

# Le oscillazioni dei neutrini

Proposte di Tesi Magistrale

## DUNE/nuSCOPE/ICARUS JUNO

A. Branca

Ufficio: edificio U2 - stanza 4024 - piano 4  
antonio.branca@unimib.it

A. Barresi

Ufficio: edificio U1 - stanza 4039b - piano 4  
andrea.barresi@unimib.it

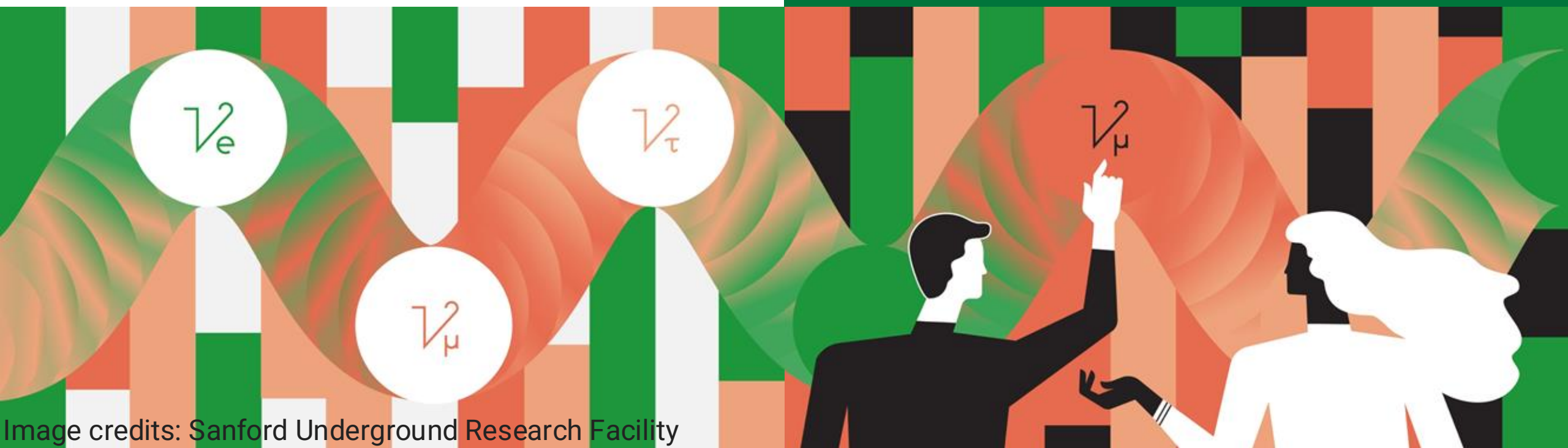
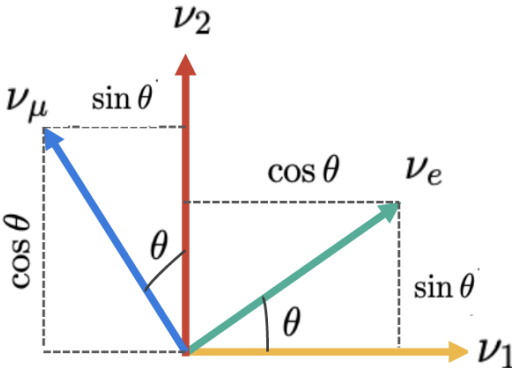
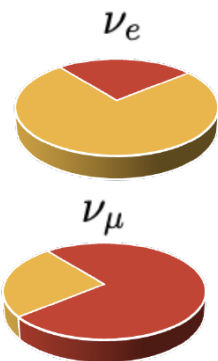


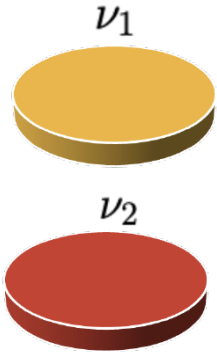
Image credits: Sanford Underground Research Facility

# Oscillazioni dei neutrini: modello a due sapori

Autostati di sapore



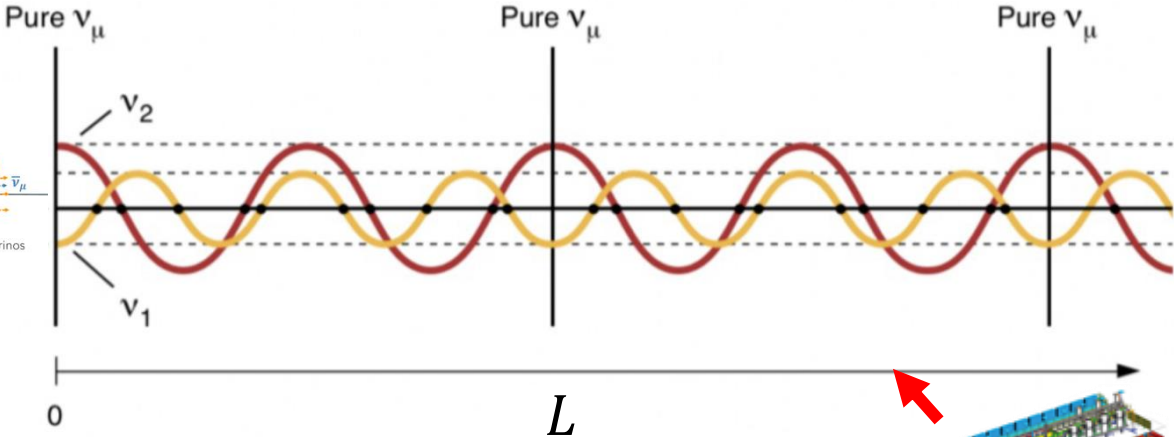
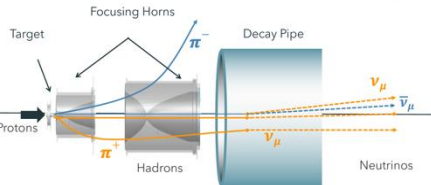
Autostati di massa



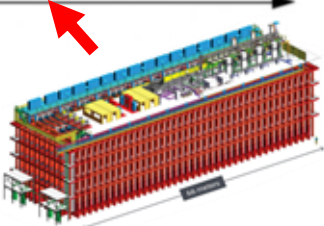
Autostato di sapore = sovrapposizione di autostati di massa

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

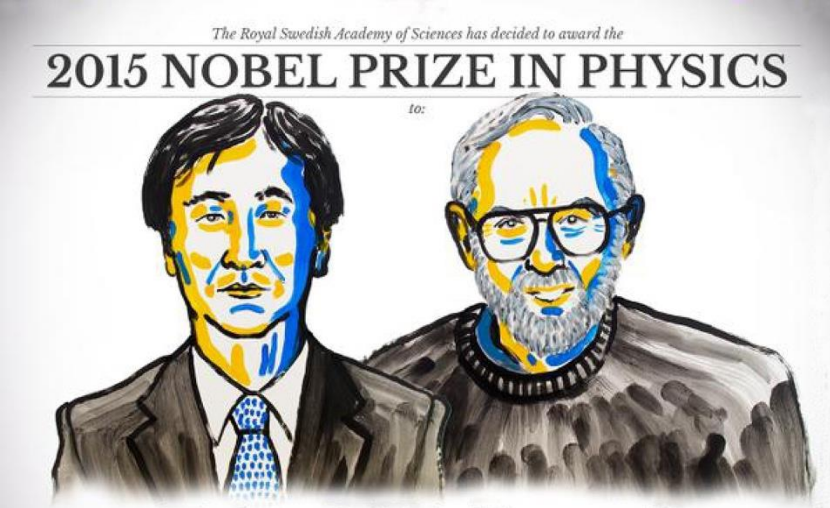
Sorgente ν\_μ



$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \sim \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right)$$



Detector

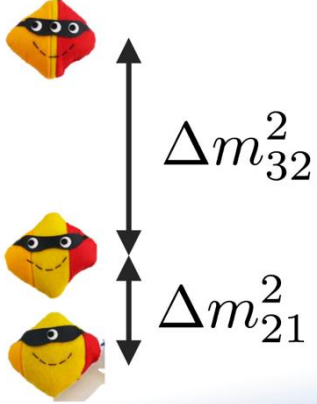


Metamorphosis in the particle world

The Nobel Prize in Physics 2015 recognises Takaaki Kajita in Japan and Arthur B. McDonald in Canada, for their key contributions to the experiments which demonstrated that neutrinos change identities. This metamorphosis requires that neutrinos have mass. The discovery has changed our understanding of the innermost workings of matter and can prove crucial to our view of the universe.

# Oscillazioni dei neutrini: i parametri

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = R(\theta_{23}) \cdot R(\theta_{13}, \delta_{CP}) \cdot R(\theta_{12}) \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

