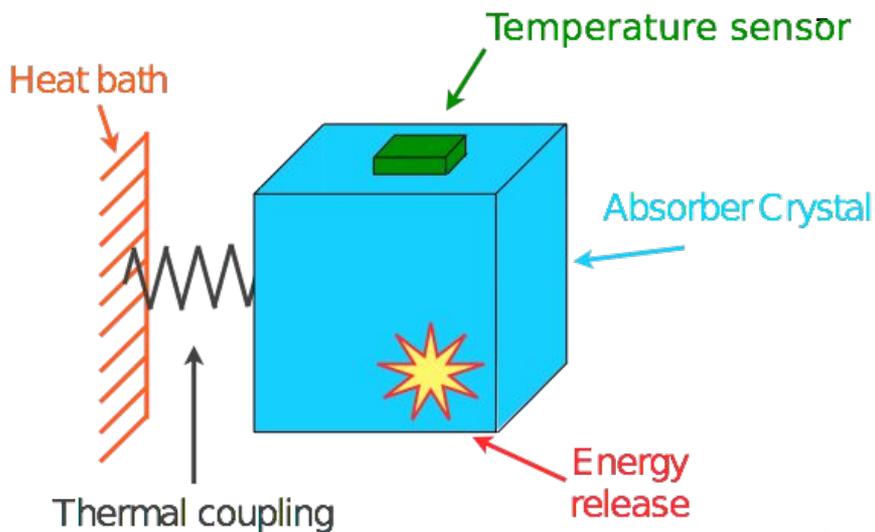
Esperimenti con tecnologia di calorimetri criogenici



Primi rivelatori: Gruppo di E.Fiorini a Milano

Tecnica sperimentale: calorimetri criogenici

Conversione dell'energia depositata in fononi



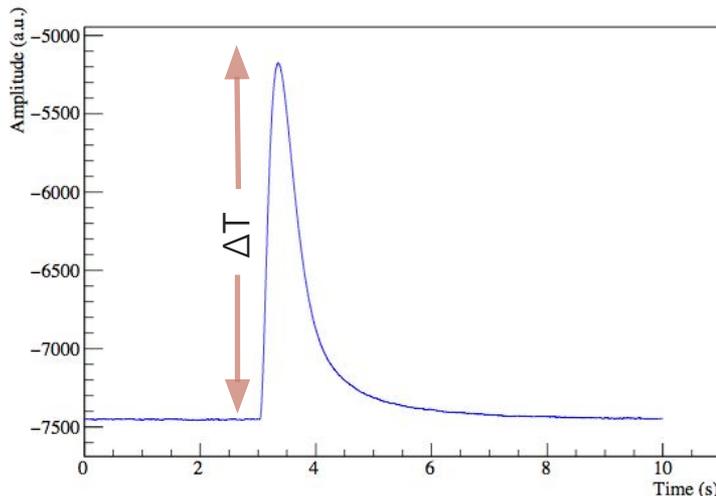
Deposizione di energia in assorbitore (E_{dep}):
 scattering di particelle su nuclei o elettroni \rightarrow
 produzione di fononi atermici \rightarrow degradazione di
 energia \rightarrow fononi termici/calore $\rightarrow \Delta T$

$$\Delta T \propto \frac{E_{dep}}{C}$$

ΔT (@300K) $\sim 10^{-12}$ $\mu\text{K}/\text{MeV}$
 ΔT (@10mK) ~ 100 $\mu\text{K}/\text{MeV}$

\rightarrow Necessario **operare l'assorbitore a $T \sim 10$ mK!**

- Sensore di fononi - Termistore NTD: forte variazione di resistenza al variare di T (ΔR) \rightarrow generazione di segnale elettrico impulsivo

