

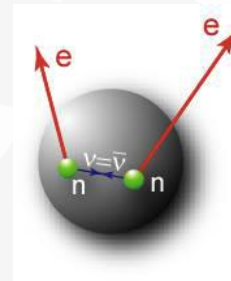
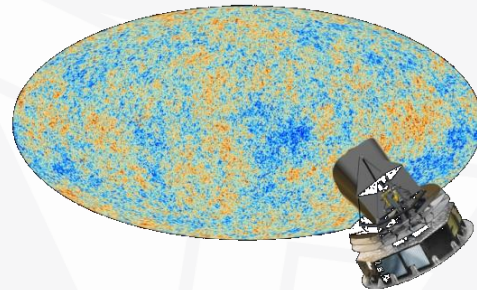
HOLMES

misura diretta di m_ν con
approccio calorimetrico



La massa del neutrino

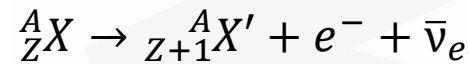
- dall'osservazione delle oscillazioni di sapore $\Delta m_{ij}^2 = |m_i^2 - m_j^2|$ e autostati di massa \neq autostati di sapore
- $m_i = ?$
- dirac o majorana?
- esiste un quarto neutrino?



tool	cosmology	$0\nu\beta\beta$	β decay end-point
Observable	$m_\Sigma = \sum_i m_{\nu_i}$	$m_{\beta\beta} = \sum_i U_{ei} ^2 m_{\nu_i} $	$m_\beta = (\sum_i U_{ei} ^2 m_{\nu_i})^{1/2}$
present sensitivity	≈ 0.1 eV	≈ 0.1 eV	≈ 0.8 eV
future sensitivity	~ 0.05 eV	~ 0.05 eV	0.2 eV
model dependency	yes	yes	no

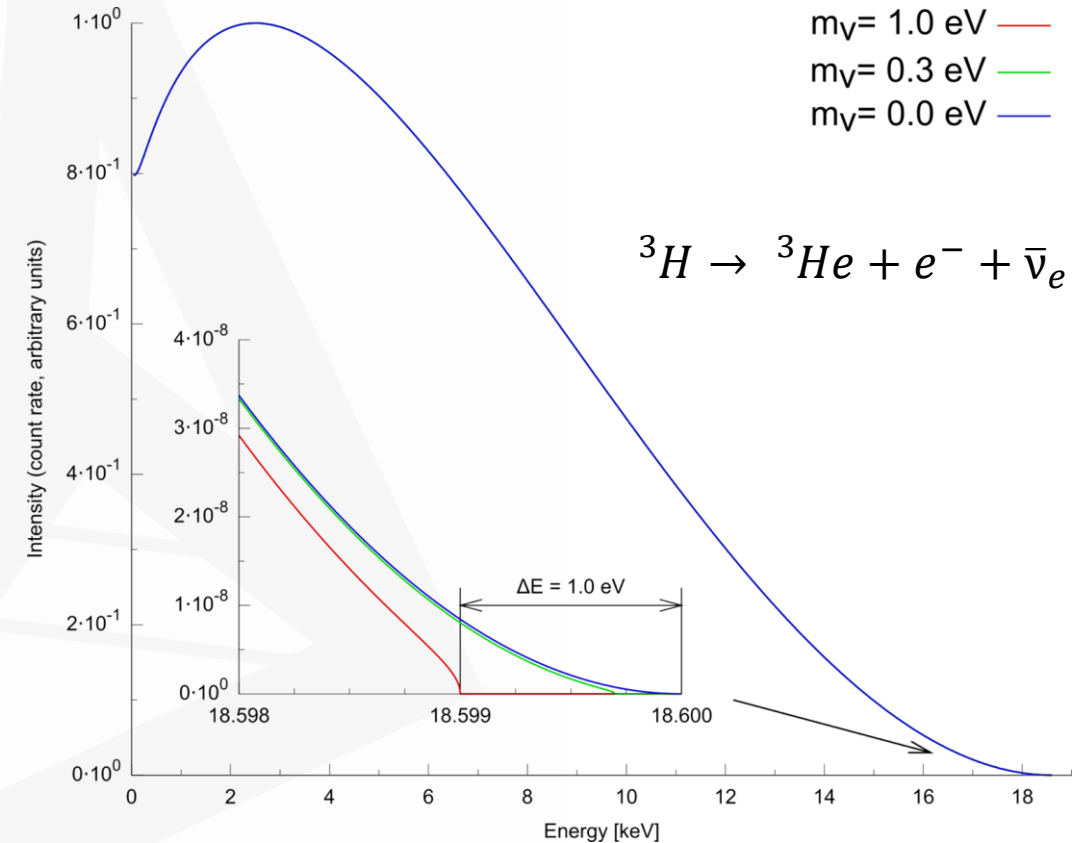
Misura diretta della massa del neutrino

La massa del neutrino diventa rilevante in decadimenti deboli quando esso viene emesso come particella non relativistica, ovvero all'*end-point* dello spettro di un decadimento beta



$$Q = m_n({}^A_Z X) - m_n({}^A_{Z+1} X') - m_e - m_{\bar{\nu}_e}$$

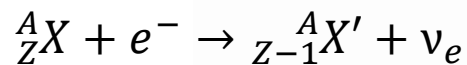
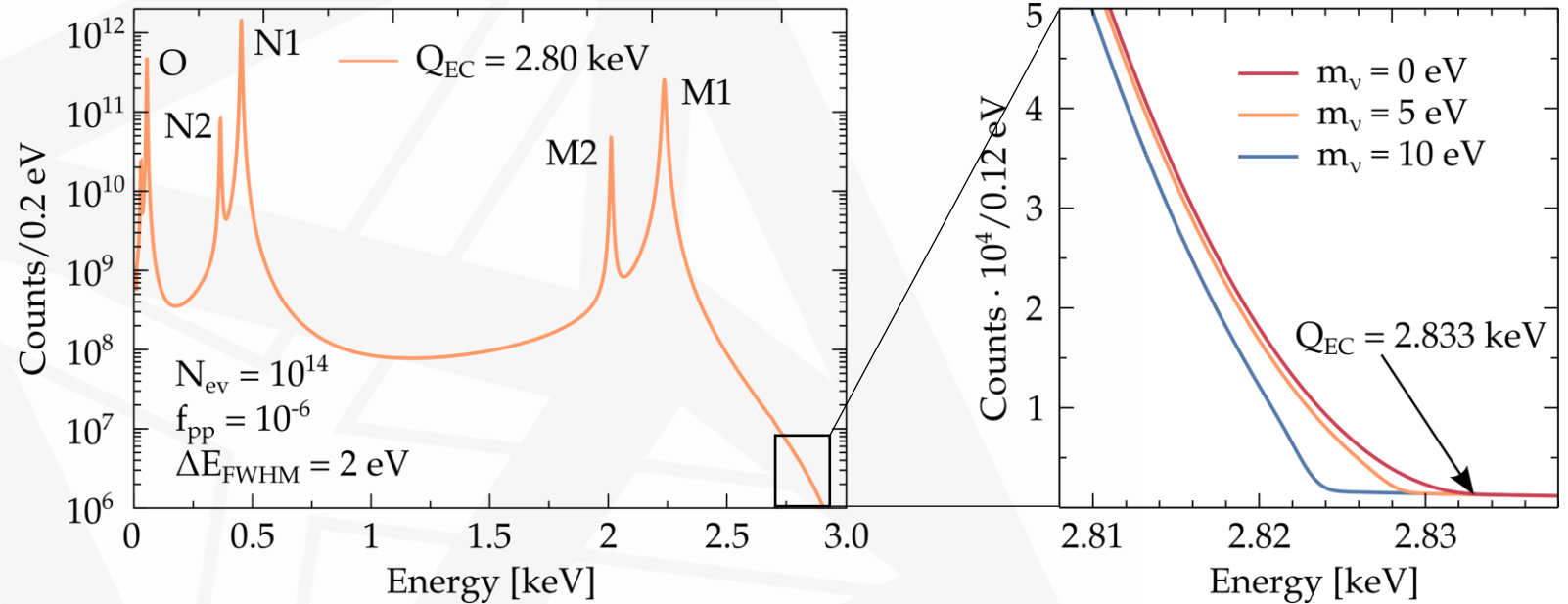
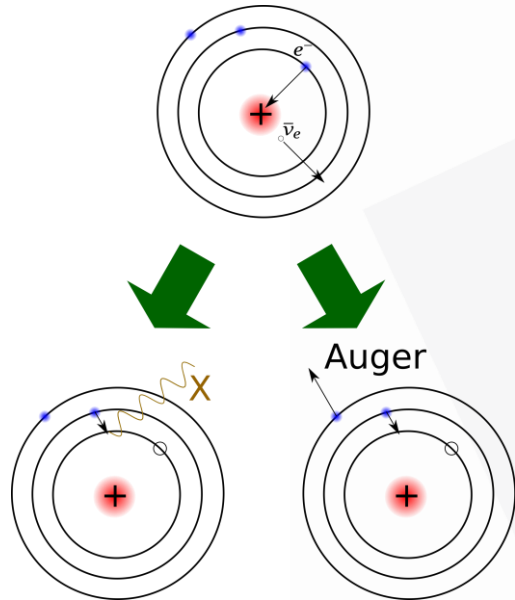
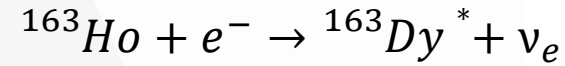
- il decadimento β produce un elettrone e un (anti)neutrino, dividendo tra queste particelle una quantità fissa di energia: il Q valore
- se il neutrino non avesse massa l'elettrone potrebbe avere energia da 0 a Q, mentre se il neutrino ha massa l'energia dell'elettrone varia da 0 a $(Q - m_\nu)$
- **Si può misurare la massa del neutrino andando a guardare l'endpoint di uno spettro β !**



