

# Tesi triennali in Fisica del Neutrino massa del $\nu$

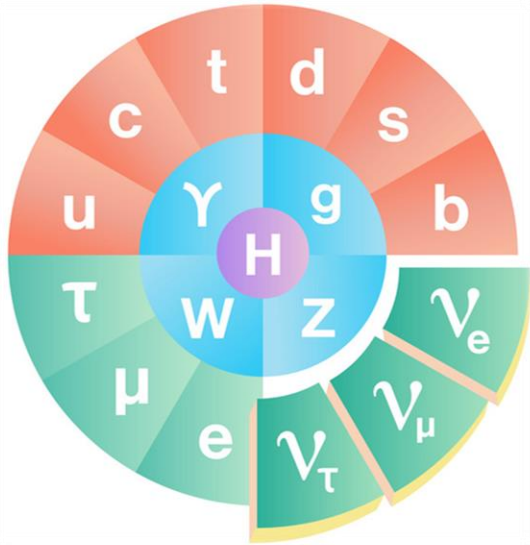
Mattia Beretta



Milano-Bicocca, 2024.01.23



# Cosa pensiamo di sapere: il Modello Standard



LEPTONI

QUARK

MASSA

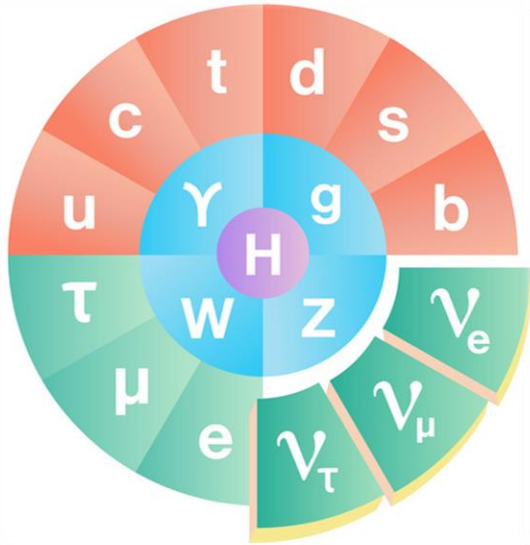
FORZE

NEUTRINI

$$m_\nu = 0$$

Solo interazione debole  
bassa probabilità di interazione

# Cosa pensiamo di sapere: il Modello Standard



## NEUTRINI

$$m_\nu = 0$$

Solo interazione debole  
bassa probabilità di interazione

**Rivelatori dedicati**

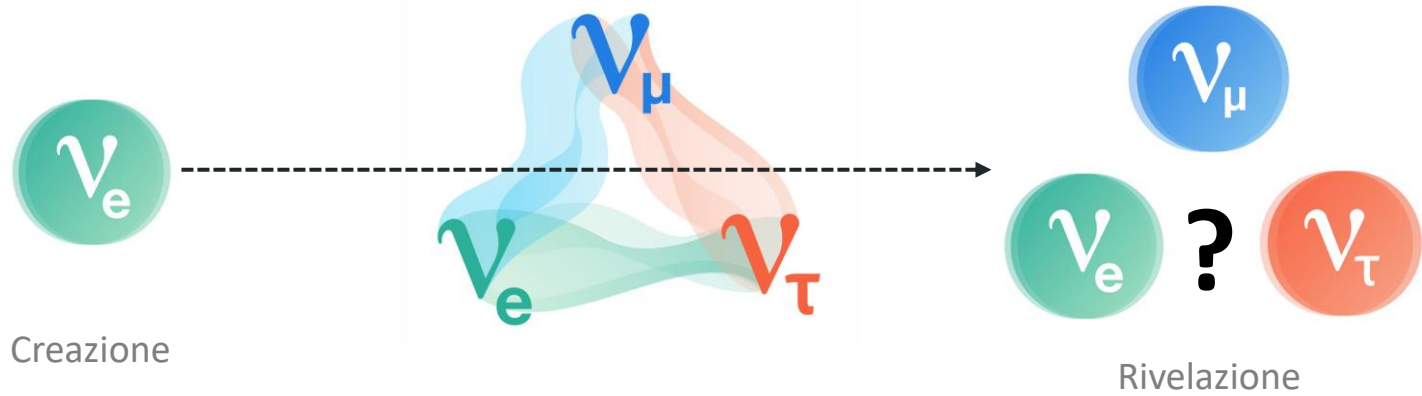
Sensibili

Grandi

**Energia mancante**

$$E_{\text{Misurata}} = E_{\text{Tot}} - E_\nu$$

# Cosa non è incluso: oscillazioni di sapore



Base di *sapore*  $\neq$  Base di *Massa*

i neutrini hanno massa  $\Rightarrow$  Non sono *standard*

# Neutrino: questioni aperte

## massa

Quanto vale?  
Perché è così piccola?  
Da dove viene?

## natura

Come li rappresento?

$$\nu \stackrel{?}{\equiv} \bar{\nu}$$

## Tipi

Sono solo 3?  
Neutrini non interagenti

# Neutrino: questioni aperte

## massa

Quanto vale?  
Perché è così piccola?  
Da dove viene?