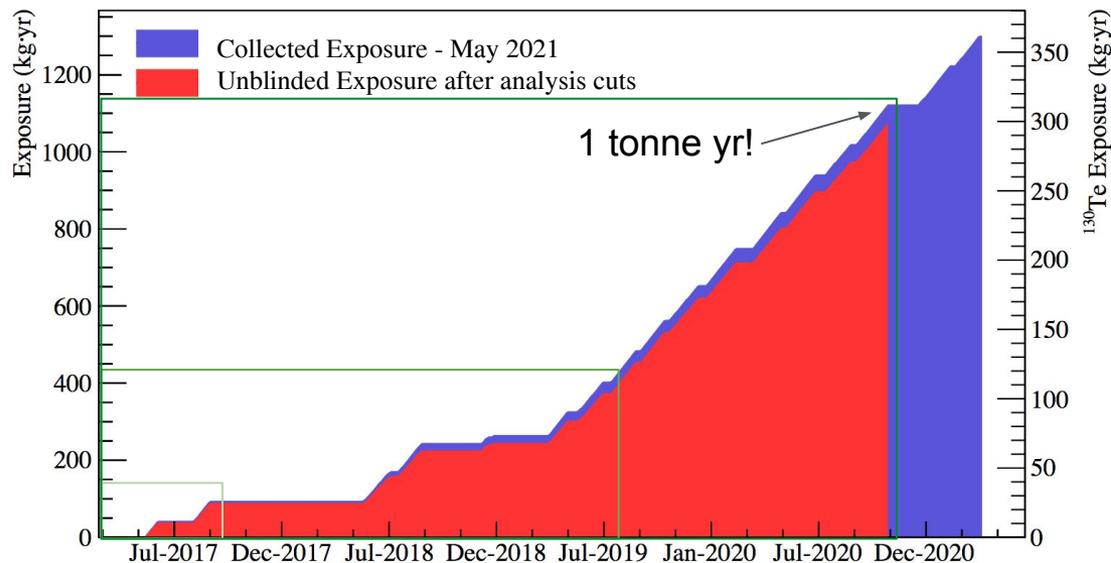


Ampiezza dell'impulso $\propto \Delta T \propto$ Energia depositata

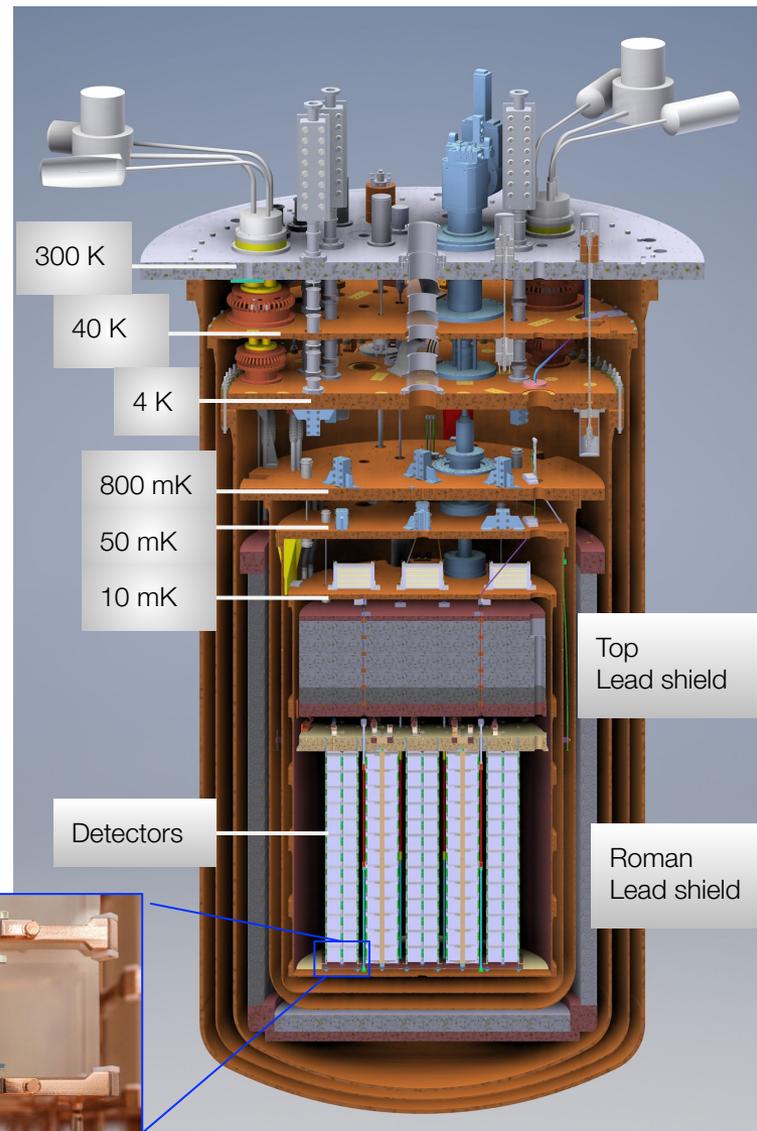
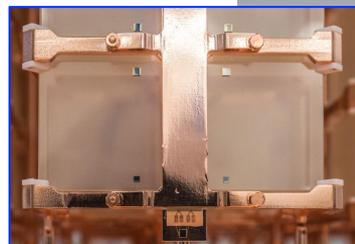
L'esperienza CUORE

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{130}Te
 Esperimento criogenico con rivelatore a stato solido di
 scala ~1 tonne. Si utilizzano 988 cristalli in $(\text{nat})\text{TeO}_2$ operati
 a ~10 mK.