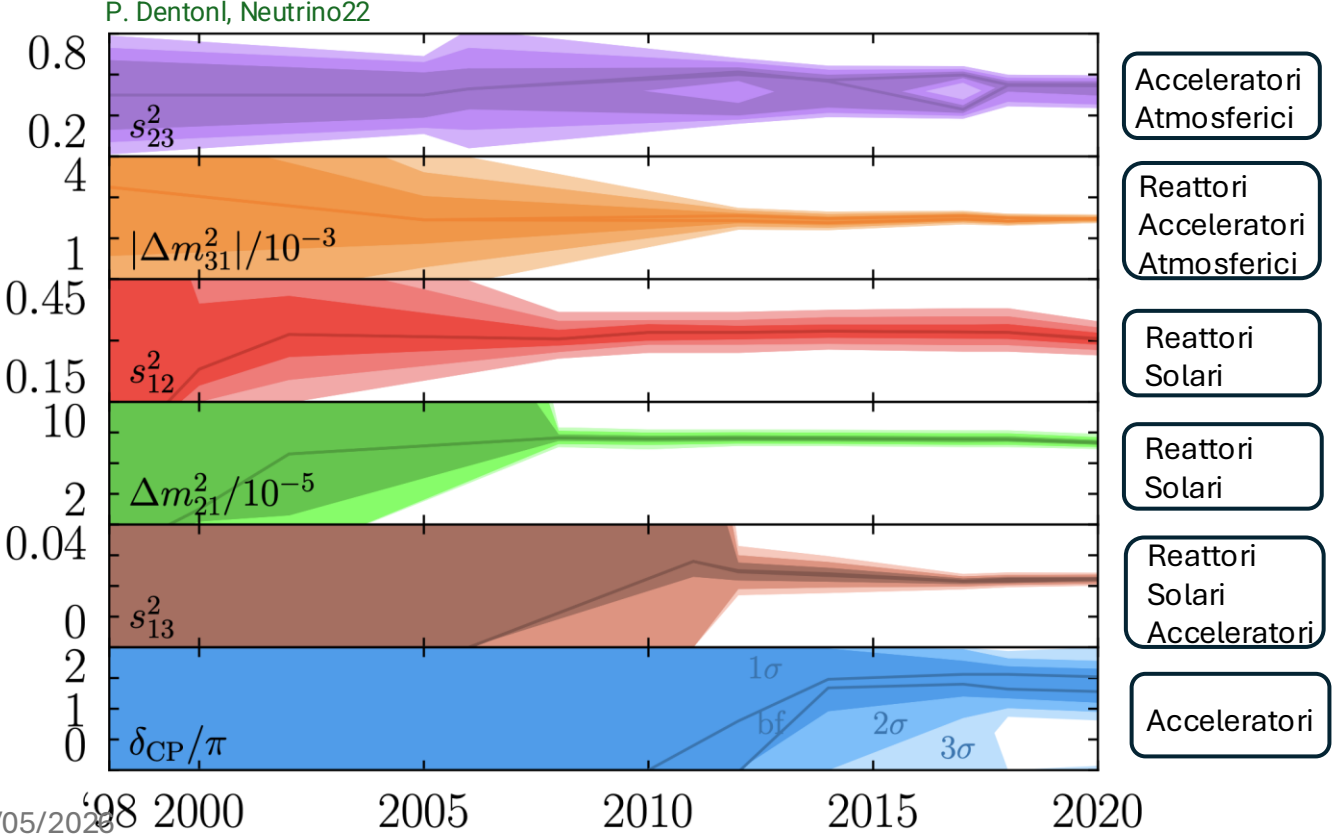


Le oscillazioni tra i tre sapori di neutrino dipendono da:

- Tre angoli di mixing  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$  e una fase  $\delta_{CP}$
- Differenze di massa  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\Delta m_{32}^2$

I parametri di oscillazione e differenze massa misurati negli ultimi decenni

- Usando (anti)neutrini prodotti da sorgenti molto diverse
- Studiando la scomparsa o l'apparizione di sapori diversi da quelli prodotti alla sorgente

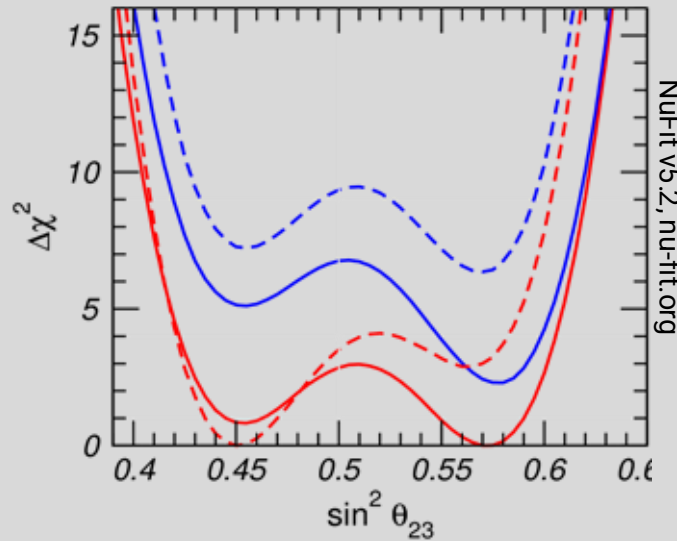


# Le oscillazioni dei neutrini - *Known Unknowns*

## Misure di precisione

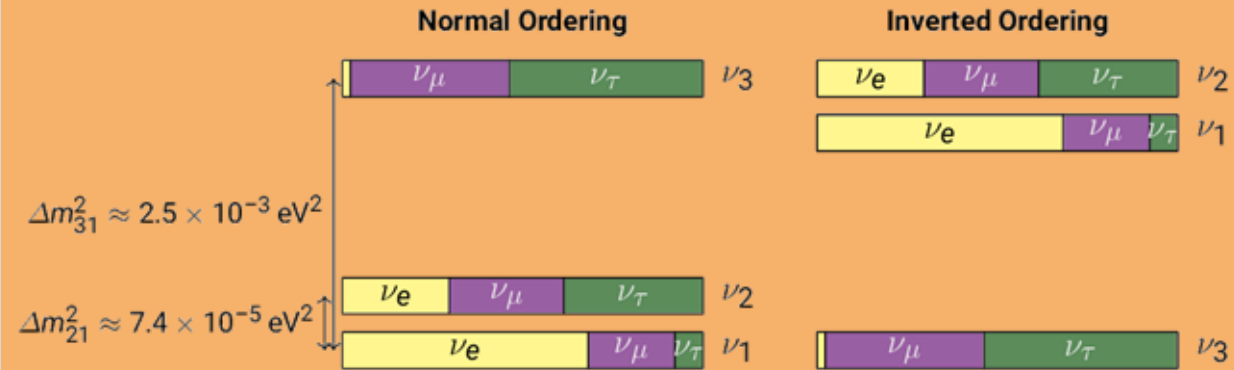
$\theta_{23}$ : maximal mixing?  
(simmetria  $\nu_\mu - \nu_\tau$ )

In quale ottante?



## Gerarchia delle masse

Quale è il neutrino più leggero? (segno di  $\Delta m_{23}^2$ )



## Violazione di $CP$

neutrini e antineutrini  
si comportano allo  
stesso modo?



Quanto vale  $\delta_{CP}$ ?

## Lo scenario a 3 sapori è completo?

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



# Oscillazioni neutrini @ UniMiB: ruolo internazionale importante

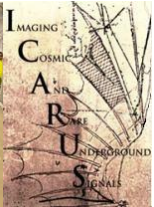
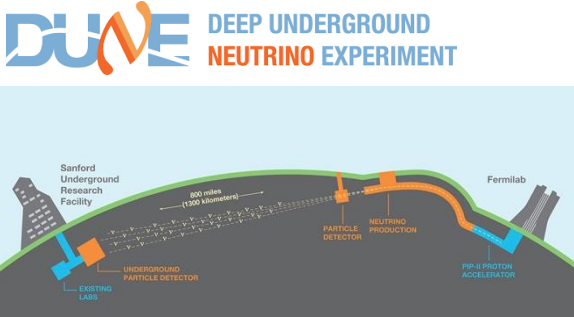
Coinvolti nella realizzazione di esperimenti per rispondere a domande fondamentali:

Neutrini e anti-neutrini si comportano in modo diverso? E di quanto?

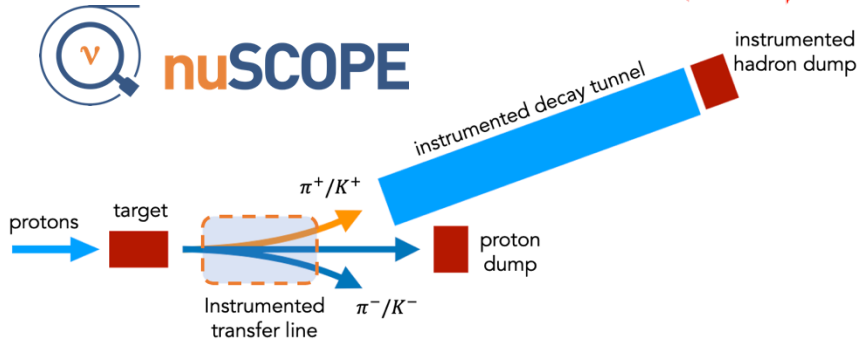
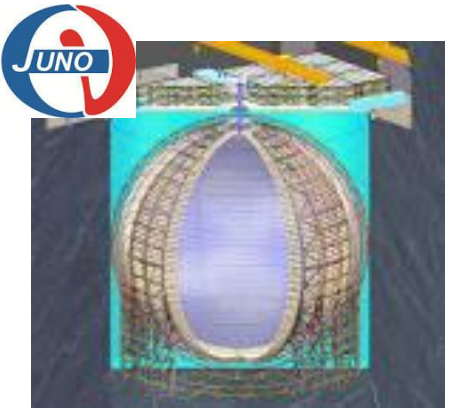
Qual è il più leggero?

Come interagiscono con la materia?

Esiste un neutrino pesante?