$$\frac{d\lambda_\beta}{dE_\beta} \propto (Q - E_\beta) \sqrt{(Q - E_\beta)^2 - m_\nu^2}$$

$$m_\nu = \left(\sum |U_{i,j}|^2 m_j^2 \right)^{1/2}$$

Misura di m_β con **HOLMES**



$$Q = m_n({}^A_Z X) + m_e - m_n({}^A_{Z-1} X') - m_{\nu_e}$$

Lo spettro conseguente la cattura elettronica è diverso dallo spettro beta (deriva da riarrangiamenti atomici) ma segue la stessa fisica!

$$\frac{d\lambda_{EC}}{dE_x} \propto (Q - E_x) \sqrt{(Q - E_x)^2 - m_\nu^2}$$

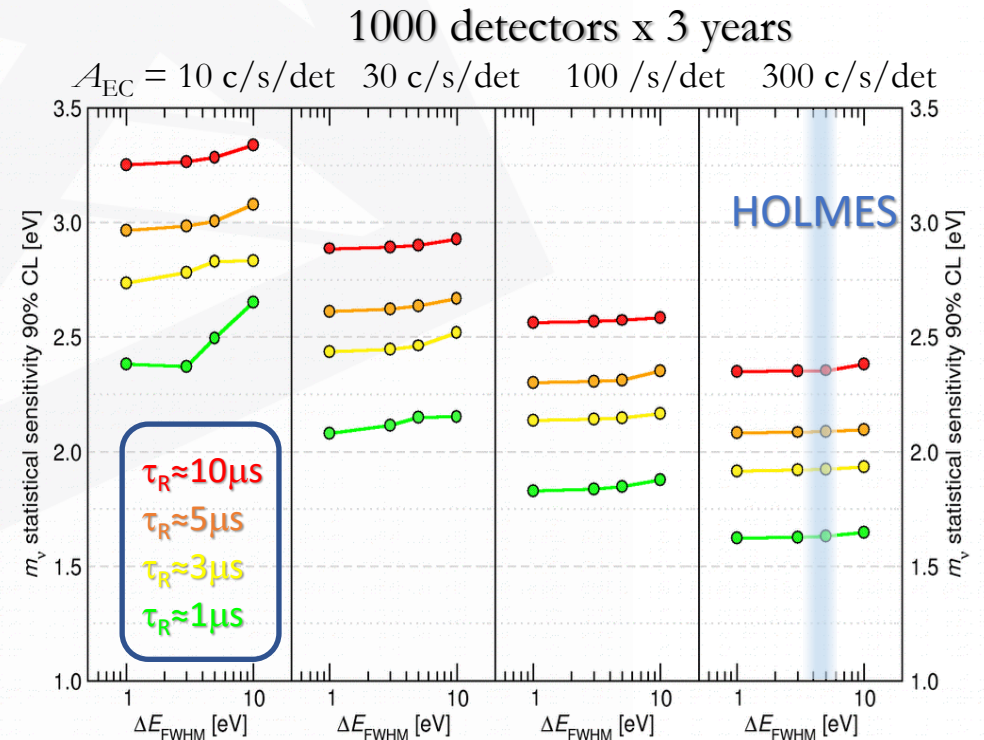
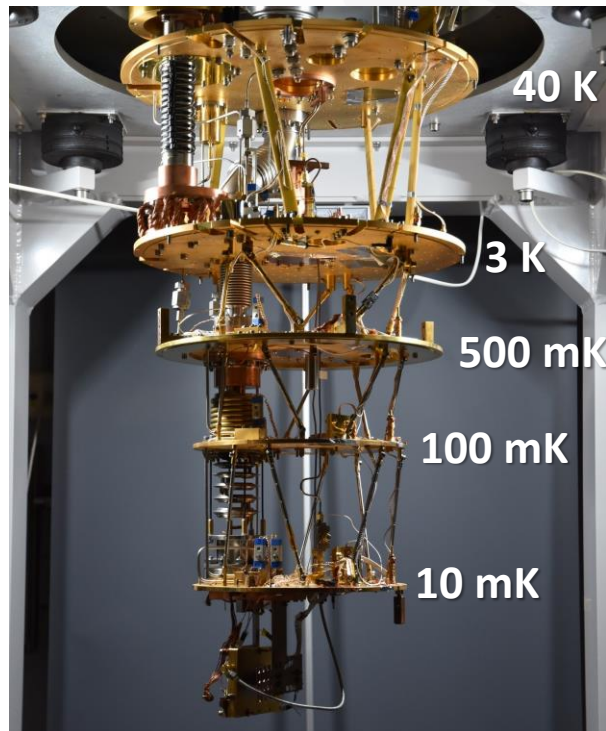
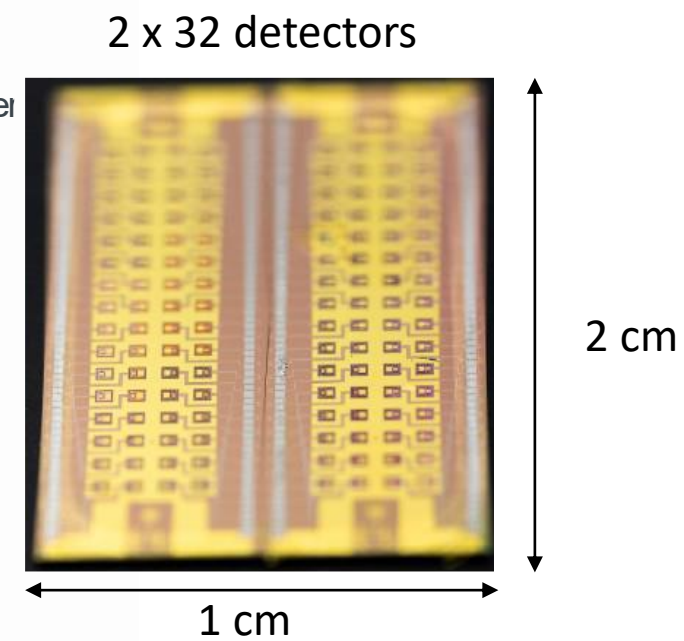
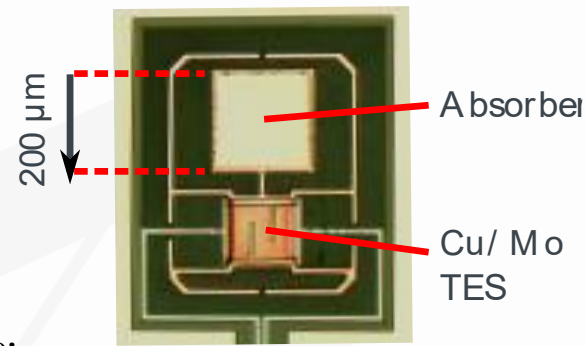
$$m_\nu = \left(\sum |U_{i,j}|^2 m_j^2 \right)^{1/2}$$