## natura

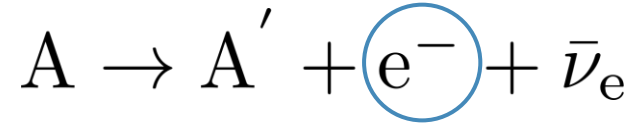
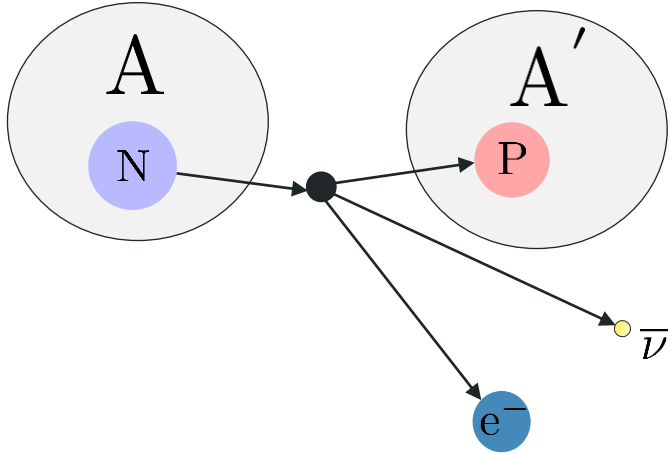
Come li rappresento?

$$\nu \stackrel{?}{\equiv} \bar{\nu}$$

## Tipi

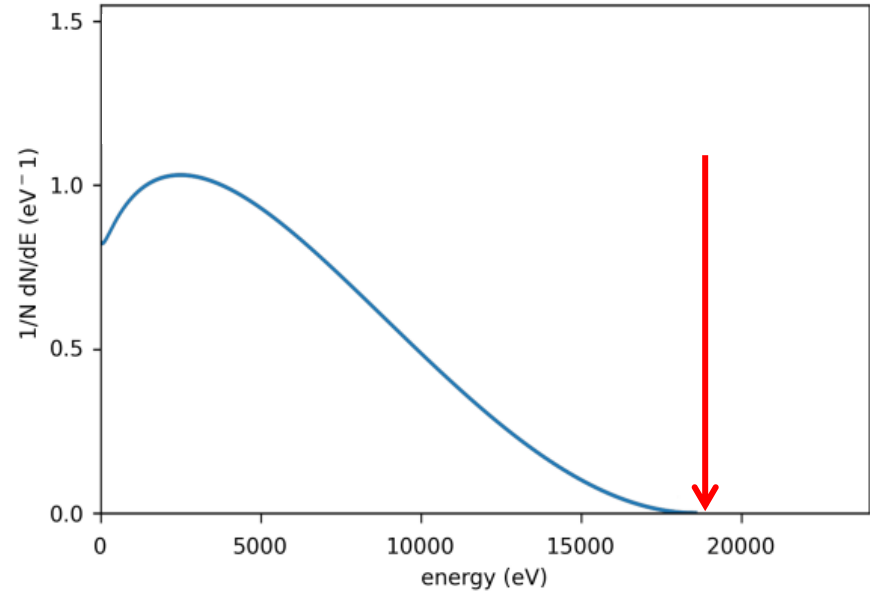
Sono solo 3?  
Neutrini non interagenti

# Misura diretta di $m_\nu$ : decadimento beta

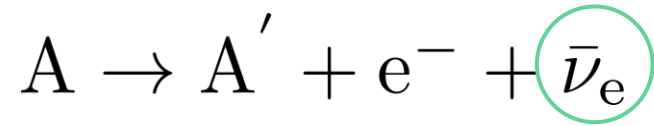
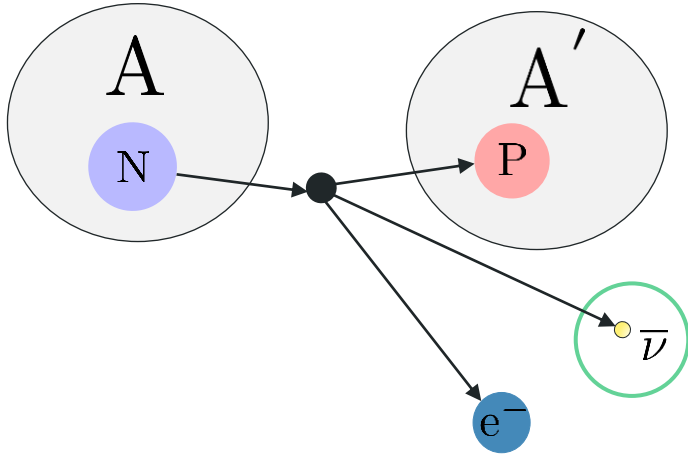