Fermilab

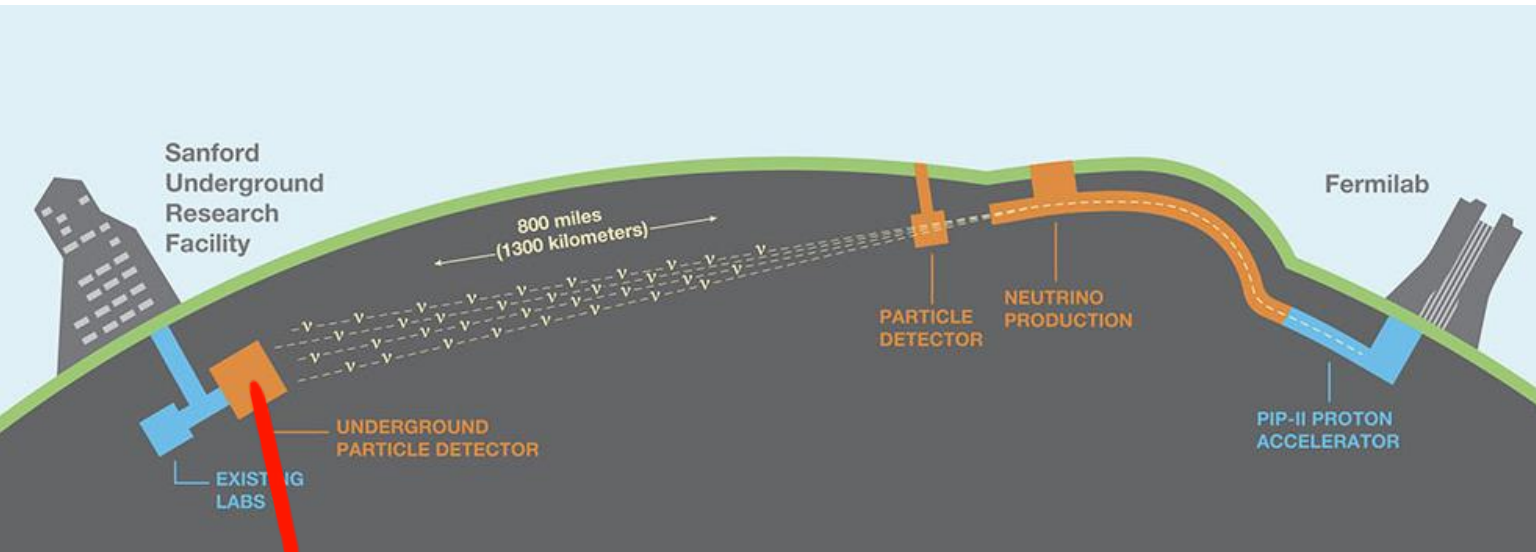


Sanford Underground Research Facility

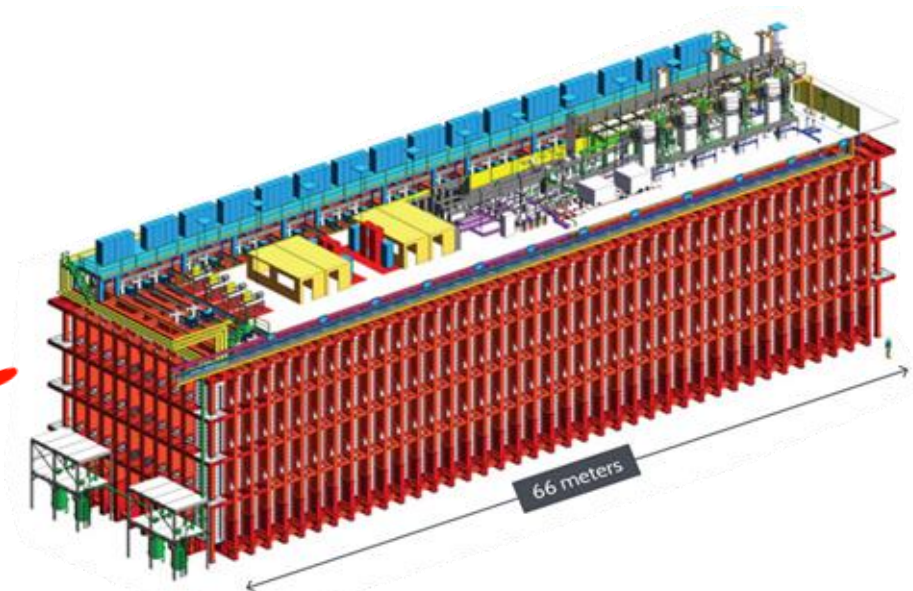


# DUNE DEEP UNDERGROUND NEUTRINO EXPERIMENT

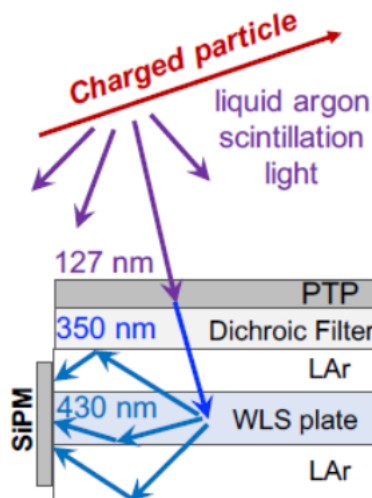
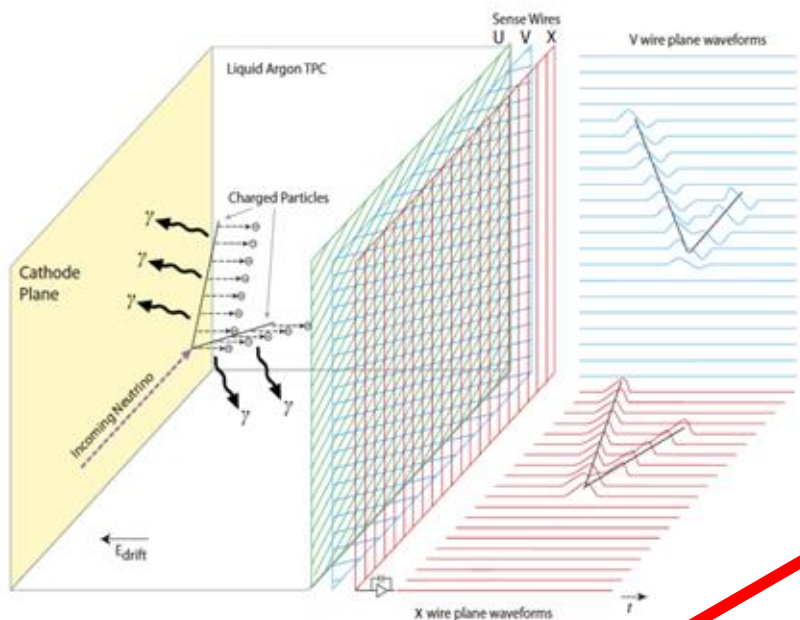
Esperimento in costruzione negli USA (30+ nazioni partecipanti):



- Genero fascio (anti) neutrini  $\mu$  al Fermilab
- Li misuro con un sistema di rivelatori vicini al punto di produzione (near detector)
- Misuro nuovamente a  $\sim 1300$  km di distanza



- ❖ Il più grande esperimento con TPC ad argon liquido
  - 4 TPC con massa totale da 40 kton
- ❖ Esteso programma di fisica
  - misura precisa dei parametri di oscillazione, ma non solo!
- ❖ Prototipi (ProtoDUNE) al CERN
  - Test delle tecnologie sviluppate

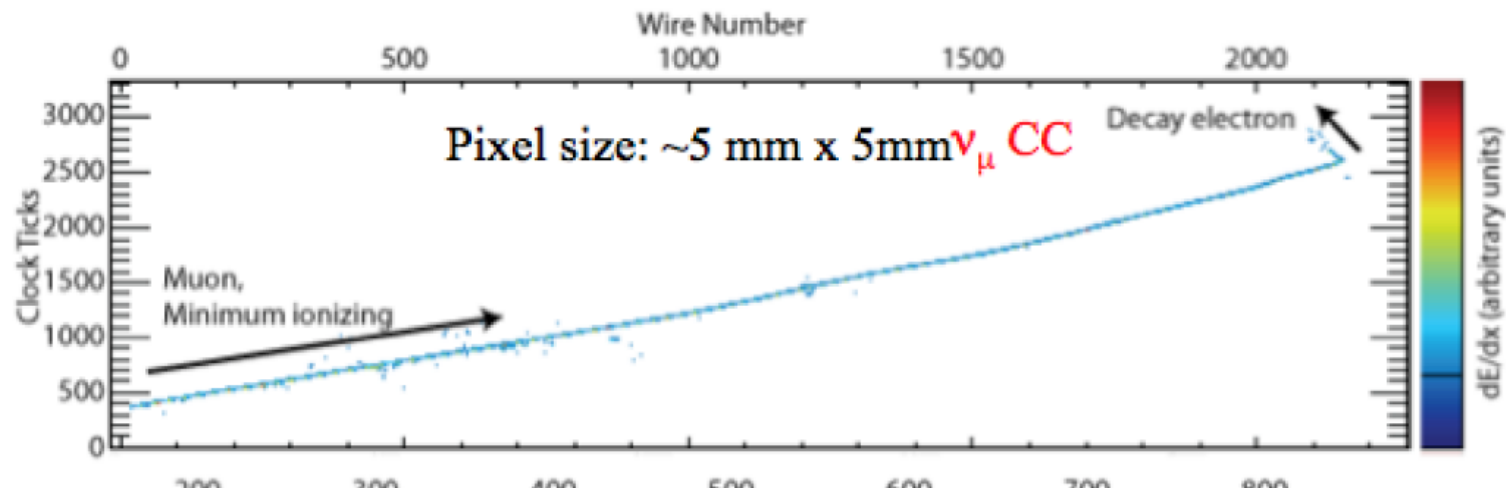
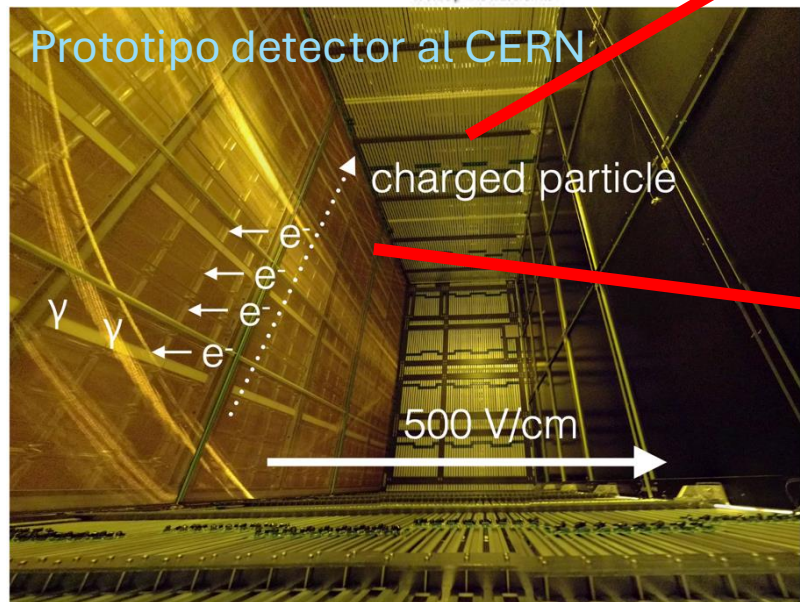


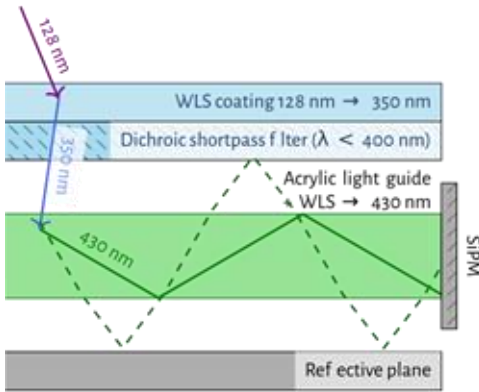
Cosa e come misuriamo? Una particella carica produce:

- Elettroni da ionizzazione: vengono “raccolti” tramite campo elettrico su anodo segmentato in  $\sim$ ms
- Luce di scintillazione ( $\lambda \sim 128$  nm): vengono “intrappolati” e misurati tramite un sistema sviluppato appositamente

Da queste ricaviamo: informazioni calorimetriche,  $dE/dx$ , topologia degli eventi, tempo delle interazioni,...