HOLMES

L'esperimento viene installato presso il laboratorio di Criogenia di Unimib

Oltre a Univ+INFN Mib , fanno parte della collaborazione:

- INFN Genova
- PSI (Svizzera)
- NIST (Boulder, (CO) USA)
- ILL (Francia)

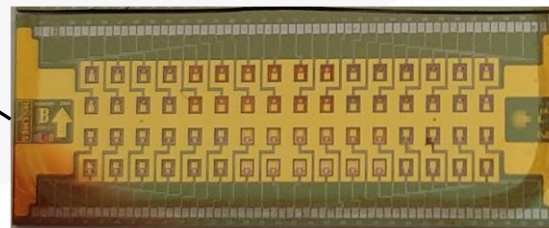
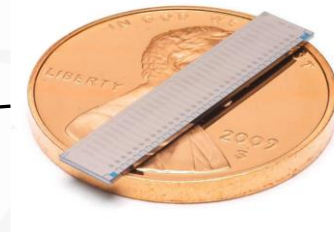
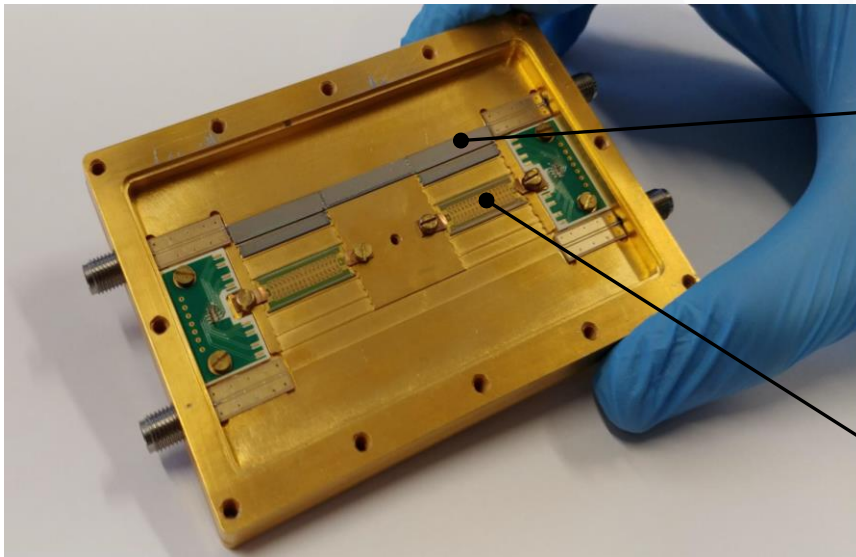
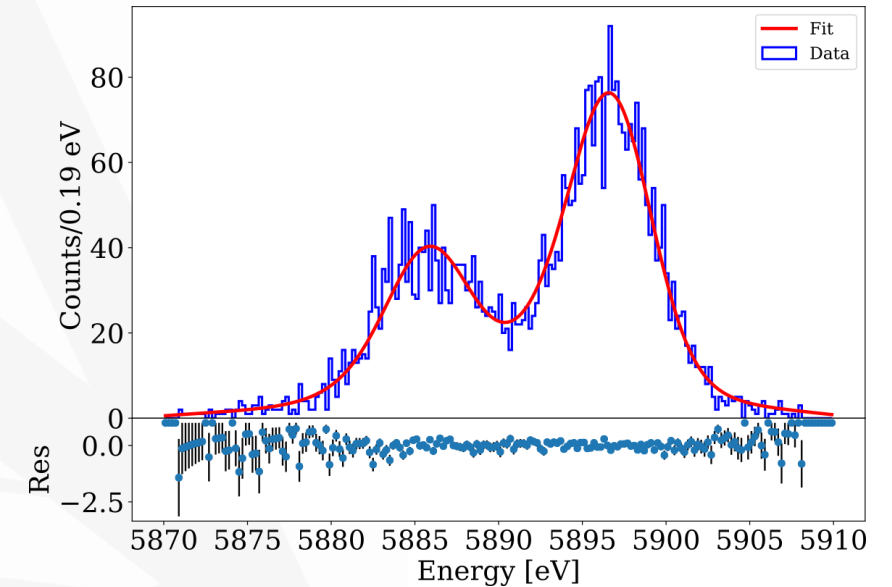


Proposte di tesi

M. Borghesi, M. Faverzani
E. Ferri, A. Giachero, A. Nucciotti

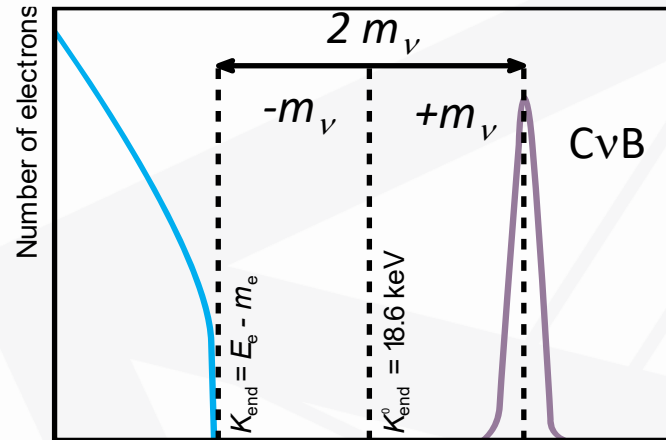
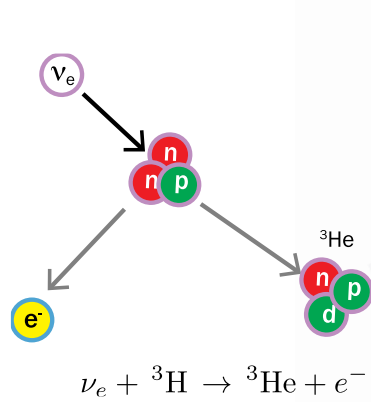
nei prossimi mesi sono attesi i primi rivelatori
impiantati con olmio!

