

Fisica dei neutrini e delle astroparticelle: tesi magistrali AA 2023-2024

13 Marzo 2024

Fisica astroparticellare

Definizione «storica» (e un po' obsoleta): “La fisica astroparticellare è la branca della fisica che studia le particelle prodotte da sorgenti naturali.”

Oggi è molto di più!

Neutrini prodotti da:

- Sole/stelle
- Raggi cosmici
- Reattori nucleari e acceleratori
- Big bang
- Decadimento beta (doppio)

Raggi cosmici

- Sulla terra
- Nello spazio

Onde gravitazionali

- Osservazione diretta

Materia oscura

- Attraverso interazione diretta
- Rivelazione indiretta

Fisica astroparticellare

Il nostro dipartimento, da oltre 20 anni, ha una leadership internazionale nella fisica del neutrino e nella fisica astroparticellare.

Collaborazioni con i principali laboratori per la fisica astroparticellare

Laboratori Nazionali del
Gran Sasso (LNGS)
(3 direttori LNGS da MiB)



CERN



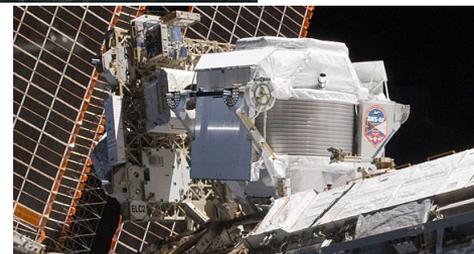
Jiangmen/JUNO (Cina)



FERMILAB



EGO/VIRGO
(direttore a MiB)



AMS

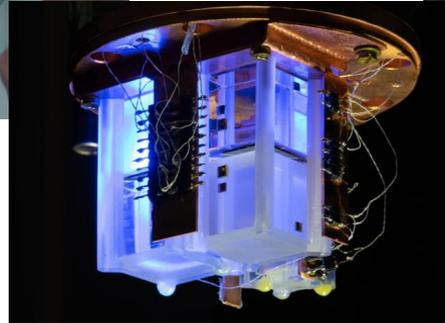
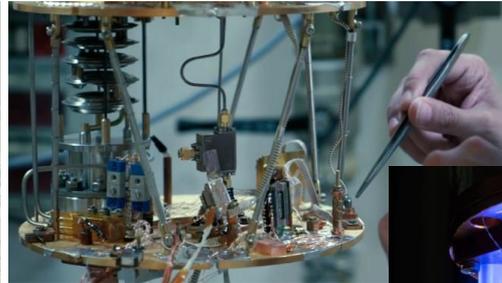
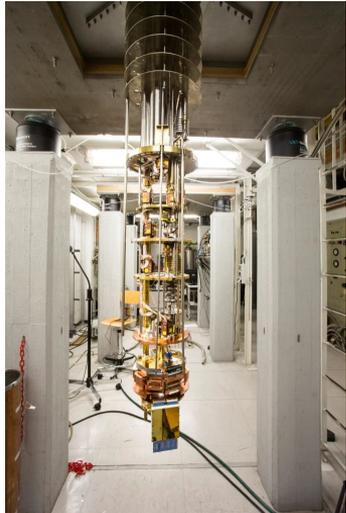
Fisica astroparticellare

Il nostro dipartimento, da oltre 20 anni, ha una leadership internazionale nella fisica del neutrino e nella fisica astroparticellare.

Ha un complesso di laboratori molto prestigioso:

Fisica delle basse temperature

Radioattività



Rivelatori di neutrini/decadimento beta

Fisica delle particelle @ MiB

Fisica dei neutrini e delle astroparticelle

13 Marzo

- Le oscillazioni dei neutrini
- Low energy interactions
- La massa dei neutrini
- Raggi cosmici
- Elettronica per la fisica delle particelle

Fisica delle interazioni fondamentali a collider

12 Marzo

- La rivelazione di onde gravitazionali
- Fisica ai collisori di particelle: esperimento CMS
- Fisica ai collisori di particelle: esperimento LHCb

Le oscillazioni dei neutrini

DUNE/ENUBET/ICARUS

JUNO

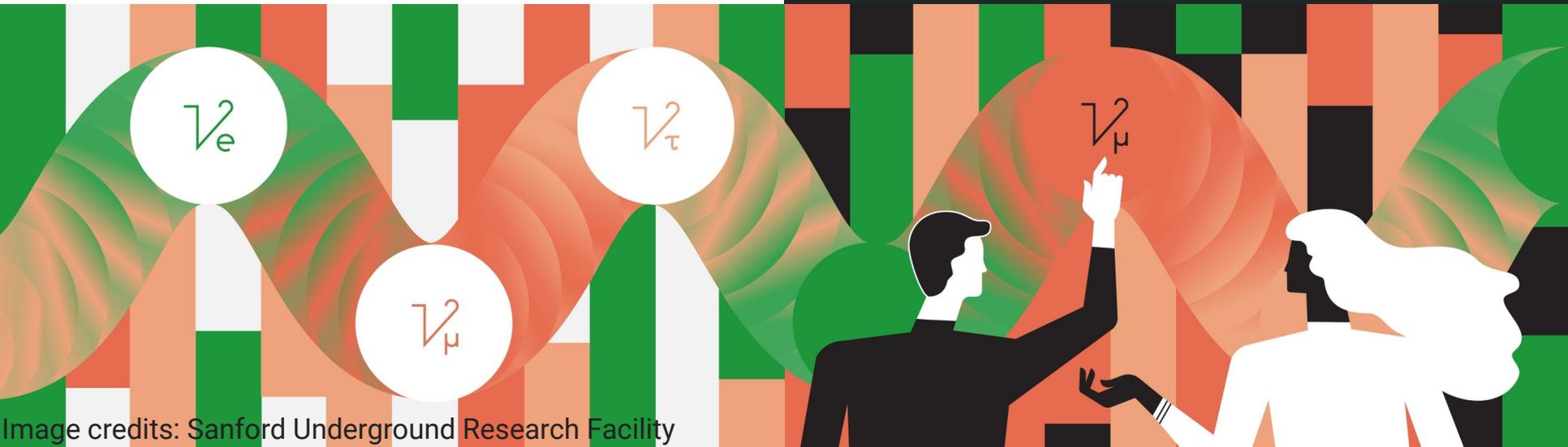
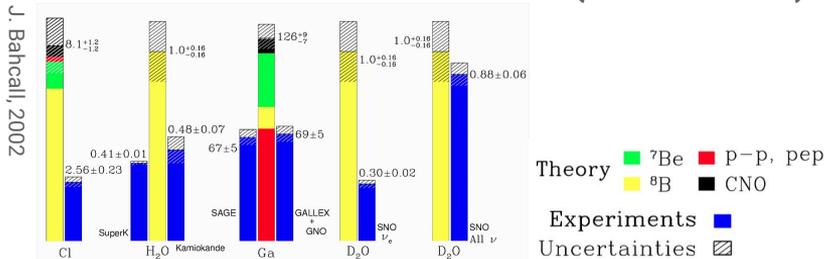


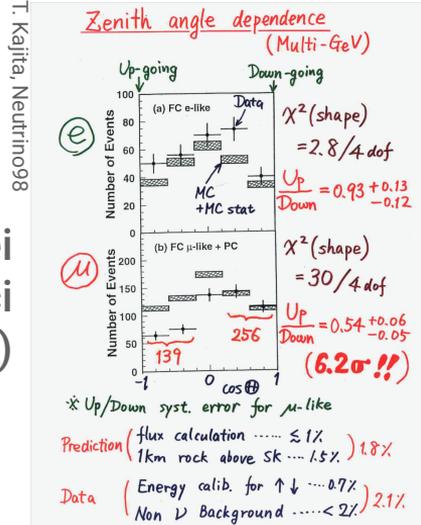
Image credits: Sanford Underground Research Facility

Le oscillazioni dei neutrini: dalle anomalie alla scoperta

Problema dei neutrini solari (1968-2002)



Anomalia dei neutrini atmosferici (1986-1998)



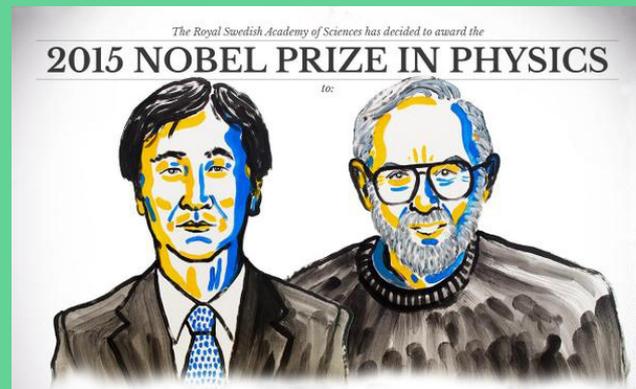
Autostato di sapore = sovrapposizione di autostati di massa

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \text{ con } \mathbf{U} \text{ matrice (unitaria) di mixing}$$

In un modello a due sapori la **probabilità di transizione $\alpha \rightarrow \beta$** è

$$|\langle \nu_\beta | H | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]} \right)$$

con $\Delta m^2 = m_j^2 - m_i^2$

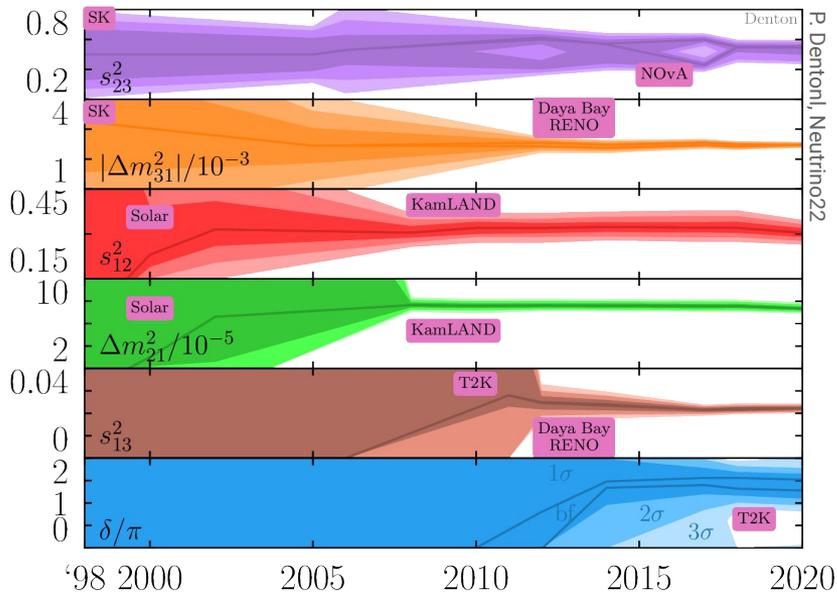


Oscillazione dei neutrini $\rightarrow m \neq 0!$

I parametri delle oscillazioni

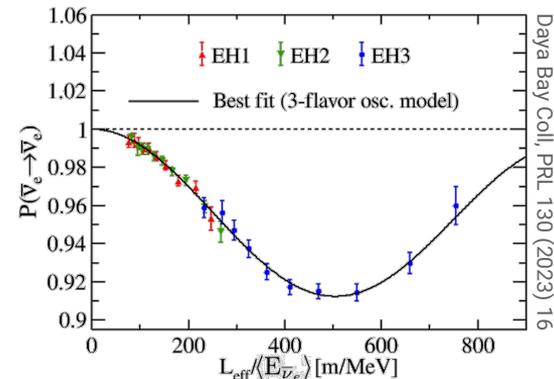
Matrice di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (3 angoli $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ + 1 fase δ_{CP})

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} s_{ij} = \sin \theta_{ij} \\ c_{ij} = \cos \theta_{ij} \end{matrix}$$

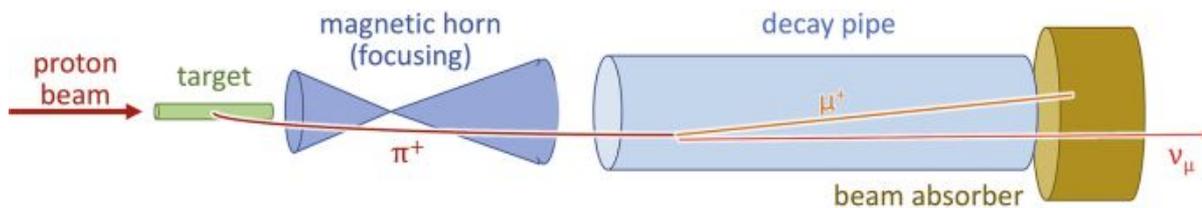


Parametri di oscillazione e mass splitting (Δm^2) misurati negli ultimi 20 anni usando (anti)neutrini prodotti da sorgenti molto diverse e studiando la *scomparsa* o l'*apparizione* di sapori diversi da quelli prodotti alla sorgente.

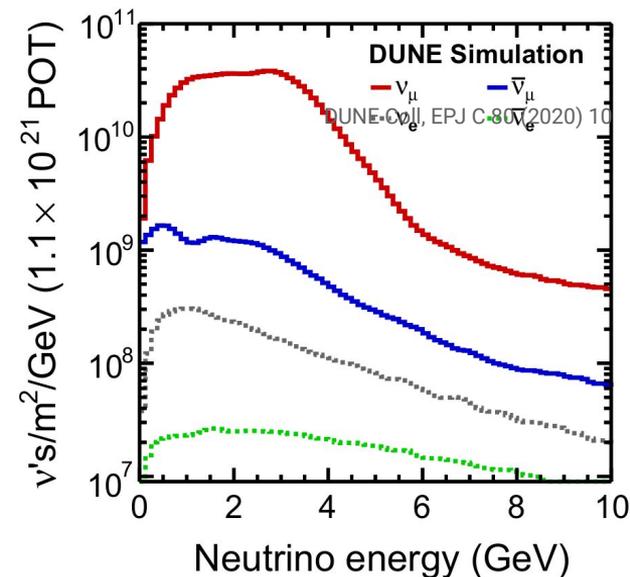
- ▷ Sole (<19 MeV)
- ▷ Reattori (< 10 MeV)
- ▷ Raggi cosmici (~GeV)
- ▷ Acceleratori (~GeV)



Come produrre un fascio di neutrini



Schema tipico di fascio di neutrini a *wide-band*
Per alcune applicazioni è desiderabile *narrow-band*



Near e Far Detector

$$R_{\text{FD}}^{\nu'} = \int \Phi^{\nu}(E) P_{\text{osc}}^{\nu \rightarrow \nu'}(E) \frac{d\sigma^{\nu'}}{dE} dE$$

$$R_{\text{ND}}^{\nu} = \int \Phi^{\nu}(E) \frac{d\sigma^{\nu}}{dE} dE$$

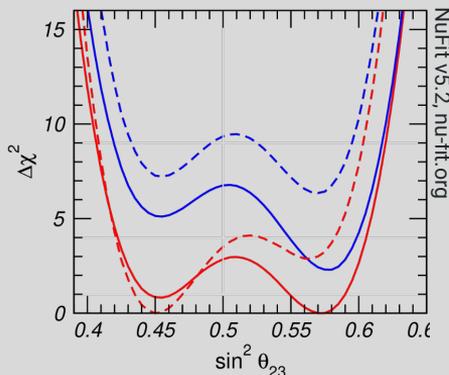
Flusso di neutrini e sezioni d'urto sono molto complicati da modellizzare

Combinare la misura al Far Detector con quella di un Near Detector aiuta a vincolare questi parametri

Misure di precisione

θ_{23} : maximal mixing?
(simmetria $\nu_\mu - \nu_\tau$)

In quale ottante?



Gerarchia delle masse:

Quale è il neutrino più leggero? (segno di Δm_{23}^2)



Violazione di CP

neutrini e antineutrini
si comportano allo
stesso modo?

Quanto vale δ_{CP} ?



Lo scenario a 3 sapori è completo?

Esistono solo 3 sapori di
neutrini?
Può esistere uno (o più)
neutrini sterili?