E di e<sup>-</sup> continua

Fino a  $E_{\max} = Q_{\text{val}}$



# Misura diretta di $m_\nu$ : decadimento beta

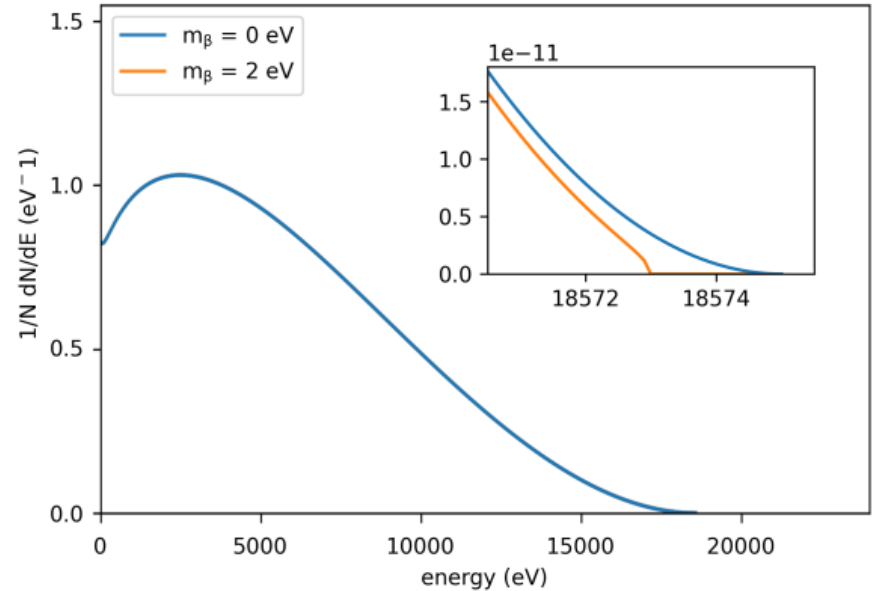


$m_\nu \neq 0$



$e^-$  non ha tutta l'energia

$$E_{\max} = Q_{\text{val}} - m_\nu$$





# Misura diretta di $m_\nu$ : HOLMES



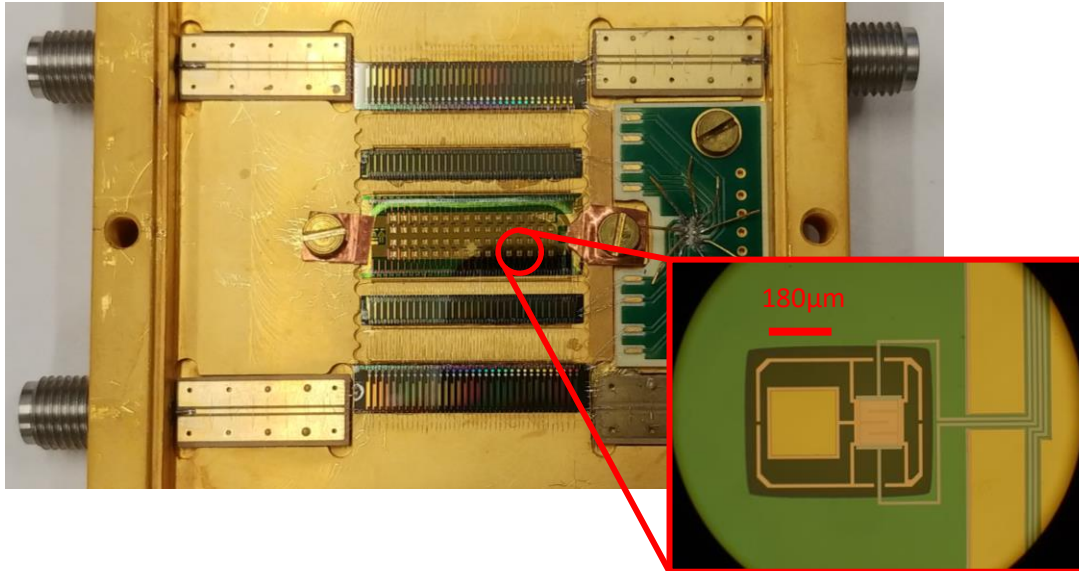
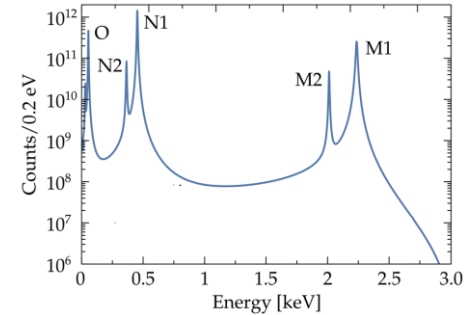
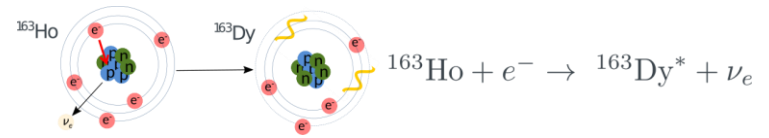
## Esperimento **in corso @MiB**

micro-calorimetri @ <100 mK

Sensori superconduttivi

$\beta \rightarrow$  Cattura  $e^-$

Vedo end-point amplificato



# Misura diretta di $m_\nu$ : HOLMES



## Esperimento **in corso @MiB**

micro-calorimetri @ <100 mK

Sensori superconduttivi

### Tesi sperimentali

- Sviluppo sorgente criogenica per calibrazione rivelatori a basse T
- Presa dati per misura di massa del  $\nu$

### Tesi analitiche

- Sviluppo software per analisi e discriminazione pile-up
- Sviluppo software simulazione segnali di micro-calorimetri TES

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani, E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

*Info x tesi:* [angelo.nucciotti@mib.infn.it](mailto:angelo.nucciotti@mib.infn.it) [marco.faverzani@mib.infn.it](mailto:marco.faverzani@mib.infn.it)

# Neutrino: questioni aperte

## massa

Quanto vale?  
Perché è così piccola?  
Da dove viene?

## natura

Come li rappresento?

$$\nu \stackrel{?}{\equiv} \bar{\nu}$$

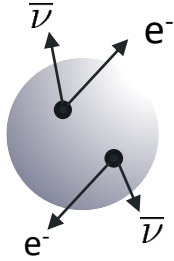
## Tipi

Sono solo 3?  
Neutrini non interagenti

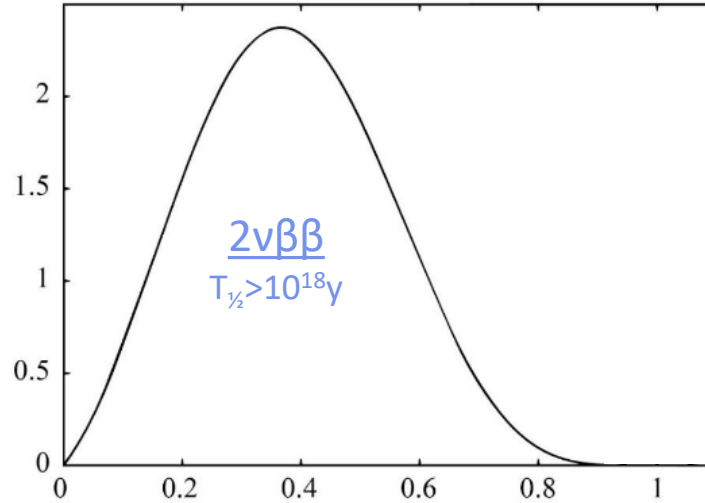
# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

Ovvero: la creazione di  $e^-$  nella materia

Processo standard:



Missing energy

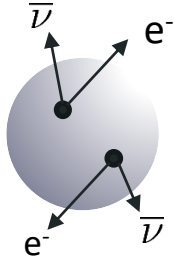


Somma delle energie dei due elettroni /  $Q_{val}$

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

Ovvero: la creazione di  $e^-$  nella materia

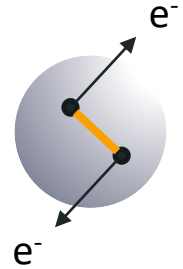
Processo standard:



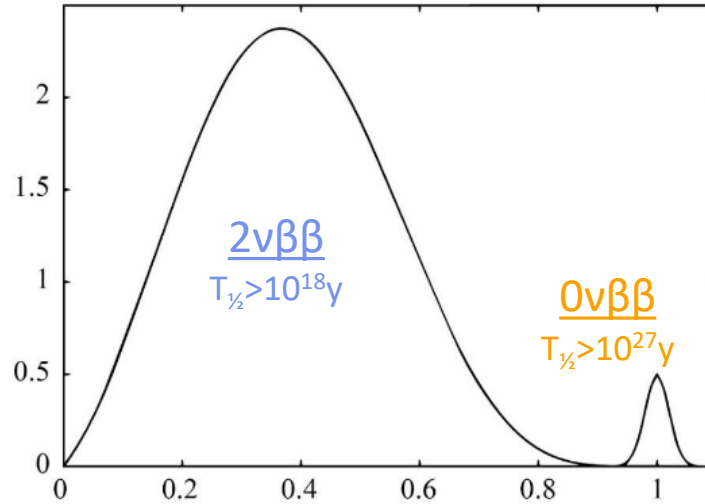
Missing energy

$$\nu \equiv \bar{\nu}$$

Variante non standard:



No missing energy

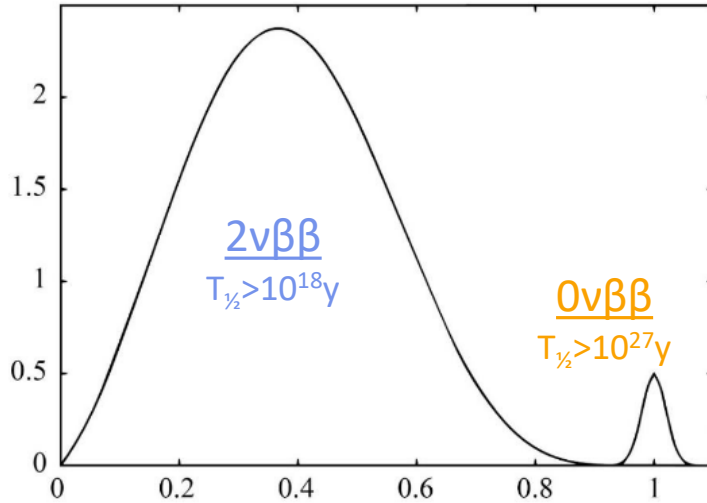
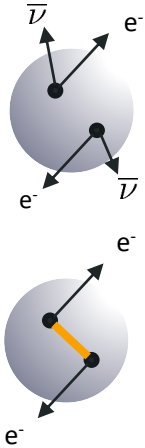


Somma delle energie dei due elettroni /  $Q_{val}$

Rate dipendente da “massa efficace” del  $\nu_e$

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

Ovvero: la creazione di  $e^-$  nella materia



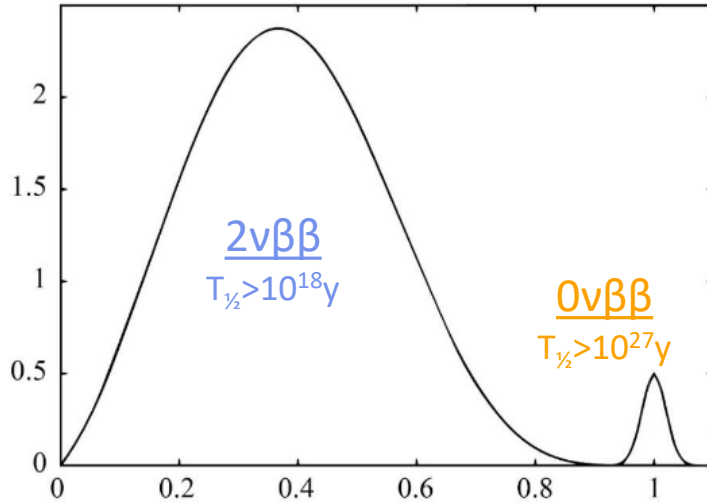
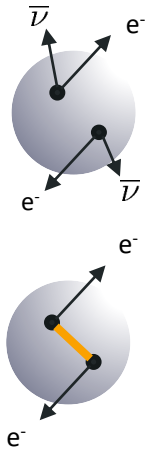
Somma delle energie dei due elettroni /  $Q_{\text{Val}}$

