

# Fisica del Neutrino e ricerca correlata @ Unimib

Presentazione delle attività dei gruppi di ricerca in Fisica delle Astroparticelle e proposte di tesi

---

Andrea Giachero

[andrea.giachero@mib.infn.it](mailto:andrea.giachero@mib.infn.it)

Università e Sezione INFN di Milano-Bicocca

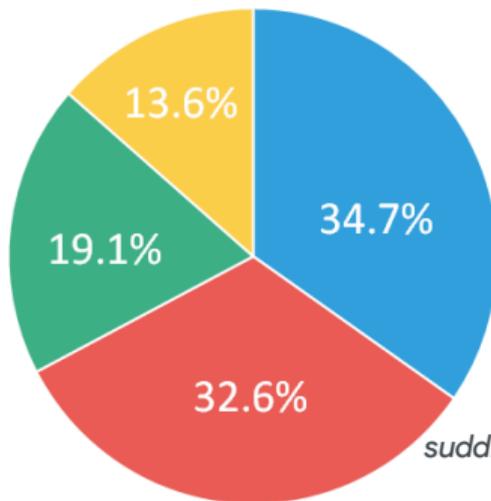


**CSN2**  
Fisica delle  
Astroparticelle



**CSN5**  
Ricerca  
Tecnologica

- Fisica del neutrino
- Radiazione dall'universo
- L'universo oscuro
- Onde gravitazionali, fisica generale e quantistica



*suddivisione delle risorse per le diverse linee scientifiche di pertinenza della CSN2 nel 2020.*

- Università di Milano-Bicocca ⇒ **lunga esperienza nello studio dei neutrini**  
⇒ **ruolo di leadership consolidato in grandi collaborazioni internazionali**

# 1930: il Neutrino nasce come idea

original - Photocopy of PCC 0393  
Abschrift/15.12.98 FM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930  
Oloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

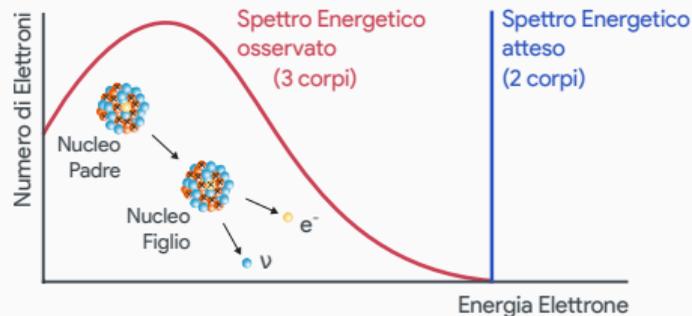
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
ansuhren bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich  
angesichts der "falschen" Statistik der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Kerne, sowie  
des kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrums auf einen verwinkelten Ausweg  
verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
welche den Spin  $1/2$  haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
sollte von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
jedenfalls nicht grösser als  $0,01$  Protonenmasse. Das kontinuierliche  
 $\beta$ -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim  
 $\beta$ -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert  
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron  
konstant ist.

Letter to Lise Meitner, 04/12/1930  
Pauli Letter Collection, CERN

- Nel 1930 W. Pauli introduce l'idea di una **particella elettricamente neutra** in una lettera aperta indirizzata ad una conferenza sulla radioattività

come un **tentativo disperato** per salvare una legge  
fondamentale della fisica: la conservazione dell'energia;

- Tre anni dopo, nel 1933, questa piccolissima particella fu  
ribattezzata **neutrino** da Enrico Fermi;  
(il neutrone fu scoperto nel 1932 da James Chadwick)

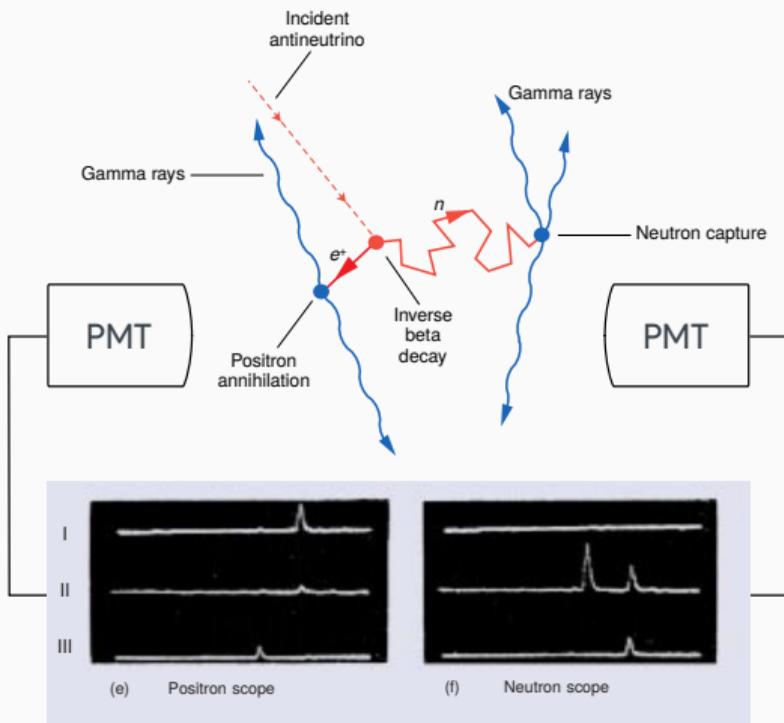


Se si fosse trattato di un decadimento a due corpi gli elettroni  
avrebbero dovuto essere monocromatici

