

Doppio decadimento beta

CUORE, CUPID, GERDA/LEGEND

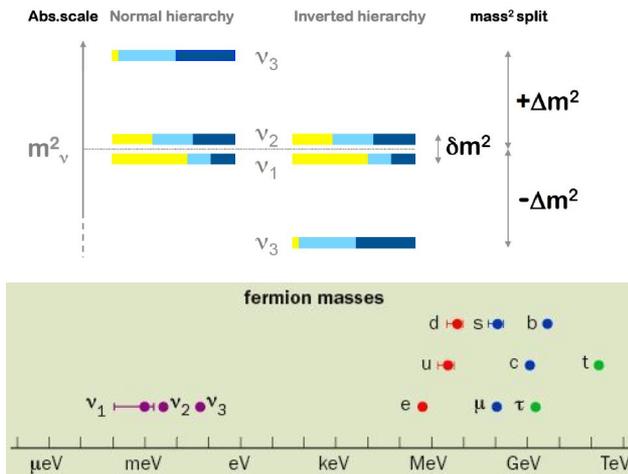
Stefano Pozzi

Presentazioni tesi magistrali 2022
Dip. Fisica G.Occhialini - UniMiB
14/07/22

Proprietà del neutrino

Tra le particelle elementari del Modello Standard è quello di cui si conoscono meno le proprietà

- Sappiamo che ha massa (oscillazioni), ma non ne conosciamo il valore
- Sappiamo misurare le differenze di massa tra i 3 stati in valore assoluto, ma non conosciamo il segno (gerarchia)
- Perché ha massa così piccola rispetto alle altre particelle del Modello Standard?
- E' una particella di Dirac o di Majorana?



E' possibile studiare transizioni nucleari permesse in estensioni del Modello Standard per sondare alcune proprietà del neutrino

Decadimento doppio beta (DBD)

Il decadimento doppio beta è un processo che converte simultaneamente due protoni in due neutroni

DBD con emissione di 2 neutrini ($2\nu\beta\beta$)

- Consentito dal Modello Standard
- Osservato su vari nuclei

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



DBD senza emissione di neutrini ($0\nu\beta\beta$)

- Proibito dal MS: viola la conservazione del numero leptonico
- Non ancora osservato

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

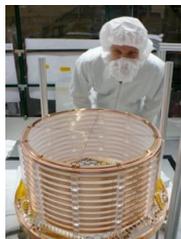


Decadimento doppio beta (DBD)

L'osservazione del decadimento $0\nu\beta\beta$ avrebbe diverse implicazioni:

- Violazione del numero leptonico
- I neutrini sono fermioni di Majorana (sono la loro stessa antiparticella)
- Indicazioni sulla gerarchia di massa

Esperimenti in tutto il mondo cercano il $0\nu\beta\beta$ su diversi isotopi:



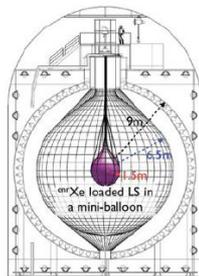
EXO/nEXO
(^{136}Xe)



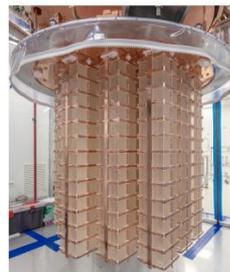
GERDA/LEGEND (^{76}Ge)



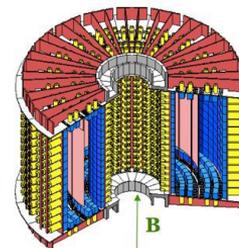
SNO+ (^{130}Te)



KamLAND-ZEN
(^{136}Xe)



CUORE (^{130}Te)
CUPID (^{100}Mo)



NEMO (vari)

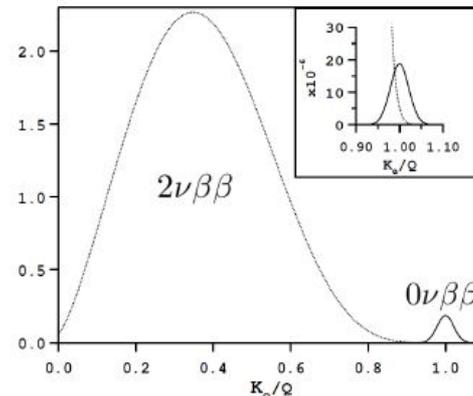
...