DUNE
ICARUS
ENUBET

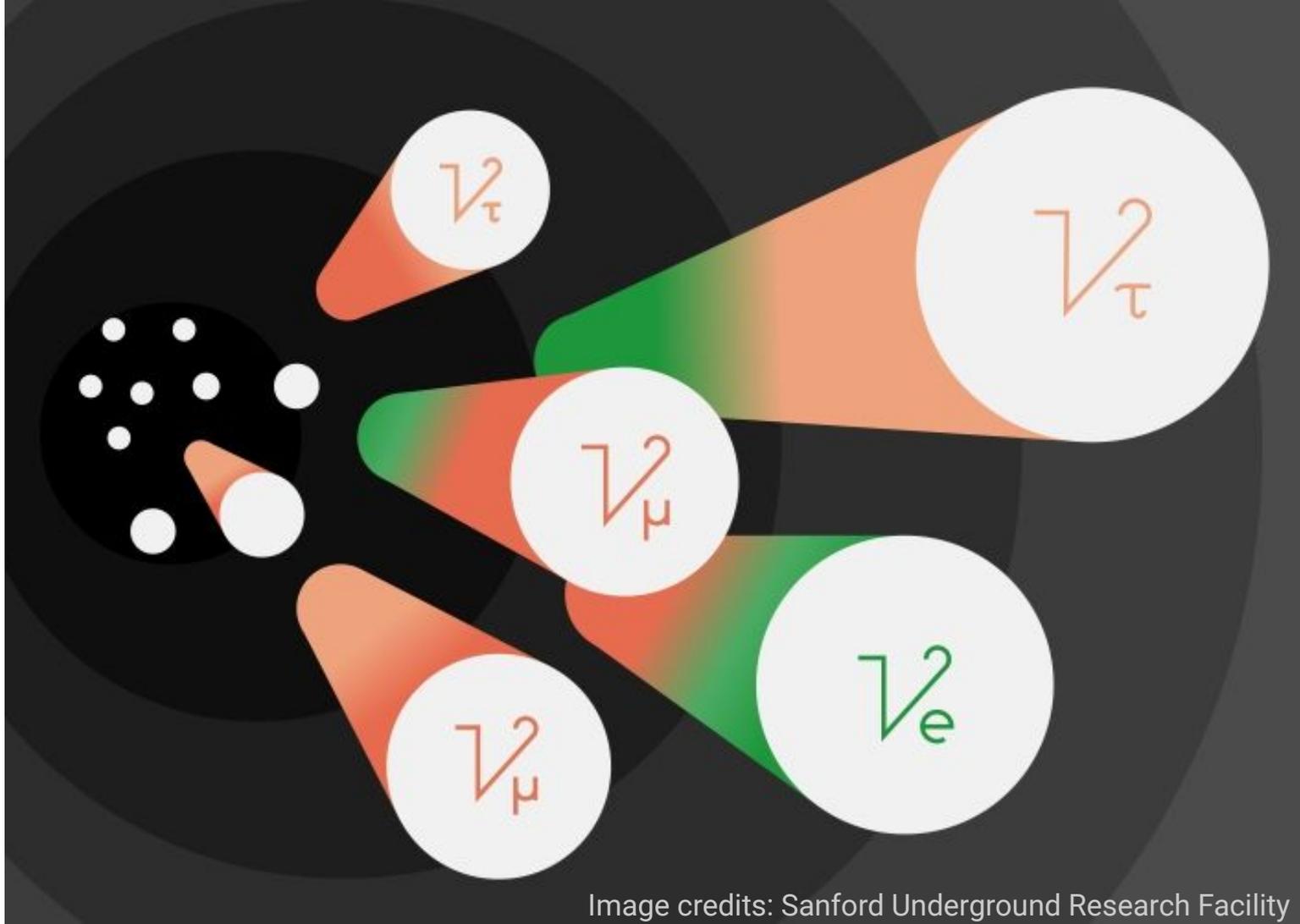
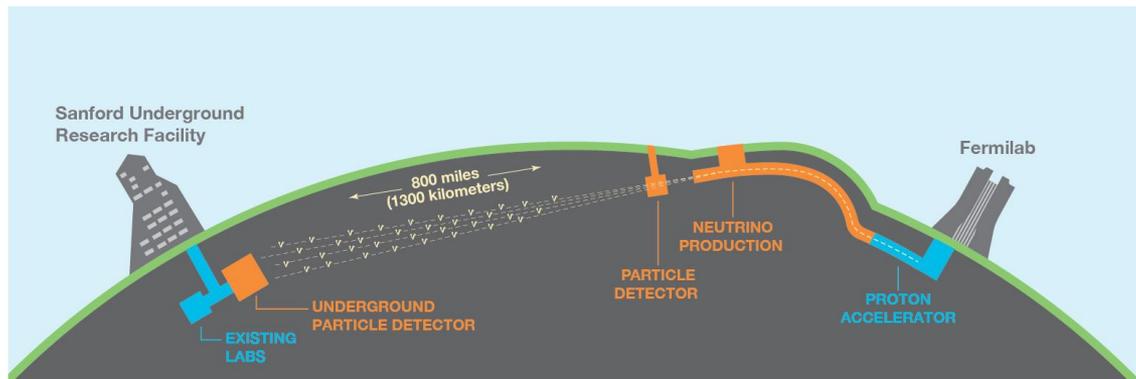


Image credits: Sanford Underground Research Facility

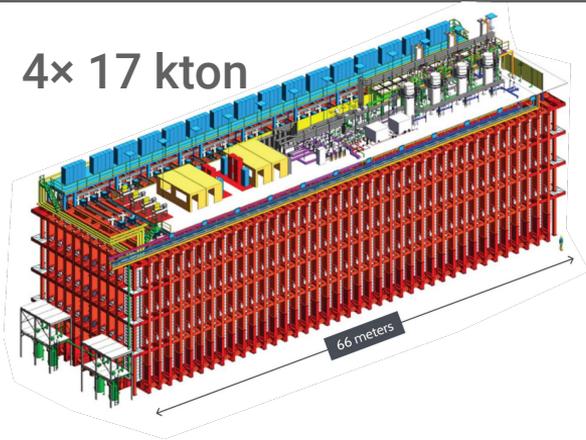
Deep Underground Neutrino Experiment



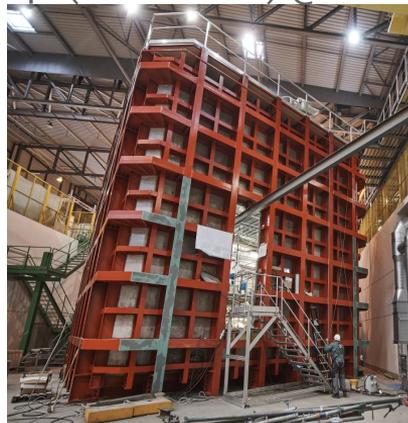
Esperimento in costruzione negli USA
(30+ nazioni partecipanti)

Fascio di (anti)neutrini μ prodotto a Fermilab, misurati da un sistema di *near detector* e di *far detector* costruiti a 1300 km di distanza e a 1500 m di profondità.

4x 17 kton



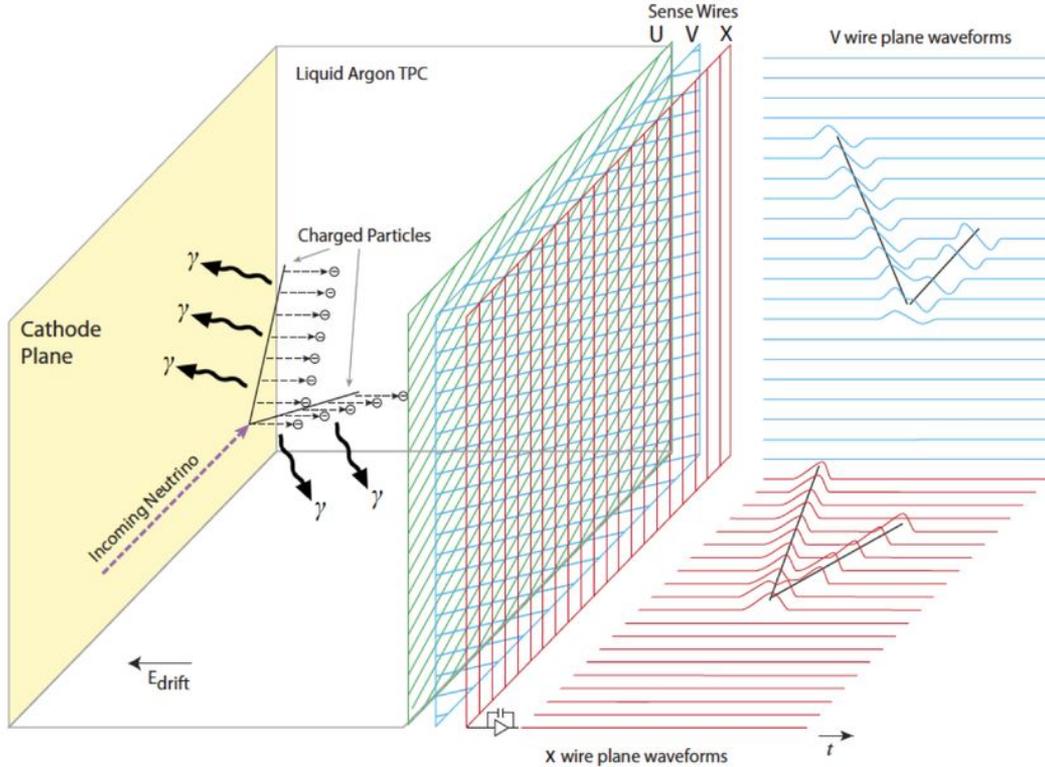
2 Prototipi (ProtoDUNE) @CERN



Estesissimo programma di fisica:

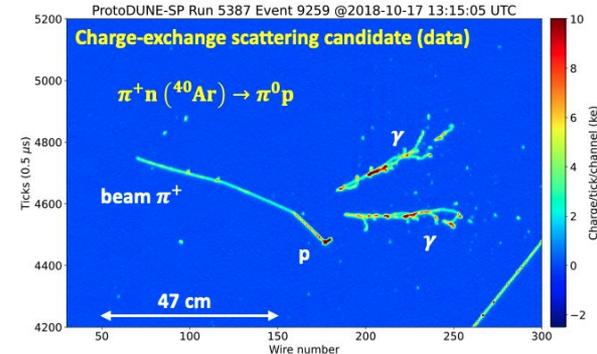
- > soluzione ottante θ_{23}
- > mass ordering
- > violazione CP nel settore leptonic
- > Misura di neutrini da Supernova
- > Misura di neutrini solari
- > Decadimento del protone
- > ...

Liquid Argon TPC



Particelle cariche in LAr producono:

- luce di scintillazione ($\lambda \sim 128$ nm) che viene rivelata da fotorivelatori *ad hoc* in poche decine di ns
- carica di ionizzazione. Gli e^- derivano sotto l'effetto di un campo elettrico fino ad essere raccolti da un anodo segmentato in \sim ms
- Calorimetria + dE/dx +topologia degli eventi !



DUNE a Milano - Bicocca

in collaborazione con CERN, CIEMAT (Madrid), Campinas, Fermilab, Berna, Manchester, ...



Rivelare la luce in DUNE:

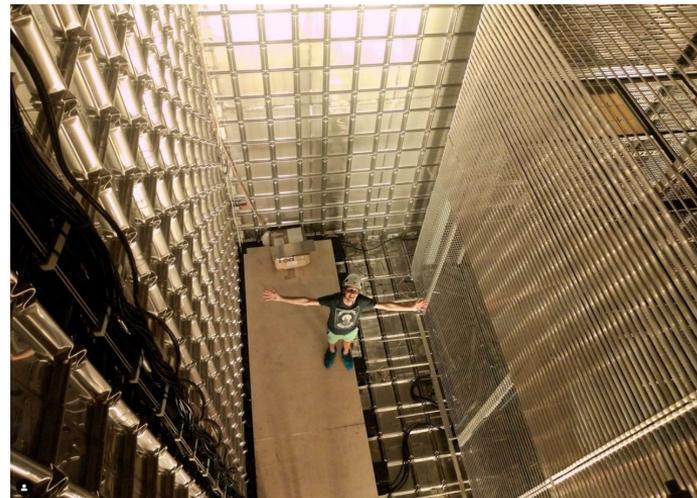
- Trapping e rivelazione di luce nell'estremo UV (a 87 K)
- Sviluppo di opto-elettronica criogenica
- Sviluppo di elettronica criogenica

Sviluppo algoritmi di calorimetria combinata luce+carica

Sensibilità ai neutrini solari in DUNE

Sensibilità al decadimento $0\nu\beta\beta$ in LArTPC "dopate" con Xe

Partecipazione al Run-II di ProtoDUNE al CERN



F. Terranova, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, C. Cattadori, E. Cristaldo, M. Delgado, A. Falcone, C. Gotti, D. Guffanti, L. Meazza, A. Minotti, G. Pessina, M. Torti

info: francesco.terranova@unimib.it

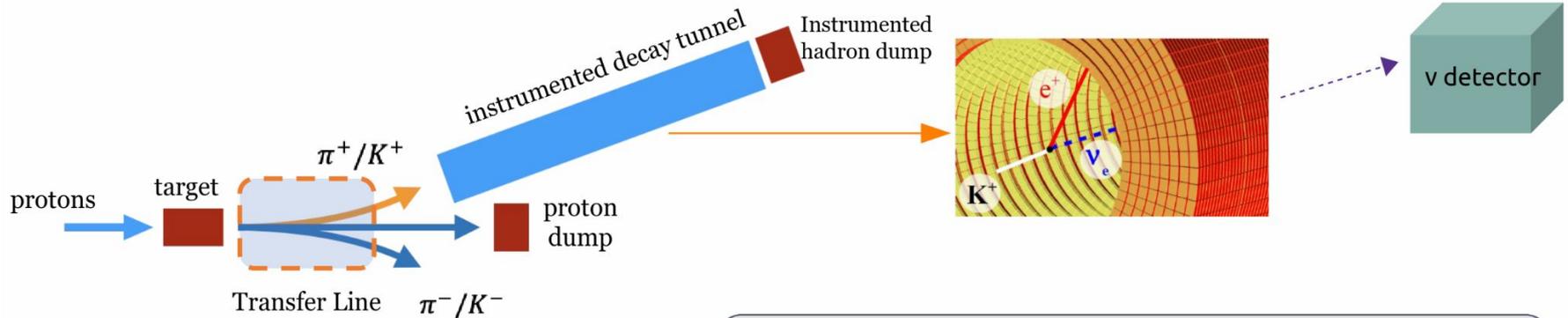
ENUBET



La precisione delle sezioni d'urto dei neutrini con la materia alla scala $\sim \text{GeV}$ è una forte limitazione alla sensibilità degli esperimenti agli acceleratori

Misura sezioni d'urto è uno dei punti cruciali da affrontare per la prossima generazione di esperimenti

Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging (ENUBET): Fasci monitorati di neutrini



Instrumentare il tunnel di decadimento e hadron dump per contare i leptoni associati alla produzione di ν
→ Misura di precisione sul flusso e sulla composizione del fascio di neutrini

ENUBET a Milano - Bicocca



Test del dimostratore di ENUBET @CERN



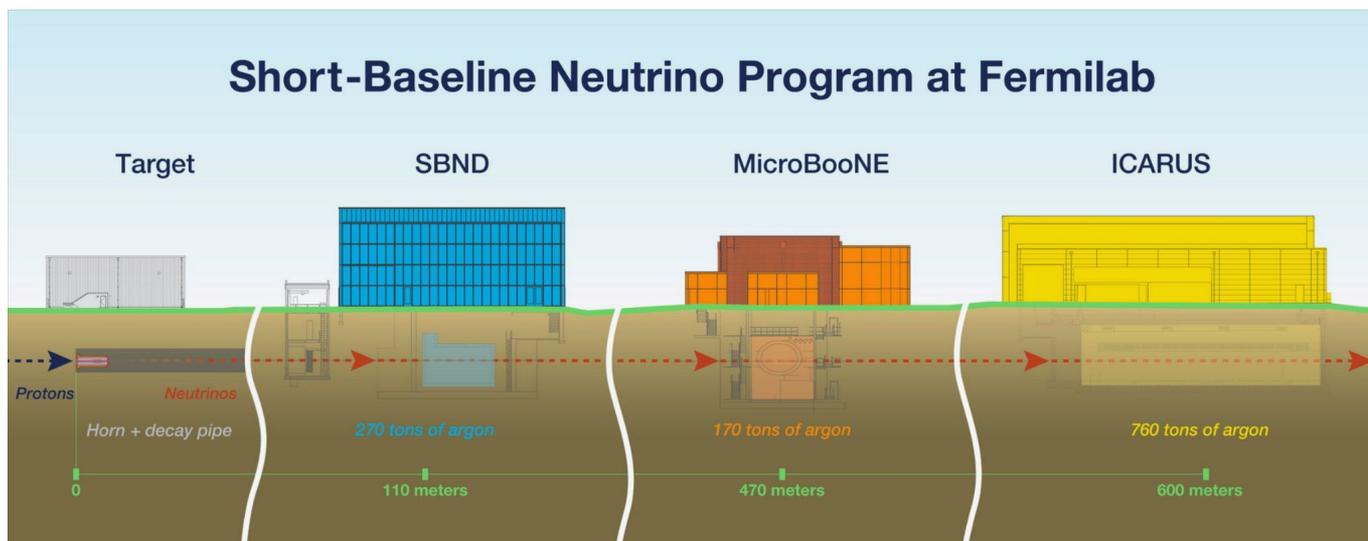
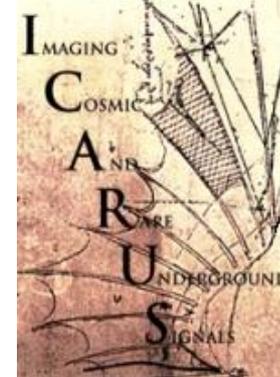
F. Terranova, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, C. Cattadori, E. Cristaldo, M. Delgado, A. Falcone, C. Gotti, D. Guffanti, L. Meazza, A. Minotti, G. Pessina, M. Torti, E. Vallazza.
info: francesco.terranova@unimib.it

- Machine learning per l'identificazione degli eventi in ENUBET
- Studio delle sistematiche sui flussi della beamline di ENUBET
- Fasci di ν monitorati alla European Spallation Source
- Fasci taggati di Neutrino
- Fasci di neutrini monitorati alla European Spallation Source
- Simulazione delle interazioni di neutrino prodotti da ENUBET su ProtoDUNE-SP
- Studio dei fondi di raggi cosmici nel rivelatore di neutrini per ENUBET

ICARUS

Negli anni *alcuni* esperimenti hanno prodotto risultati in **tensione** con il modello di oscillazione a 3 sapori, lasciando aperta la possibilità di uno stato di **neutrino sterile** con $m \sim 1-10$ eV e piccolo angolo di mixing

ICARUS parte dello Short Baseline Neutrino Program del Fermilab (600 m baseline)



ICARUS è composto da 2×300 t LArTPC ($3.6 \times 3.9 \times 19.6$ m³)