## Approfondimenti

- **Neutrino invention** [symmetrymagazine.org](http://symmetrymagazine.org)
- **The neutrino turns 60** [symmetrymagazine.org](http://symmetrymagazine.org)

## 1956: dall'idea all'evidenza sperimentale



I have done a terrible thing.  
I have postulated a particle  
that cannot be detected



- C. Cowan e F. Reines decisero di sfruttare il decadimento beta inverso:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
- Installarono il loro rivelatore nei pressi del reattore di Savannah River (1956);
- L'esperimento prese dati per 5 mesi: 900 ore con il reattore alla massima potenza, e 250 ore con il reattore spento;
- Dopo 26 anni il (anti)neutrino fu misurato per la prima volta;  
*Detection of the Free Neutrino: a Confirmation*  
*Science* 124, 3212 (1956) pp. 103-104
- Questi importanti risultati valsero il premio Nobel per la Fisica a F. Reines nel 1995 (C. Cowan morì nel 1974);

**Perché così tanto tempo?:**

I neutrini interagiscono molto poco (interazione debole): sorgenti ad alta intensità e rivelatori di grande massa sono indispensabili.

### Approfondimenti

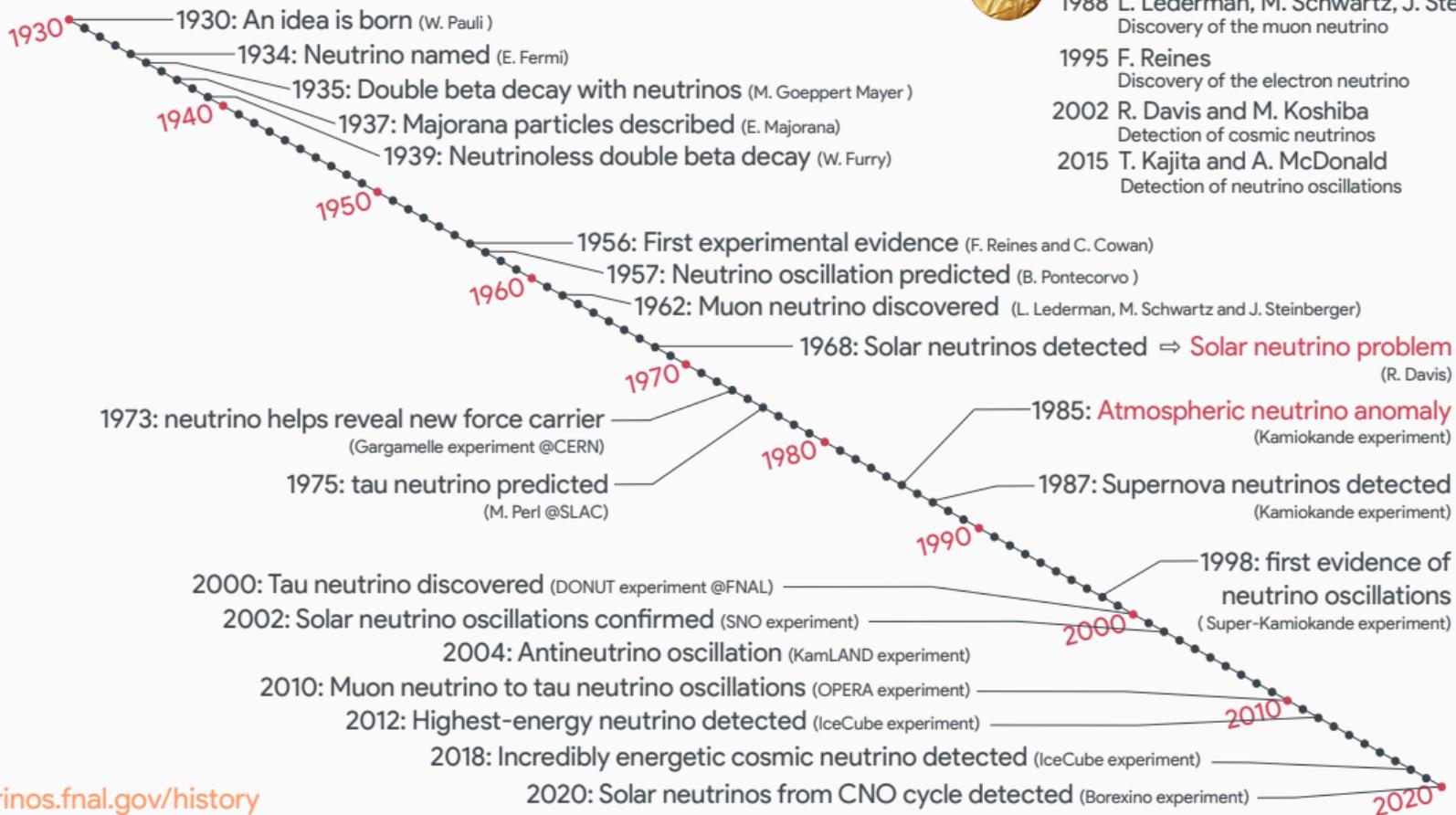
- [Ghosts in the machine](https://cerncourier.com) *cerncourier.com*