Prototipo detector al CERN





## Photon Detection System (PDS)

Hardware oriented

@UniMiB

@ UniMiB progettazione dell'elettronica di front-end criogenica dei fotorivelatori.  
**Obiettivo:** dimostrare che siamo in grado di ricostruire singoli fotoni con SNR > 4 e range dinamico sufficiente per l'applicazione simultanea a neutrini da fascio, neutrini solari e da supernovae

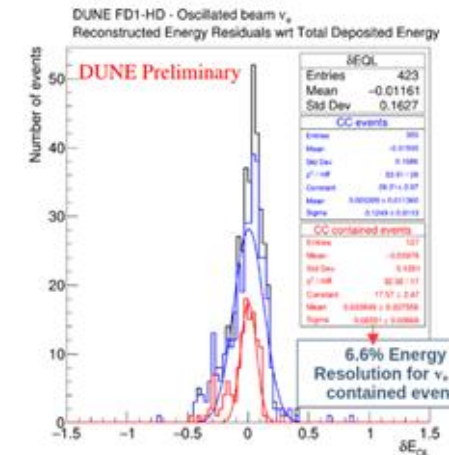
## Double Calorimetry in DUNE

Analysis/Simulation

@UniMiB

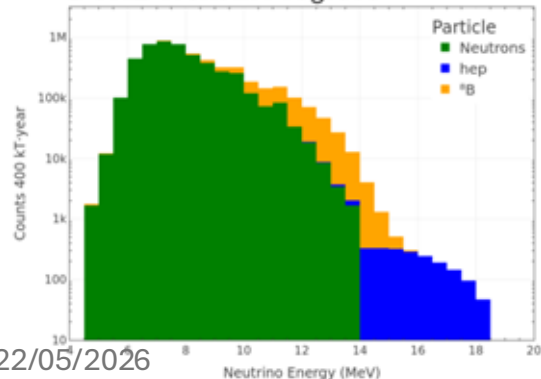
“Tradizionalmente” la luce di scintillazione è stata usata solo per determinare il tempo dell'interazione, ma può essere usata per migliorare la risoluzione energetica del detector.

**Obiettivo:** sviluppo di algoritmi per la massimizzazione della risoluzione energetica utilizzando la calorimetria combinata luce+carica



G. Brunetti, NuT el 2023

DUNE Work In Progress



## Sensibilità ai neutrini solari in DUNE

Analysis/Simulation

@UniMiB & Madrid

Grande massa + underground rendono DUNE un ottimo candidato per misurare  $\nu$  solari e per la prima osservazione dei neutrini prodotti dalla reazione  ${}^3\text{He} + p$ .

**Obiettivo:** sviluppo dell'analisi per la prima osservazione assoluta di neutrini solari provenienti dalla fusione He+p



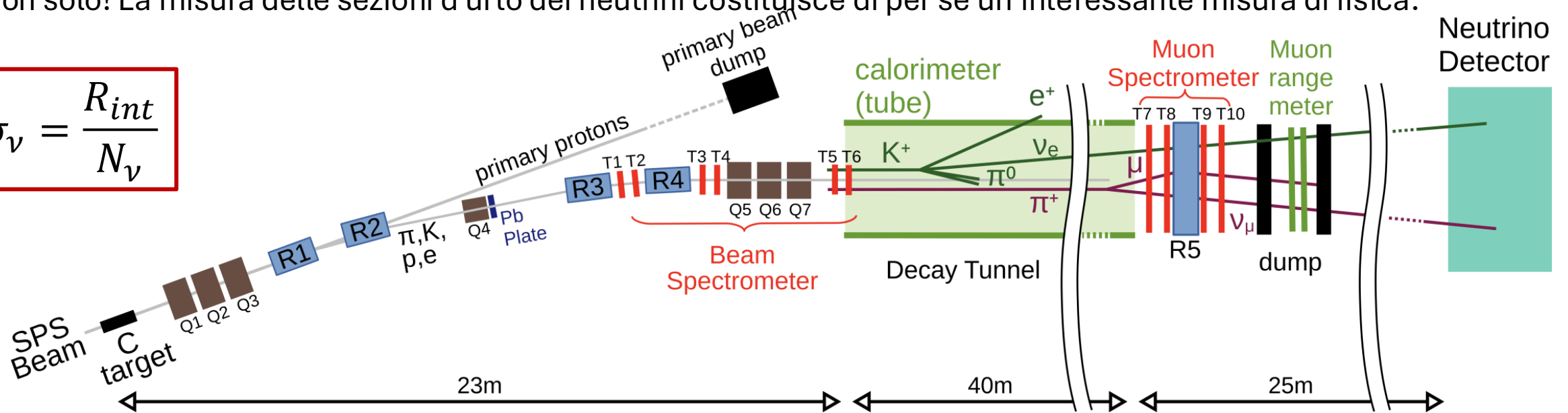
# nuSCOPE neutrino SPS Complex for Precision Experiments

La sensibilità dei futuri esperimenti di neutrino agli acceleratori (DUNE & Hyper-K) saranno limitati dalla precisione con cui conosciamo le sezioni d'urto dei neutrino:

- ❖ Vogliamo misurare la sezione d'urto dei neutrini con una precisione mai raggiunta prima ( $O(1\%)$ ) per superare queste limitazioni

Non solo! La misura delle sezioni d'urto dei neutrini costituisce di per sé un'interessante misura di fisica.

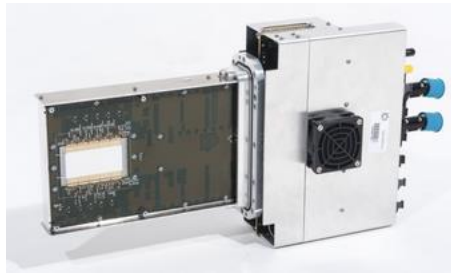
$$\sigma_\nu = \frac{R_{int}}{N_\nu}$$



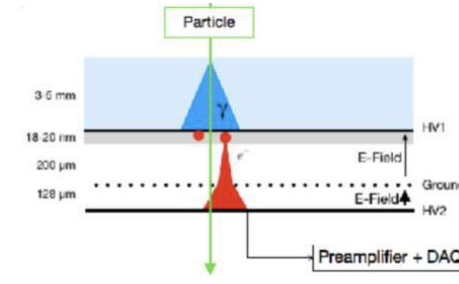
**Monitoring dei neutrini (idea nata qui a MiB!):** conto i leptoni carichi prodotti assieme al neutrino nei decadimenti di pioni e kaoni

**Tagging dei neutrini:** ricostruisco la cinematica dei decadimenti di pioni e kaoni nel canale muonico

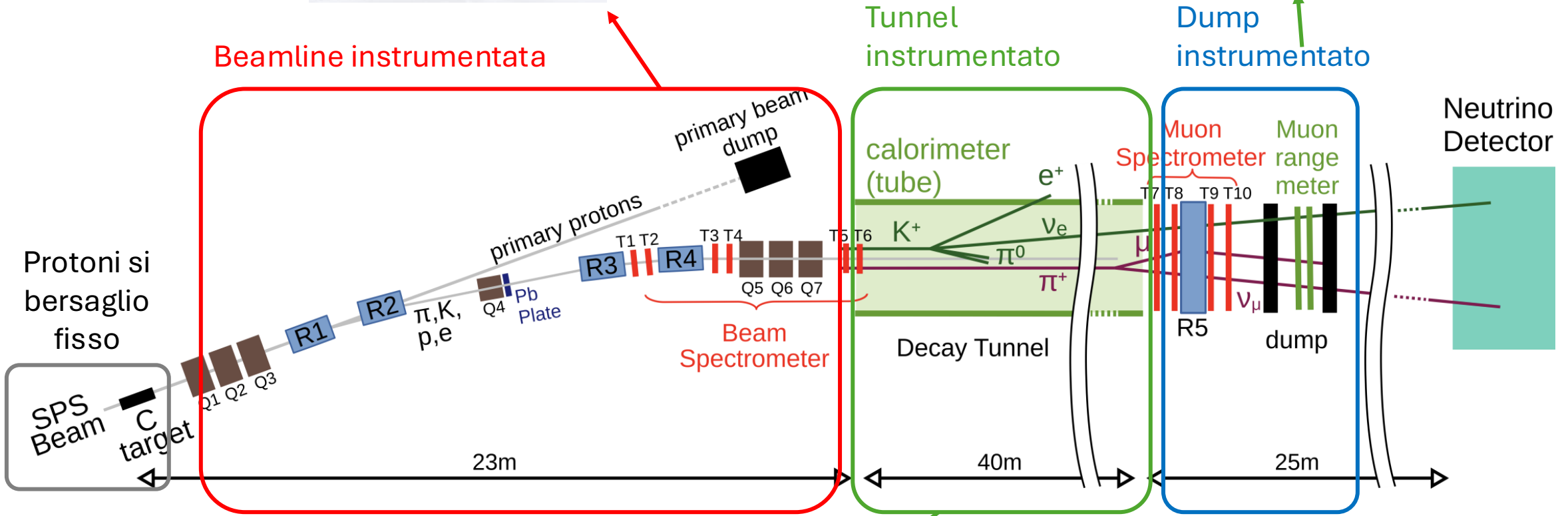
Collaborazione internazionale stabilita nel 2025 per costruire al CERN il primo fascio di neutrini di questo genere