Una sfida tecnologica!



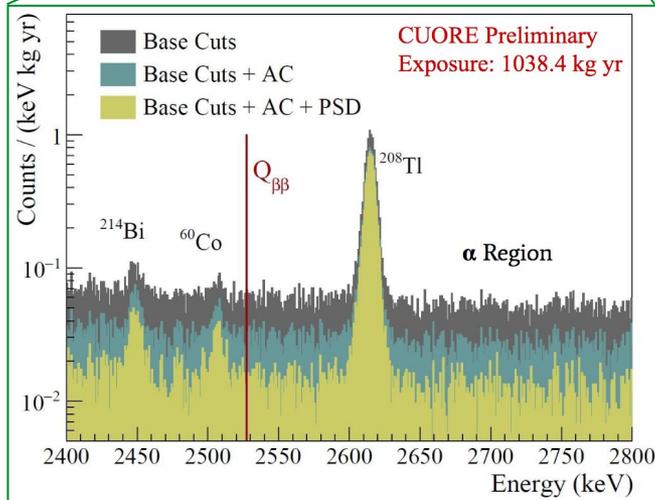
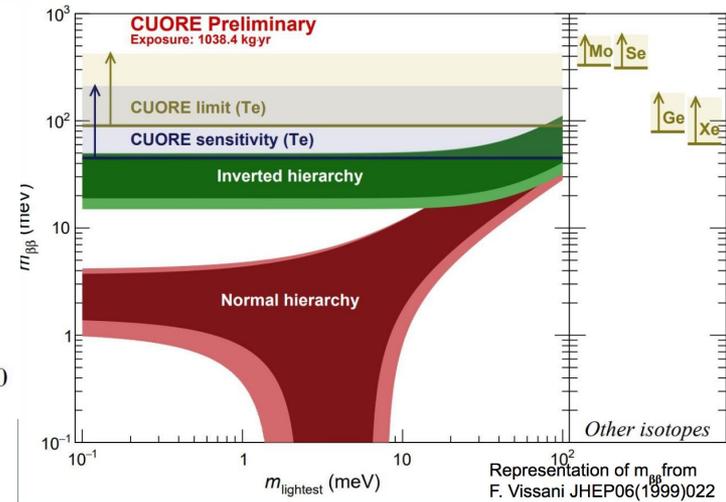
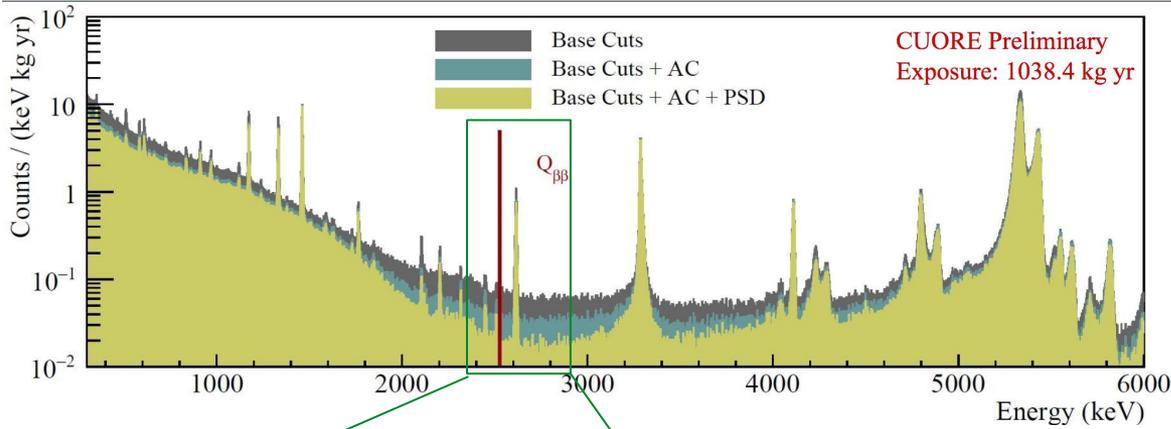
CUORE continuerà la presa dati fino al
 raggiungimento di esposizione: 3 tonne yr



L'esperimento CUORE



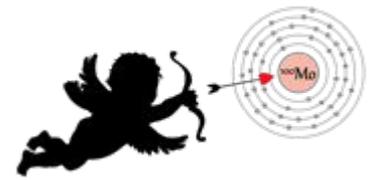
Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di ^{130}Te