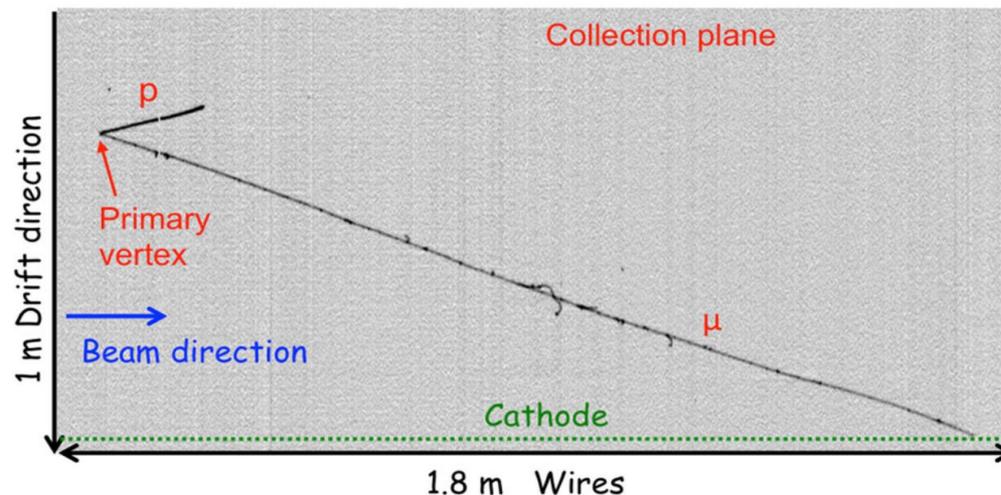
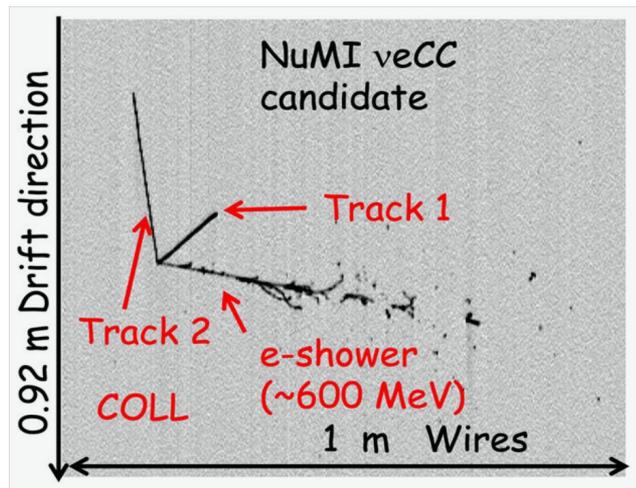
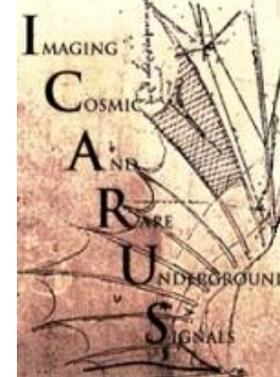
2010-2013
ICARUS@Gran Sasso
→ CERN
2017 → Fermilab

Presi dati
cominciati nel 2021

ICARUS a Milano - Bicocca

- Studio del sistema di calibrazione laser di Icarus
- Simulazione del fascio di neutrini a Fermilab (Boosted Neutrino Beam)
- Ricerca di neutrini sterili con Icarus

M. Bonesini, R. Benocci, A. Falcone, M. Torti
info: maurizio.bonesi@mib.infn.it



JUNO

Jiangmen Underground Neutrino Observatory



Obiettivo principale

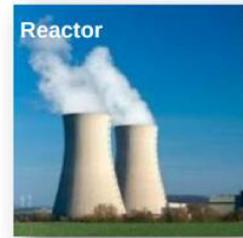
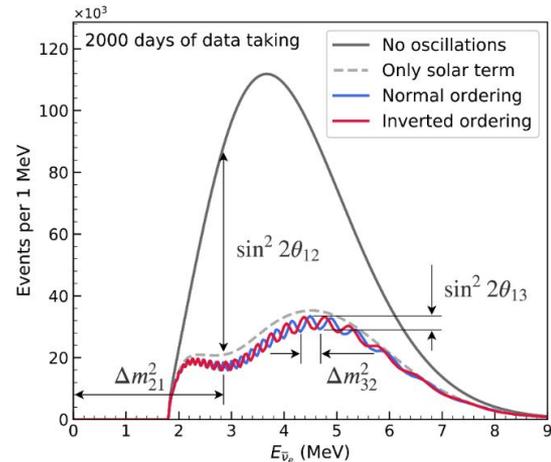
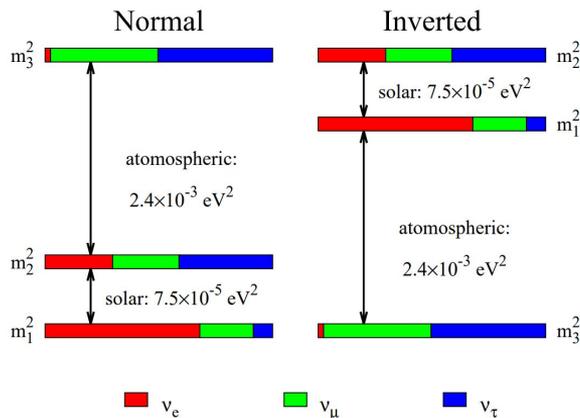
Determinare l'ordinamento in massa dei neutrini

Come?

Analisi delle oscillazioni degli antineutrini elettronici ($\bar{\nu}_e$)

Dove?

In un laboratorio sotterraneo a circa 53 km di distanza da due centrali nucleari nel sud della Cina

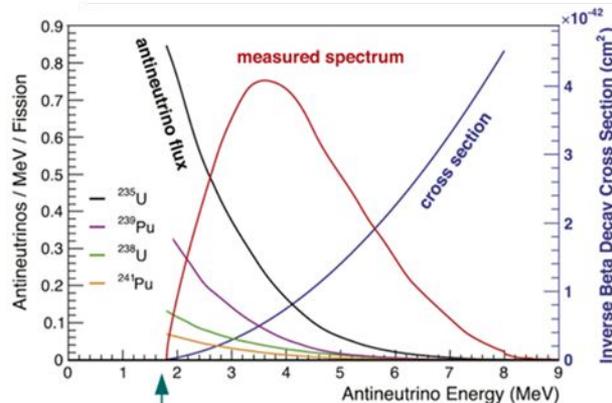


Come si misurano i neutrini in JUNO?



Rivelazione degli antineutrini elettronici ($\bar{\nu}_e$)

- Inverse beta decay



Energy threshold: 1.8 MeV

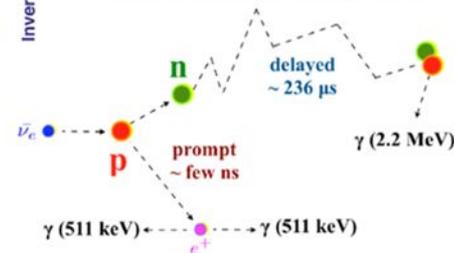


- $E_{\text{vis}}(e^+) \simeq E(\bar{\nu}_e) - 0.8 \text{ MeV}$
- Time coincidence between prompt and delayed signals to reject uncorrelated background

Antineutrinos from reactors



INVERSE BETA DECAY (IBD) reaction on the scintillator:



Come si misurano i neutrini in JUNO?



Rivelazione degli antineutrini elettronici ($\bar{\nu}_e$)

- Inverse beta decay

Rivelatore:

- Sfera di acrilico 35.4 m di diametro riempita con 20'000 tonnellate di liquido scintillante



Come si misurano i neutrini in JUNO?



Rivelazione degli antineutrini elettronici ($\bar{\nu}_e$)

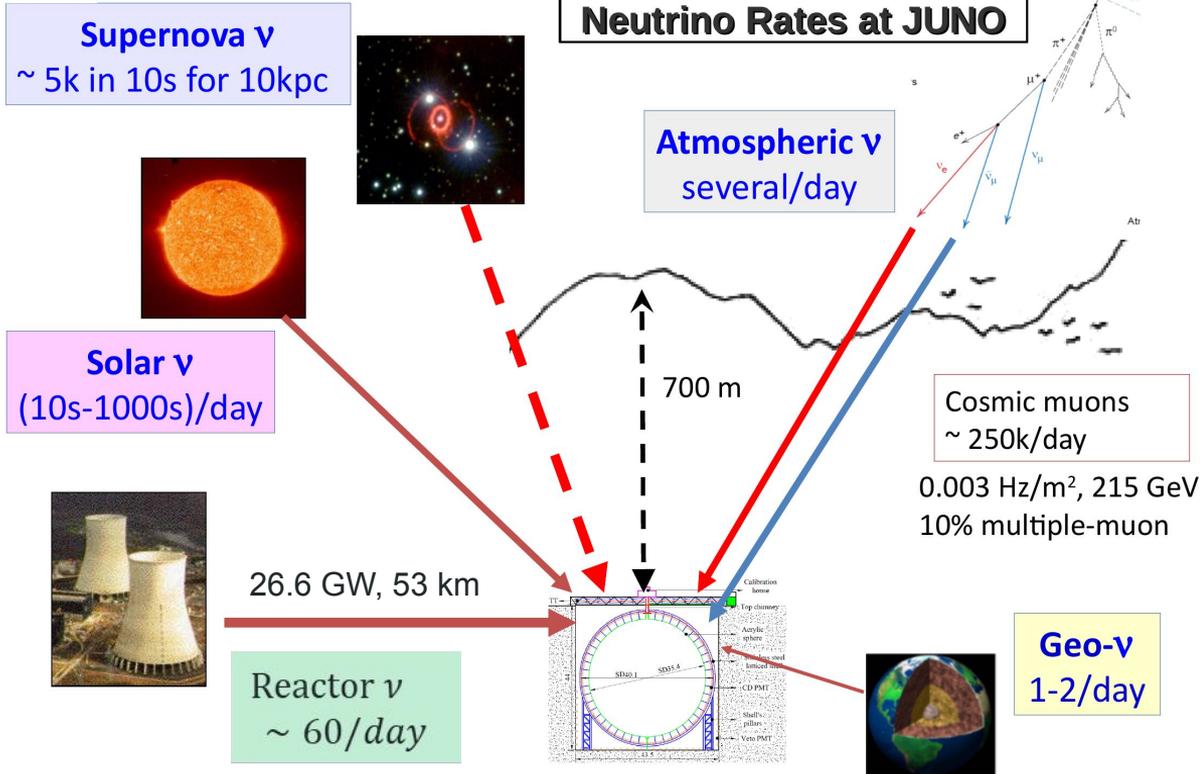
- Inverse beta decay

Rivelatore:

- Sfera di acrilico 35.4 m di diametro riempita con 20'000 tonnellate di liquido scintillante
- ... circondata da decine di migliaia di PMT (tubi fotomoltiplicatori)
- Ottima risoluzione energetica ($3\% \sqrt{E}$ (MeV)) e bassa incertezza sulla scala energetica (<1%)
- Laboratorio sotterraneo (700 m)



JUNO: un esperimento "multipurpose"



La costruzione del rivelatore è quasi completata!!!

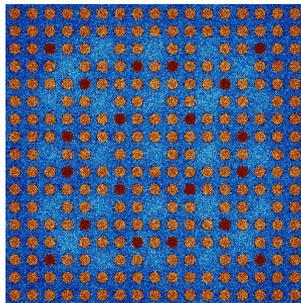
- Inizio presa dati: **2024**
- Moltissime prospettive di studi di fisica interessanti nell'ambito di una **collaborazione internazionale** che conta più di 600 scienziati

Proposte di tesi con il gruppo di Milano Bicocca

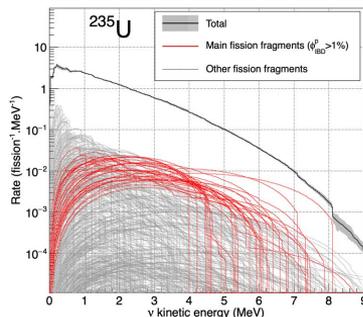


Modellizzazione dei neutrini emessi dai reattori nucleari

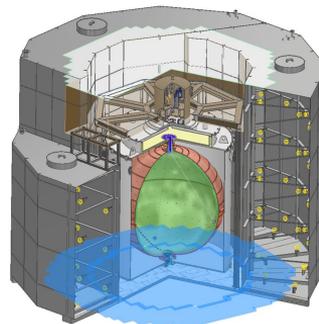
- **Simulazione del burnup** del combustibile nucleare in un reattore di potenza
- **Summation Method** per la ricostruzione dello spettro di $\bar{\nu}_e$
- Confronto con lo spettro “non oscillato” misurato da **TAO (Taishan Antineutrino Observatory)** a ~ 40 m di distanza dal *core* di un reattore



Simulazione del burnup di una *fuel assembly* con codice Monte Carlo *Serpent*



Somma degli spettri di $\bar{\nu}_e$ emessi dai decadimenti β dei frammenti di fissione del ^{235}U



TAO detector: sfera di diametro 1.8 m contenente 2.8 ton di Gd-LS strumentata con un array da 10 m^2 di SiPM

COMPETENZE CHE POTETE ACQUISIRE

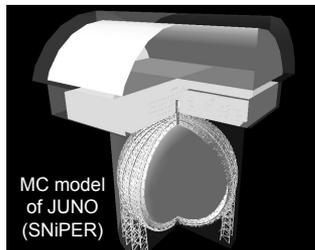
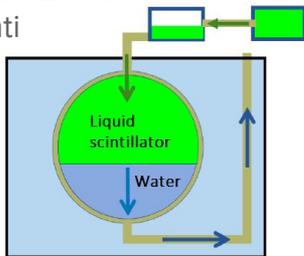
- Fisica dei reattori nucleari (neutronica e ciclo del combustibile)
- Moderne simulazioni Monte Carlo
- Fisica del decadimento β
- Fisica nucleare e radioattività

Proposte di tesi con il gruppo di Milano Bicocca

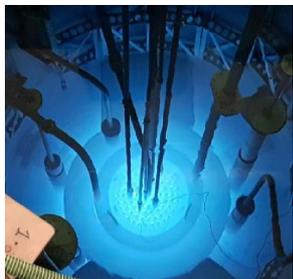


Studio delle componenti del fondo radioattivo atteso per l'esperimento JUNO

- Simulazione MC di propagazione e interazione delle particelle emesse dai decadimenti
- Misura della radiopurezza dell'acqua e del liquido scintillante durante la fase di riempimento della sfera
 - Water □ Cherenkov light
 - Liquid scintillator □ scint. light



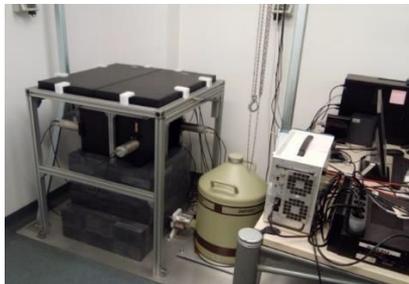
Misura di contaminanti in traccia in campioni solidi e liquidi mediante attivazione neutronica (NAA) e tecniche radiochimiche



Reattore TRIGA @ Pavia



Lab. Radioattività @ Bicocca



COMPETENZE CHE POTETE ACQUISIRE

Analisi dati e simulazioni

- Fisica degli eventi rari
- Radioattività
- Interazione radiazione-materia

Attività di laboratorio!

- Preparazione di campioni per NAA e trattamenti radiochimici post irraggiamento
- Misure di spettroscopia gamma con rivelatori HPGe

Contatti



monica.sisti@unimib.it



andrea.barresi@unimib.it

davide.chiesa@unimib.it



matteo.borghesi@unimib.it



massimiliano.nastasi@unimib.it

Low energy interactions

RESNOVA

MOST ABUNDANT PARTICLES IN THE UNIVERSE

ANCORA SCONOSCIUTE

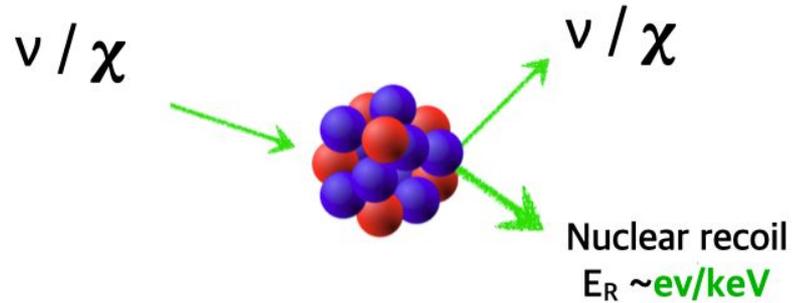
- Neutrino
 - Leggeri
 - Interazione debole
 - Neutri
 - Sorgenti:
 - SN, Sole, reattori
- Dark Matter
 - Ancora invisibile
 - Interazione gravitazionale
 - Non relativistic
 - Sorgenti:
 - Centro della galassia



device detect
One ring to rule them all

RIVELARE NEUTRINI E DM

SCATTERING ELASTICO COERENTE SU NUCLEI



neutrino-nucleo:

$$\sigma_{\nu-N} \propto N^2$$

Numero di
neutroni

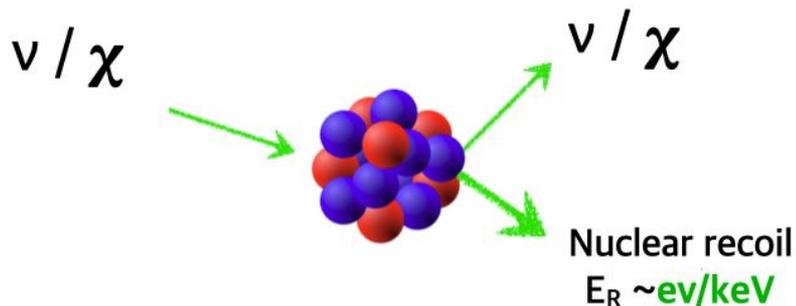
DM-nucleo:

$$\sigma_{\chi-N} \propto A^2$$

Numero di
neutroni+protoni

RIVELARE NEUTRINI E DM

SCATTERING ELASTICO COERENTE SU NUCLEI



Pb target ideale

Più alto numero di neutroni

Più alta stabilità nucleare

$$\sigma_{\nu-N} \propto N^2$$

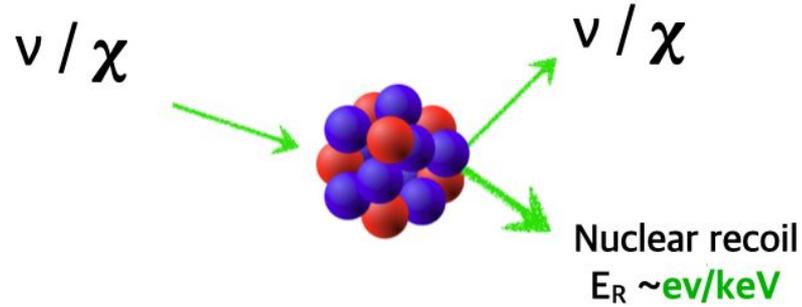
Numero di
neutroni

$$\sigma_{\chi-N} \propto A^2$$

Numero di
neutroni+protoni

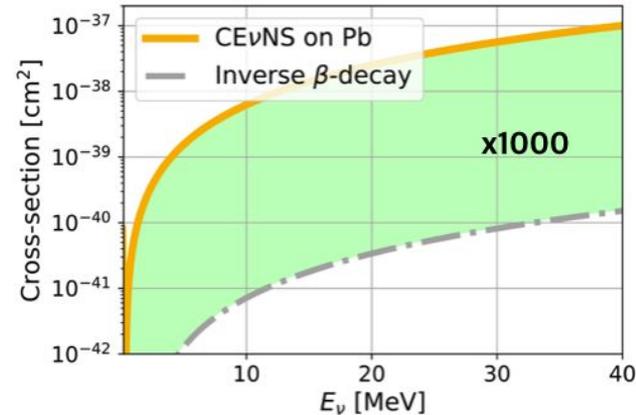
RIVELARE NEUTRINI E DM

SCATTERING ELASTICO COERENTE SU NUCLEI



Pb target ideale

Più alto numero di neutroni
 Più alta stabilita nucleare



UN DETECTOR DI NEUTRINI/DM SU SCALA DEI CM

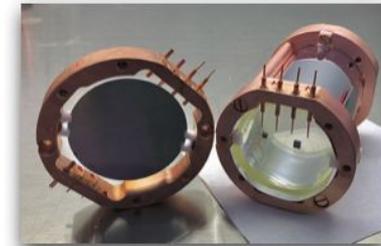
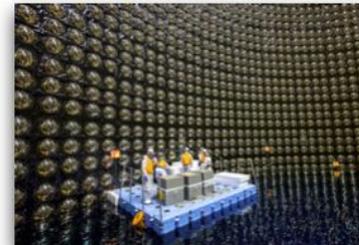
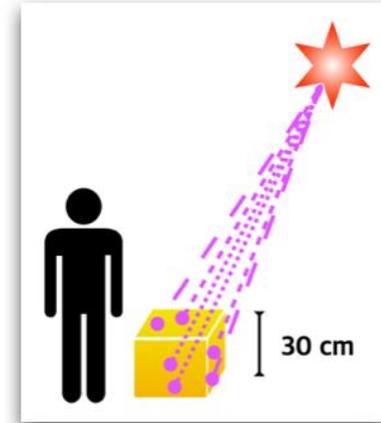
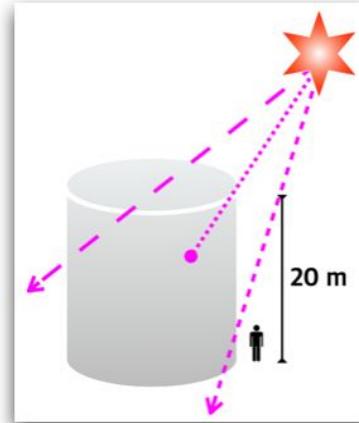