# La storia del neutrino: dal 1930 al 2020



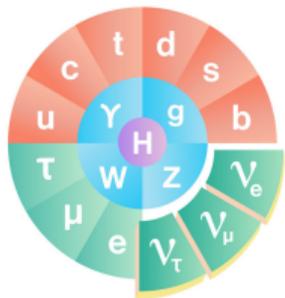
## Nobel Prize in Physics for Neutrinos

- 1988 L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger  
Discovery of the muon neutrino
- 1995 F. Reines  
Discovery of the electron neutrino
- 2002 R. Davis and M. Koshiba  
Detection of cosmic neutrinos
- 2015 T. Kajita and A. McDonald  
Detection of neutrino oscillations

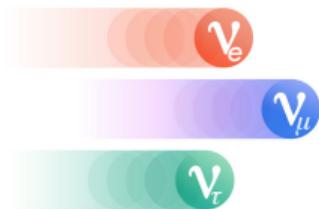


[neutrinos.fnal.gov/history](https://neutrinos.fnal.gov/history)

# Neutrino, cosa sappiamo



I neutrini sono particelle elementari

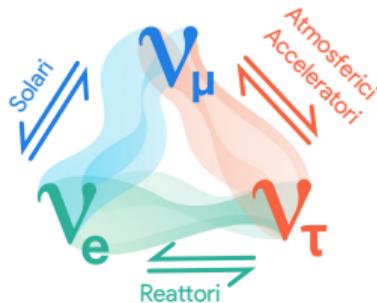


Si presentano in tre differenti sapori



60 miliardi di neutrini per  $\text{cm}^2$  per secondo

Sono tra le particelle più abbondanti in natura



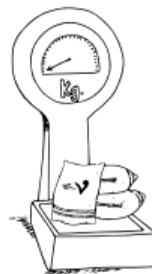
Possono oscillare tra un sapore e l'altro

What's a neutrino?  
[neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/](http://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/)



sezione d'urto  
 $10^{-43} \text{ cm}^2 @ 1 \text{ MeV}$

... ma le più elusive da misurare

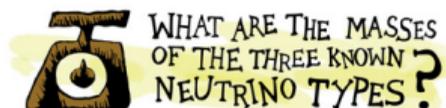


da 100 000 a 1 milione di volte inferiore a quella dell'elettrone

Sono le particelle più leggere in assoluto

# Neutrino, cosa non sappiamo

Neutrinos, the Standard Model misfits  
on [symmetrymagazine.org](http://symmetrymagazine.org)



Le differenze tra le masse sono misurate con estrema precisione

... ma è molto complicato misurarne il valore assoluto:  $m_\nu < 1.1 \text{ eV}$

Qual è il neutrino più leggero?

Una misura sempre più precisa della massa nel neutrino può aiutare nella formulazione dei modelli cosmologici



$$\nu \neq \bar{\nu}$$

Dirac Particle

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

Majorana Particle

Neutrino e antineutrino sono la stessa particella?

⇒ violazione del numero Leptonico

Neutrini e anti-neutrini si comportano in modo differente?

⇒ violazione della simmetria CP

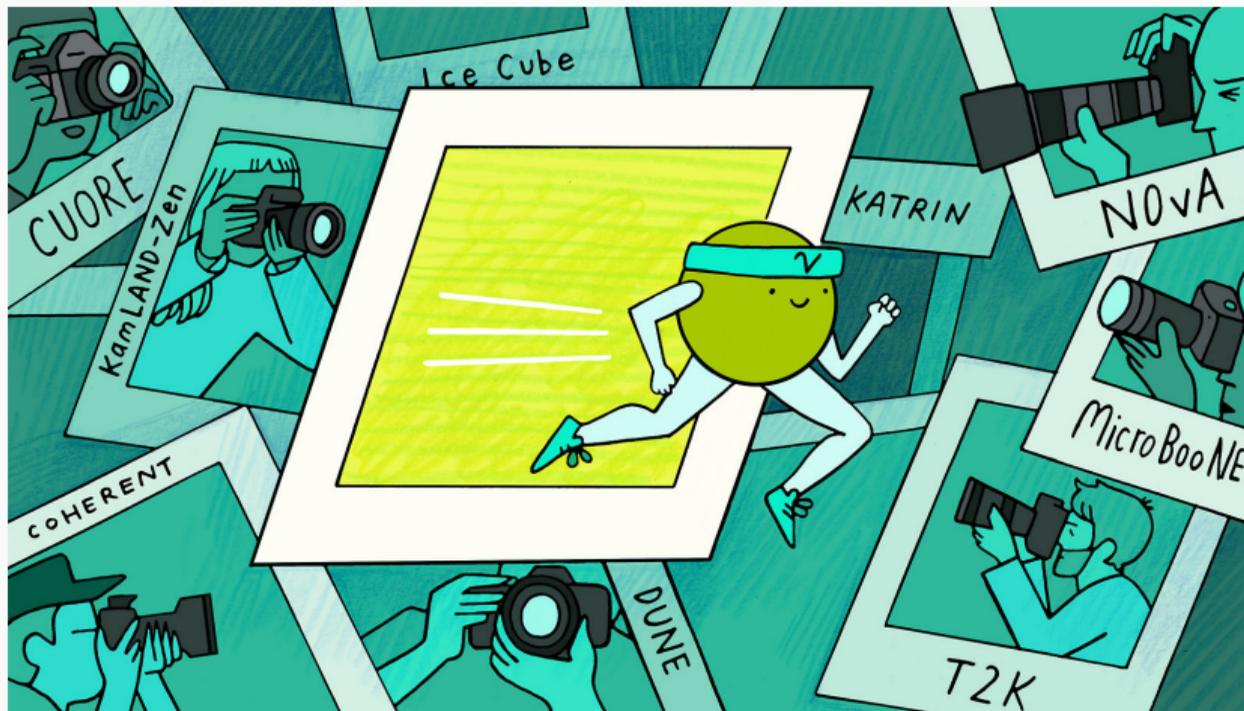


Esperimenti presso reattori suggeriscono che la quantità di neutrini prodotti è circa il 6% inferiore al numero predetto.