Misurare il $0\nu\beta\beta$

Obiettivo: misurare l'energia dei due elettroni emessi

$2\nu\beta\beta$: gli elettroni hanno spettro continuo (parte dell'energia è ceduta ai $\bar{\nu}_e$ e non viene rivelata)

$0\nu\beta\beta$: tutta l'energia è ceduta agli elettroni; si misura la somma delle due energie e si cerca un picco al Q-valore del decadimento



Sensibilità a $0\nu\beta\beta$

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \epsilon \sqrt{\frac{M \cdot t}{b \cdot \Delta E}}$$

- Massa (**M**) elevata
- Lungo tempo di misura (**t**)
- Basso *background* (**b**): contributi dalla radioattività ambientale alla regione intorno al Q-valore
- Ottima risoluzione energetica (**ΔE**)

Riduzione del fondo (background)

Nella vita di un esperimento, ci aspettiamo solo una manciata di eventi da $0\nu\beta\beta$

Es. CUORE: 10^{27} atomi di ^{130}Te , se $T_{1/2} = 10^{26}$ yr \longrightarrow < 10 decadimenti all'anno

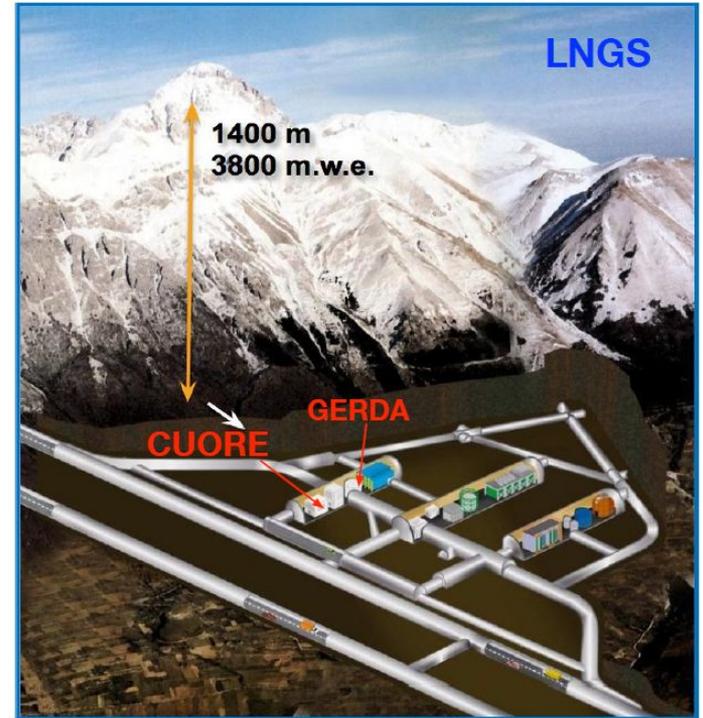
La radioattività ambientale può facilmente mascherare questi eventi e ridurre la sensibilità sperimentale; il suo effetto va ridotto quanto più possibile

- Selezione dei materiali: radiopurezza estrema in tutto l'apparato sperimentale
- Schermature attive (veto) e passive (Cu/Pb)
- Laboratori sotterranei per ridurre l'impatto dei μ cosmici

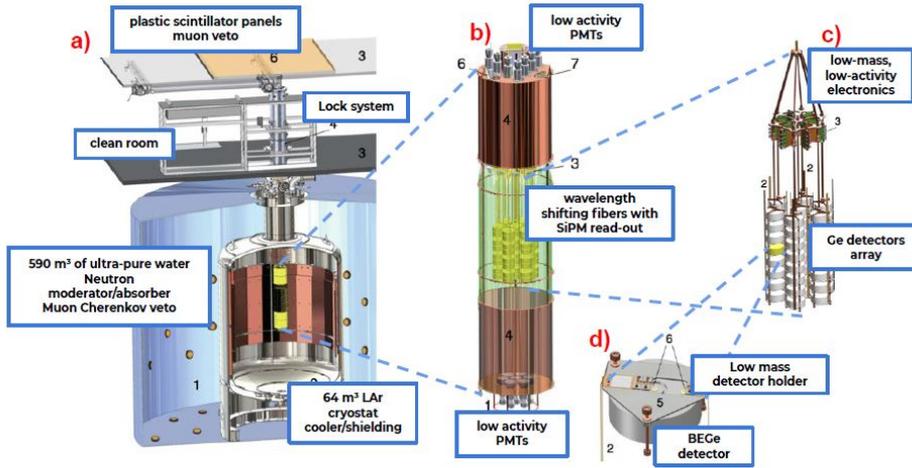
Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