RES-NOVA

Sviluppo di rivelatori criogenici prodotti con Pb Romano per la rivelazione di :

Neutrini da Supernova

Materia Oscura



Funded by the
European Union



erc
European Research Council
Establishing the European Commission

UN DETECTOR DI NEUTRINI/DM SU SCALA DEI CM

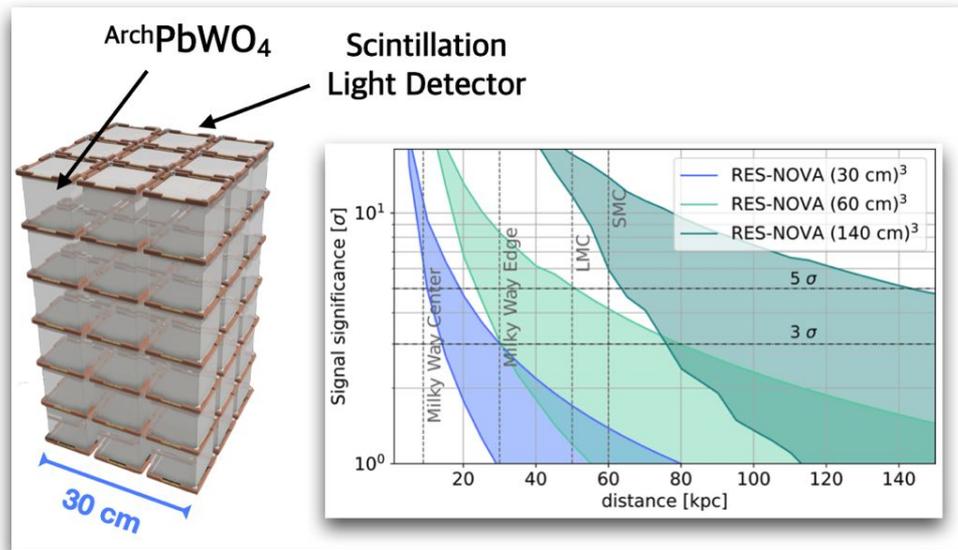


RES-NOVA

Sviluppo di rivelatori criogenici prodotti con Pb Romano per la rivelazione di :

Neutrini da Supernova

Materia Oscura



Puo' osservare 90% delle SN galattiche

La massa dei neutrini

HOLMES/PTOLEMY

KATRIN/TRISTAN

CUORE/CUPID/LEGEND

La massa dei neutrini

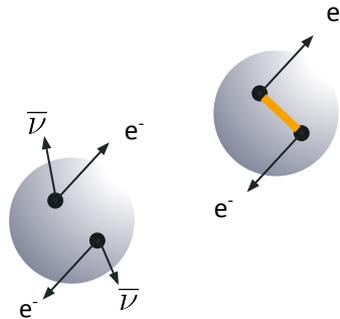
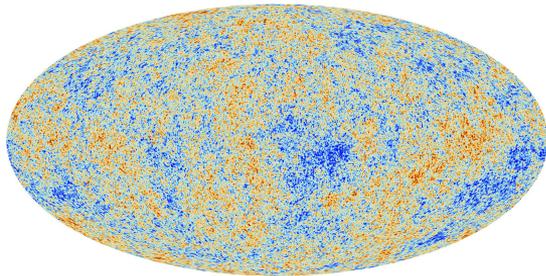
Misura indiretta o **diretta** ?

cosmologia

$$\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$$

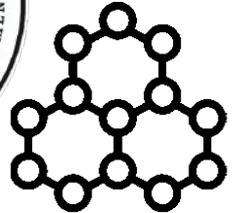
decadimento $0\nu\beta\beta$

$$m_{\beta\beta} = | \Sigma U_{ek}^2 m_k |$$



$$m_{\beta} = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_{\nu}$$

end-point spettri β



PTOLEMY

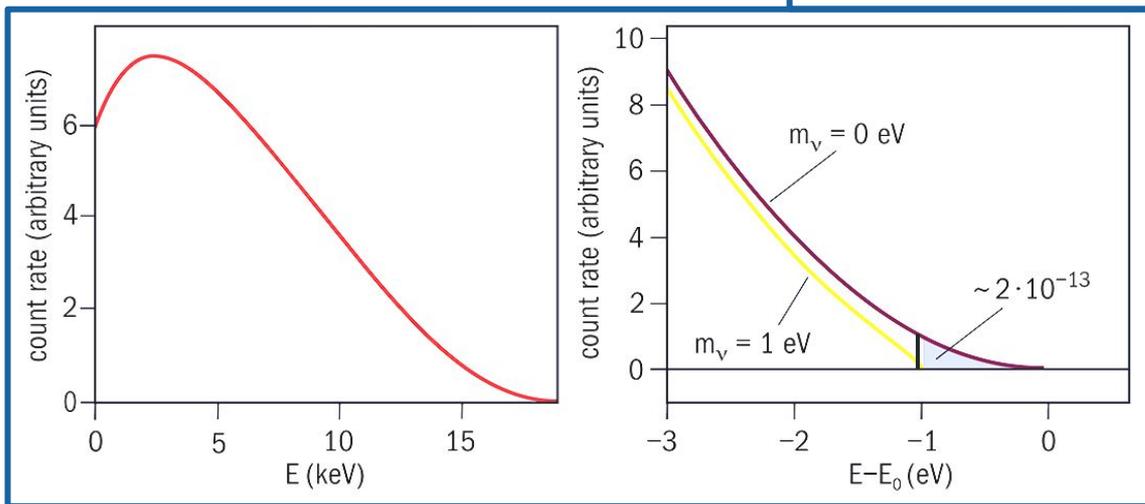
HOLMES

La massa dei neutrini

Misura **diretta** con Trizio: **KATRIN**

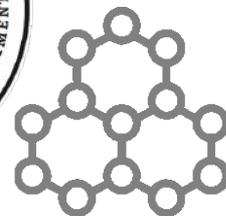
- misura integrale dell'endpoint
- sorgente esterna di T_2 (Trizio molecolare)
- limite di sensibilità: $0.2 \text{ eV}/c^2$

decadimento β^- :



$$m_\beta = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_\nu$$

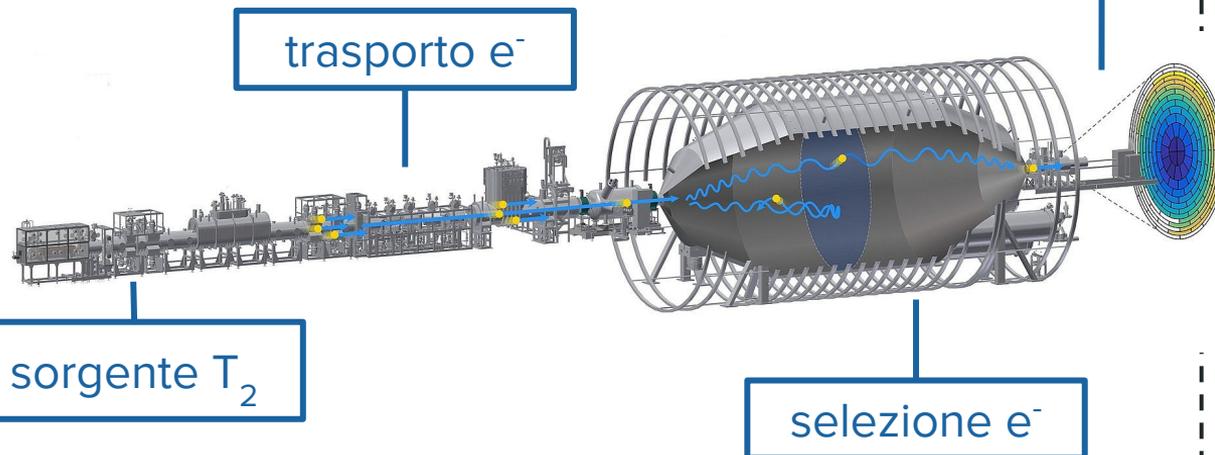
endpoint spettri β



PTOLEMY

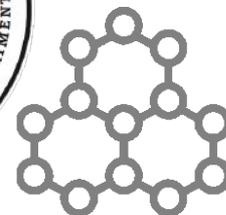
HOLMES

La massa dei neutrini



$$m_\beta = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_\nu$$

endpoint spettri β



PTOLEMY

HOLMES

Stato dell'esperimento

2001-04: lettera d'intenti e design

2018: inizio presa dati

2022: $m_\nu < 0.8 \text{ eV}/c^2$

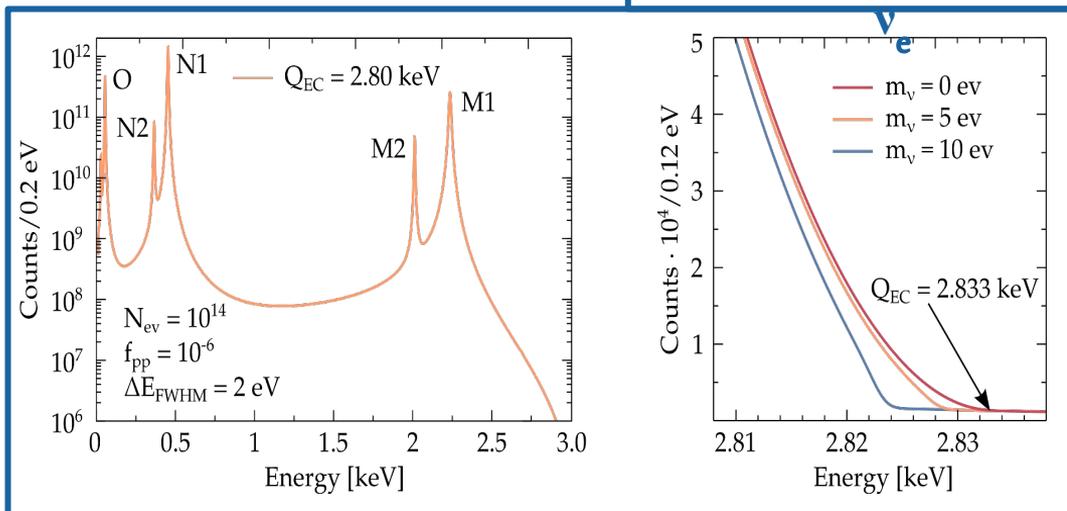
2024: nuova pubblicazione in arrivo

La massa dei neutrini

Misura **diretta** con Olmio: **HOLMES**

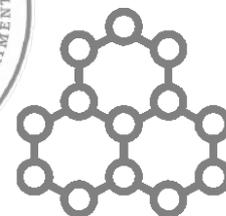
- misura differenziale dell'intero spettro
- approccio calorimetrico
 - sorgente di Ho incorporata nei detector

cattura elettronica:



$$m_\beta = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_\nu$$

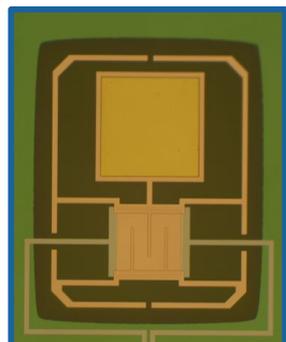
endpoint spettri β



PTOLEMY

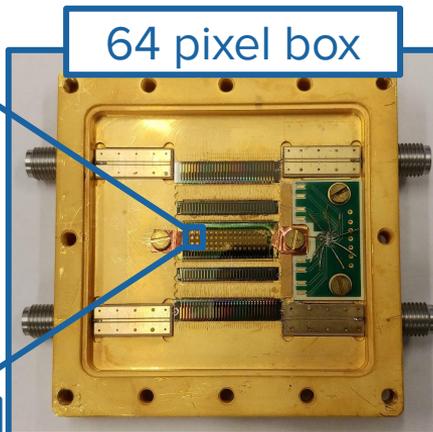
HOLMES

La massa dei neutrini



microcalorimetro

64 pixel box



criostato

Stato dell'esperimento

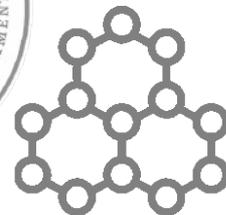
2014: proposal del progetto

2023: inizio presa dati

2024: primo risultato in arrivo

$$m_{\beta} = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_{\nu}$$

endpoint spettri β



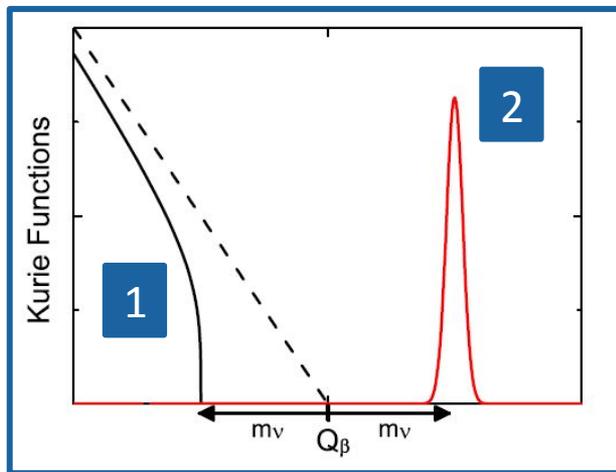
PTOLEMY

H  LMES

La massa dei neutrini

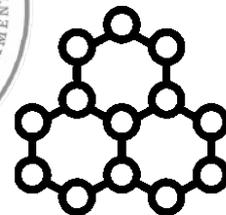
PTOLEMY

- progetto rivolto al futuro
- misura spettrometrica con microcalorimetri
- sorgente esterna di T (Trizio atomico)
- 1° obiettivo: misura diretta m_ν
- 2° obiettivo: fondo cosmico di neutrini (CVB)



$$m_\beta = \sqrt{|U_{ek}|^2 m_k^2} = m_\nu$$

endpoint spettri β



PTOLEMY

HOLMES

La massa dei neutrini

nature View all Journals Search Log in

Explore content About the journal Publish with us Subscribe Sign up for alerts RSS feed

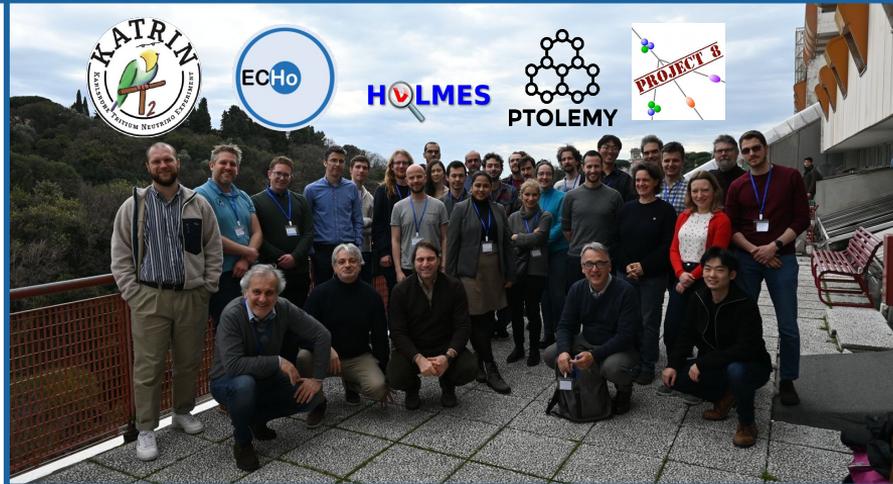
[nature](#) > [news](#) > article

NEWS | 01 March 2024

How heavy is a neutrino? Race to weigh mysterious particle heats up

Physicists discuss experiments that could improve laboratory measurements of the super-light particle's mass.