Potrebbe esistere un quarto sapore non attivo?

Questo neutrino "sterile" potrebbe essere il responsabile della materia oscura?

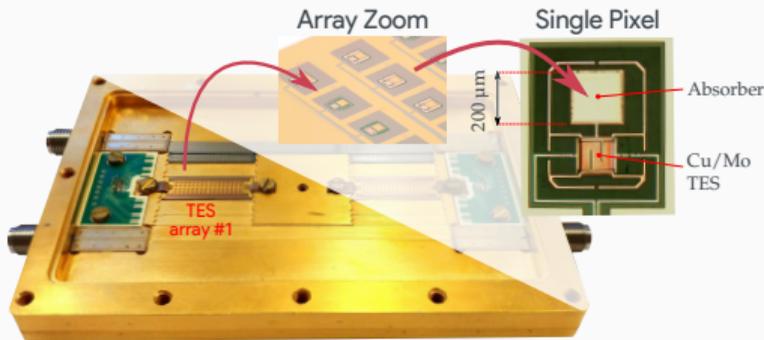
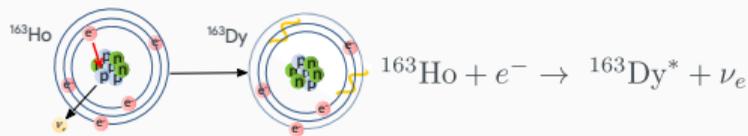
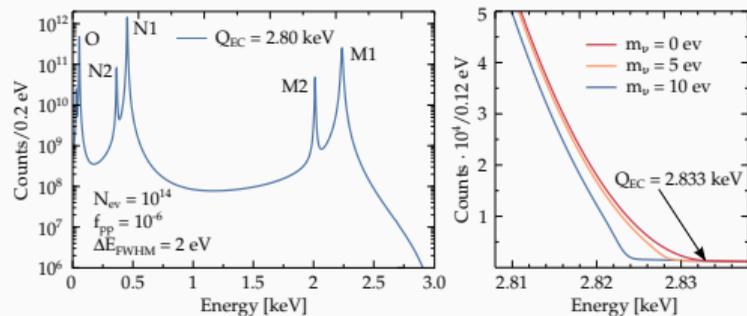
Gruppi di ricerca italiani, e di Bicocca, in prima fila nella caccia al neutrino: l'illustre sconosciuto



# Esperimenti sui Neutrini



## Misura della massa del neutrino attraverso lo studio dell'end-point di uno spettro di cattura elettronica



Rivelatori criogenici ( $T \sim 60$  mK) superconduttivi (TES) ad altissima risoluzione e letti con tecniche a microonde;  
Esperimento fisicamente svolto in Bicocca

- Microfabbricazione e ottimizzazione di rivelatori TES;
- Sviluppo di un sistema di lettura e multiplexing per matrici di micro-calorimetri;
- Sviluppo di algoritmi software per l'analisi e per la discriminazione del pile-up (SVD, Deep Machine Learning);
- Studio della sensibilità di esperimenti per la misura della massa del neutrino con approccio bayesiano;
- Studio del fondo di raggi cosmici e radioattività naturale (misura e Monte Carlo);

per informazioni sulle proposte di tesi  
[angelo.nucciotti@mib.infn.it](mailto:angelo.nucciotti@mib.infn.it)

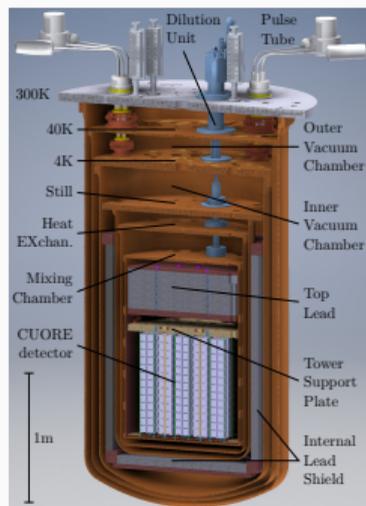
- Decadimento doppio beta con emissione di neutrini ( $2\nu\beta\beta$ ): osservato in diversi isotopi;
- Decadimento doppio beta **senza** emissione di neutrini ( $0\nu\beta\beta$ ): **mai osservato**  
 ⇒ se osservato **neutrino ed antineutrino sono lo stessa particella**;
- Sono decadimenti *rari* ⇒ sono necessari scudi naturali e artificiali per non confonderli con fenomeni più attivi;