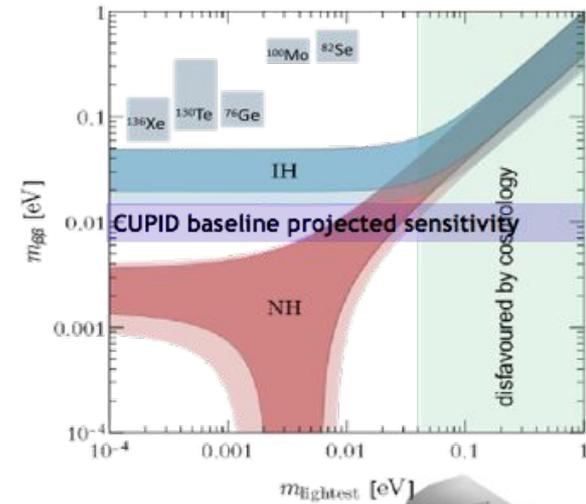
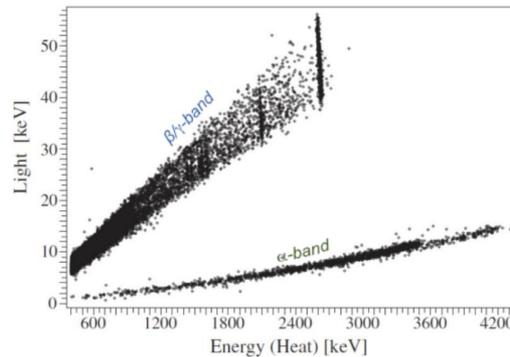
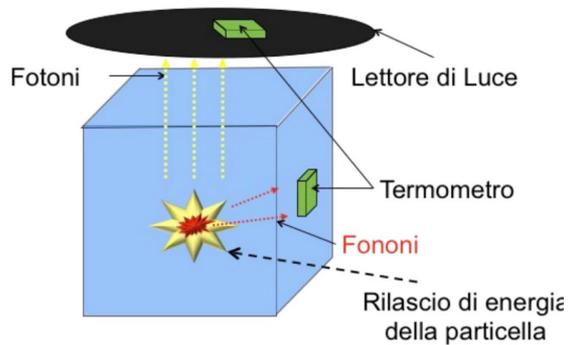
Particelle α degradate provenienti da decadimenti vicini ai rivelatori o sulla loro superficie, che depositano una frazione variabile della loro energia nei rivelatori costituiscono il principale ($\sim 90\%$) contributo all'indice di B nella ROI di CUORE.

CUORE è un calorimetro puro. Nei rivelatori in TeO_2 , con il calore soltanto, non si discriminano eventi α da β/γ .

Il progetto CUPID



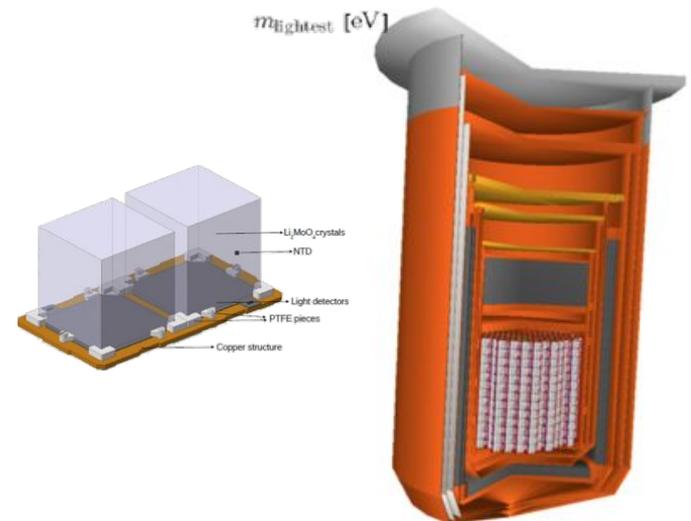
Per migliorare la sensibilità degli esperimenti con calorimetri criogenici e riuscire a coprire tutta la regione di gerarchia inversa per $m_{\beta\beta}$ sono necessari approcci ibridi per ridurre/discriminare il contributo α nella ROI. Utilizzo di altri isotopi $\beta\beta$ (^{48}Ca , ^{82}Se , ^{100}Mo) che hanno alti $Q_{\beta\beta}$ e composti scintillanti.