Appositi rivelatori al silicio per sostenere l'elevato rate di particelle e la dose di radiazione

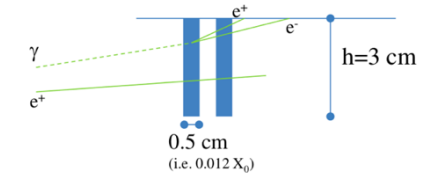
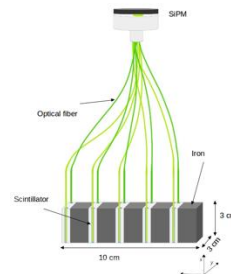
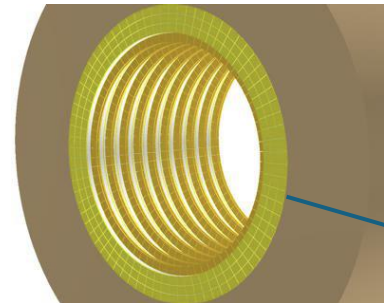


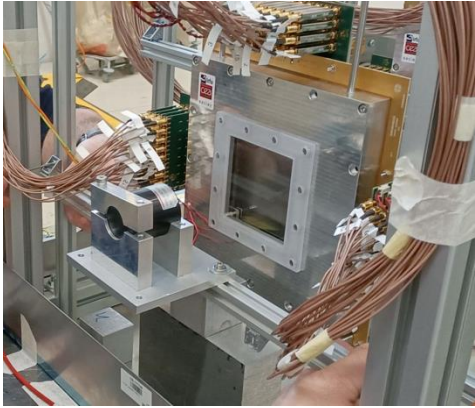
Rivelatori a gas molto veloci (PICOSEC) per coprire grandi aree



Protoni si bersaglio fisso

Calorimetro a sampling per la misura di positroni e muoni





## Test di rivelatori per il neutrino tagging

Analisi dati

@UniMiB & Parigi

Lo sviluppo di fasci di neutrini taggati richiede rivelatori ultra-veloci (~100 ps) per ricostruire i decadimenti che generano neutrini. Naturale candidato sono i rivelatori PICOSEC sviluppati presso il CEA Saclay.

**Obiettivo:** determinazione delle prestazioni temporali, dell'efficienza e della massima rate sostenibile e validazione del loro utilizzo in fasci taggati

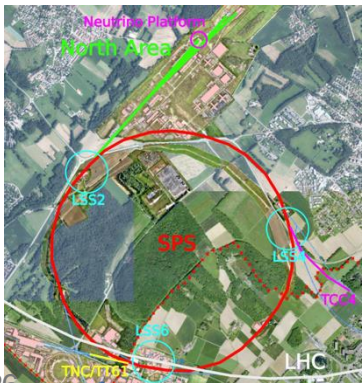
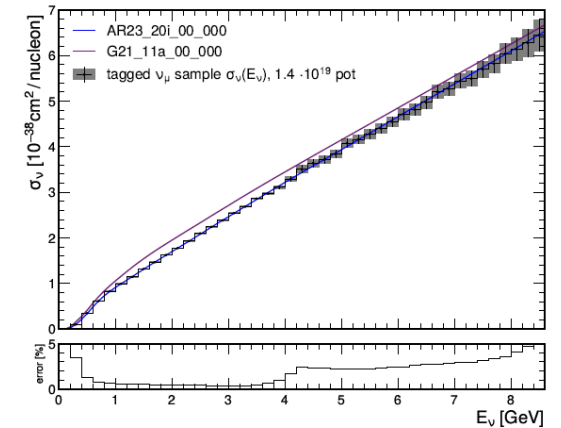
## Sezioni d'urto

Analisi/Simulazioni

@UniMiB

Sfruttando il tagging dei neutrini è possibile studiare le sezioni d'urto con precisioni mai raggiunte prima.

**Obiettivo:** determinazione della precisione nella misura di sezioni d'urto (inclusive/esclusive, totali/differenziali) del neutrino muonico su nuclei di argon



## Implementazione della beamline

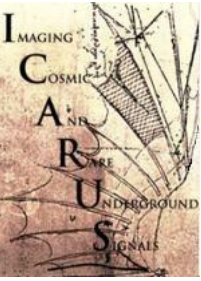
Analisi/Simulazioni

@UniMiB & CERN

La beamline di nuSCOPE si basa su magneti convenzionali e sfrutta una "estrazione lenta" dei protoni su bersaglio

**Obiettivo:** studio della possibilità di implementare la beamline nel complesso di acceleratori del CERN

# ICARUS: LA PRIMA 'KILOTON-SCALE' TPC BASATA SU ARGON LIQUIDO



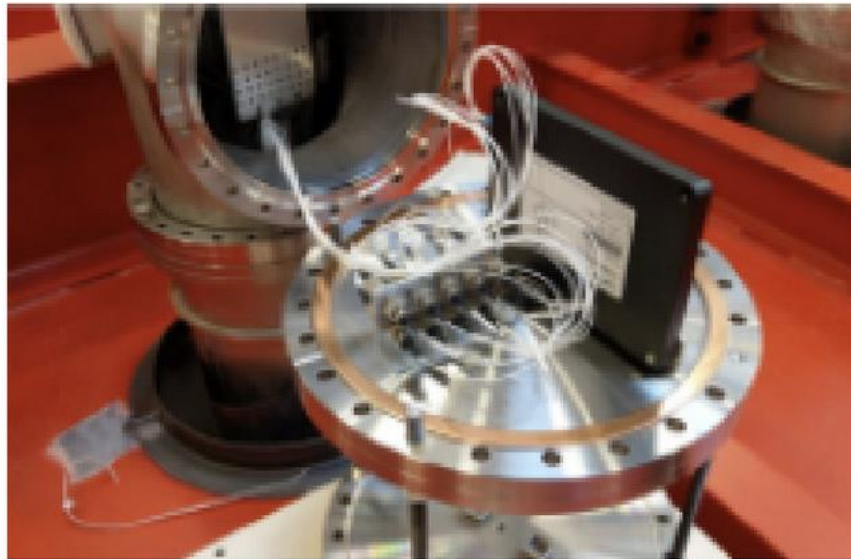
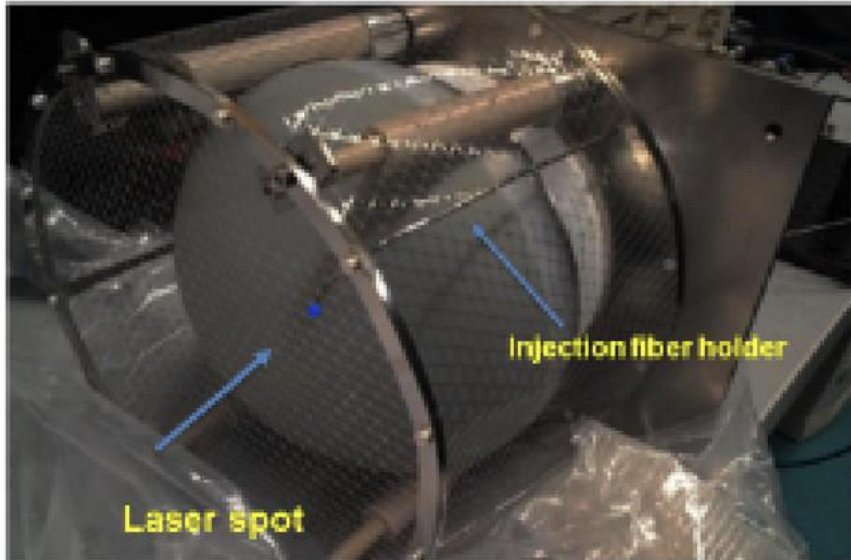
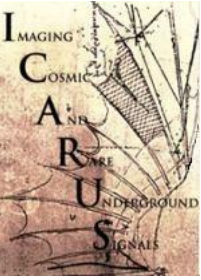
- ICARUS: Imaging Cosmic And Rare Underground Signal, la prima TPC a ad argon liquido a grandi dimensioni
- Due moduli da 300 t ( $3.6 \times 3.9 \times 19.6 \text{ m}^3$ ) ciascuno
- Dal 2010 al 2014 in presa dati ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso per dimostrare la fattibilità della tecnologia
- Nel 2017 trasferito al FermiLab per prendere parte al programma SBN, Short Baseline Neutrino, con lo scopo di ricercare l'eventuale neutrino sterile assieme ad altre 2 TPC ad argon liquido
- ICARUS inizia a raccogliere dati nel 2021 ed è attualmente in presa dati

## Short-Baseline Neutrino Program at Fermilab



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  $m \sim 1-10 \text{ eV}$  e piccolo angolo di mixing

# ICARUS: LA PRIMA 'KILOTON-SCALE' TPC BASATA SU ARGON LIQUIDO



## Proposte di Tesi:

- Sviluppo e upgrade le tecniche di calibrazione del sistema di rivelazione della luce di scintillazione (PMT)
  - Sviluppo in laboratorio di componenti ottici per la calibrazione dei PMT
  - Analisi dei dati raccolti durante le campagne di calibrazione
- Ricerca di neutrini sterili con Icarus

Referenti: M. Bonesini, R. Benocci, A. Falcone, M. Torti  
info: [maurizio.bonesi@mib.infn.it](mailto:maurizio.bonesi@mib.infn.it)