$T_{1/2}$  Lunghi  
Tanti ( $\sim$ ton) nuclei candidati  
Basso fondo

Ricerca di un picco  
Risoluzione energetica  $\sim$  ‰  $Q_{\text{Val}}$

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

Ovvero: la creazione di  $e^-$  nella materia

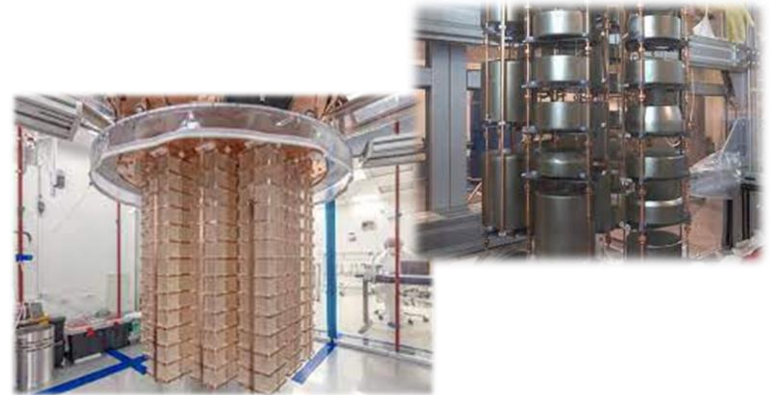


Somma delle energie dei due elettroni /  $Q_{Val}$

Rivelatori con molti moduli  
Analisi dedicate  
Laboratori sotterranei

$T_{1/2}$  Lunghi  
Tanti ( $\sim$ ton) nuclei candidati  
Basso fondo

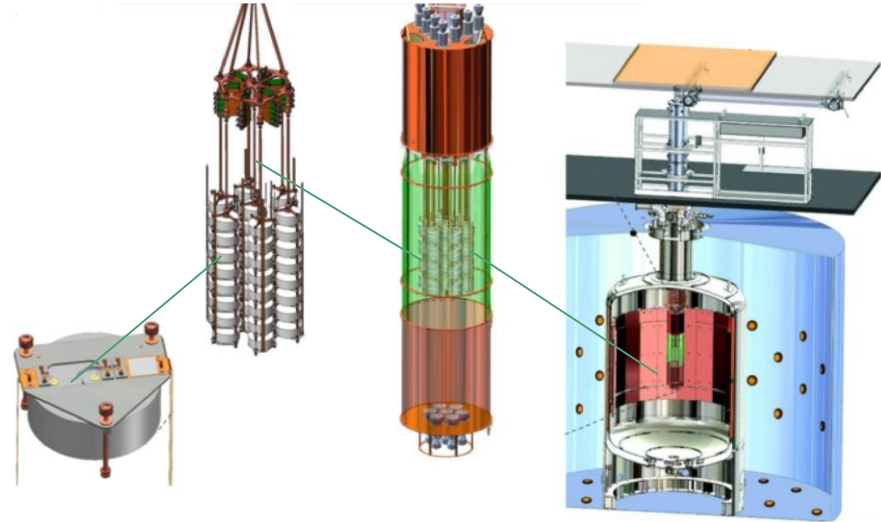
Ricerca di un picco  
Risoluzione energetica  $\sim$  ‰  $Q_{Val}$



# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ : LEGEND

LEGEND

$0\nu\beta\beta$  del  $^{76}\text{Ge}$   
@ Gran Sasso  
Rivelatori al Germanio



Array di HPGe

Veto Attivo scintillante



# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ : LEGEND



$0\nu\beta\beta$  del  $^{76}\text{Ge}$

@ Gran Sasso

Rivelatori al Germanio



- Algoritmi machine learning per identificazione rumore e studio della forma di impulso (MiB)
- Analisi dati da SiPMs per readout luce scintillazione Argon Liquido (MiB)
- Presa dati e preanalisi per LEGEND-200: statistiche e correlazioni multiparametriche (MiB e LNGS)
- Messa in funzione e presa dati di setup per la misura dell'efficienza di rivelazione del LAr neutron tagger (LARATmVeto) (MiB e LNGS).
- Partecipazione a test di qualificazione e accettazione dei nuovi rivelatori Ge per LEGEND-200 presso IRMM (MiB e Geel)

C. Cattadori, T. Tabarelli

*Info x tesi:* [carla.cattadori@lngs.infn.it](mailto:carla.cattadori@lngs.infn.it)

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ : CUORE e CUPID

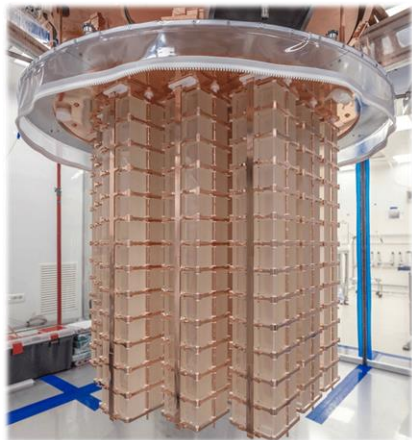
Rivelatori termici @ 10mK

Energia dall'aumento di temperatura

Tecnologia cresciuta @MiB



$0\nu\beta\beta$  del  $^{130}\text{Te}$   
@ Gran Sasso



988 rivelatori

$\text{m}^3$  più freddo  
dell'universo

In presa dati

# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ : CUORE e CUPID

Rivelatori termici @ 10mK

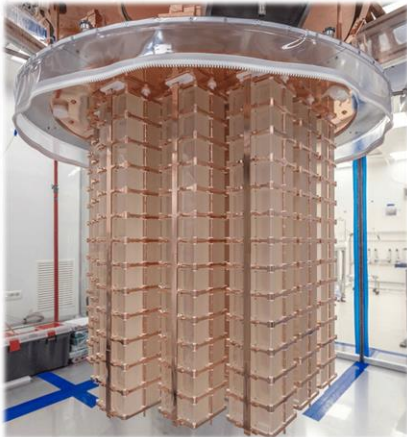
Energia dall'aumento di temperatura



$0\nu\beta\beta$  del  $^{130}\text{Te}$   
@ Gran Sasso



$0\nu\beta\beta$  del  $^{100}\text{Mo}$   
Cristalli scintillanti  
Anche luce!

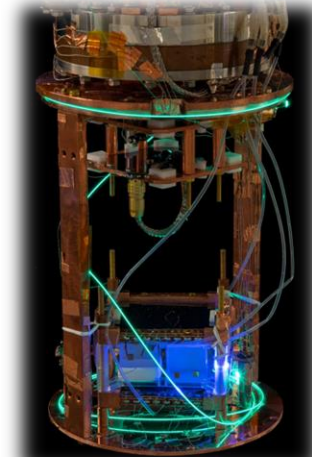


988 rivelatori

$\text{m}^3$  più freddo  
dell'universo

In presa dati

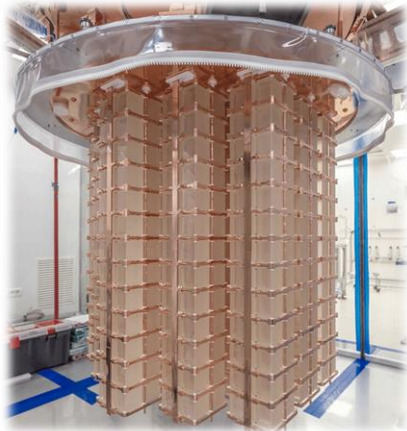
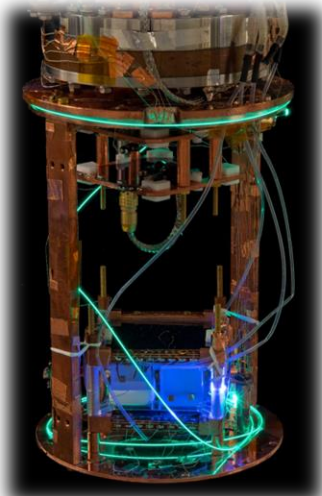
In progettazione  
R&D attivo @MiB



# Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ : CUORE e CUPID

Rivelatori termici @ 10mK

Energia dall'aumento di temperatura



- Sviluppo+test nuovi rivelatori calorimetrici
- Misura contaminazioni radioattive materiali
- Misure  $\gamma$  con HPGe, misure  $\alpha$  con rivelatori al Si
- 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

M. Biassoni, M. Beretta, 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

# Neutrino: questioni aperte

## massa

Quanto vale?  
Perché è così piccola?  
Da dove viene?