By [Davide Castelvecchi](#)



HOLMES/PTOLEMY

breve spiegazione HOLMES



Physics Letters B
Volume 118, Issues 4–6, 9 December 1982, Pages 429–434



Calorimetric measurements of ^{163}Ho holmium decay as tools to determine the electron neutrino mass

A. De Rújula, M. Lusignoli¹

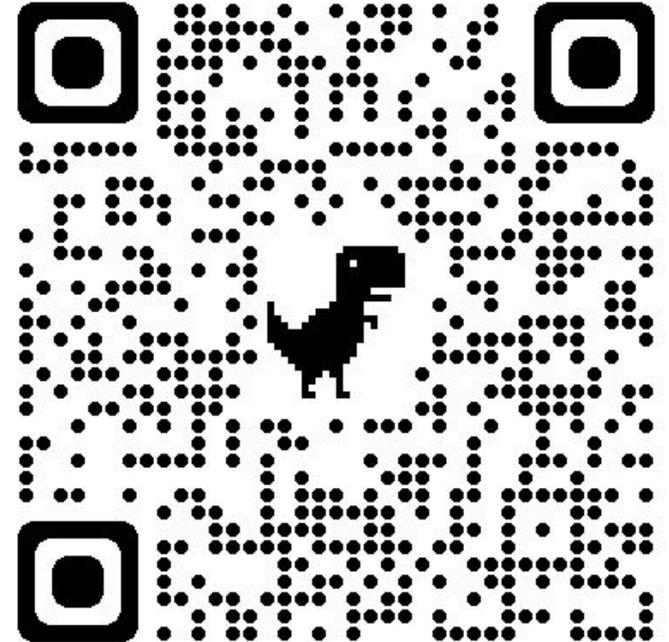
Show more ▾

+ Add to Mendeley  Share  Cite

[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)90218-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90218-0) [Get rights and content ↗](#)

Abstract

We compute the spectrum of “calorimetric” energy in the electron capture decay of ^{163}Ho . A calorimetric experiment would yield an excellent determination of the (^{163}Ho , ^{163}Dy) mass difference. The proximity of the spectral endpoint to an atomic resonance makes the fraction of events that are sensitive to a non-zero neutrino mass superior in ^{163}Ho decay than in tritium decay.



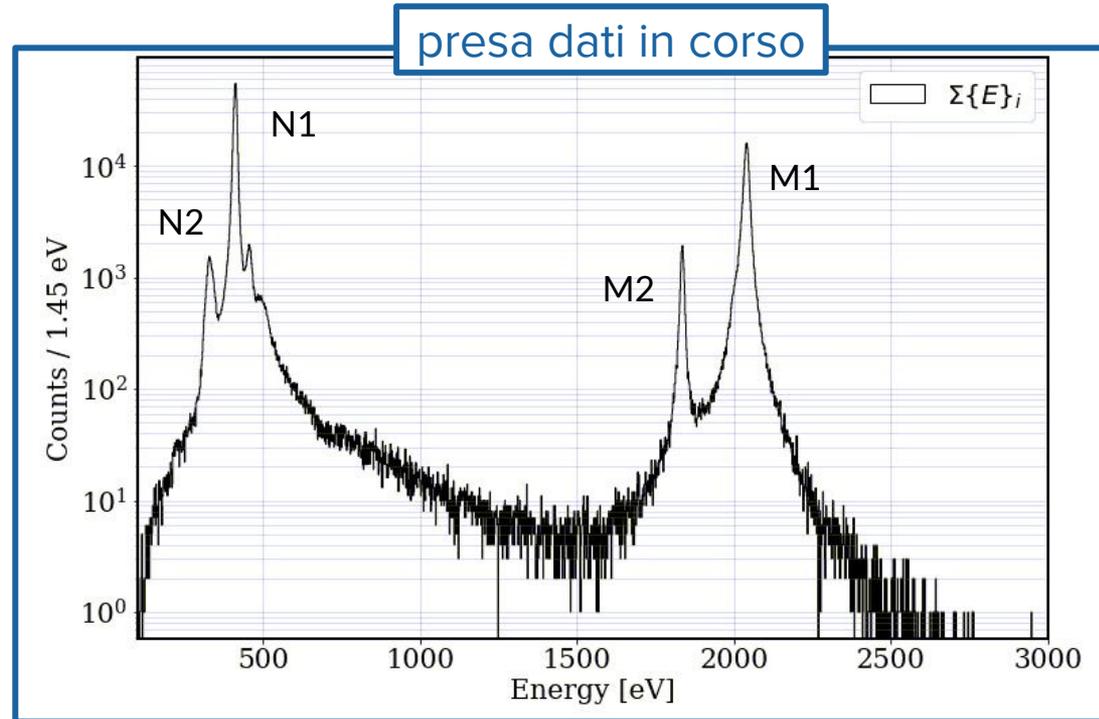
breve spiegazione HOLMES

Obiettivo:

dimostrare le potenzialità dell'alternativa calorimetrica

In Bicocca:

- ultimazione microcalorimetri
- setup criogenico
- readout a microonde
- trattamento del segnale
- analisi dello spettro
- studi sulla sensibilità (praticamente tutto)



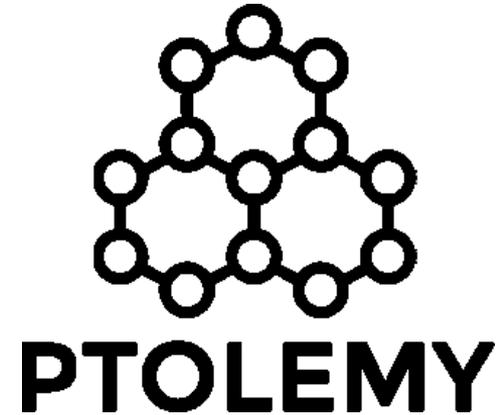
breve spiegazione PTOLEMY

Obiettivo:

inaugurare la next gen unendo gli avanzamenti tecnologici raggiunti finora dai vari esperimenti

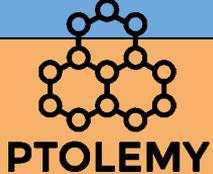
In Bicocca:

- design e costruzione e^- -gun criogenica
- test e^- su microcalorimetri TES
- studi sulla sensibilità



Proposte di tesi magistrali



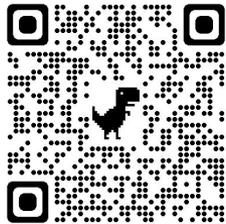
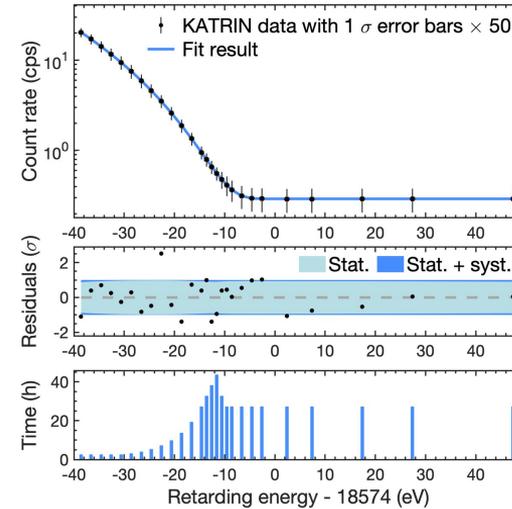
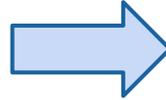
- seguire tutte le fasi di misura di HOLMES (LAB+ANALISI)
 - dalla presa dati all'analisi dello spettro
 - studio della sensibilità su m_ν per esperimenti calorimetrici di next-gen (ANALISI+SIMULAZIONI)
- 
-
- prima misura criogenica di elettroni su TES (LAB+ANALISI)
 - risposta dei TES, setup electron-gun
 - studio della sensibilità su m_ν per PTOLEMY (ANALISI+SIMULAZIONI)
- 

M.Borghesi, P. Campana, M. Faverzani, E. Ferri, A. Giachero, A. Nucciotti, L. Origo

Info x tesi: matteo.borghesi@mib.infn.it, marco.faverzani@mib.infn.it,
elena.ferri@mib.infn.it, angelo.nucciotti@mib.infn.it

KATRIN/TRISTAN

breve spiegazione KATRIN



ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1>
nature
physics

Check for updates

OPEN

Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity

The KATRIN Collaboration*

Since the discovery of neutrino oscillations, we know that neutrinos have non-zero mass. However, the absolute neutrino-mass scale remains unknown. Here we report the upper limits on effective electron anti-neutrino mass, m_e , from the second physics run of the Karlsruhe Tritium Neutrino experiment. In this experiment, m_e is probed via a high-precision measurement of the tritium β -decay spectrum close to its endpoint. This method is independent of any cosmological model and does not rely on assumptions whether the neutrino is a Dirac or Majorana particle. By increasing the source activity and reducing the background with respect to the first physics campaign, we reached a sensitivity on m_e of 0.7 eV c^2 at a 90% confidence level (CL). The best fit to the spectral data yields $m_e^2 = (0.26 \pm 0.34)\text{ eV}^2\text{ c}^4$, resulting in an upper limit of $m_e < 0.9\text{ eV c}^2$ at 90% CL. By combining this result with the first neutrino-mass campaign, we find an upper limit of $m_e < 0.8\text{ eV c}^2$ at 90% CL.

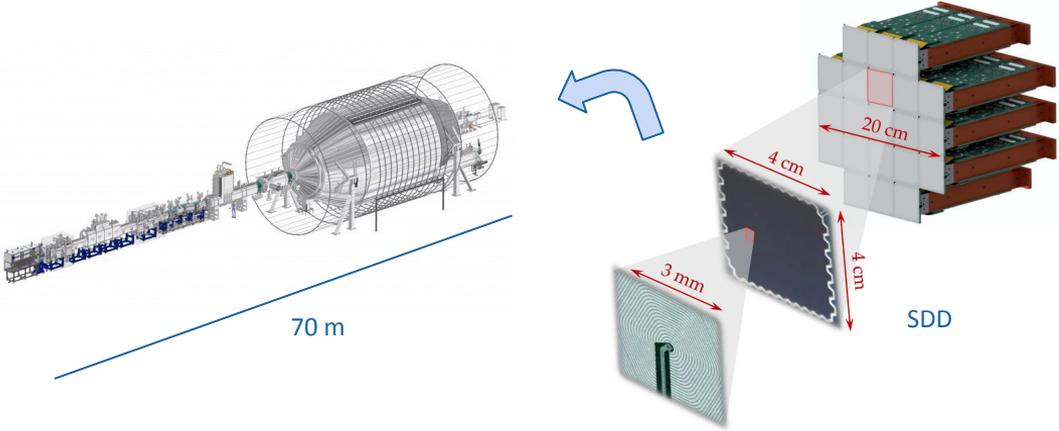
Caratteristiche principali

- risoluzione $< 1\text{ eV}$ @ 18.6 keV
- sorgente da 10^{11} eventi/s
- $B = O(T)$, $U = O(10\text{ kV})$, $p = O(10^{-11}\text{ mbar})$
 $\rightarrow m_\nu < 0.8\text{ eV}$

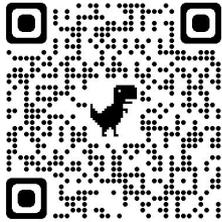
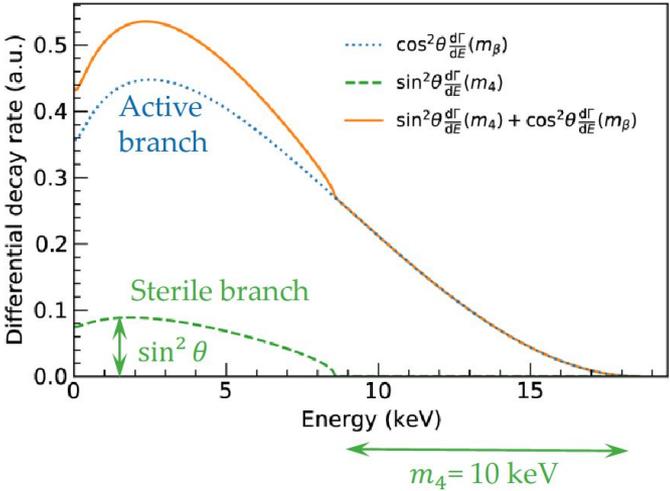
la fase TRISTAN

IDEA

- ricerca di Warm Dark Matter (neutrini sterili) tramite misura precisa di tutto lo spettro del Trizio
- serve un detector veloce per reggere alti rate

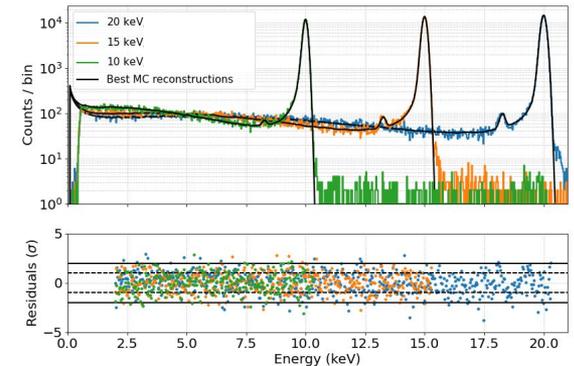
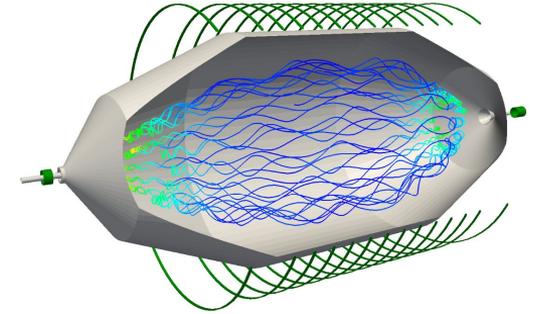
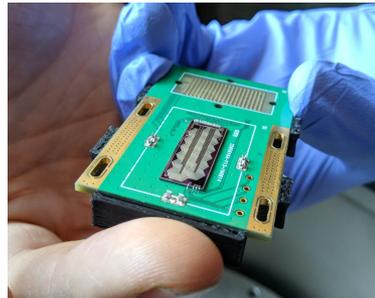
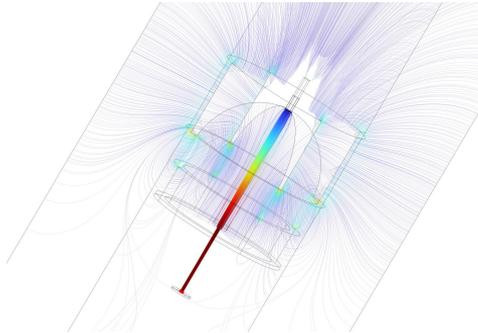


$$\frac{d\Gamma}{dE} = \cos^2 \theta \frac{d\Gamma}{dE}(m_\beta) + \sin^2 \theta \frac{d\Gamma}{dE}(m_4)$$



in Bicocca

- sviluppo del codice di analisi per ricerca di neutrini sterili
- simulazioni MC dell'intera beamline di KATRIN
- sviluppo e validazione di simulazioni accurate per interazioni di elettroni di bassa energia
- studi di sensibilità a fisica BSM
- sviluppo di un test-stand (+ electron-gun) per la caratterizzazione del detector per la fase TRISTAN (SDD)
- spin-off: altre misure di fisica negli spettri β con SDD



Proposte di tesi

- Caratterizzazione di SDD per la fase TRISTAN → design di un e-gun, misure in Lab e simulazioni MC
- Sviluppo di una simulazione MC della beamline di KATRIN
- Sviluppo di un codice di analisi veloce basato su simulazioni MC e neural network → simulazioni in Geant4, interpolazione con NN, studi di sensibilità
- Sviluppo di un setup per misure di spettri beta proibiti con SDD → misure storicamente difficili, grande interesse per $0\nu\beta\beta$ e neutrini da reattore
- ...