CUPID: CUORE Upgrade with Particle IDentification

Esperimento di prossima generazione per la ricerca dello $0\nu\beta\beta$ in ^{100}Mo

- 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 termistori NTD
- Rivelatore di CUPID sarà posizionato nel criostato di CUORE alla fine della sua presa dati

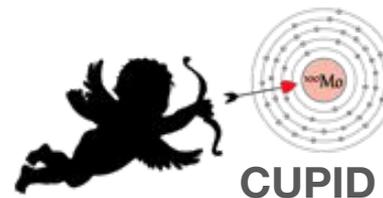


Attività di tesi disponibili a UniMiB per esperimenti sul decadimento doppio beta

- Analisi dati
- Simulazioni Monte Carlo
- Modellizzazione teorica della risposta dei rivelatori
- Messa in opera, caratterizzazione e ottimizzazione di nuovi rivelatori e tecnologie relative
- Misure di contaminanti radioattivi in rivelatori e materiali del setup
- Partecipazione a attività di presa dati e di commissioning degli esperimenti e dei dimostratori @LNGS



Ce n'è per tutti!



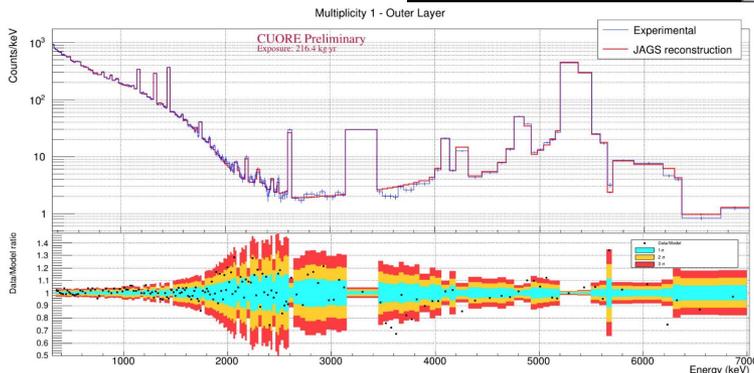
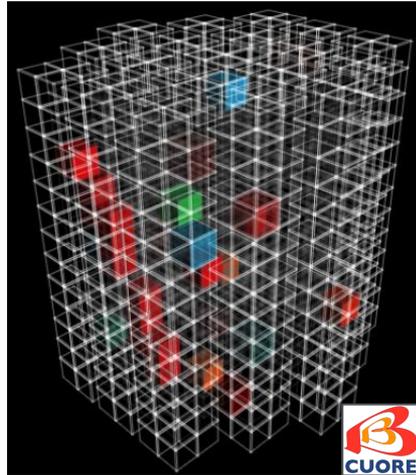
Attività di tesi disponibili: software / teoria

- Analisi dati
- Simulazioni Monte Carlo
- Modellizzazione teorica della risposta dei rivelatori

GERDA/LEGEND-200

Simulazioni Monte Carlo e analisi con SW dedicato e sviluppato nell'ambito della collaborazione

[C.M.Cattadori]



CUORE/CUPID:

Simulazione dati e ricostruzione degli eventi:

- Analisi dello spettro di energia di CUORE: componenti di fondo, regione di bassa energia (es. materia oscura)
- Sviluppo e test di algoritmi di analisi: identificazione di particelle, utilizzo di synthetic data
- Machine learning: ricostruzione della topologia degli eventi

Analisi e ottimizzazione dei rivelatori:

- Tecniche hardware & software di riduzione del rumore
- Studio della forma dei picchi e della risoluzione energetica
- Costruzione di un modello elettro-termico predittivo per la forma degli impulsi dei macro-calorimetri

[M. Biassoni, L. Gironi,
S. Pozzi, I. Nutini,
O. Cremonesi, M. Pavan]

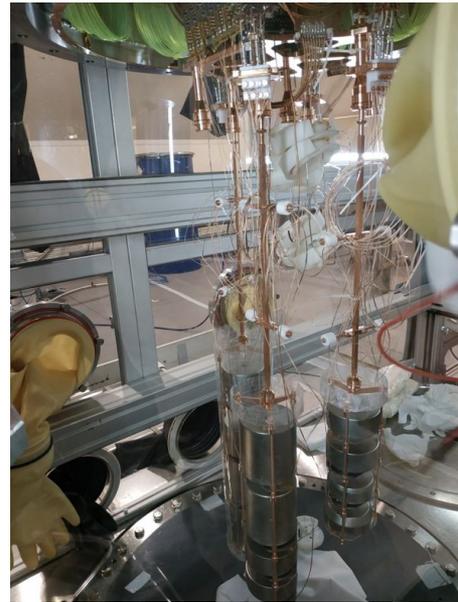
Attività di tesi disponibili: hardware / software