I LNGS, il centro di ricerca sotterraneo più grande al mondo, si trovano sotto il massiccio del Gran Sasso

- Coperti da 1400 metri di roccia: riduzione del flusso di μ cosmici di un fattore 10^6
- Ospitano numerosi esperimenti di fisica degli eventi rari, tra cui GERDA e CUORE/CUPID



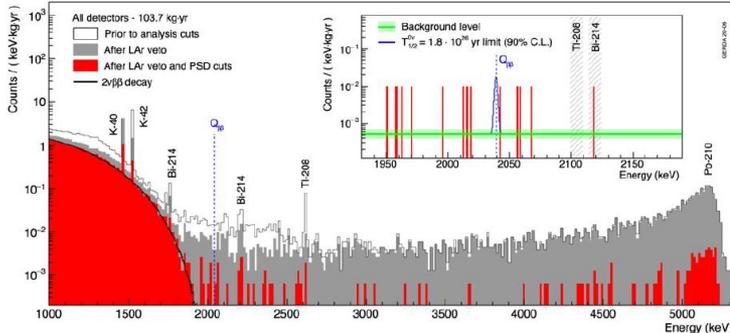
GERDA (2018)



- a) overview
- b) liquid argon veto (LAR)
- c) detector array
- d) detector module

GERDA: Ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{76}Ge

- Rivelatori al Germanio ultrapuro (HPGe)
 - ^{76}Ge all'interno del rivelatore
- Ulteriore riduzione del fondo cosmico
 - Scintillatori plastici
 - Immerso in acqua (Cherenkov)
- Rivelatori immersi in Argon liquido: veto per eventi non provenienti dal Ge (sicuramente non $0\nu\beta\beta$)
- Discriminazione tra eventi β e α (sicuramente non $0\nu\beta\beta$)

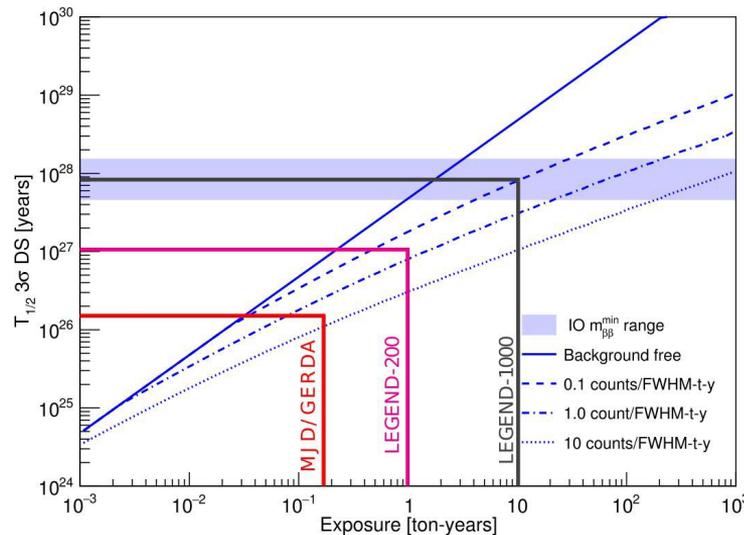


LEGEND



- LEGEND-200
 - 200 kg di rivelatori HPGe nella struttura usata da GERDA
 - Attualmente in fase di commissioning
- LEGEND-1000
 - 1000 kg di rivelatori HPGe in un nuovo sito

Stessa tecnica sperimentale di GERDA, ma migliorate le performance di rivelatori, veto LAr e elettronica



Calorimetri criogenici

Misura dell'aumento di temperatura in un assorbitore a seguito dell'interazione di una particella al suo interno