- effettuazione misure con isotopo
- valutazione effetti attività olmio vs prestazioni rivelatore
- ottimizzazione algoritmo reiezione pile-up
- analisi dati per primo risultato su m_ν



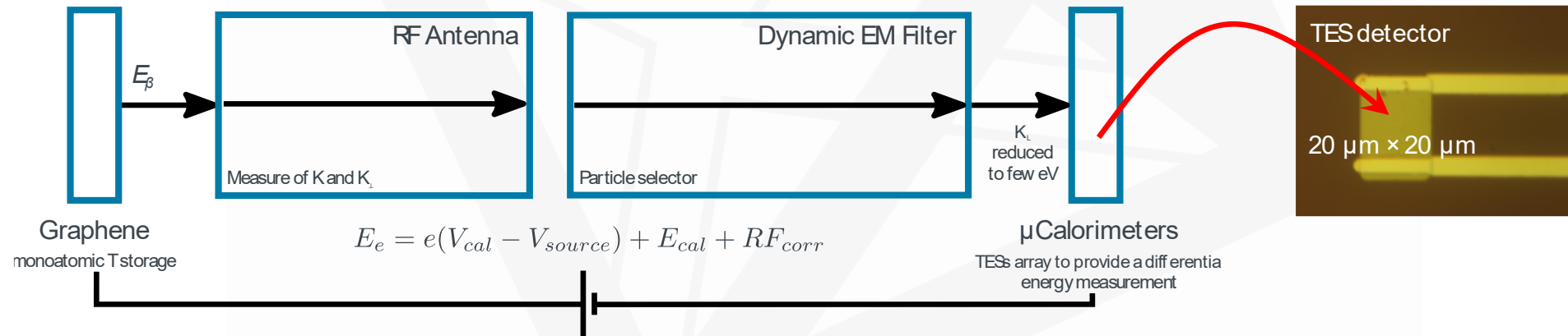
per info su proposte di tesi:
A. Nucciotti
angelo.nucciotti@mib.infn.it
M. Faverzani
marco.faverzani@mib.infn.it

Ricerca dei neutrini primordiali con PTOLEMY



P on-
T ecorvo
O bservatory for
L ight,
E arly-universe,
M assive-neutrino
Y ield

M. Borghesi, M. Faverzani
E. Ferri, A. Giachero, A. Nucciotti



- ottimizzazione sorgente di calibrazione (electron gun @ 20 mK)
- test dei rivelatori

Per info su proposte di tesi:
A. Nucciotti: angelo.nucciotti@mib.infn.it

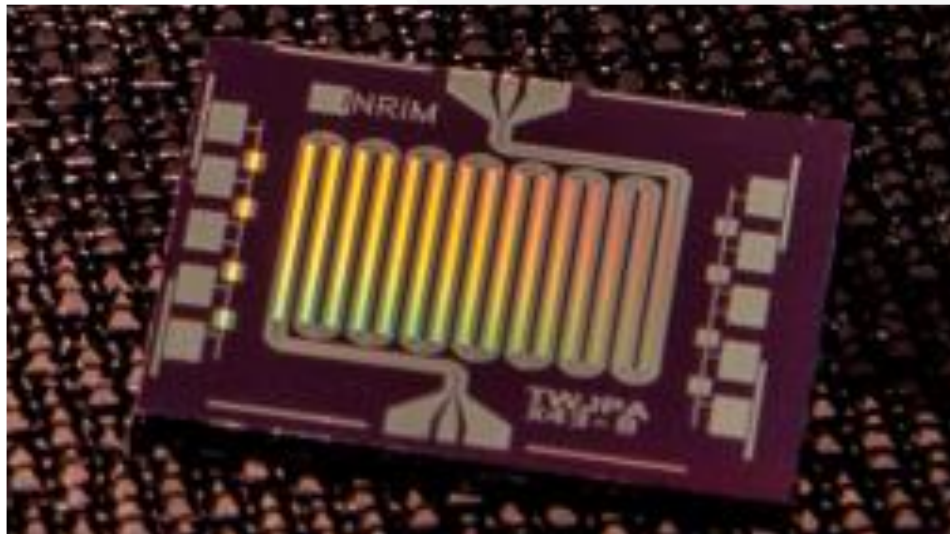
DARTWARS/tecnologie quantistiche

M. Borghesi, M. Faverzani
E. Ferri, A. Giachero, A. Nucciotti



DARTWARS

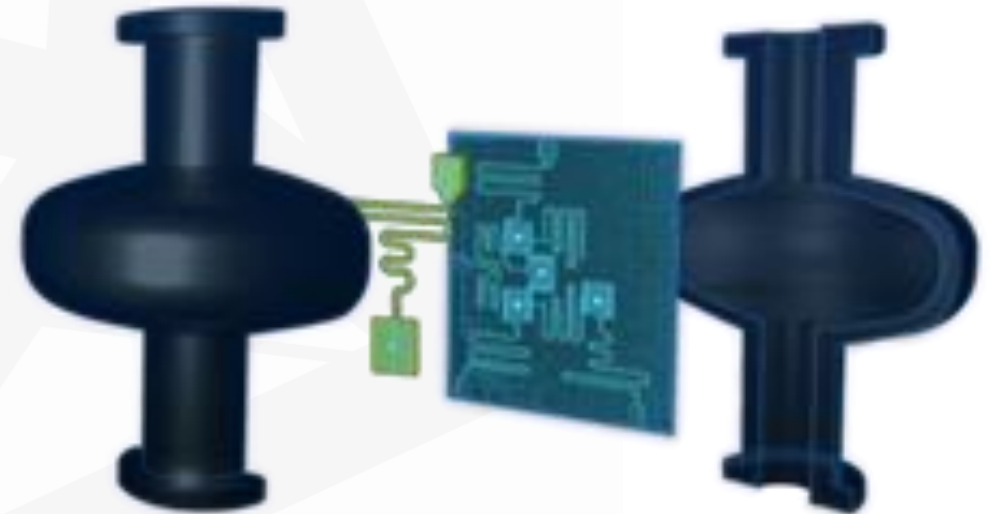
Sviluppo di linee di lettura innovative caratterizzate da ampia banda e rumore a livello quantistico



- progettazione e simulazione di amplificatori parametrici
- caratterizzazione amplificatori prodotti e dimostrazione read-out con matrici di rivelatori e qbit

Superconducting Quantum Materials & Systems

Computer quantistico con prestazioni di frontiera basato su tecnologie superconduttive presso Fermilab



- progettazione e caratterizzazione di una linea di lettura per qbits in ambiente criogenico
- studio e simulazione dei contributi radioattivi in un qbit superconduttivo

Per info su proposte di tesi: A. Giachero: andrea.giachero@mib.infn.it; E. Ferri: elena.ferri@mib.infn.it