Matteo Biassoni, Chiara Brofferio, Giulio Gagliardi, Andrea Nava, Irene Nutini, Maura Pavan

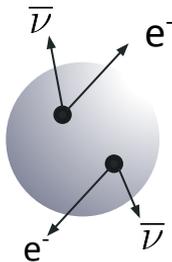
Info per tesi: matteo.biassoni@mib.infn.it, andrea.nava@mib.infn.it

CUORE/CUPID/LEGEND

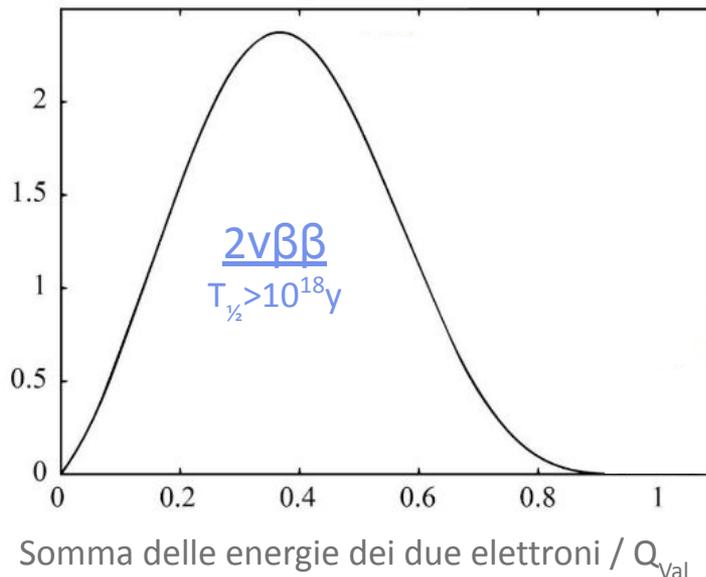
Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$

Ovvero: la creazione di e^- nella materia

Processo standard:



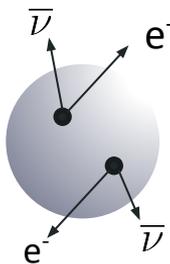
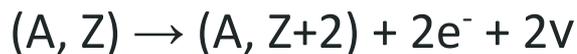
Missing energy



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

Ovvero: la creazione di e^- nella materia

Processo standard:

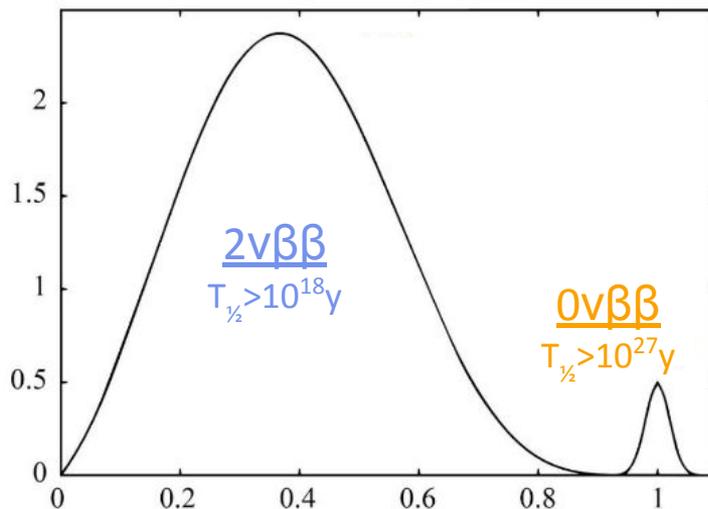


Missing energy

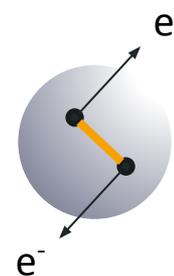
Neutrino di Majorana

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

Variante non standard:



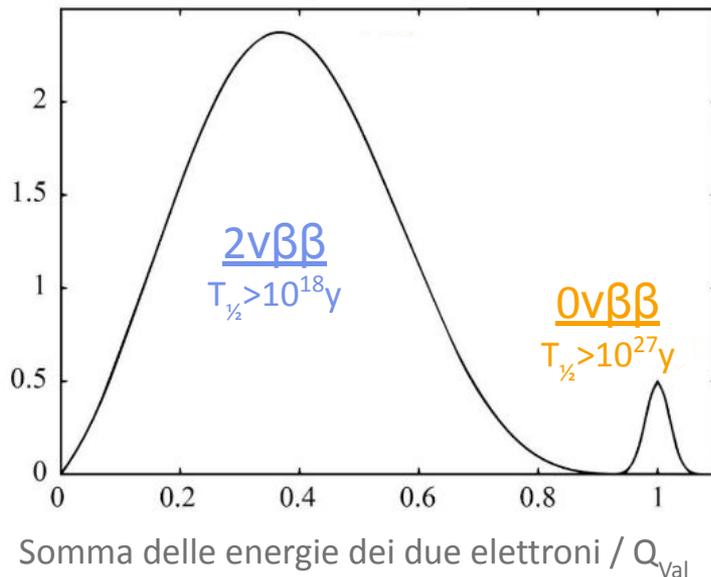
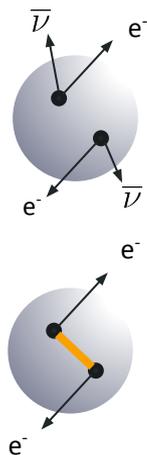
Somma delle energie dei due elettroni / Q_{val}



No missing energy

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

Ovvero: la creazione di e^- nella materia



$T_{1/2}$ Lunghi

Alto numero nuclei candidati

(~ton scale)

Basso fondo

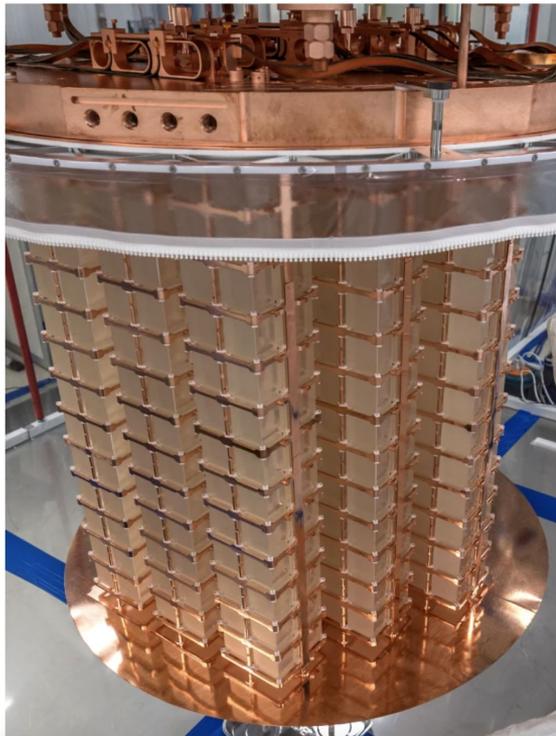
Ricerca di un picco

Risoluzione energetica $\sim \text{‰}$ at Q_{Val}

Half-life dipende da “massa efficace” $m_{\beta\beta}$ del ν_e

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

Ovvero: la creazione di e^- nella materia



$T_{1/2}$ Lunghi

Alto numero nuclei candidati

(\sim ton scale)

Basso fondo

Ricerca di un picco

Risoluzione energetica \sim ‰ at Q_{Val}

Rivelatori con molti moduli

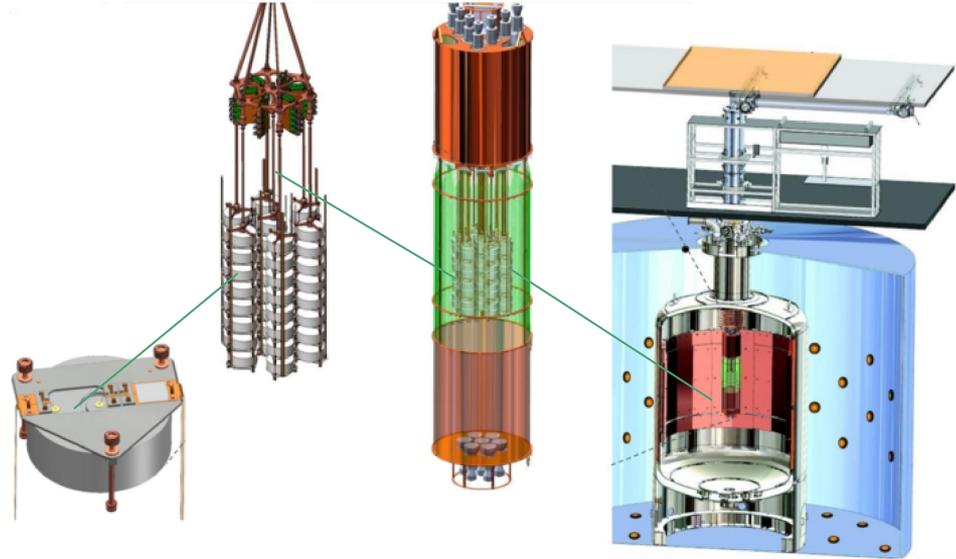
Analisi dedicate

Laboratori sotterranei

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



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



Array di HPGe

Veto Attivo in LAr
scintillante

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



$0\nu\beta\beta$ del ^{76}Ge
@ Laboratori del 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

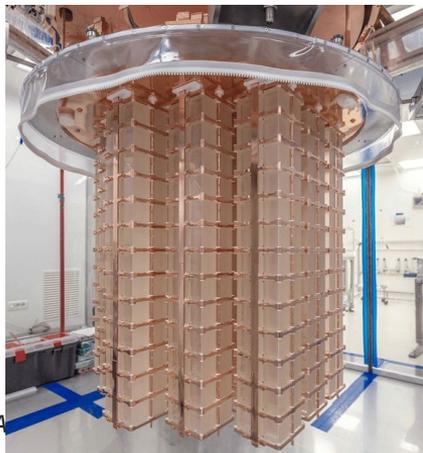
Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$: CUORE e CUPID

Rivelatori termici @ 10mK

Energia dall'aumento di temperatura



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

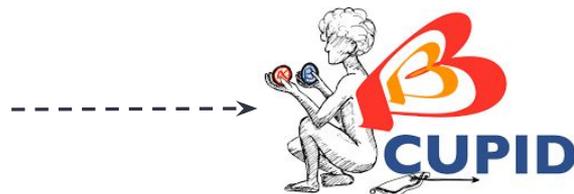


988 rivelatori
@15mK

m^3 più freddo
dell'universo

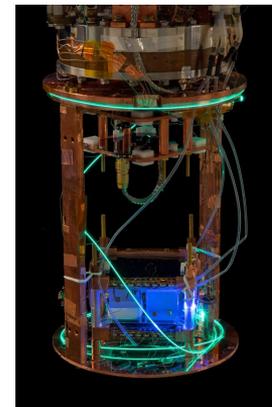
In presa dati dal 2017

Tecnologia cresciuta @MiB



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

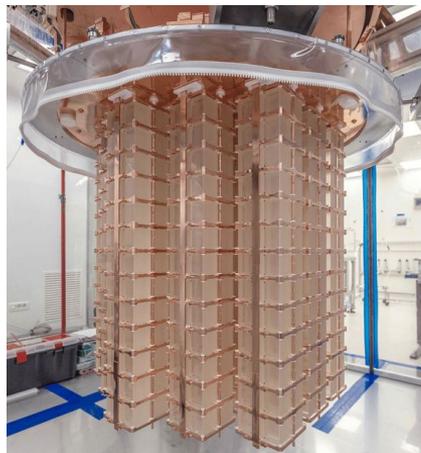
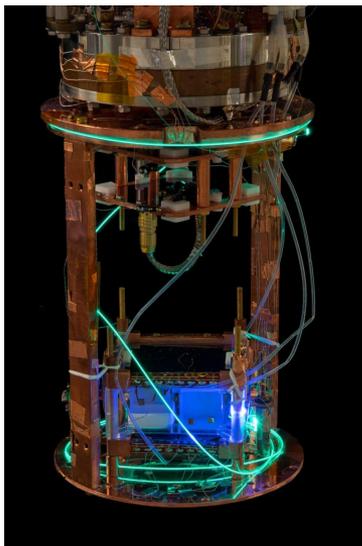
In progettazione
R&D attivo @MiB



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 γ con HPGe, misure α 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

Raggi cosmici: astro-particelle dalla galassia alla Terra

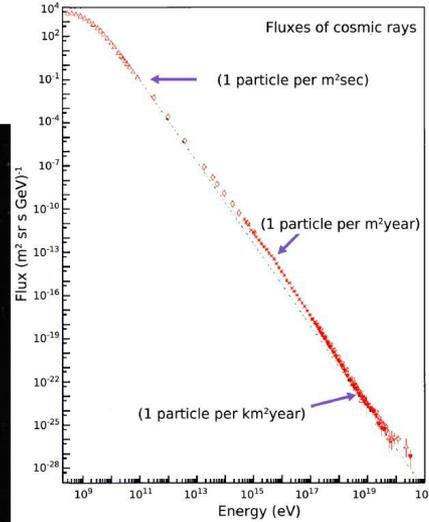
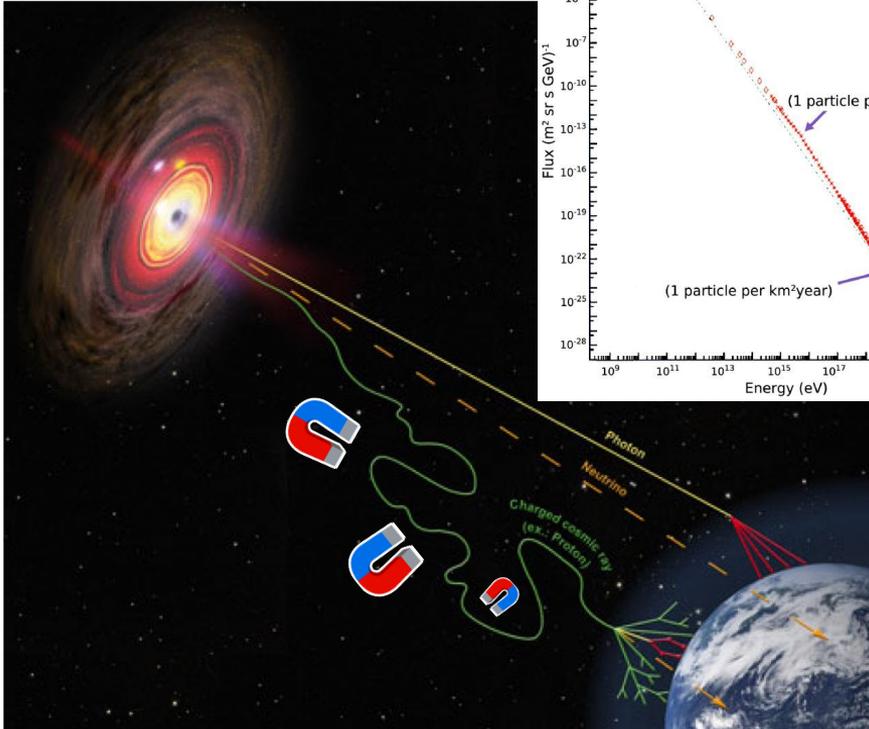


Raggi Cosmici

Space weather

Danno da radiazione nello spazio

Raggi cosmici: dalla galassia alla Terra



Credit: HAP/A. Chantelauze

I raggi cosmici sono particelle cariche di alta energia provenienti dallo spazio che ci colpiscono continuamente e da tutte le direzioni.

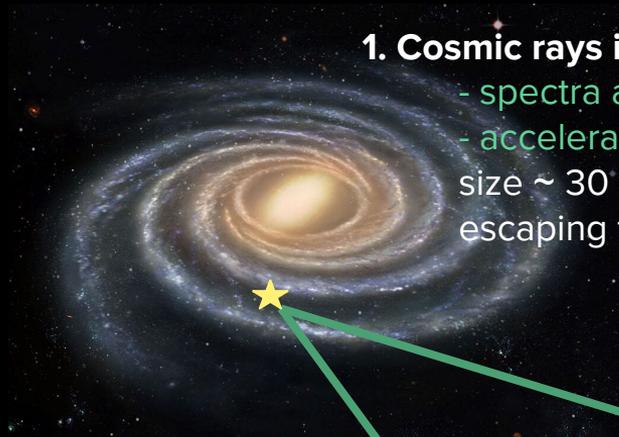
Scoperte da Victor Hess nel 1912, sebbene siano studiate da più di un secolo, la loro origine non è ancora completamente compresa.

I raggi cosmici di **origine galattica** misurabili in modo diretto sono nel range GeV-PeV. Sotto il GeV i raggi cosmici misurati possono essere di **origine solare**.

Raggi cosmici: dalla galassia alla Terra

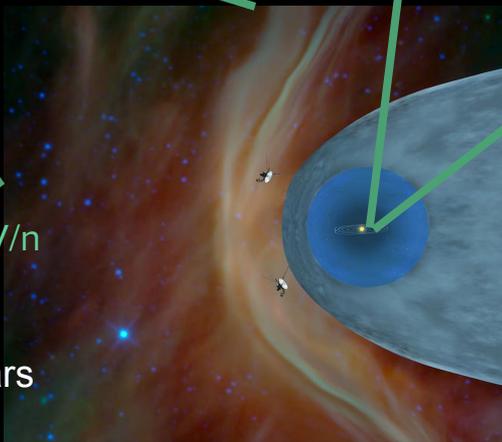
1. Cosmic rays in the galaxy

- spectra and abundances
 - acceleration and transport
- size ~ 30 kpc
escaping time $\sim 10^6$ y



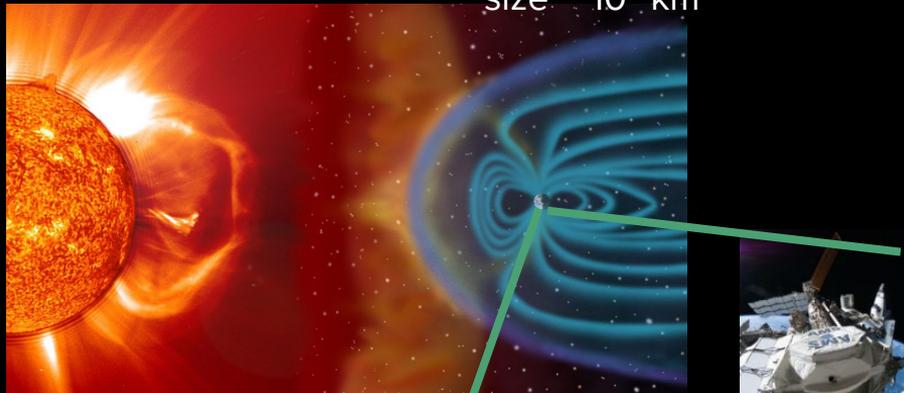
2. Transport in the solar cavity

- flux modulation $E < 20\text{GeV}/n$
 - time dependence
- size ~ 120 AU
propagation time \sim few years



3. In the Earth magnetic field

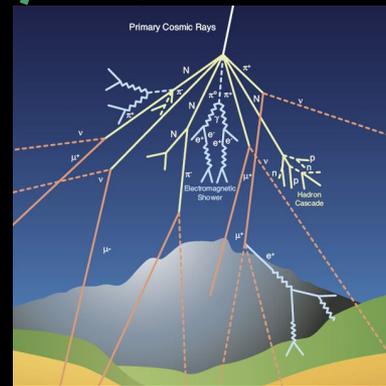
- cutoff rigidity
- size $\sim 10^4$ km



Space based detectors

4. Atmospheric shower

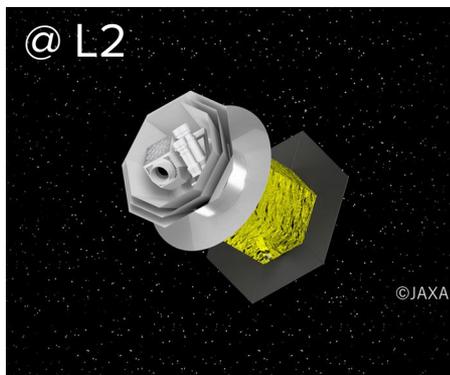
Ground based detectors



Raggi cosmici: misure sperimentali

Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02):

- Evoluzione temporale del flusso dei raggi cosmici
- Misura del flusso degli particelle energetiche solari (SEP)
- Studio dei raggi cosmici intrappolati in magnetosfera



LiteBird:

- Sistematiche sperimentali di MFT dovute ai raggi cosmici
- Applicazione del Machine Learning alla sintesi di dati di calibrazione