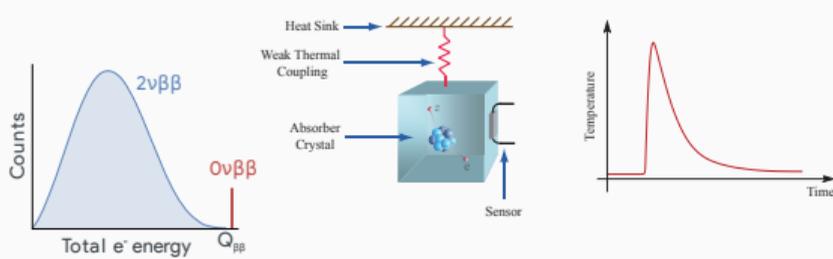
Esperimento all'interno della montagna

Temperatura criogenica  $T > 20$  mK

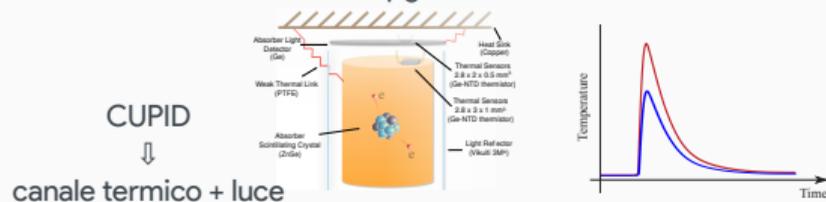
## Cryogenic Underground Observatory for Rare Events



## CUORE ⇒ solo canale termico



## CUORE Upgrade with Particle Identification



CUPID

canale termico + luce

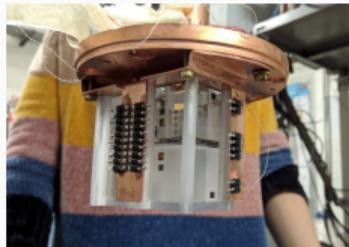
**Discriminazione tra elettroni e particelle**  
 ⇒ producono quantità di luce diversa;

# Studio di decadimenti nucleari rari: sviluppo di rivelatori

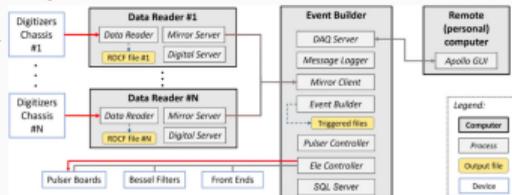
Rivelatori criogenici per fisica delle particelle: **costruzione, studio e comprensione**

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

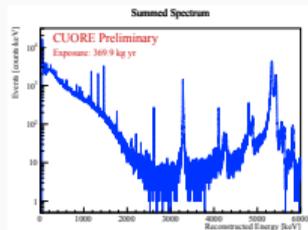
## Costruzione



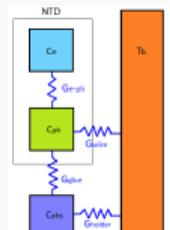
## Acquisizione dati



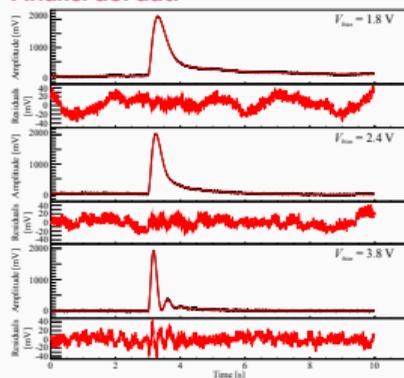
## Studio di canale di Fisica



## Modello fisico



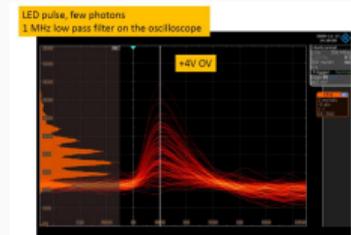
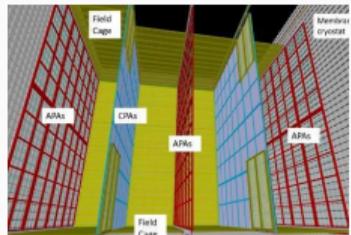
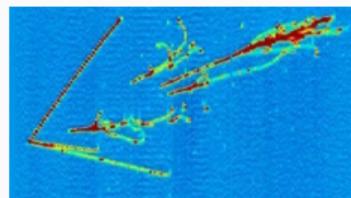
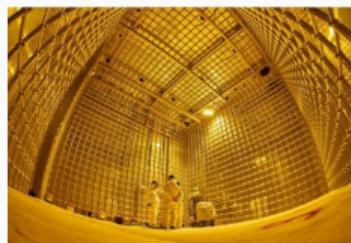
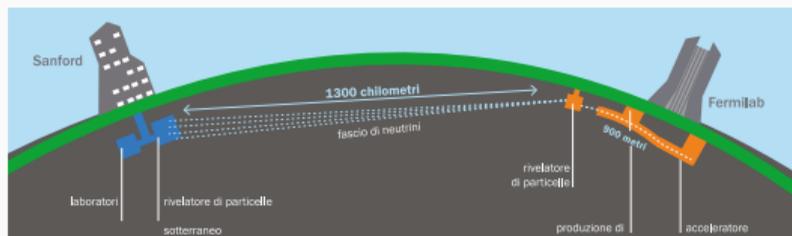
## Analisi dei dati



- Realizzazione e studio della funzione di risposta di nuovi rivelatori;
- Analisi dati e sviluppo algoritmi (reiezione del pile-up, correlazione tra eventi sismici e rumore vibrazionale);
- Analisi dati e simulazioni (background CUORE e CUPID-0 e proiezioni a CUPID);
- Identificazione di contaminazioni radioattive localizzate o asimmetriche nel setup di CUORE;

per informazioni sulle proposte di tesi  
[chiara.brofferio@mib.infn.it](mailto:chiara.brofferio@mib.infn.it) (CUORE)  
[luca.gironi@mib.infn.it](mailto:luca.gironi@mib.infn.it) (CUPID)