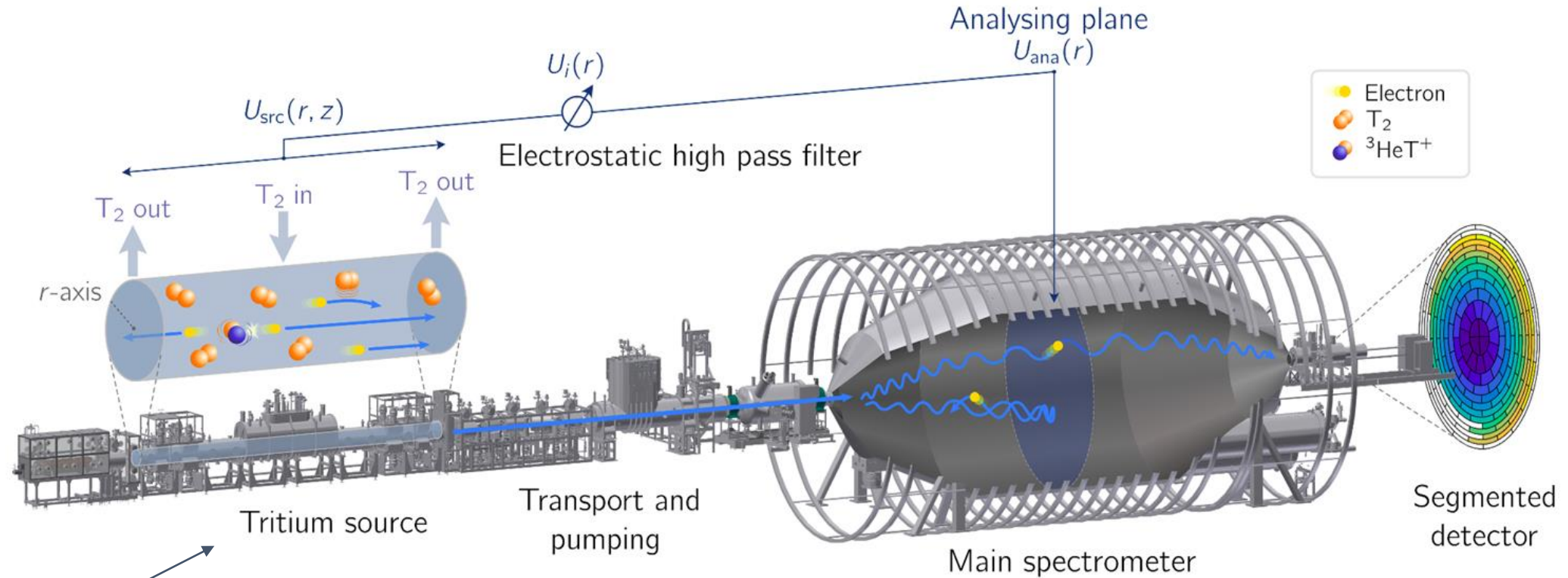
KATRIN e TRISTAN

- misura diretta di m_ν con approccio spettrometrico
 - ricerca ν_s



Misura diretta della massa del neutrino con KATRIN

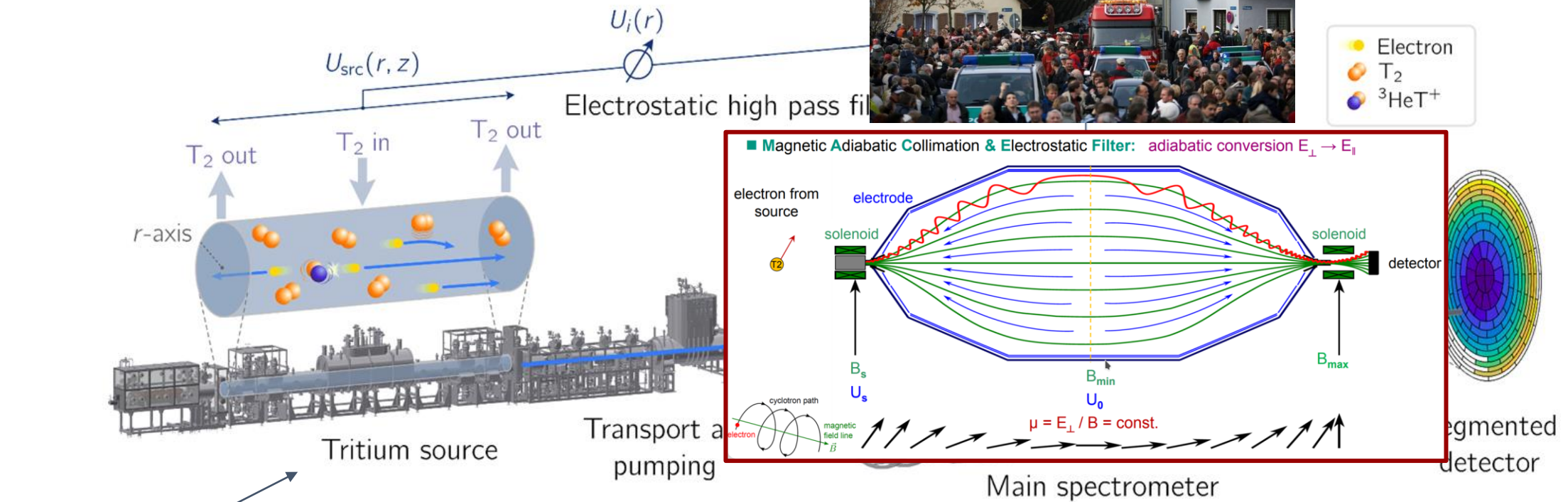
La deformazione è dell'ordine dell'eV → serve una risoluzione dello stesso ordine di grandezza



sorgente da 10^{11}
decadimenti s^{-1}

risoluzione energetica di 1eV data
dalla precisione con cui si setta il filtro
elettrostatico

Misura diretta della massa del neutrino con KATRIN

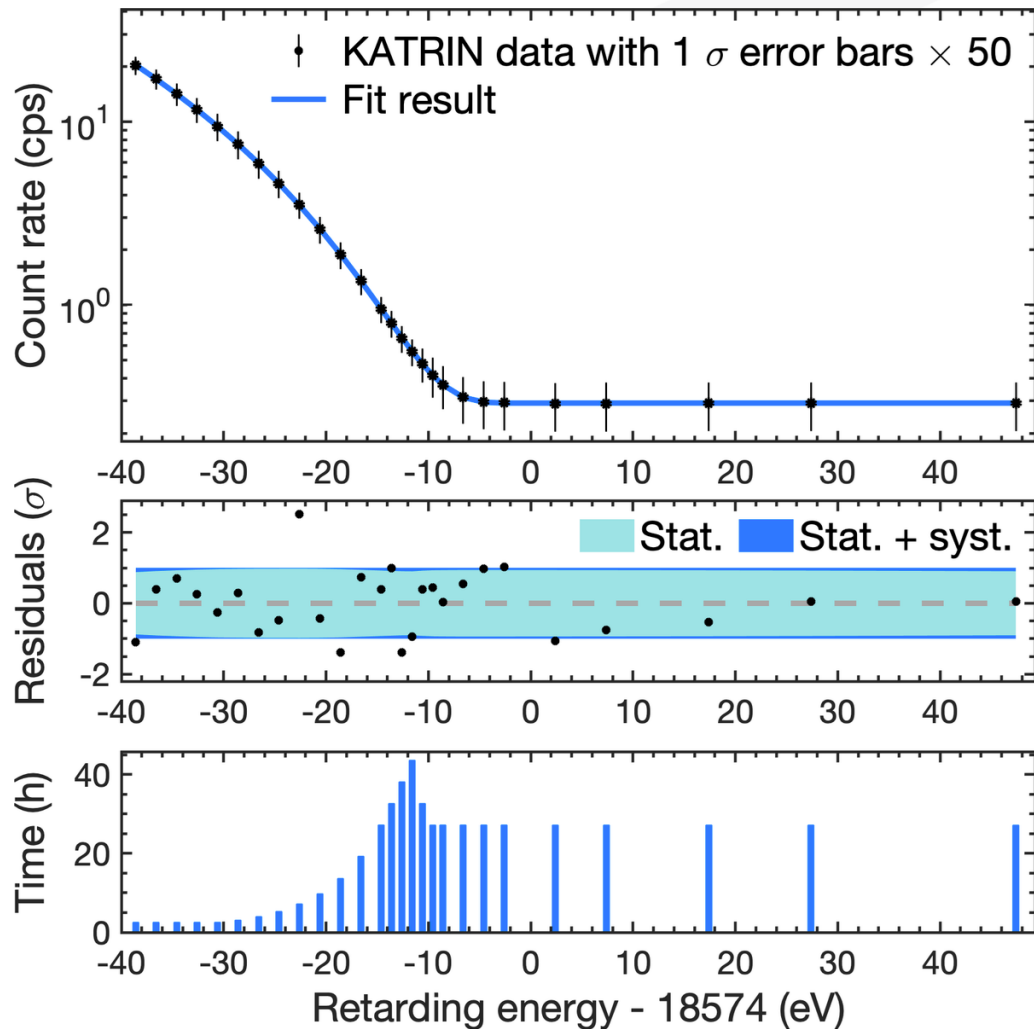


sorgente da 10^{11}
decadimenti s^{-1}

risoluzione energetica di 1eV data
dalla precisione con cui si setta il filtro
elettrostatico

Misura diretta della massa del neutrino con KATRIN

La deformazione è dell'ordine dell'eV → serve una risoluzione dello stesso ordine di grandezza



Spostando il valore del filtro elettrico e contando gli elettroni che passano il filtro si ottiene lo spettro integrale