- Messa in opera, caratterizzazione e ottimizzazione di nuovi rivelatori e tecnologie relative
- Misure di contaminanti radioattivi in rivelatori e materiali del setup

GERDA/LEGEND-200:

- Caratterizzazione in criostati a vuoto (curve I-V, determinazione dead layer etc.) dei nuovi rivelatori $^{enr}\text{Hp}_\text{Ge}$ presso IRMM (Geel-Belgio) ove GERDA ha un laboratorio attrezzato con tavoli scanning. Analisi dati presso MiB.
- Sviluppo di nuovi scintillatori plastici per supporti attivi dei rivelatori Ge e per LAr veto (presso MiB)

[C.M.Cattadori]

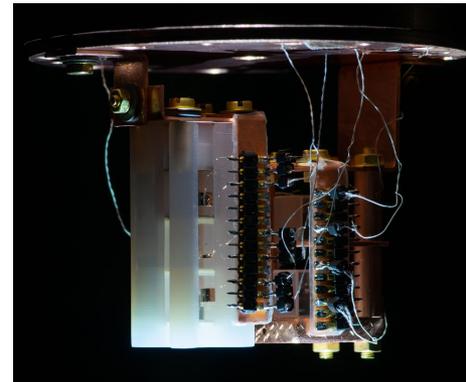
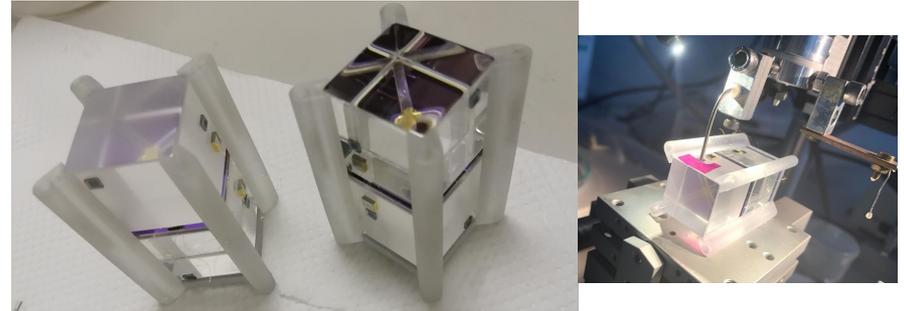


Attività di tesi disponibili: hardware / software

- Messa in opera, caratterizzazione e ottimizzazione di nuovi rivelatori e tecnologie relative
- Misure di contaminanti radioattivi in rivelatori e materiali del setup

CUORE/CUPID:

- Caratterizzazione di calorimetri per lo studio di risposta (velocità, shape e ampiezza del segnale), con differenti montaggi e termistori, e/o esposti a sorgenti alfa e gamma - @MiB, @LNGS [**M.Biassoni, L.Gironi, I.Nutini, C.Brofferio**] in collab. anche con i Fisici Elettronici
- Misure con bolometri scintillanti: studio dell'aumento in resa in luce di piccoli cristalli Li_2MoO_4 con different drogaggi - @MiB in collab. con Scienze dei Materiali [**L.Gironi**]
- Sviluppo di un sistema di misura per spettroscopia alfa ad alta sensibilità per misure di catene radioattive naturali - @MiB [**S.Capelli, M.Nastasi**]



Attività di tesi disponibili: hardware / software

- Partecipazione a attività di presa dati e di commissioning degli esperimenti e dei dimostratori @LNGS

LEGEND-200:

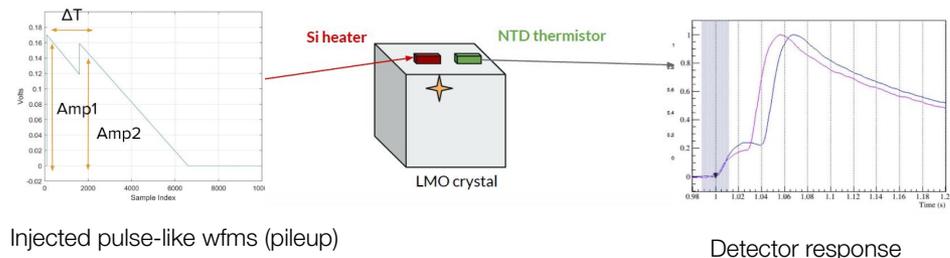
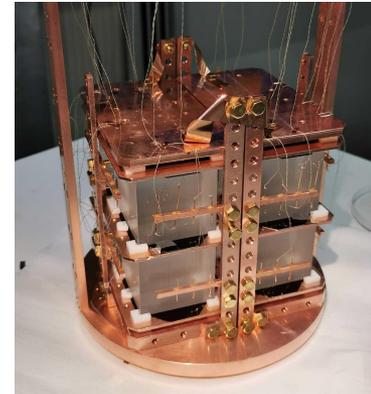
Partecipazione attiva' di Commissioning dell'esperimento LEGEND (presso LNGS) che avverrà nel 2021! Momento particolarmente "fortunato" per mettere mano e conoscere dettagli di questo sofisticato esperimento!