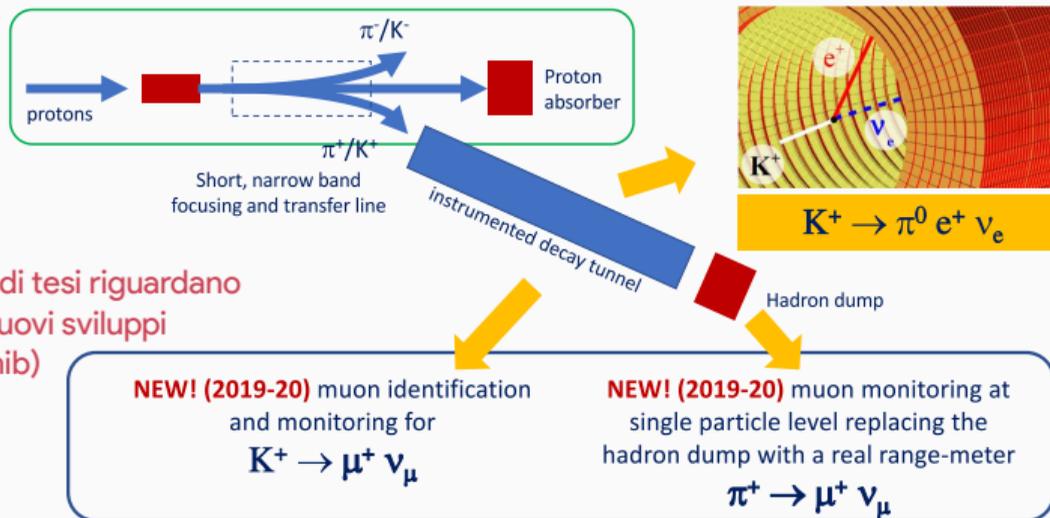
- Protoni su bersaglio: viene prodotto un fascio di neutrini intenso, di energia definita e collimato;
- I neutrini viaggiano su una distanza molto lunga: hanno tempo di “oscillare” da un tipo all’altro;
- Alcuni interagiscono con i rivelatori: è possibile misurare di che tipo sono e confrontarli con ciò aspettato;



- Sviluppo di rivelatori (fotosensori e ottica nel VUV a temperatura criogenica  $\sim 87$  K);
- Simulazione e analisi dei dati (GEANT4, tecniche bayesiane, analisi multivariate, machine learning);
- Test su fascio al CERN e analisi dei dati.

per informazioni sulle proposte di tesi  
[francesco.terranova@unimib.it](mailto:francesco.terranova@unimib.it)

- Da un'idea di Unimib è nata una collaborazione Italiana che ha dato luogo a un progetto CERN;
- Nei decadimenti in cui viene prodotto il neutrino ha origine anche un leptone;
- Contando i leptoni prodotti è possibile ottenere il numero di neutrini nel fascio;



- Sviluppo di rivelatori ad alta risoluzione temporale e resistenti alla radiazione (rad-hard);
- Simulazione e analisi dei dati (GEANT4, tecniche bayesiane, analisi multivariate, machine learning);
- Test su fascio al CERN e analisi dei dati.

per informazioni sulle proposte di tesi  
[francesco.terranova@unimib.it](mailto:francesco.terranova@unimib.it)

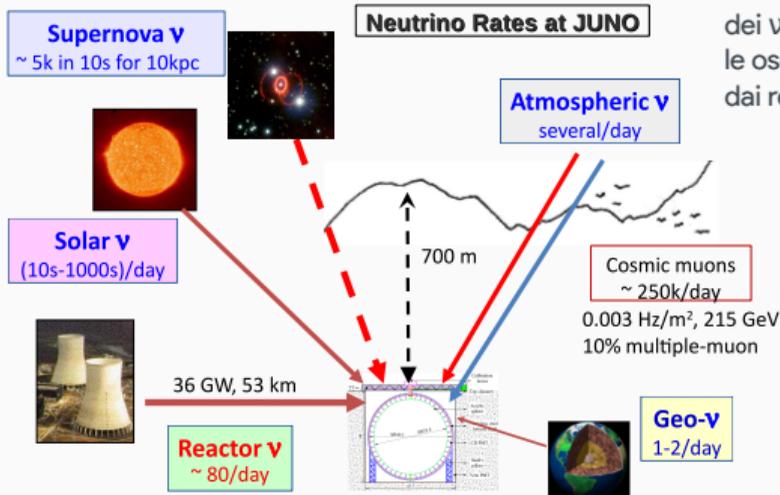
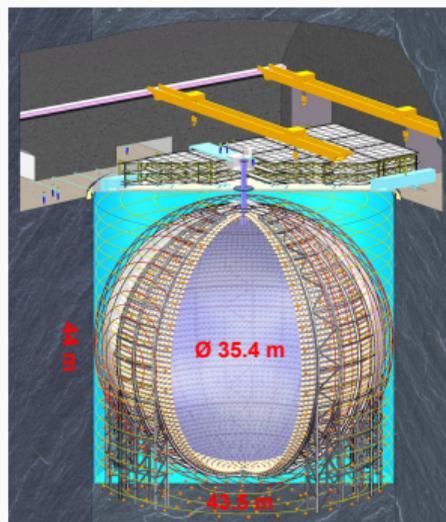
# Il più grande osservatorio sotterraneo di neutrini al mondo



Jiangmen Underground  
Neutrino Observatory

M. Sisti, E. Previtali,  
D. Chiesa, M. Nastasi

Rivelatore a scintillazione liquida con obiettivo scientifico primario  $\Rightarrow$  **determinazione dell'ordinamento delle masse dei neutrini**

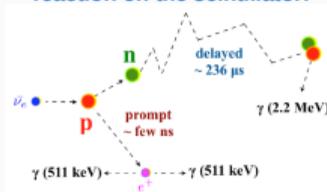


La misura dell'ordinamento delle masse dei  $\nu$  può essere effettuata sfruttando le oscillazioni degli antineutrini emessi dai reattori nucleari.