Limite attuale sulla massa del neutrino

$$m_{\beta} < 0.8\text{eV}$$

TRISTAN: ricerca di neutrini sterili con KATRIN

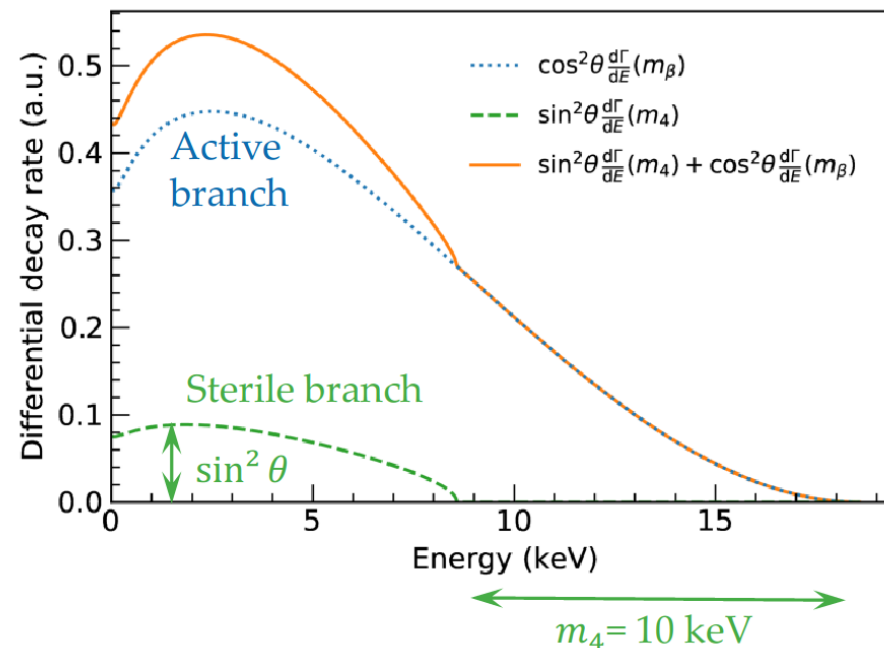
Il neutrino sterile è un ipotetico quarto neutrino che interagisce solo gravitazionalmente o tramite mixing con i tre neutrini attivi → può avere circa qualunque massa

→ se avesse massa nel range dei keV sarebbe un candidato per la materia oscura!

Nel decadimento β viene sempre emesso un (anti)neutrino elettronico, che poi si propaga in autostati di massa leggeri (“standard”) o in questo ipotetico quarto stato di massa

- se ciò succede, il corrispondente spettro viene troncato a $(Q-m_s)$
- questo spettro va poi a sommarsi con quello “standard” generando un kink

$$\frac{d\Gamma}{dE} = \cos^2 \theta \frac{d\Gamma}{dE}(m_\beta) + \sin^2 \theta \frac{d\Gamma}{dE}(m_4)$$



TRISTAN: ricerca di neutrini sterili con KATRIN

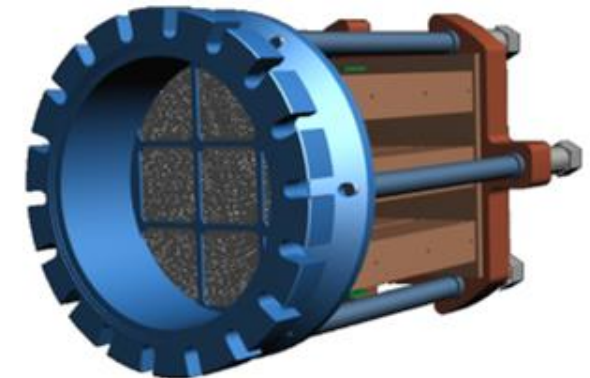
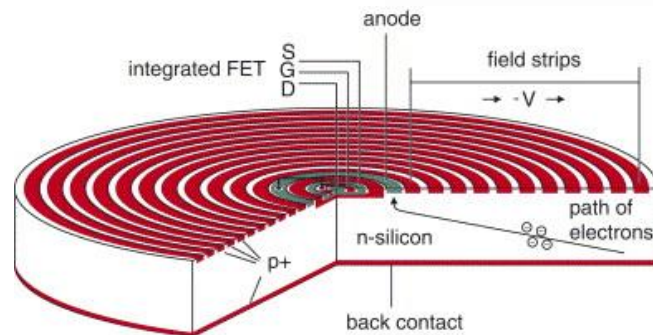
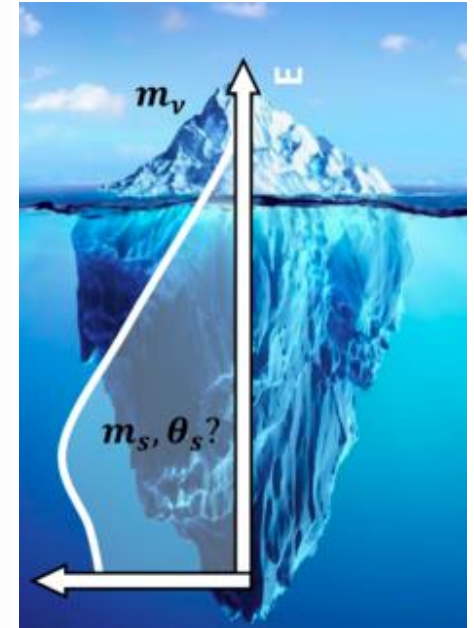
La deformazione non è più solo all'endpoint, può essere ovunque nello spettro

→ occorre **misurare tutto lo spettro**

Il filtro elettrostatico deve essere rimosso, arriveranno al detector molti più elettroni

→ serve un **detector più veloce** per reggere l'alto rate

Matrice di **Silicon Drift Detector (SDD)** → circa 1000 detector in totale



Proposte di Tesi Software

KATRIN

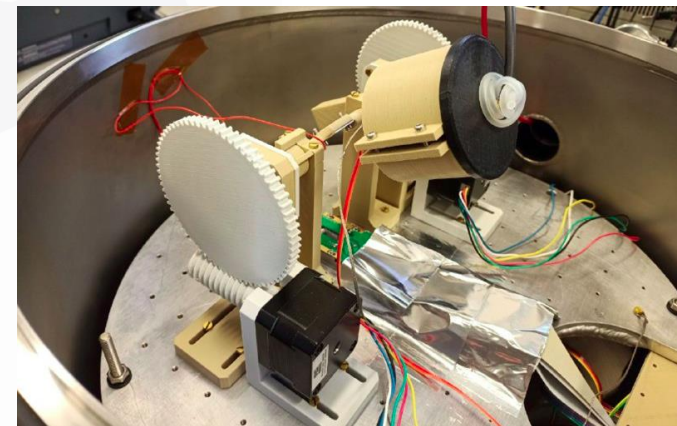
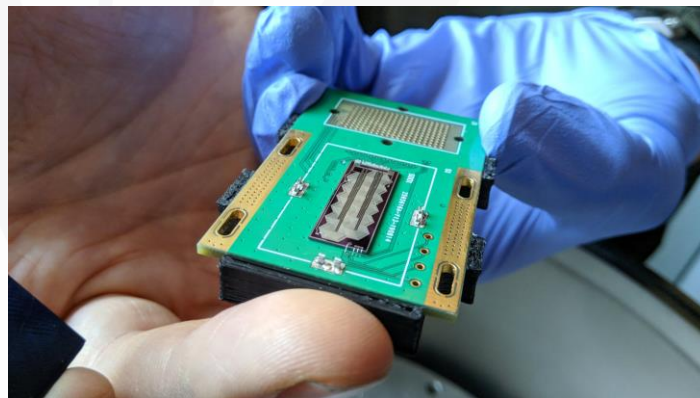
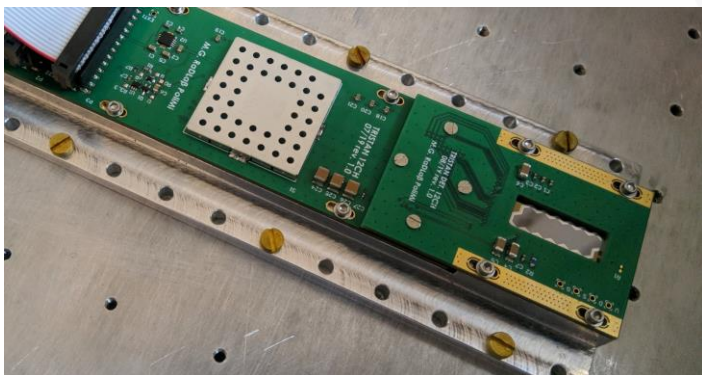
- simulazione in Geant4 della sorgente di Trizio di KATRIN
- simulazione in Geant4 del detector di KATRIN con focus sulla sistematica del backscattering e sul suo impatto sul limite alla massa del neutrino
- sviluppo di un programma per simulazioni ad alta statistica parzialmente basato su Geant4
- studi di sensibilità al neutrino sterile con focus sull'impatto della risposta di un SDD agli elettroni
- studi di sensibilità di TRISTAN alla fisica oltre il Modello Standard