## natura

Come li rappresento?

$$\nu \stackrel{?}{\equiv} \bar{\nu}$$

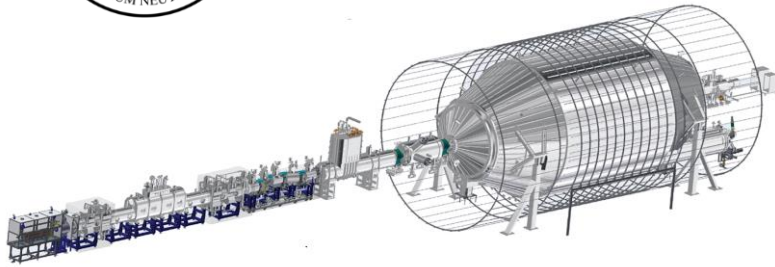
## Tipi

Sono solo 3?  
Neutrini non interagenti

# Misura diretta di $m_\nu$ : KATRIN



Decadimento  $\beta$  del  $^3\text{H}$   
Spettrometro  
Guardo attorno a  $E_{\text{Max}}$



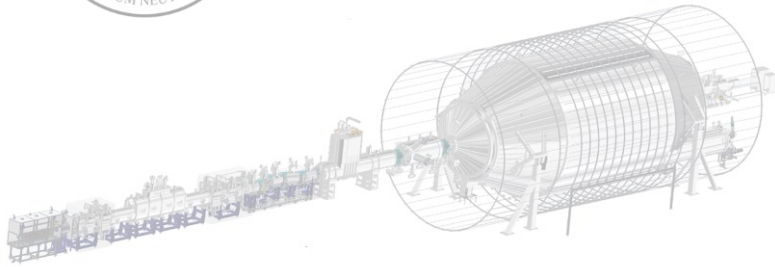
Miglior  
limite su  $m_\nu$

Strumento  
unico

# Misura diretta di $m_\nu$ : KATRIN



Decadimento  $\beta$  del  $^3\text{H}$   
Spettrometro  
Guardo attorno a  $E_{\text{Max}}$

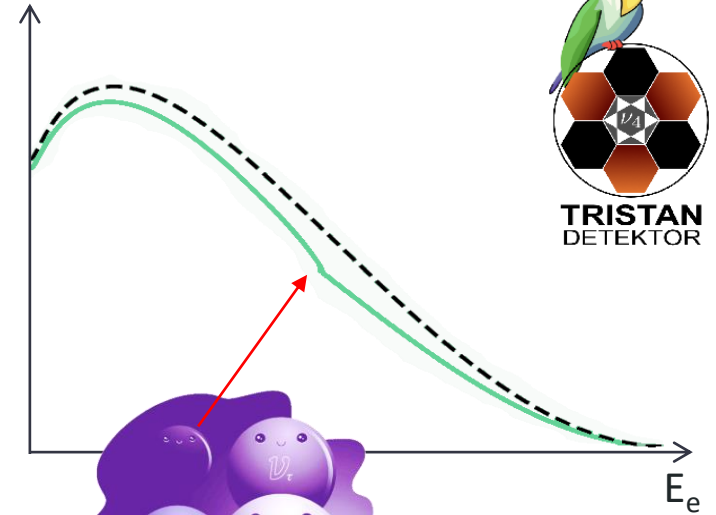


Miglior  
limite su  $m_\nu$

Strumento  
unico

# TRISTAN

Ricerca di  $\nu_{\text{sterili}}$   
deformazione in spettro  $\beta$   
Rivelatori SDD



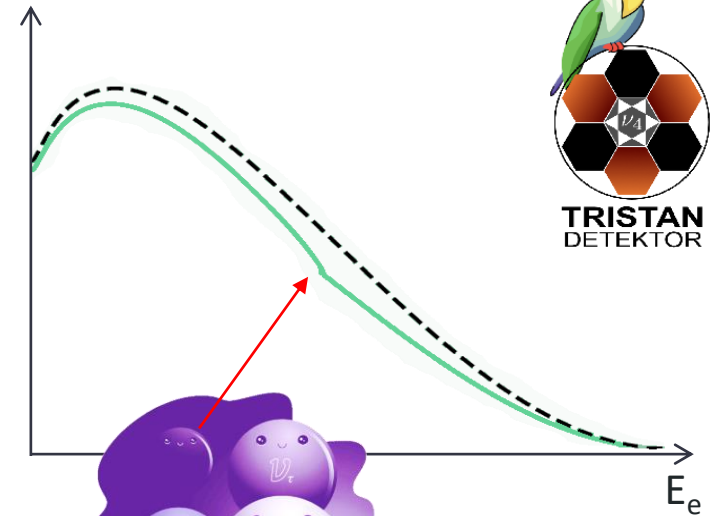
# TRISTAN

Ricerca di  $\nu_{\text{sterili}}$   
deformazione in spettro  $\beta$   
Rivelatori SDD

- Simulazione MC di KATRIN per fase TRISTAN
  - Simulazione per misura spettri  $\beta$ 
    - SDD + scintillatore
  - Studio sensibilità/analisi dati per TRISTAN
- Misure di Back-scattering
    - Diversa E, angolo e materiali
    - Confronto con simulazioni
  - Misura di spettri  $\beta$  con SDD
    - Confronto con simulazioni