Antineutrinos from reactors



**INVERSE BETA DECAY (IBD) reaction on the scintillator:**

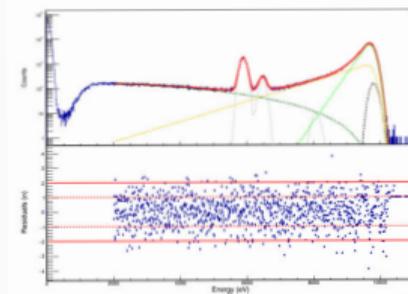
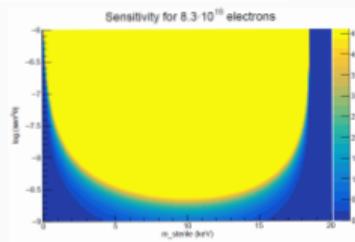
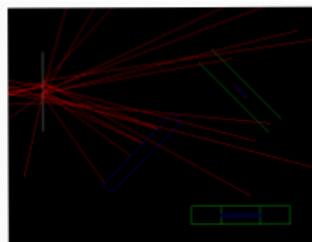
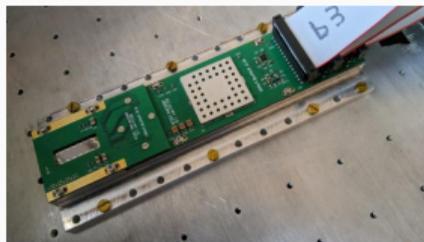
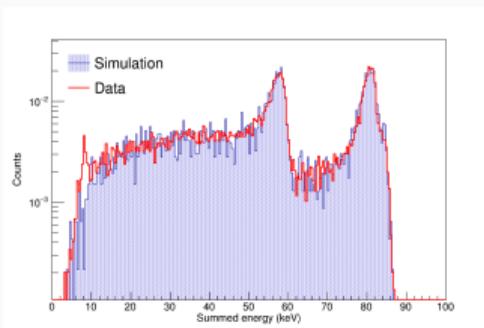
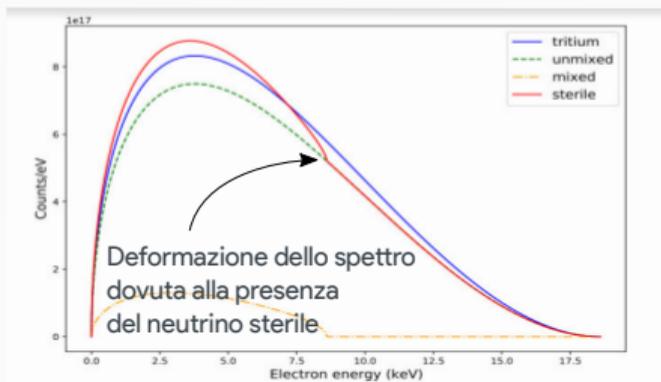


- Selezione dei componenti cruciali del rivelatore tramite misure ad altissima sensibilità per la ricerca dei contaminanti in ultra-tracce;
- Simulazioni Monte Carlo del fondo radioattivo previsto per l'esperimento;
- Sviluppo di strumenti di analisi per la valutazione della sensibilità di JUNO alla misura dell'ordinamento delle masse dei neutrini;
- Simulazione del flusso di neutrini emesso dai reattori nucleari e studio delle sistematiche coinvolte;

per informazioni sulle proposte di tesi [monica.sisti@mib.infn.it](mailto:monica.sisti@mib.infn.it)



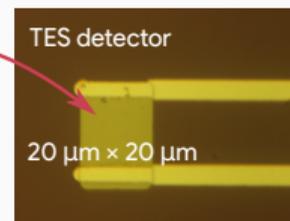
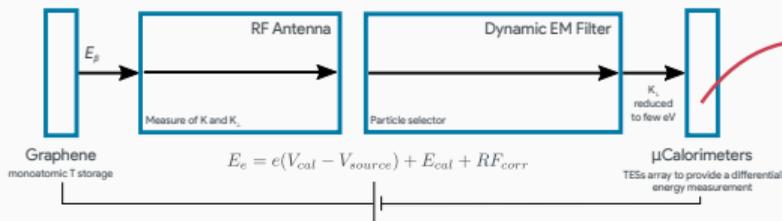
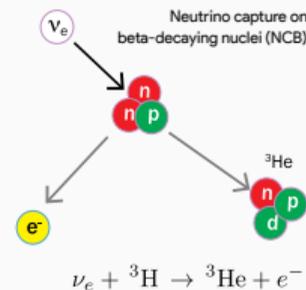
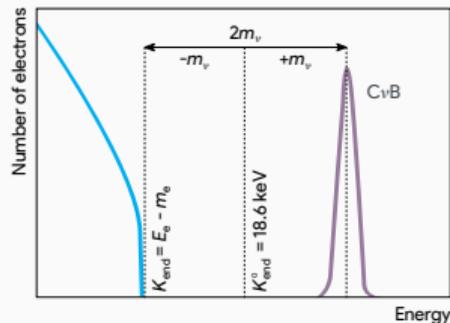
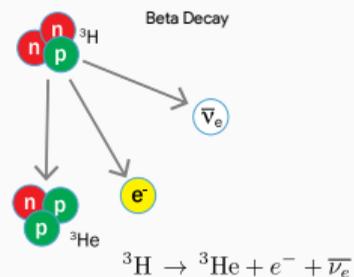
Ricerca di un quarto tipo di neutrino tramite misure precise di spettri  $\beta$