# Esperimento JUNO: Jiangmen underground neutrino observatory

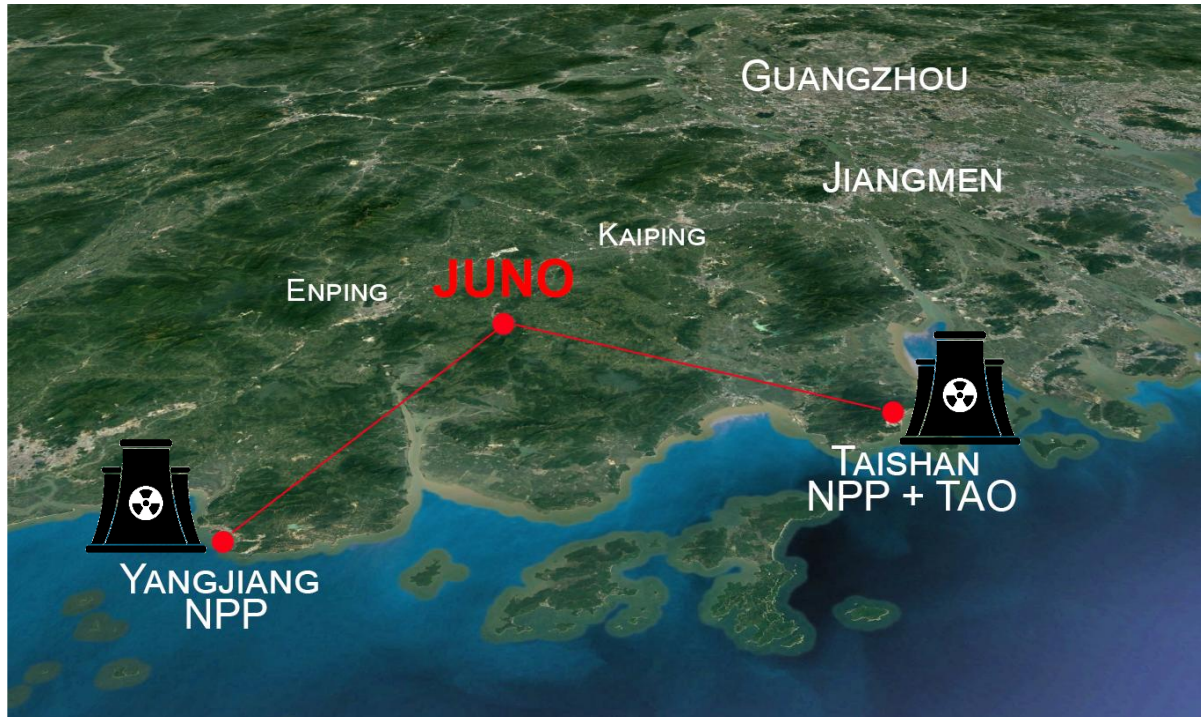
JUNO è un OSSERVATORIO di (anti)neutrini

Rivela (anti)neutrini da molte sorgenti

Sia neutrini sia antineutrini

## Obiettivi principali

- Determinazione dell'ordinamento di massa
- Misura di precisione parametri di oscillazione



Collaborazione internazionale di 69 istituti in 16 nazioni  
~700 collaboratori

Posizionato a ~53 km da due impianti nucleari per rivelatore gli antineutrini

Massima sensibilità di misura all'ordinamento di massa

# Rivelare gli antineutrini

## Reazione di decadimento beta inverso

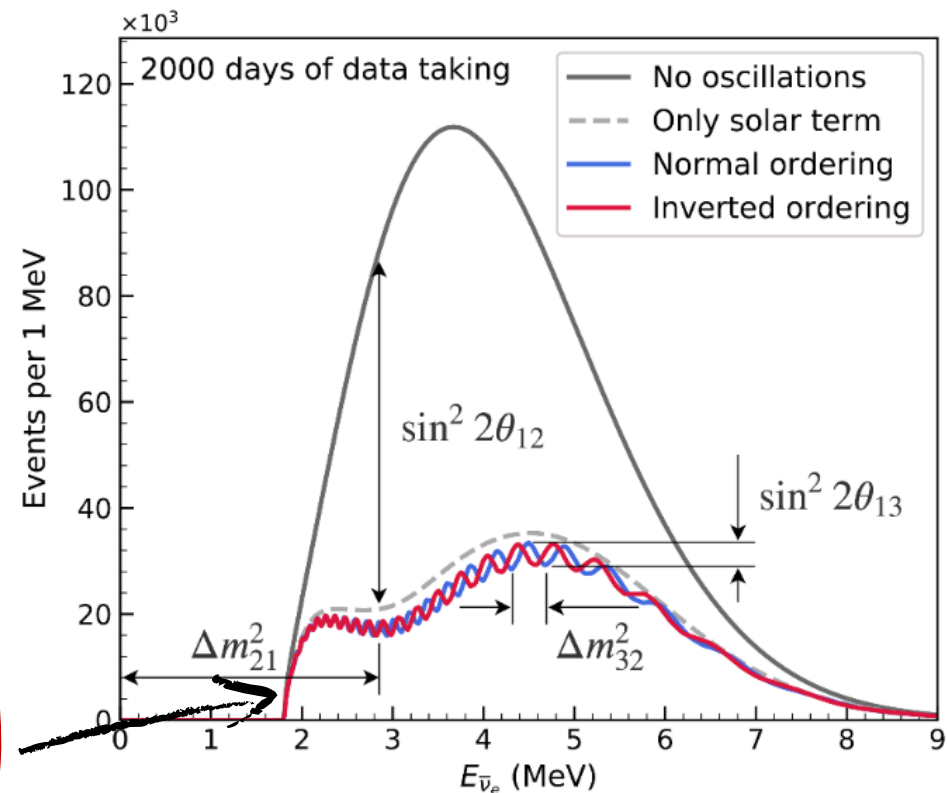
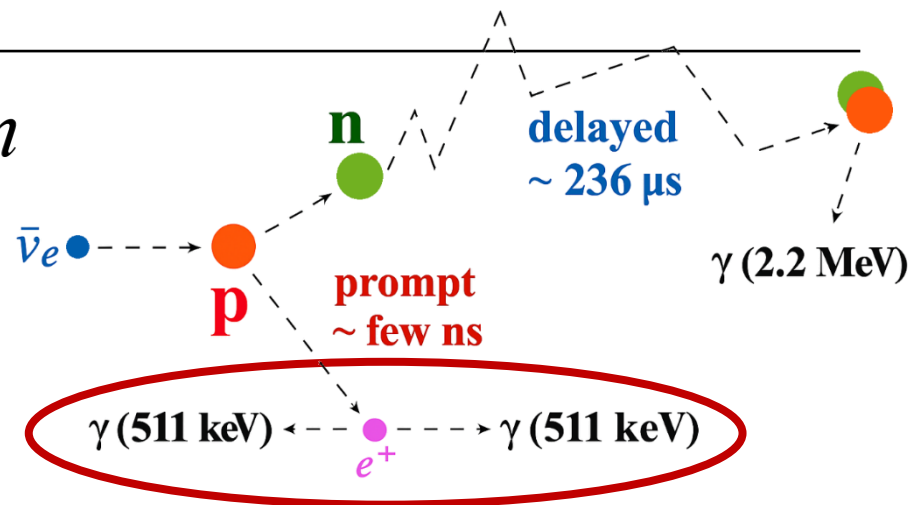
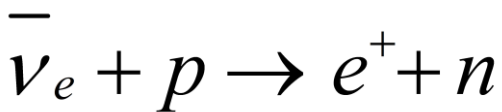
- Maggiore sezione d'urto
- Misure diretta dell'energia degli antineutrini
- Segnale caratteristico

## Bassa sezione d'urto:

- Rivelatori enormi
- Prestazioni eccezionali
- Fondo bassissimo
- Sorgenti multi intense

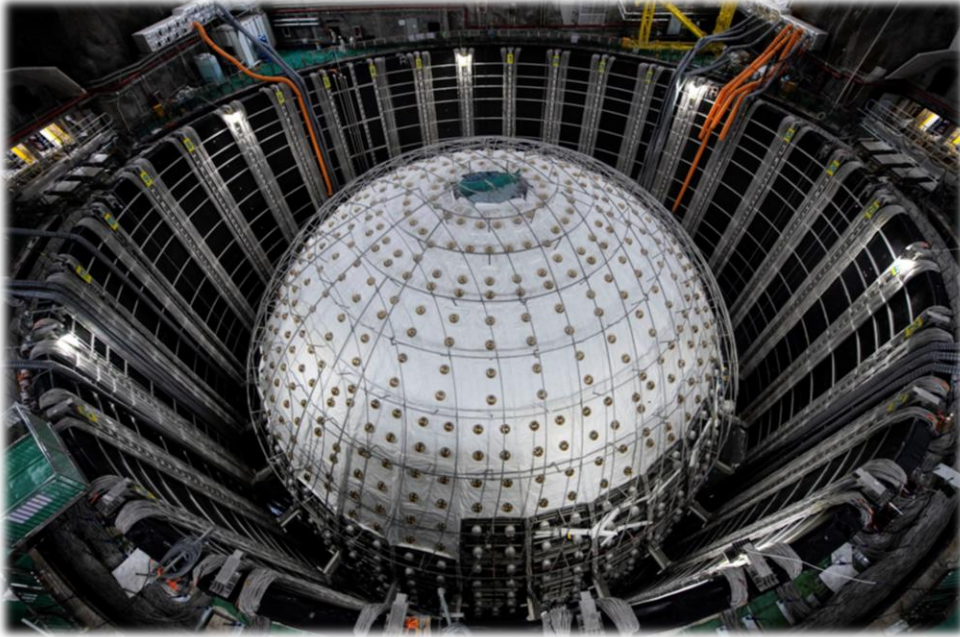


Necessaria **elevata risoluzione energetica e precisa ricostruzione dell'energia**