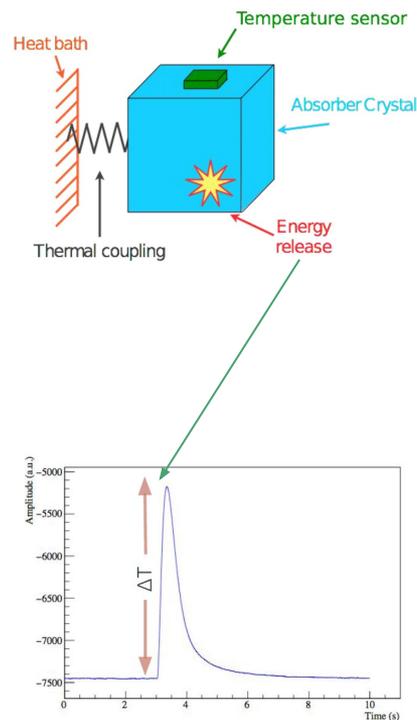
La variazione è misurabile solo a temperature prossime a 0K

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

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

Il segnale è letto attraverso un termistore, la cui resistenza varia con la temperatura

L'ampiezza dell'impulso è proporzionale all'energia depositata

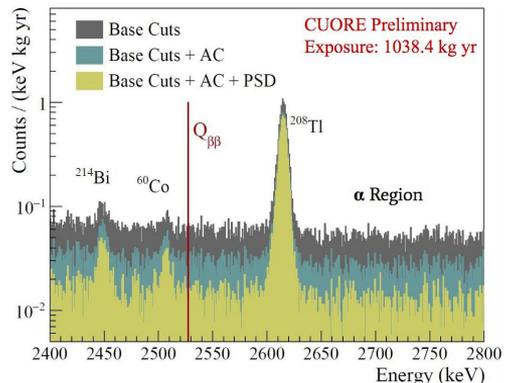


CUORE



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

- Calorimetri criogenici in TeO_2 ($\approx 34\%$ A.I. ^{130}Te)
- 988 cristalli (741 kg TeO_2)
- Mantenuti stabilmente a una temperatura di $\approx 10\text{mK}$
- In presa dati dal 2017, continuerà per altri ≈ 3 anni



Rispetto a GERDA, CUORE ha una massa molto maggiore, ma una minore capacità di distinguere il background

Non è possibile discriminare gli eventi β (potenzialmente interessanti) e α (sicuramente fondo)



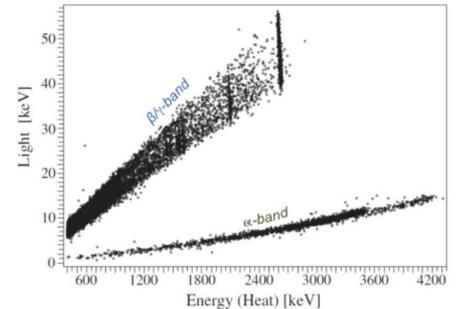
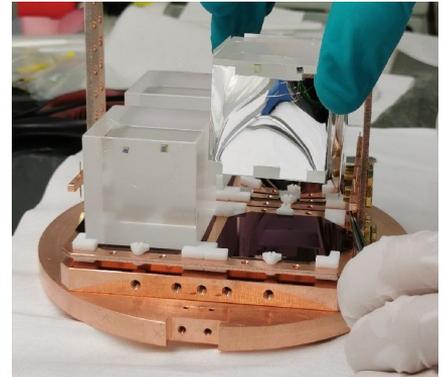
CUPID



CUPID: **CUORE** Upgrade with **P**article **ID**entification

Assorbitore: ≈ 1500 cristalli di Li_2MoO_4

- Isotopo ‘bersaglio’: ^{100}Mo (≈ 250 kg)
 - Q-valore più alto (3 MeV vs. 2.5 MeV ^{130}Te), background naturale più basso
- Calorimetri scintillanti: la deposizione di energia è associata a emissione di luce, letta da Light Detector
 - A parità di energia, diversa intensità di luce tra β e α ; riduzione del background
- Verrà inserito nel criostato di CUORE alla fine della sua presa dati