- Simulazioni Monte Carlo, modellizzazione del rivelatore e analisi statistiche;
- Misure e caratterizzazioni con i rivelatori che verranno usati in TRISTAN;

per informazioni sulle proposte di tesi  
[matteo.biassoni@mib.infn.it](mailto:matteo.biassoni@mib.infn.it)

Rivelazione dei neutrini *primordiali* osservando la traccia che lasciano quando interagiscono con nuclei di trizio



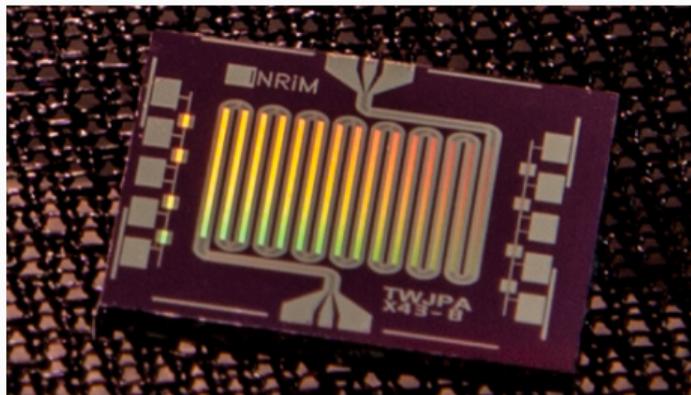
- Sviluppo, realizzazione e ottimizzazione di rivelatori TES ottimizzati per le basse energie;
- Sviluppo di un sistema criogenico per la caratterizzazione dei rivelatori sviluppati;
- Studio della sensibilità dell'esperimento con approccio bayesiano;

per informazioni sulle proposte di tesi  
[angelo.nucciotti@mib.infn.it](mailto:angelo.nucciotti@mib.infn.it)

La tecnologie sviluppate per la fisica della particelle hanno forti sinergie  
con l'emergente campo delle tecnologie ed informazione quantistica

## DARTWARS

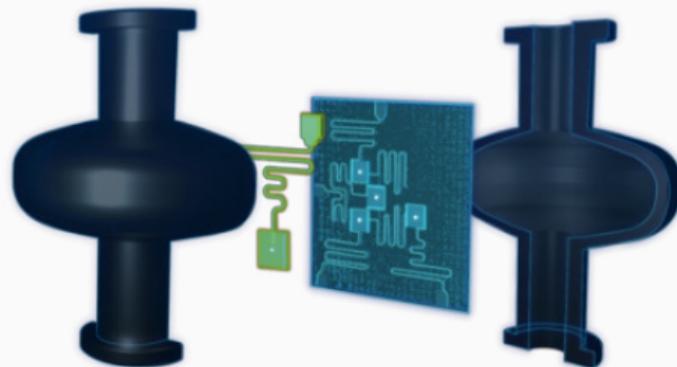
Linee di lettura innovative caratterizzate da larga banda e  
rumore a livello quantistico per matrici di rivelatori e di qubit



- Progettazione e simulazione di amplificatori parametrici;
- Caratterizzazione degli amplificatori prodotti e dimostrazione di read-out con matrici di rivelatori e qubit;

## Superconducting Quantum Materials and Systems

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

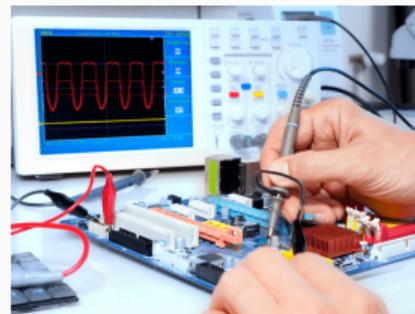


- Progetto e caratterizzazione di una linea di lettura per qubits in ambiente criogenico;
- Studio e simulazione dei contributi radioattivi in un qubit superconduttivo;

per informazioni sulle proposte di tesi [andrea.giachero@mib.infn.it](mailto:andrea.giachero@mib.infn.it)

# Oltre la ricerca

Le competenze acquisite nel percorso di studi in particelle sono spendibili anche al di fuori della ricerca





Grazie per l'attenzione!!!

Approfondimenti:

- [Neutrinos 101](http://symmetrymagazine.org) *symmetrymagazine.org*
- [A voyage to the heart of the neutrino](http://cerncourier.com) *cerncourier.com*
- [All things neutrino](http://neutrinos.fnal.gov) *neutrinos.fnal.gov*
- [\[neutrini\]](http://asimmetrie.it) *asimmetrie.it*
- [L'inafferrabile neutrino](http://asimmetrie.it) *asimmetrie.it*