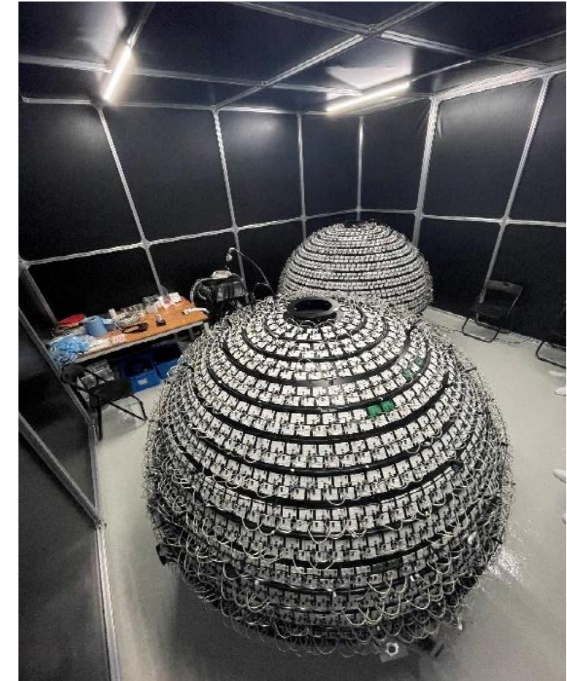
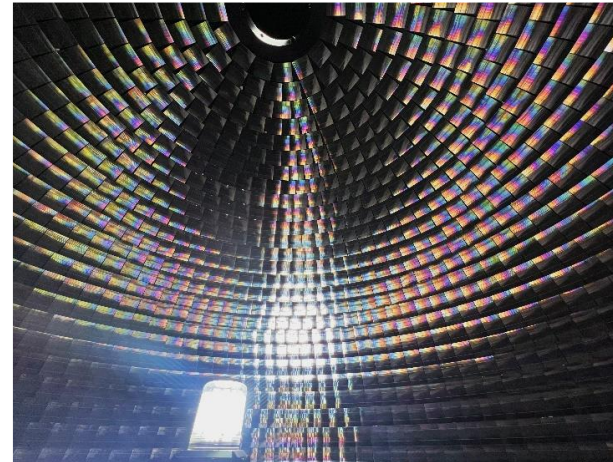
**Rosso o blu? -> Ordinamento di massa**  
**Forma dello spettro -> parametri di oscillazione**

## Due rivelatori



- **JUNO (far detector – 53 km):**
  - Diametro rivelatore centrale: 35,4 m
  - ~20 000 t di liquido scintillante in una sfera di acrilico
  - > 40 000 fotomoltiplicatori
  - Bobine schermatura campo magnetico terrestre
  - Immerso in piscina d'acqua da 35 000 t
  - Risoluzione ~ 3% @1 MeV

- **TAO (near detector – 44 m):**
  - Diametro rivelatore centrale: 1,8 m
  - 2,8 t di liquido scintillante con Gd
  - 10 m<sup>2</sup> SiPM
  - Risoluzione ~ 2% @1MeV



# JUNO come osservatorio di neutrini



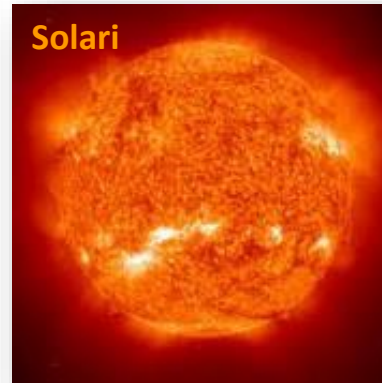
Reattori

~60 IBDs per days



Atmosferici

Several per day



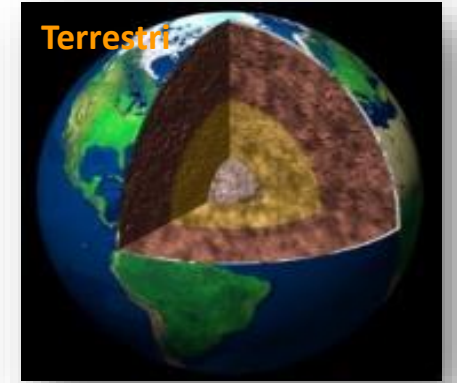
Solari

Hundred per day



Supernova

~5000 IBDs for  
CCSN @10 kpc

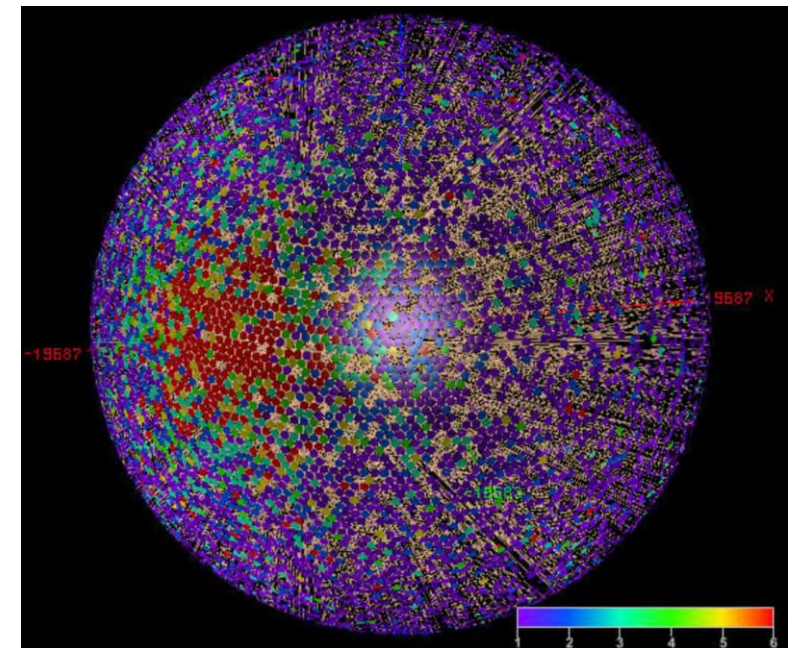


Terrestri

Several IBDs per day

JUNO rivelerà neutrini ed antineutrini da tutte queste sorgenti (e non solo!)

- Juno è stato completato e sta prendendo dati dal **26 agosto 2025**
- Anche TAO è operativo e prende dati dal **10 febbraio 2026**
- Fase molto attiva
- Possibilità di lavorare sui dati acquisiti giornalmente!



## Studio del fondo del rivelatore e analisi neutrino solari

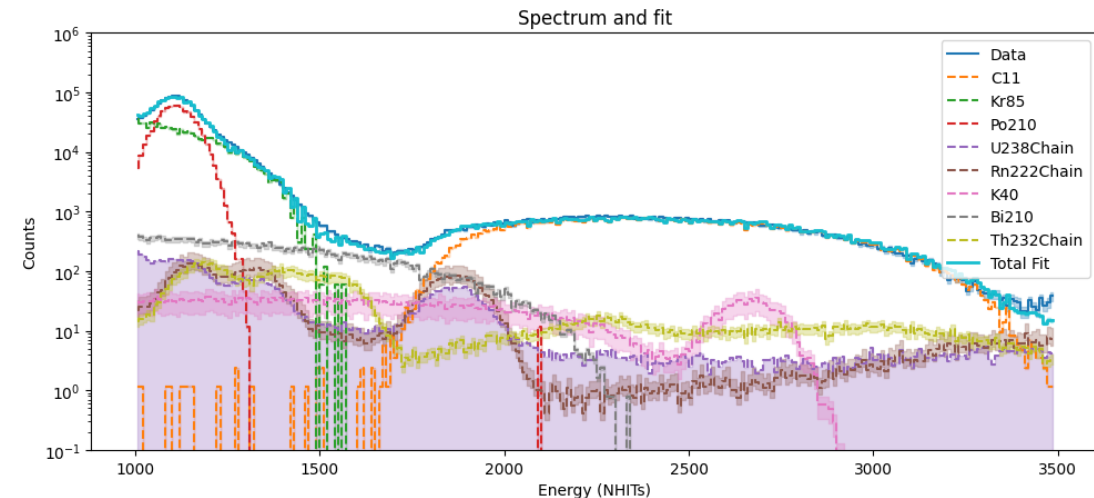
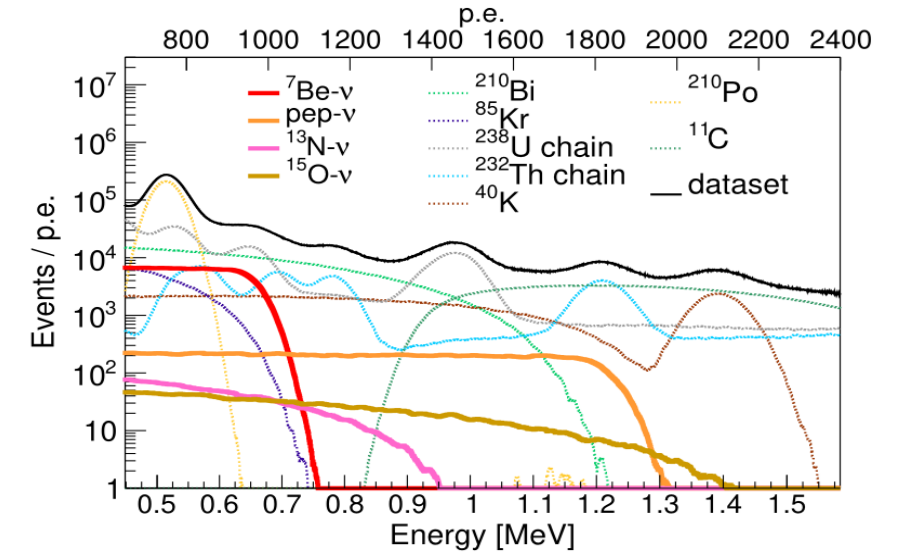
- **Identificazione di specifiche sorgenti di fondo nei dati JUNO** (ad esempio, catene di decadimento di U e Th tramite coincidenze veloci Bi-Po)
- **Analisi spettrale** a bassa energia per quantificare le componenti di fondo
- Obiettivo finale: **estrazione del segnale dei neutrini solari**

### Proposte di tesi:

- Caratterizzazione del fondo radioattivo dell'esperimento JUNO
- Caratterizzazione del software Monte Carlo di JUNO
- Identificazione dei neutrini solari con l'esperimento JUNO