M. Biassoni, O. Cremonesi, A. Nava, I. Nutini, M. Pavan, S. Pozzi

*Info x tesi:* [matteo.biassoni@mib.infn.it](mailto:matteo.biassoni@mib.infn.it)





# Neutrino: questioni aperte

massa



natura



Tipi



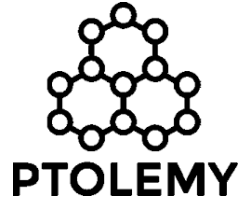
**H**  **LMES**



LEGEND 

Sviluppo di tecniche con varie applicazioni

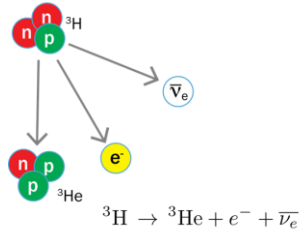
# Misura di $\nu$ primordiali: PTOLEMY



ricerca di  $\nu$  primordiali dal Big Bang

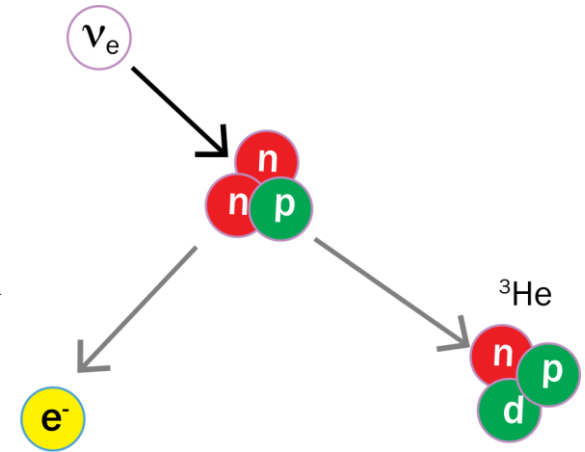
simili a CMB, ma disaccoppiati dopo  $\sim 1s$

i più numerosi... eppure i più difficili da misurare



$$\nu \rightarrow e^-$$

Sfrutto il decadimento  $\beta$  inverso

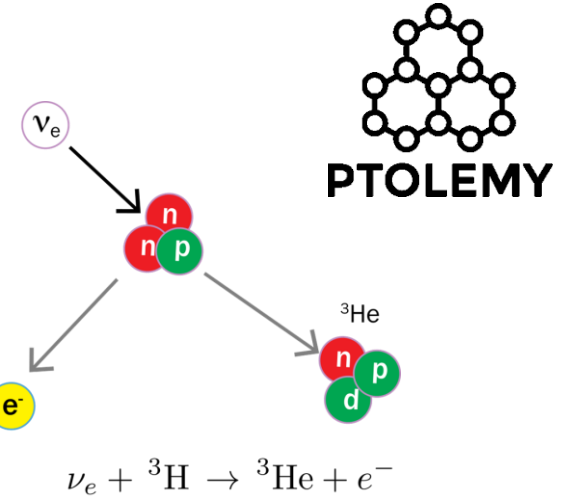


spettrometro + **rivelatori Superconduttivi**



# Misura di $\nu$ primordiali: PTOLEMY

Spettrometro  
+  
rivelatori Superconduttivi



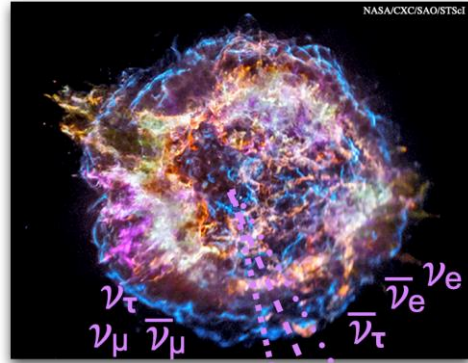
- Studio sensibilità PTOLEMY con approccio bayesiano
- Spettroscopia di elettroni con rivelatori criogenici
- Sviluppo software simulazione segnali di micro-calorimetri TES

A. Nucciotti, M. Borghesi, M. Faverzani, E. Ferri, A. Giachero, D. Labranca, L. Origo

*Info x tesi:* [angelo.nucciotti@mib.infn.it](mailto:angelo.nucciotti@mib.infn.it) [marco.faverzani@mib.infn.it](mailto:marco.faverzani@mib.infn.it)

# RES-NOVA

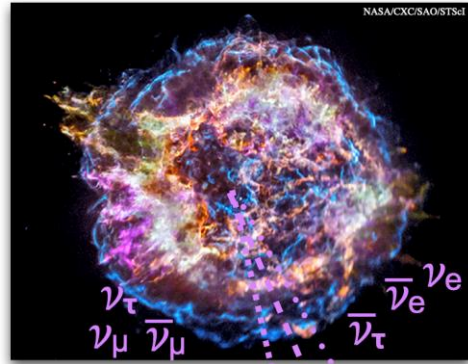
Rivelare neutrini da Supernova usando Pb archeologico



Sviluppare rivelatori criogenici (10 mK) prodotti utilizzando Pb Romano Archeologico

# RES-NOVA

Rivelare neutrini da Supernova usando Pb archeologico



Sviluppare rivelatori criogenici (10 mK) prodotti utilizzando Pb Romano Archeologico

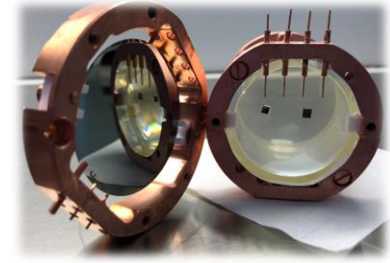
Rivelatore di neutrini tradizionale



Water Cherenkov detector

20 m

rivelatore di neutrini di RES-NOVA

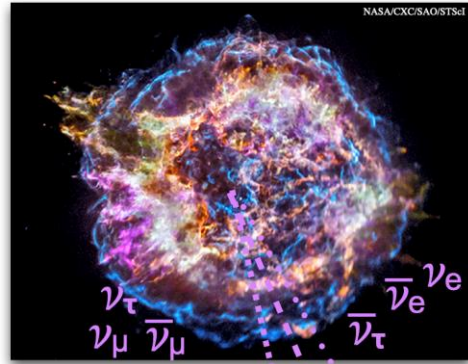


Archeo-PbWO<sub>4</sub> crystal

4 cm

# RES-NOVA

Rivelare neutrini da Supernova usando Pb archeologico



Sviluppare rivelatori criogenici (10 mK) prodotti utilizzando Pb Romano Archeologico