CUORE/CUPID:

Dimostratori di CUPID a LNGS in sala C - adesso in presa dati! - e presto anche in sala A:

- Test di nuovi design del rivelatore
- Caratterizzazione dei rivelatori e dei sensori per CUPID
- Test per studiare la discriminazione del pile-up



Possibilità di borse INFN per periodi a LNGS durante la Tesi Magistrale!

Attività di tesi disponibili

Contatti per relatori/correlatori:

GERDA/LEGEND-200: Carla Cattadori carla.cattadori@lngs.infn.it

CUORE/CUPID: Matteo Biassoni matteo.biassoni@mib.infn.it ,
Chiara Brofferio chiara.brofferio@mib.infn.it, Silvia Capelli silvia.capelli@infn.it ,
Oliviero Cremonesi oliviero.cremonesi@mib.infn.it, Luca Gironi luca.gironi@mib.infn.it ,
Irene Nutini irene.nutini@mib.infn.it, Maura Pavan maura.pavan@mib.infn.it ,
Stefano Pozzi stefano.pozzi@mib.infn.it, Ezio Previtali ezio.previtali@mib.infn.it

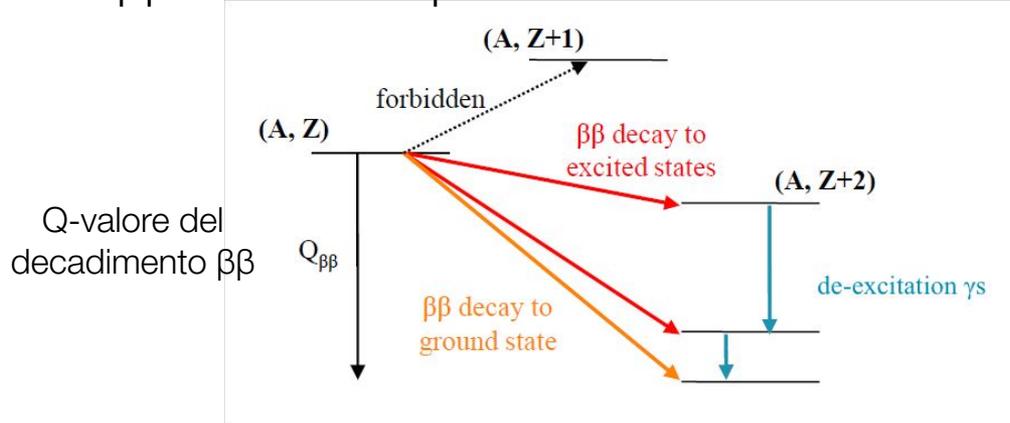
Proposte di tesi dettagliate CUORE/CUPID, GERDA/LEGEND a:

<https://www.fisica.unimib.it/it/didattica/corsi-studio/corso-laurea-magistrale-fisica/argomenti-prova-finale-della-laurea-magistrale/argomenti-prova-finale-della-laurea-magistrale-fisica-delle-particelle>

Backup

Decadimento doppio beta

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

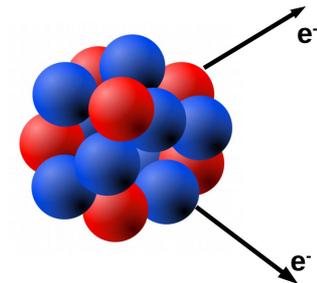
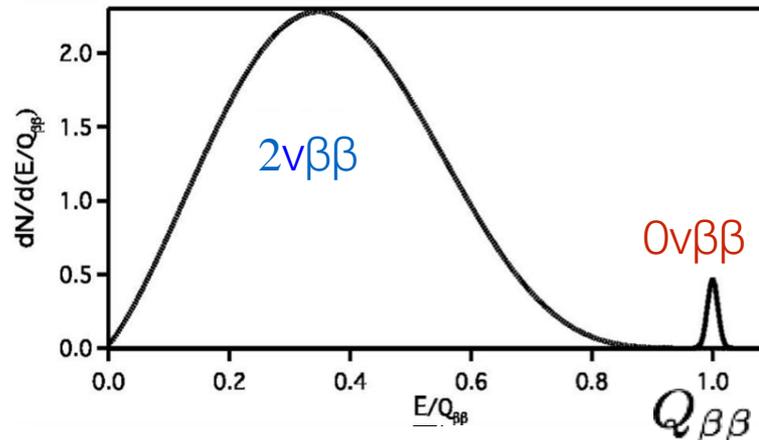
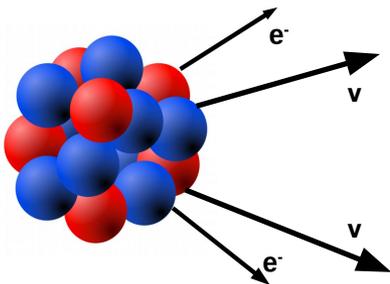