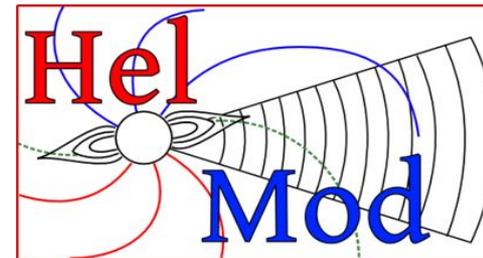
Raggi cosmici: modelli interpretativi

Modulazione solare:

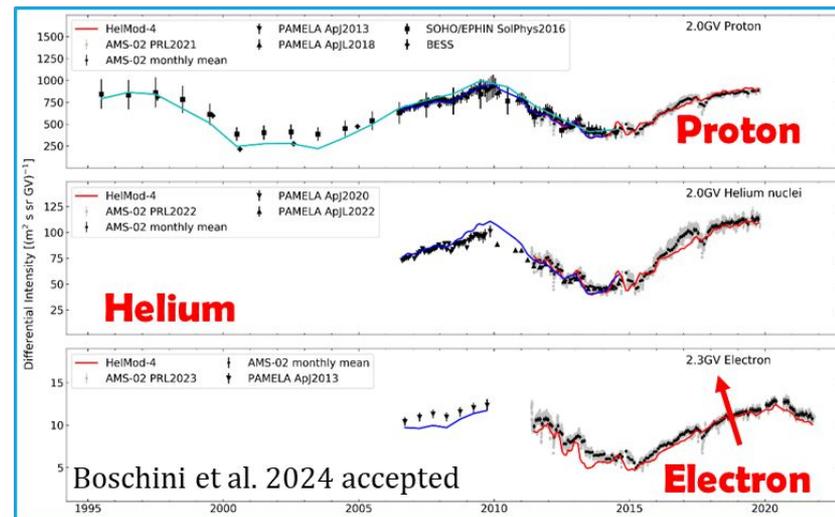
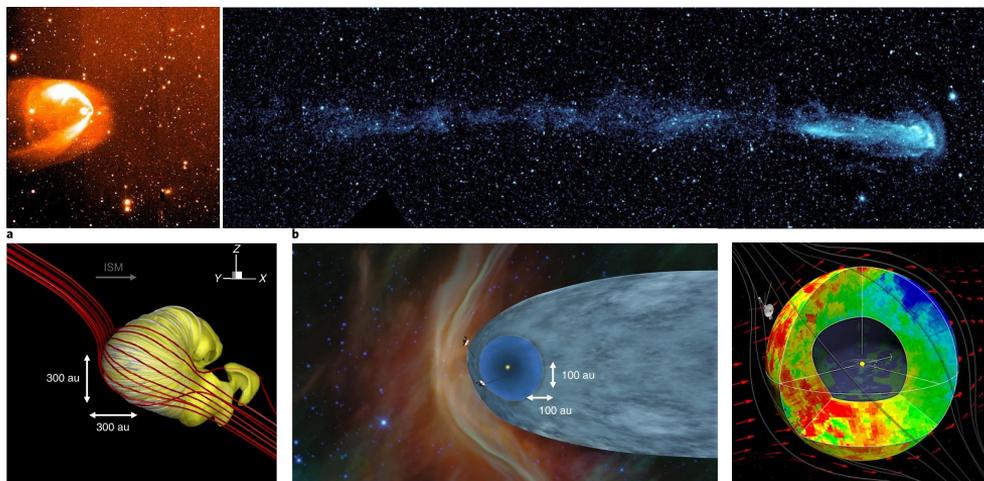
- Studio dei parametri di modulazione in ambito HPC
- Dalle Astroparticelle all'astrofisica, misura e interpretazione degli spettri locali interstellari

Dove finisce il vento solare?

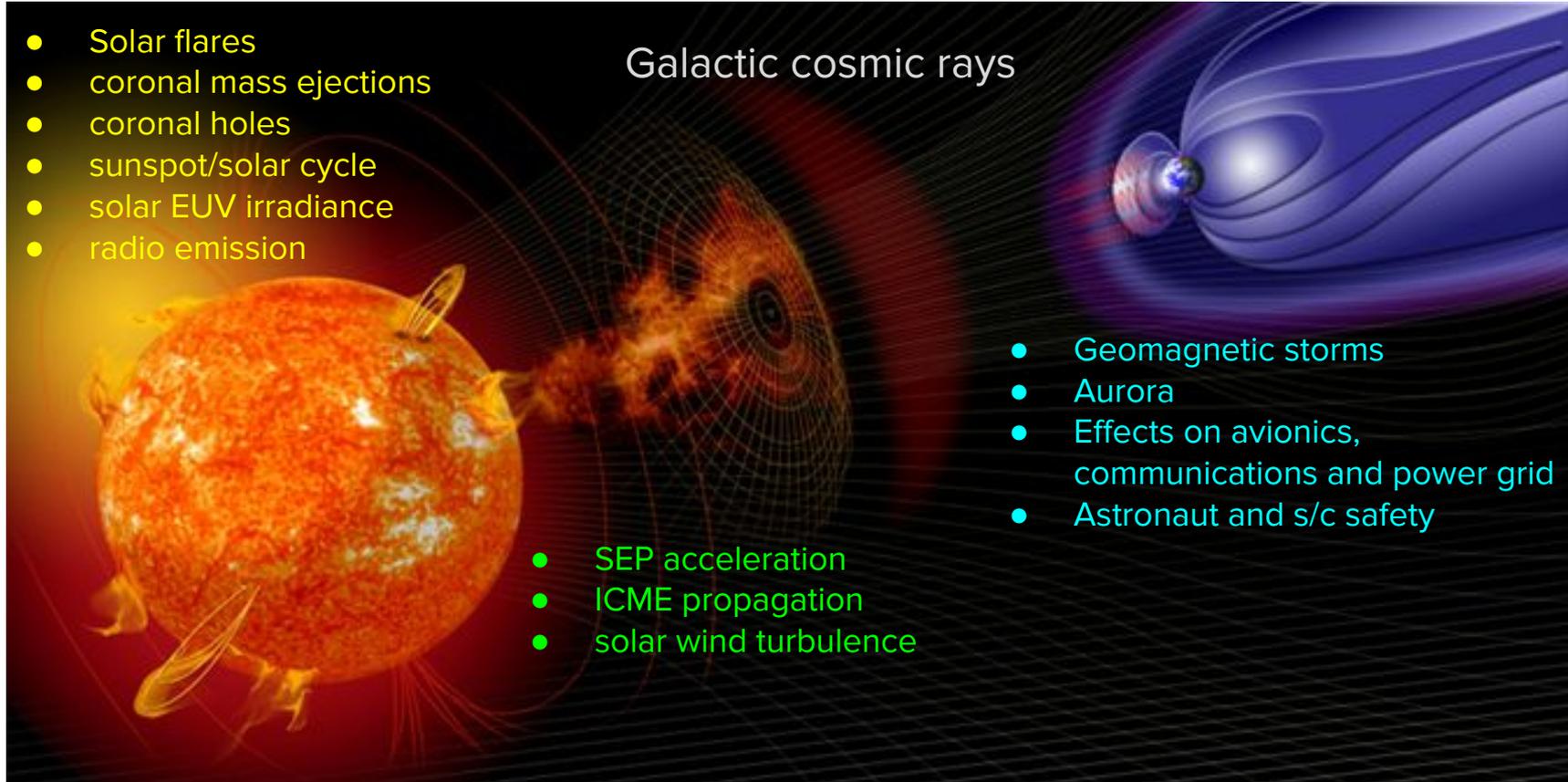
studi sulla dimensione e forma globale dell'eliosfera



www.helmod.org



Space weather: l'imprevedibile attività del sole



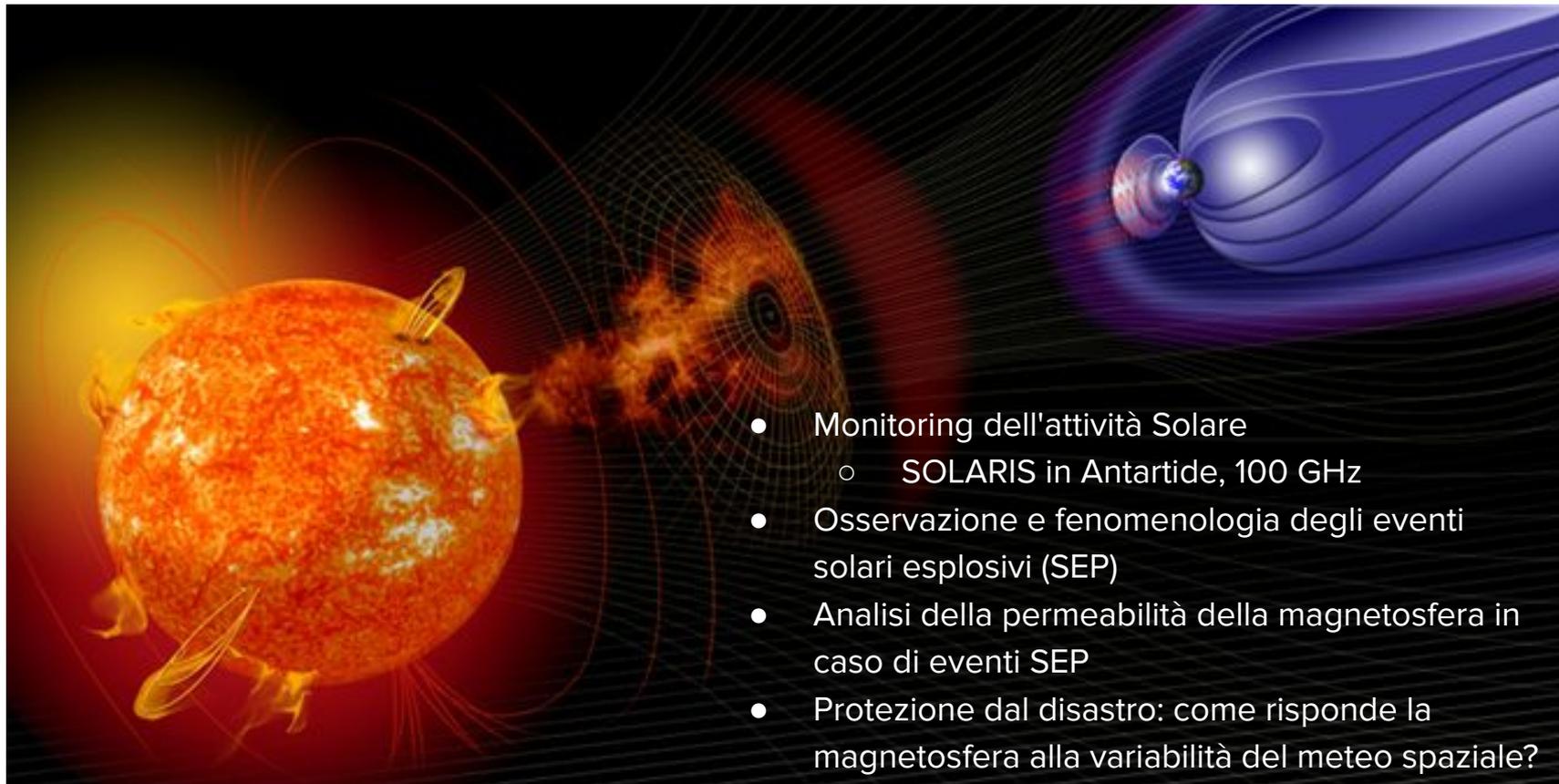
- Solar flares
- coronal mass ejections
- coronal holes
- sunspot/solar cycle
- solar EUV irradiance
- radio emission

Galactic cosmic rays

- SEP acceleration
- ICME propagation
- solar wind turbulence

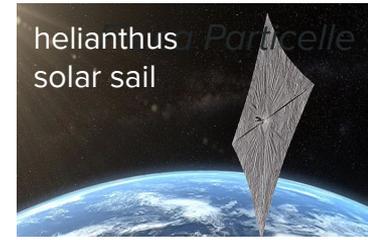
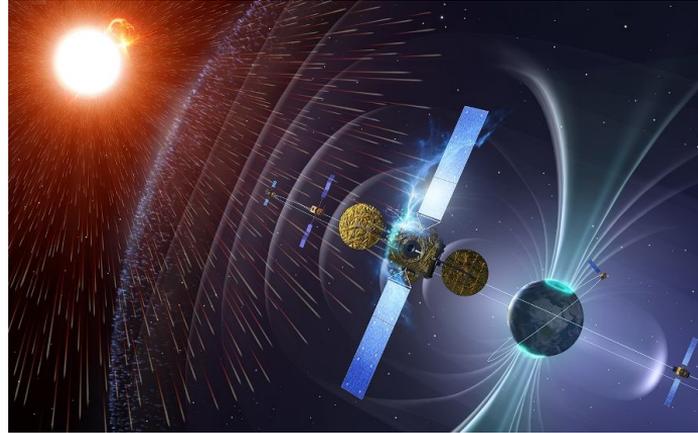
- Geomagnetic storms
- Aurora
- Effects on avionics, communications and power grid
- Astronaut and s/c safety

Space weather: ~~l'im~~prevedibile attività del sole



Tecnologie per l'esplorazione spaziale

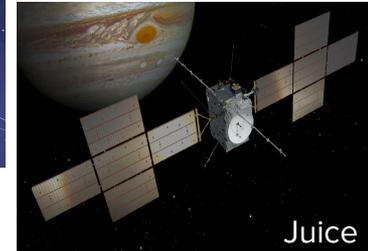
- Interazione della radiazione spaziale con dispositivi elettronici: rischi, analisi e previsioni
- Misura della dose: i radiation monitor nello spazio e al suolo
- Uso pubblico dei risultati scientifici: sviluppo di strumenti web



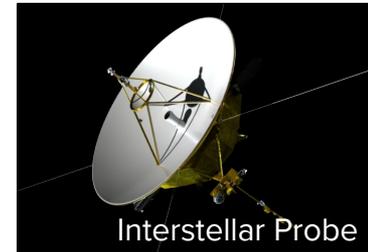
helianthus *Particelle*
solar sail



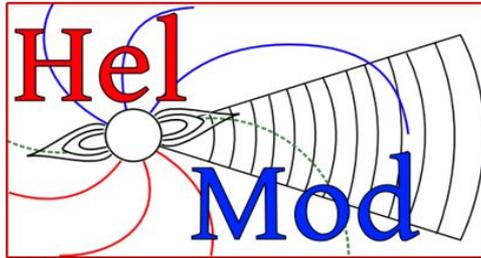
Lunar Gateway



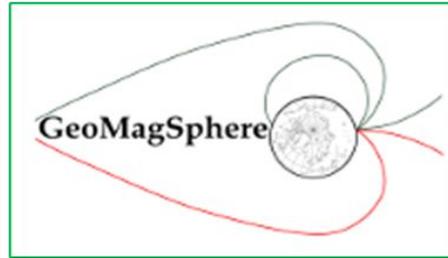
Juice



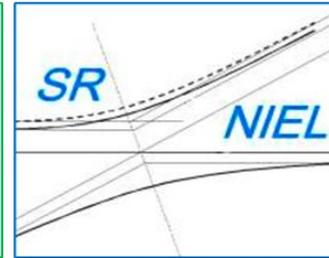
Interstellar Probe



www.helmod.org



www.geomagsphere.org



www.sr-niel.org

Chi siamo



Massimo Gervasi
U1-3044
massimo.gervasi@unimib.it



Stefano Della Torre
U2-3007
stefano.dellatorre@mib.infn.it



Davide Grandi
U2-3006
davide.grandi@unimib.it



Davide Rozza
U2-3018
davide.rozza@unimib.it



Mauro Tacconi
U2-3019
mauro.tacconi@unimib.it



Giovanni Cavallotto
U2-3007
giovanni.cavallotto@mib.infn.it



Giuseppe La Vacca
U2-3006
giuseppe.lavacca@unimib.it

Alcune proposte

- **ESA Academy's Training and Learning Facility**
https://www.esa.int/Education/ESA_Academy/About_the_training_and_learning_facility
- **ESA Student Internships** a Novembre
https://www.esa.int/About_Us/Careers_at_ESA/Student_Internships2
- **ESA Young Graduate Trainees** a Febbraio
https://www.esa.int/About_Us/Careers_at_ESA/Graduates_Young_Graduate_Trainees