Interazione neutrino solari: scattering elastico

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

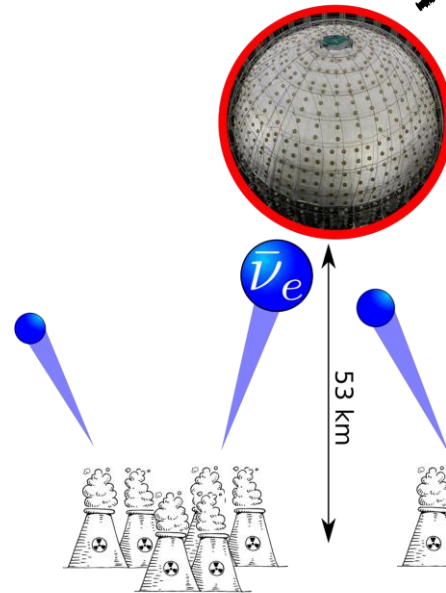


## Analisi dello spettro IBD misurato da JUNO

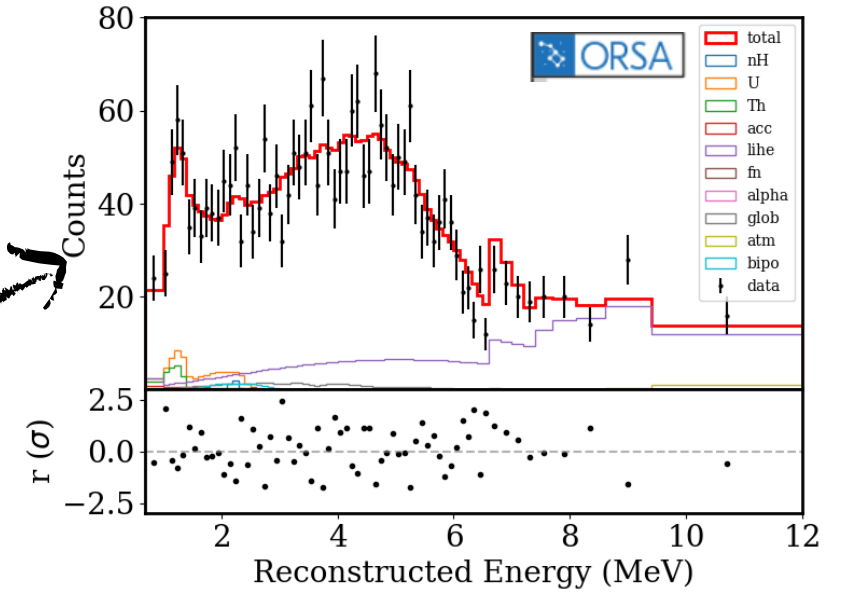
- Studio dell'effetto dell'incertezza dello spettro non oscillato sui **parametri di oscillazione** e sull'**ordinamento della massa dei neutrini**, utilizzando dati reali di JUNO.

### Proposte di tesi:

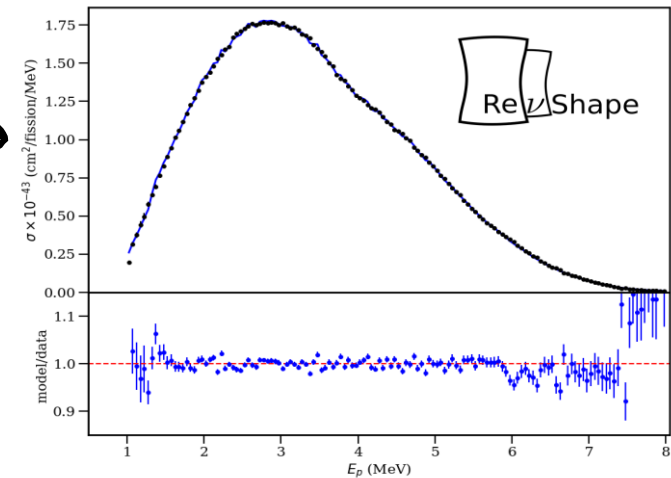
- Studio dell'impatto dello spettro degli antineutrini non oscillati sui primi risultati fisici di JUNO



Spettro misurato da JUNO (~ 50 giorni di dati)



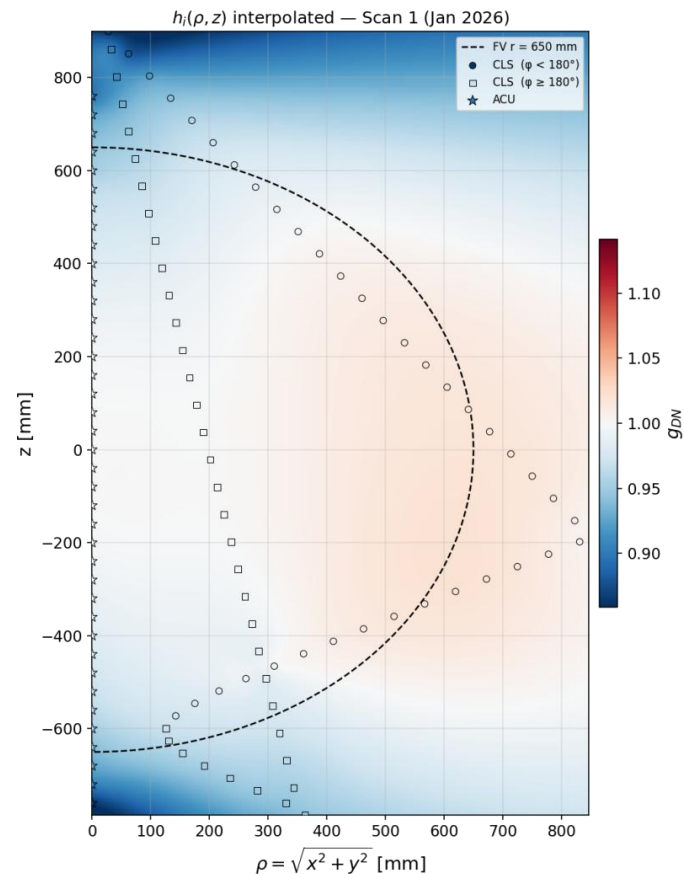
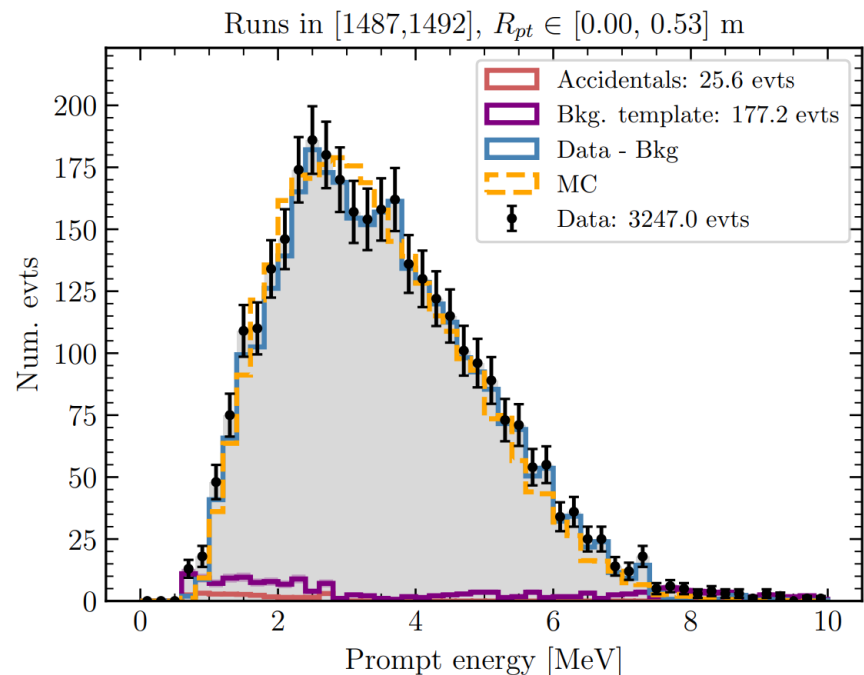
Predizione dello spettro non oscillato



## Rivelatore TAO:

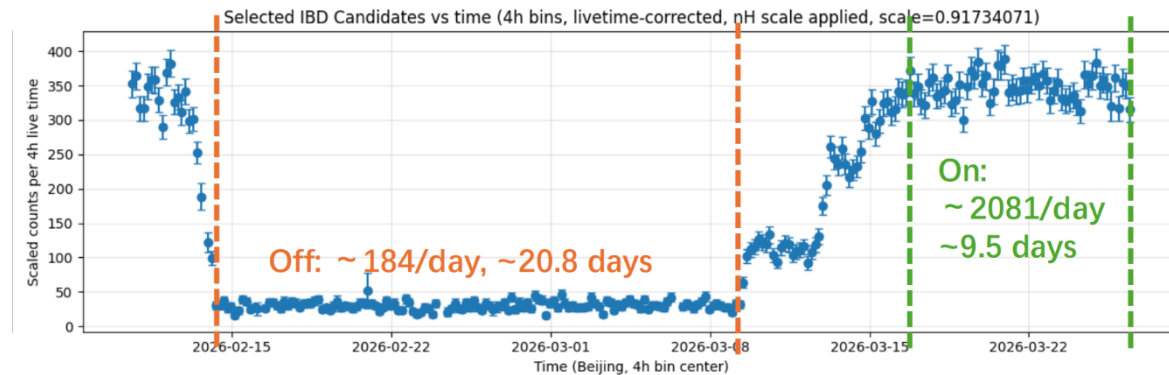
### Studio della risposta del rivelatore, sviluppo algoritmi di analisi dati

- Risoluzione energetica e calibrazione
- Studi di non uniformità e non linearità
- Studi di selezione del fondo e dell'IBD
- Analisi dello spettro degli antineutrini



## Proposte di tesi:

- Caratterizzazione della risposta del rivelatore JUNO-TAO e ricostruzione dello spettro energetico degli antineutrini da reattore



Grazie dell'attenzione.  
Enjoy Neutrino Oscillations!