TRISTAN

per maggiori info: **M. Biassoni** matteo.biassoni@mib.infn.it

Proposte di Tesi Hardware

- caratterizzazione della risposta di SDD agli elettroni mediante confronto tra simulazioni e misure raccolte utilizzando un electron-gun
- ottimizzazione del design di un electron-gun
- misure della probabilità di backscattering per diversi materiali con applicazioni a KATRIN e TRISTAN
- sviluppo di un setup sperimentale composto da un SDD e cristalli scintillanti letti da SiPM per misure di spettroscopia beta



per maggiori info: **M. Biassoni** matteo.biassoni@mib.infn.it



osservazione $0\nu\beta\beta$ con
rivelatori termici



osservazione $0\nu\beta\beta$ con
rivelatori termici e particle
identification

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

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

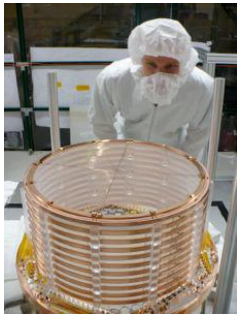


Decadimento doppio beta (DBD)

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

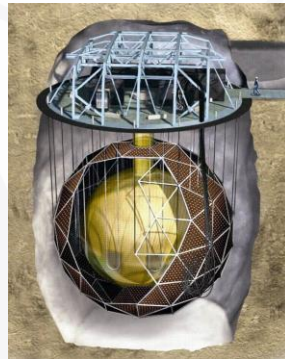
Esperimenti in tutto il mondo cercano il $0\nu\beta\beta$ su diversi isotopi:



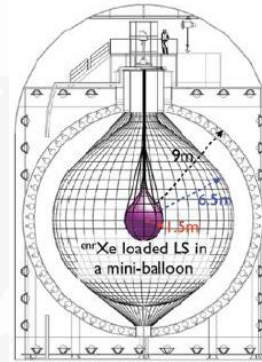
EXO/nEXO
(^{136}Xe)



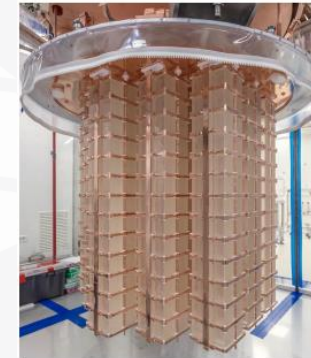
GERDA/LEGEND (^{76}Ge)



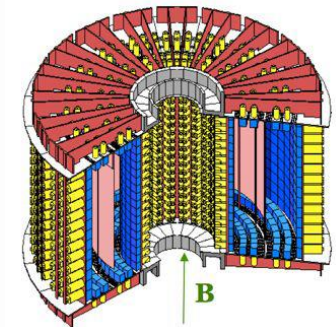
SNO+ (^{130}Te)



KamLAND-ZEN
(^{136}Xe)



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



NEMO (vari)

...

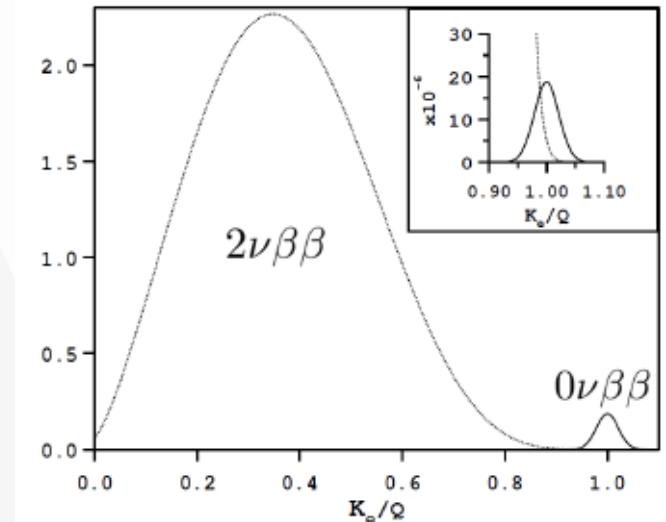
per info: Carla Cattadori
carla.cattadori@mib.infn.it

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 ν_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

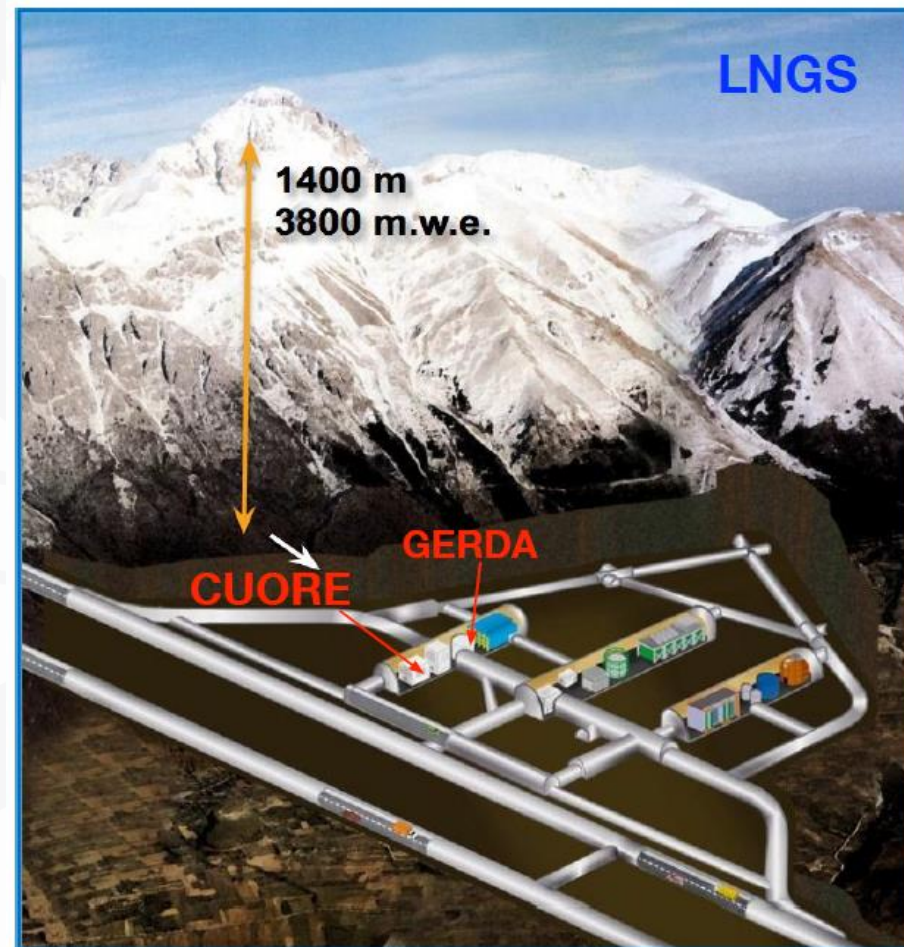
La radioattività ambientale può facilmente mascherare questi eventi e ridurre la sensibilità sperimentale; il suo effetto va ridotto quanto più possibile