@AstroParticelleMIB



#astropart_mib

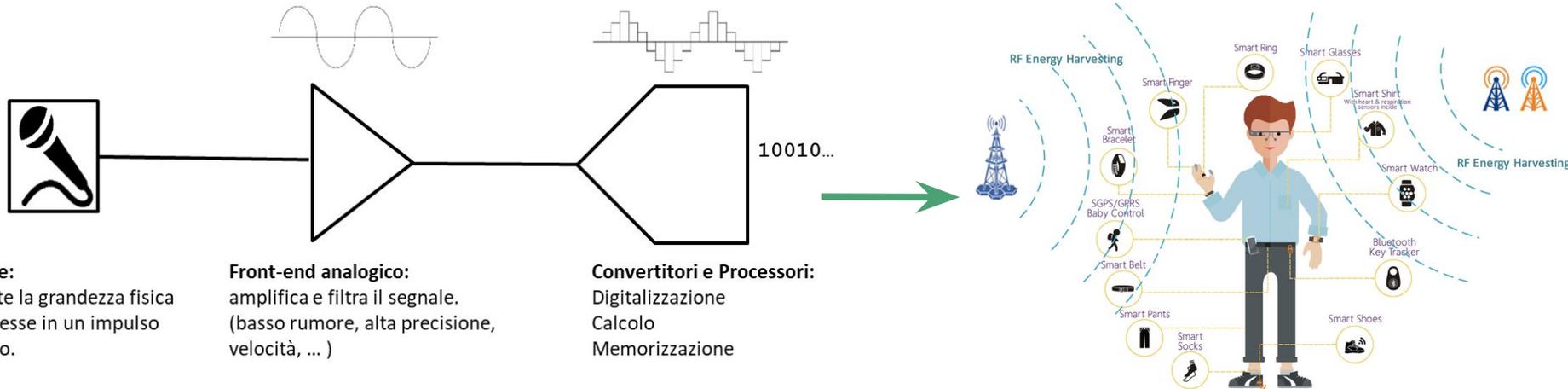


Elettronica

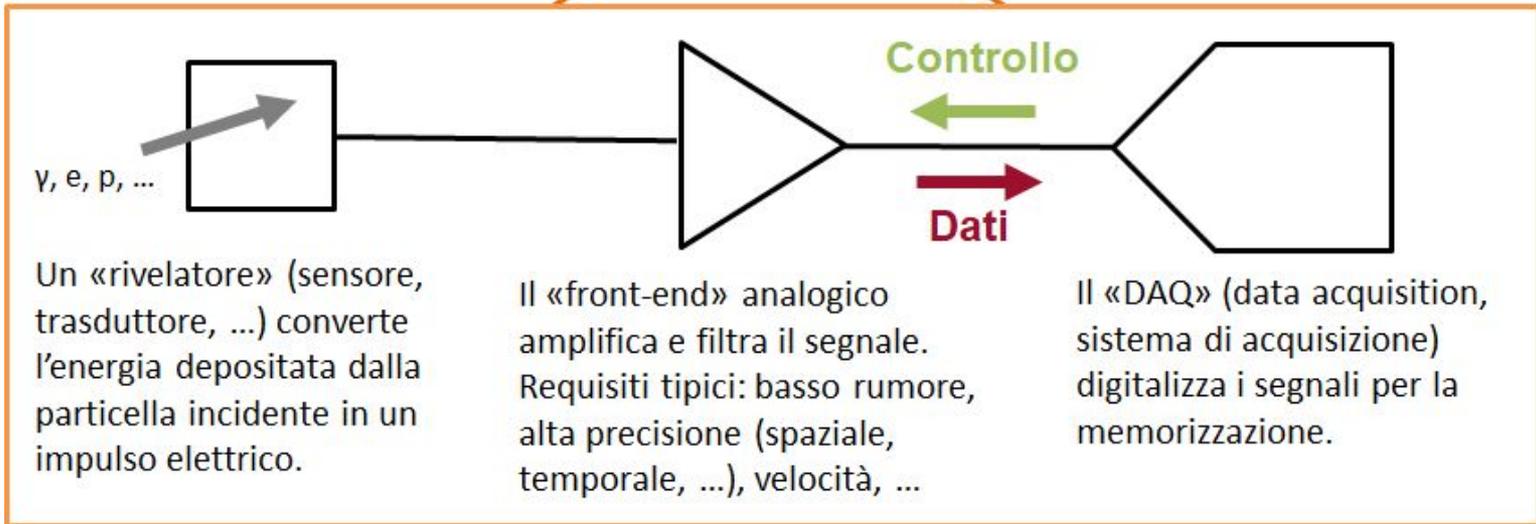
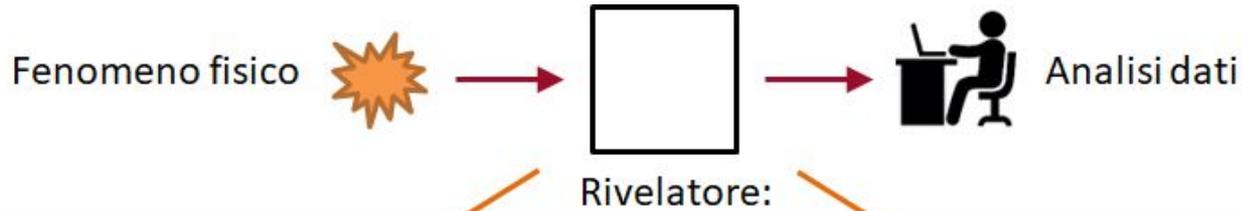


Di cosa ci occupiamo

- Ci occupiamo dell'interfaccia tra il mondo fisico analogico e il mondo digitale
- L'elettronica è distribuita nel mondo fisico sotto forma di sensori
- Ci sono sensori di ogni tipo in oggetti di uso quotidiano (smartphones, smartwatches, automobili, ...)

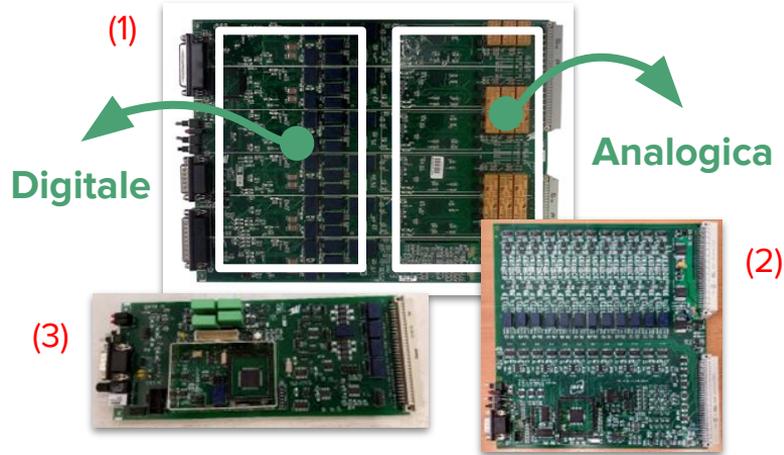


Elettronica in esperimenti di fisica delle particelle



Esempi di elettronica di front-end realizzata nei nostri laboratori

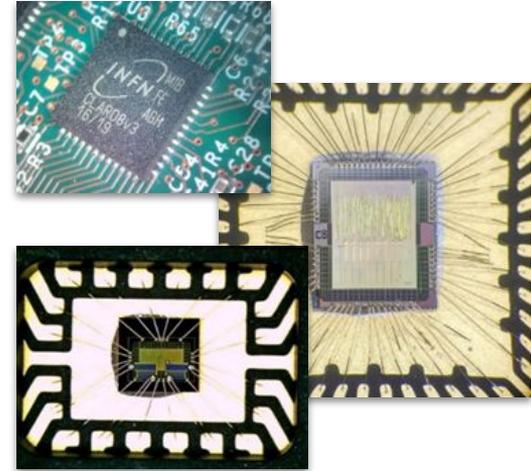
Esperimenti per la fisica del neutrino



Esempio di tre parti che costituiscono l'elettronica

Gli amplificatori (1), il sistema di conversione del segnale da analogico a digitale (2) e l'impulsore di segnale ultra stabile per la calibrazione del sistema (3)

Esperimenti con acceleratori



Circuiti integrati custom

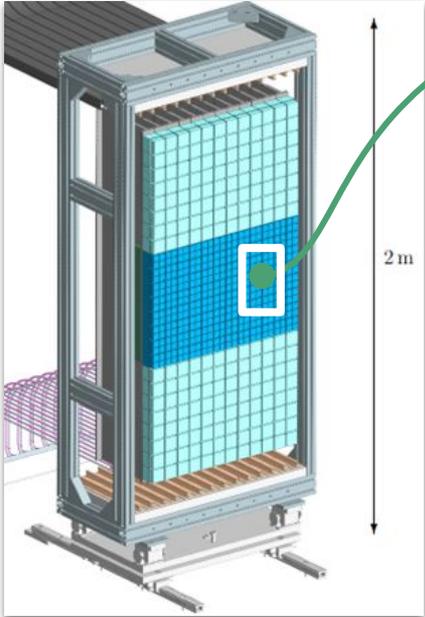
Quando lo spazio a disposizione è poco e le caratteristiche dell'esperimento lo richiedono, si realizzano circuiti integrati di dimensioni micrometriche, progettati ad hoc («ASIC: Application specific integrated circuit»)

LHCb - Rivelatori RICH



LHCb è uno dei 4 grandi esperimenti all'acceleratore Large Hadron Collider (CERN). Comprende due **sottorivelatori «RICH» per la misura della velocità delle particelle**. In sostanza, delle macchine fotografiche ultraveloci: 40 milioni di scatti al secondo e sensibili a singolo fotone.

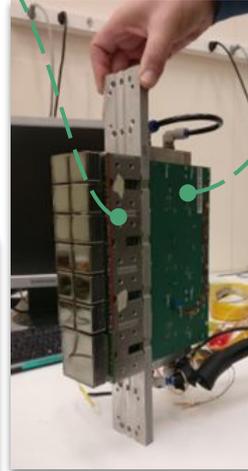
Parte del rivelatore RICH



Analoga

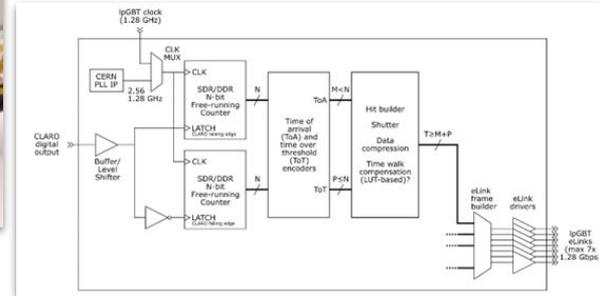
Chip CLAROS

Ultra-veloce (risposta < 25 ns) per alti rate di segnale (> 40 MHz)
Resistente alla radiazione



Digitale

- Digitalizzazione dei segnali
- Misura e compensazione del tempo di arrivo dei fotoni
- Deve poter resistere alla radiazione

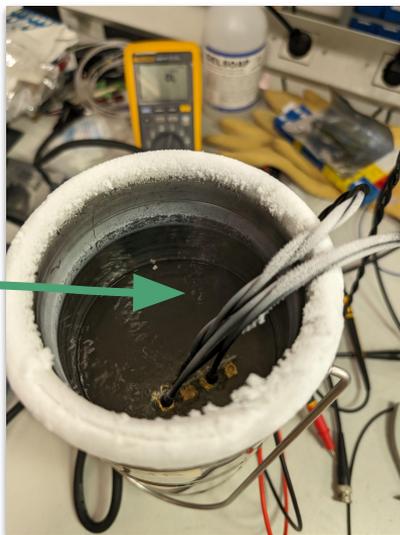


LHCb, RICH - Caratterizzazione di SiPM



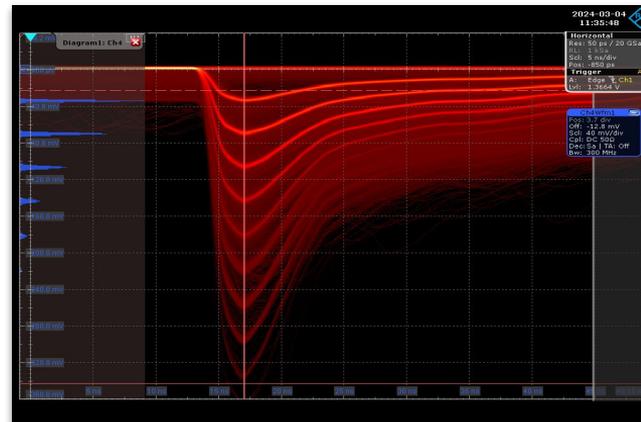
Futuri aggiornamenti dell'LHC richiederanno una maggiore granularità di sensori nel RICH. Utilizzo di **SiPM** (Silicon PhotoMultipliers), sensori di luce compatti e che consumano poco. Bisogna raffreddarli a **temperature criogeniche** per misurare il singolo fotone in **ambienti radioattivi** come quelli presenti in LHCb.

Immersione in azoto liquido



Amplificatore veloce e a basso rumore

- Risoluzione di 100-200 ps sul tempo di arrivo fotoni
- Tempo di discesa del segnale di 1-2 ns circa

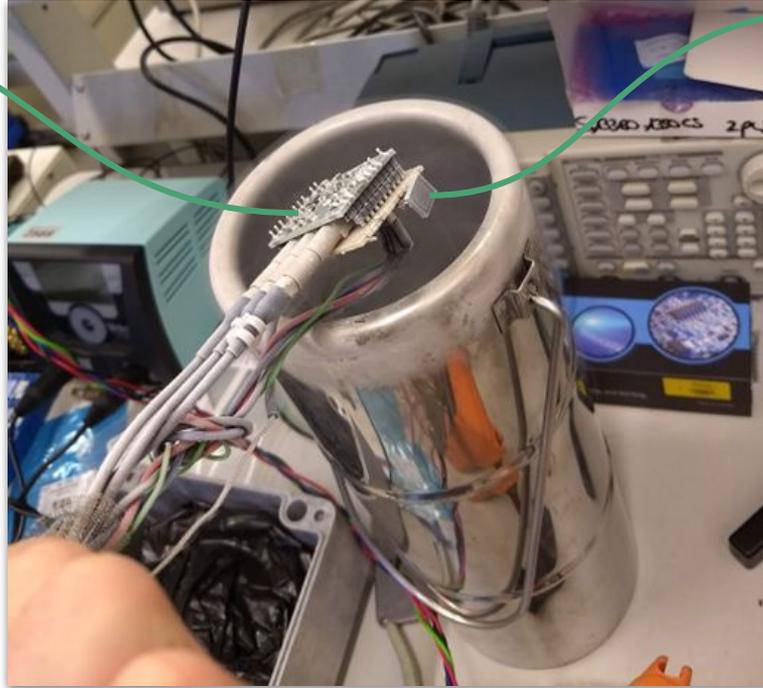
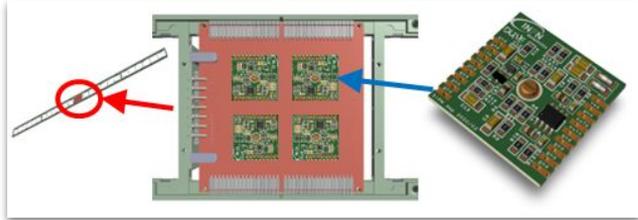


5 ns

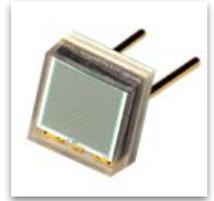
I fotorivelatori di DUNE

DUNE è un esperimento per lo studio delle proprietà dei neutrini in costruzione negli USA. Nel rivelatore di DUNE vengono rivelati i fotoni per localizzare gli eventi nel tempo con precisione. Per rivelare i fotoni prodotti nelle interazioni, si usano SiPM immersi in **argon liquido** (90 K).

Amplificatore



Fotorivelatore SiPM



Rivelatori Bolometrici (CUPID, CUORE, CROSS)

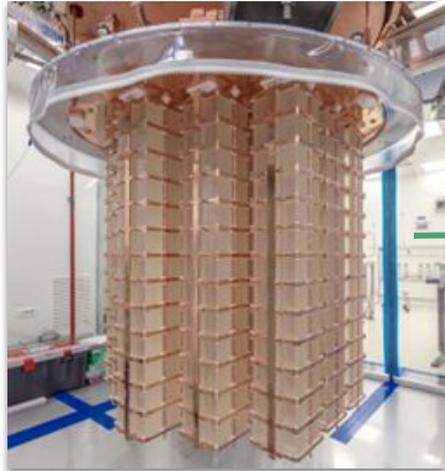


I **bolometri** convertono l'energia rilasciata dalle particelle.

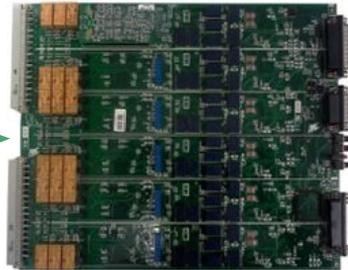
L'aumento di temperatura è rivelato da un sensore resistivo (**termistore**) a semiconduttore (NTD-Ge).

Il termistore genera un segnale di tensione, che viene amplificato e digitalizzato.

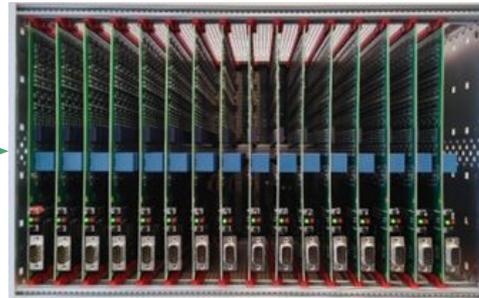
Rivelatore



Front-end analogico



Sistema di acquisizione



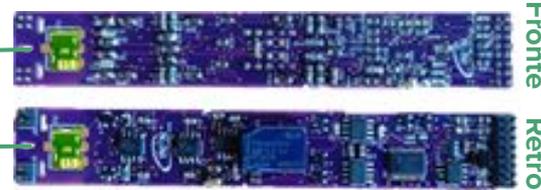
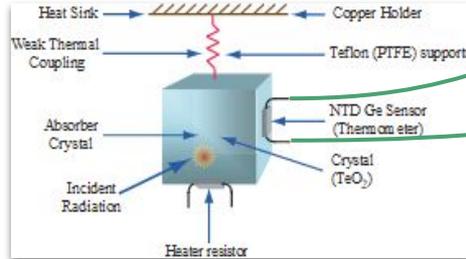
PC



Rivelatori Bolometrici (CUPID, CUORE, CROSS)



Generazione segnale bolometro

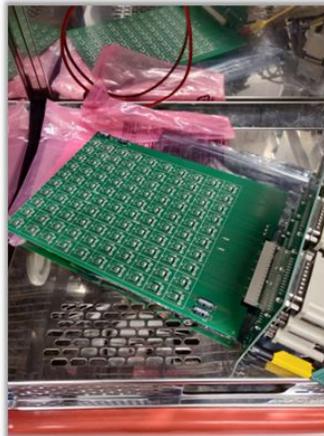


Preamplicatore con transistor JFET in ingresso

Compiti della nuova elettronica di front-end:

- Lettura dei segnali a bassissimo rumore
- Alta reiezione dei disturbi ambientali (temperatura, EMF)
- Alta stabilità nel tempo
- **Caratterizzazione di un grande numero di dispositivi** per raggiungere le specifiche di stabilità in temperatura
- **Modellizzazione dei dispositivi** per predire il loro comportamento in tensione e varie condizioni ambientali

Matrice di 100 JFET



Proposte di tesi

- Test di un amplificatore di SiPM a temperature ambiente e criogeniche e caratterizzazione di SiPM
- Caratterizzazione, modellizzazione e analisi statistica di transistor JFET
- Progettazione elettronica per lettura rivelatori



**Per maggiori informazioni scriveteci
o passate a trovarci al 3° piano**

**paolo.carniti@mib.infn.it
claudio.gotti@mib.infn.it
gianluigi.pessina@mib.infn.it
davide.trotta@mib.infn.it**