Attività di tesi per esperimenti DBD

- Analisi dati
- Simulazioni Monte Carlo
- Modello teorico della risposta dei rivelatori
- Caratterizzazione e messa in opera di nuovi rivelatori e tecnologie collegate
- Misura di contaminanti radioattivi in rivelatori e materiali del setup
- Partecipazione a attività di commissioning/presa dati per esperimenti e dimostratori @LNGS



Attività di tesi: software, risposta del rivelatore

LEGEND-200

- Digital Signal Processing di set di dati acquisiti dai rivelatori Ge e dal veto LAr

[**C.M. Cattadori**]

CUORE/CUPID

- Ricostruzione delle principali sorgenti di fondo in CUORE con simulazioni Monte Carlo, previsione del fondo per CUPID
- Sviluppo e ottimizzazione di algoritmi per la riduzione del fondo caratterizzazione della risposta dei rivelatori (synthetic data)
- Tecniche hardware/software per la riduzione del rumore
- Modello elettro-termico predittivo per la forma degli impulsi nei calorimetri criogenici

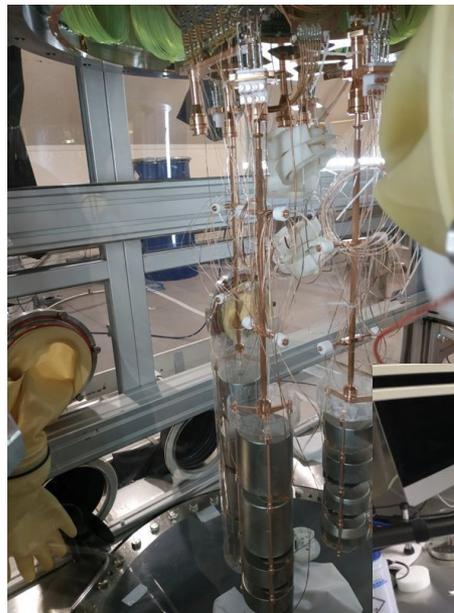
[**M. Biassoni, L. Gironi, S. Pozzi, I. Nutini, O. Cremonesi, M. Pavan**]

Attività di tesi: hardware

LEGEND-200

- Misura e analisi delle prestazioni di preamplificatori di carica criogenici
- Caratterizzazione delle performance di fotosensori
- Caratterizzazione e modellazione dei nuovi rivelatori Ge
- Partecipazione alle attività di commissioning di LEGEND @LNGS

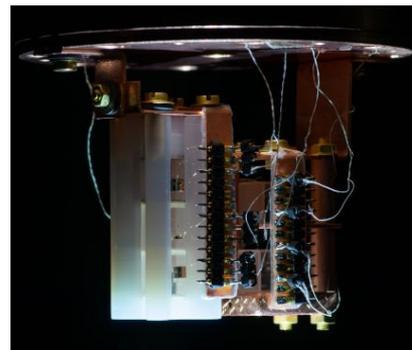
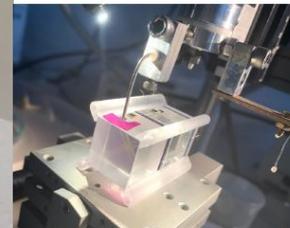
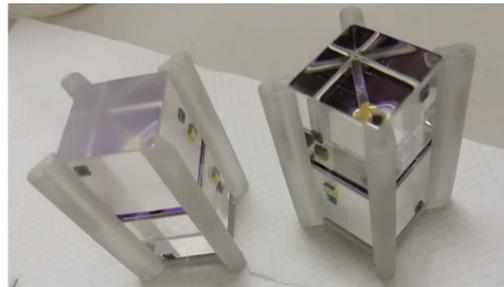
[**C.M. Cattadori**]



Attività di tesi: hardware

CUORE/CUPID

- Caratterizzazione della risposta (risoluzione temporale, forma dei segnali, ...) di calorimetri scintillanti in setup di test [**M.Biassoni, L.Gironi, I.Nutini, C.Brofferio**]
- Studio della resa in luce di cristalli Li_2MoO_4 con diverso drogaggio [**L.Gironi**]
- Sviluppo di un sistema di misura per spettroscopia alfa per misura di catene radioattive naturali [**S.Capelli, M.Nastasi**]
- Misure di test e caratterizzazione @LNGS



Contatti

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@mib.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

<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>