Decadimento doppio beta con emissione di neutrini **$2\nu\beta\beta$**

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

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

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

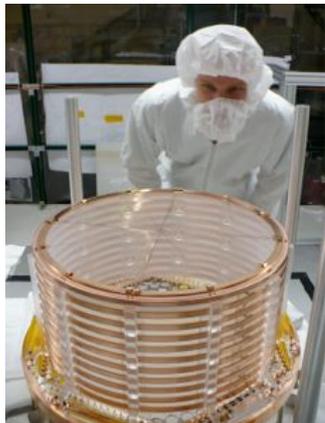
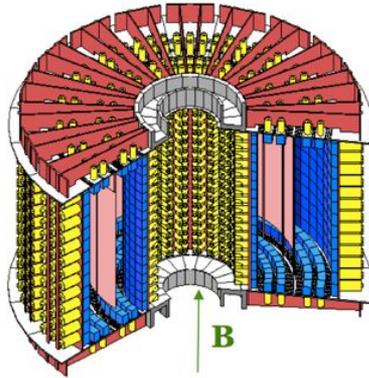


Sensibilità sperimentale per il decadimento $0\nu\beta\beta$

Calorimetri	Sorgente esterna
<ul style="list-style-type: none">+ Massa ($\sim 10\text{kg} \rightarrow \text{tons}$)+ 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 ($< \text{kg}$)- Limitata efficienza e risoluzione energetica

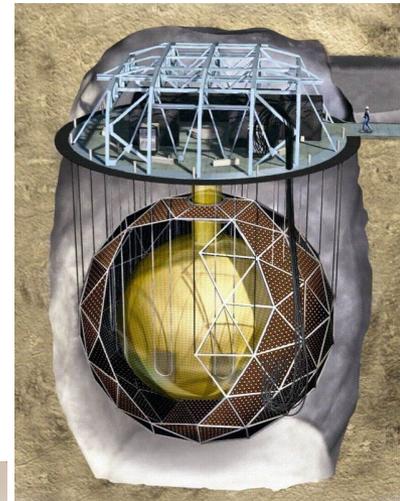
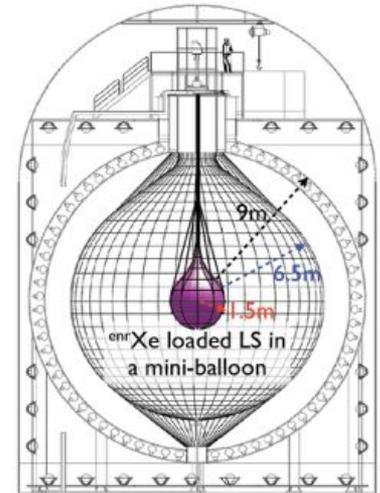
Esperimenti di doppio decadimento beta

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)



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

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

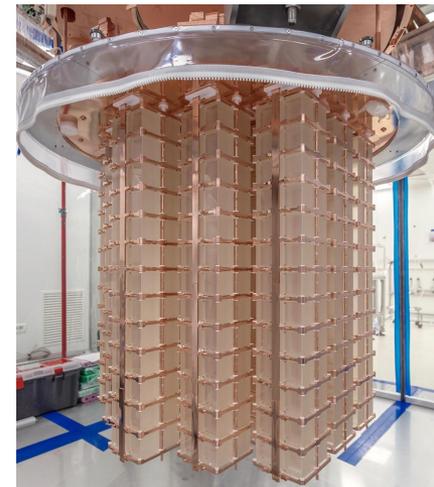


SNO+
SNO detector filled with
 ^{130}Te -loaded liquid scintillator

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



CUORE
742 kg of TeO_2
(206 kg of ^{130}Te)
crystals operated
at ~ 10 mK
→ CUPID (^{100}Mo)



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 $2\nu\beta\beta$, ...
- ...

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