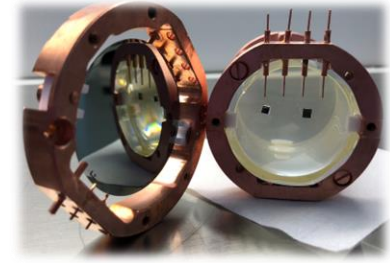
Rivelatore di neutrini tradizionale



Water Cherenkov detector

20 m

rivelatore di neutrini di RES-NOVA



Archaeo-PbWO<sub>4</sub> crystal

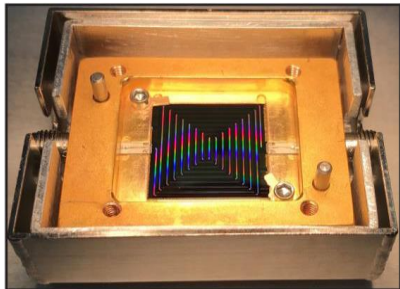
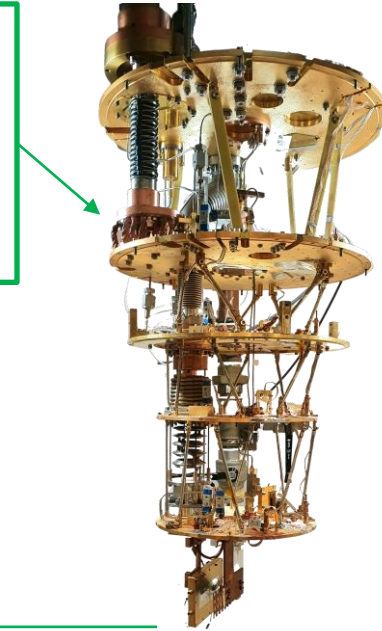
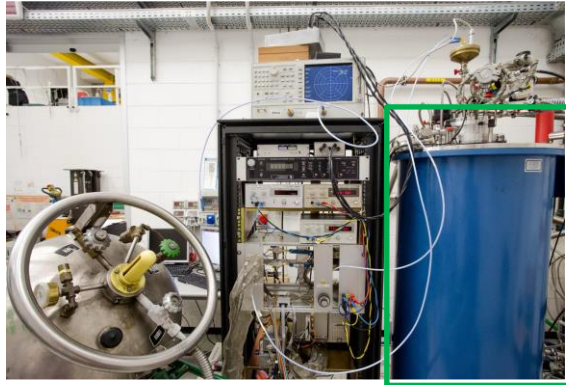
4 cm

- Caratterizzazione di campioni di Pb Archeologico (HP-Ge, X-ray)
- Misure di attivazione neutronica di campioni di Pb Archeologico
- Studio di attivazione cosmogenica di cristalli di Archeo-PbWO<sub>4</sub>

L. Pattavina, M. Clemenza

*Info x tesi:* [luca.pattavina@unimib.it](mailto:luca.pattavina@unimib.it)

# Nella pratica: QT nel solco delle particelle



Percorso di laurea dedicato a  
Tecnologie Quantistiche



Laboratorio di stato solido e  
tecnologie quantistiche

Utilizzo di tecniche della  
ricerca sulla massa del  $\nu$



# Quantum Computing: dalla ricerca all'applicazione

maggiori dettagli alla presentazione di fisica applicata

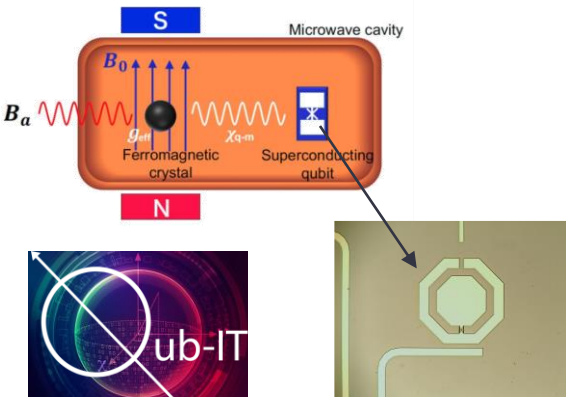
## Qub-IT:

Dark matter con q-bits  
Misura di singoli fotoni

- Simulazione di SC qbit
- Modello di risposta

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

*Info x tesi:* andrea.giachero@mib.infn.it



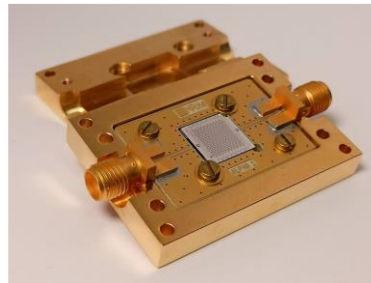
## DARTWARS:

Linee SC con alta banda e  
rumore quantico

- Simulazione/modello di amplificatore
- Caratterizzazione sperimentale

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

*Info x tesi:* andrea.giachero@mib.infn.it



## Simulazioni/algoritmi di QC

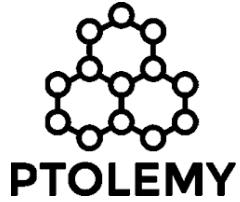
Utilizzo dei QBit

- Simulazione di QC
- Quantum error correction
- Quantum machine learning
- Quantum key distribution

A. Giachero, P. Govoni, A. Nucciotti, R. Moretti



**HOLMES**



Tante attività, per altrettante sfide