- 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

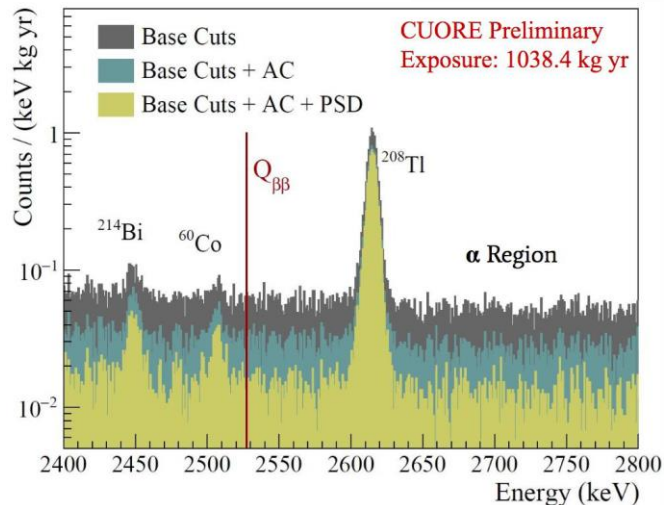


CUORE



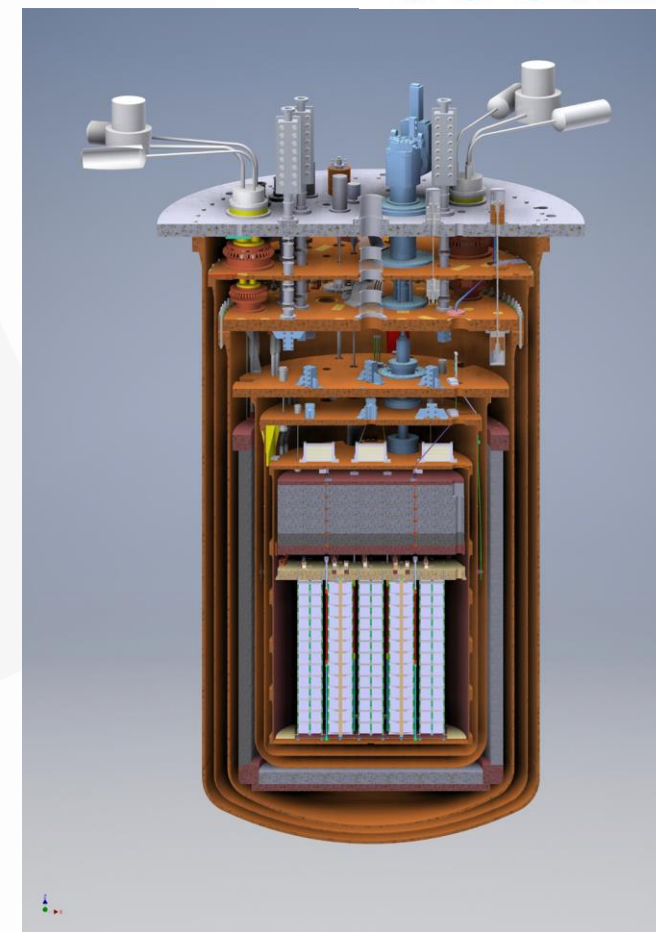
Ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te

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

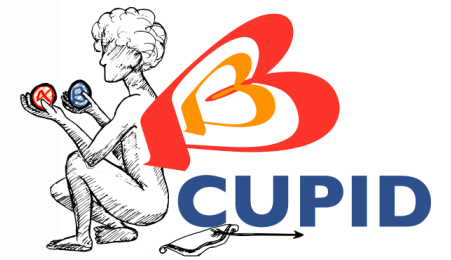


CUORE ha una massa molto elevata, ma poca capacità di distinguere il background

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



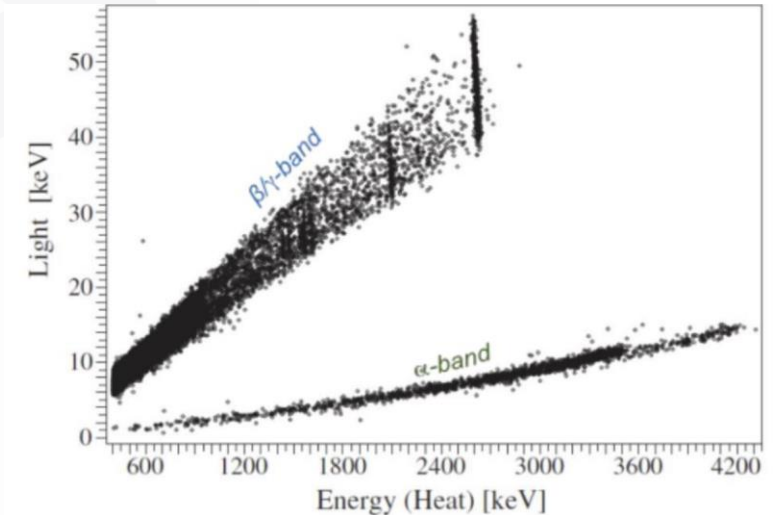
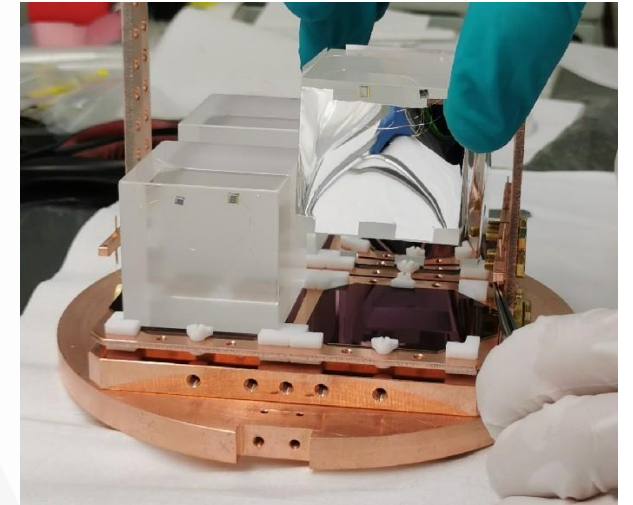
CUPID



CUPID: CUORE Upgrade with Particle IDentification

Assorbitore: ~ 1500 cristalli di Li_2MoO_4

- Isotopo 'bersaglio': ^{100}Mo (~ 250 kg)
 - Q-valore piú alto (3 MeV vs. 2.5 MeV ^{130}Te), background naturale piú 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



Proposte di tesi: CUORE & CUPID



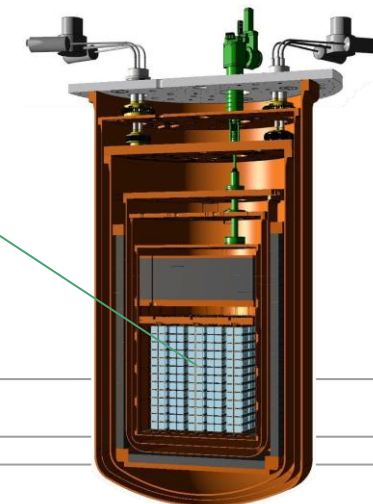
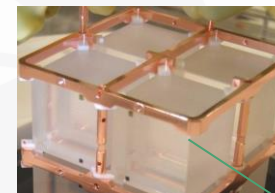
- $0\nu\beta\beta$ del $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{100}\text{Mo}$
- @LNGS
- bolometri a $T \sim 10$ mK
- Lab Criogenia @MiB
 - tecnologia nata qui
 - >30 anni di misure
 - ricco programma di R&D

- Sviluppo+test nuovi rivelatori bolometrici
- Misura contaminazioni radioattive materiali

- Caratterizzazione risposta rivelatori CUPID
- Modello fondo radioattivo CUORE & previsioni per CUPID
- Calibrazione CUORE: analisi dati & simulazione MC
- Algoritmi Machine Learning per studio pileup e rumore
- Eventi a bassa E: ricerca signature DM



attività sperimentale nel laboratorio di criogenia @MiB
possibili periodi di attività svolta presso LNGS



M. Biassoni, C. Brofferio, S. Capelli, D. Chiesa, O. Cremonesi, S. Dell'Oro, M. Girola, L. Gironi, I. Nutini, M. Pavan, S. Pozzi, E. Previtali, M. Sisti

Info x tesi: chiara.brofferio@unimib.it, luca.gironi@mib.infn.it