

Tesi Magistrali @ UniMiB

Attività dei gruppi di ricerca in Fisica delle Astroparticelle

Oscillazioni di Neutrini

GIULIA BRUNETTI

UNIVERSITÀ E SEZIONE INFN DI MILANO-BICOCCA



I neutrini - Le oscillazioni

- **1957** Predizioni di Bruno Pontecorvo: [Le Oscillazioni di Neutrini](#): Pontecorvo aveva ipotizzato che i neutrini potessero “oscillare” da un tipo all’altro, cioè cambiare da un sapore all’altro mentre viaggiano
- **1998**: **La prima evidenza sperimentale**: L’esperimento Super-Kamiokande dimostrò che parte dei ν_μ atmosferici “sparivano” nel loro viaggio fino al rivelatore su distanze $\sim 1000-10000\text{km}$
- **2002**: **I neutrini solari**: L’esperimento SNO misura l’oscillazione $\nu_e \rightarrow \nu_x$

La Probabilità di Oscillazione (a 2 sapori)

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}\right)$$

- θ : Angolo di mixing
- $\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$: Differenza delle masse
- L : La distanza percorsa dal neutrino
- E : L’energia del neutrino

ν_α : ν_e, ν_μ, ν_τ = Autostati di sapore
 ν_i : ν_1, ν_2, ν_3 = Autostati di massa
Gli autostati di sapore sono combinazioni degli autostati di massa

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

U = Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata mixing matrix $\leftrightarrow \theta_{\text{mixing}}, \delta_{\text{CP}}$

Questi sono dati da madre natura

Questi possiamo controllarli!



Le sorgenti di neutrini
ARTIFICIALI:
[Acceleratori](#)
[Reattori](#)

Per massimizzare la probabilità di oscillazione **possiamo ottimizzare il rapporto L/E** :

- scegliendo dove mettere il rivelatore rispetto alla sorgente $\rightarrow L$
- producendo neutrini di energia E voluta

I neutrini – Cosa non sappiamo

3

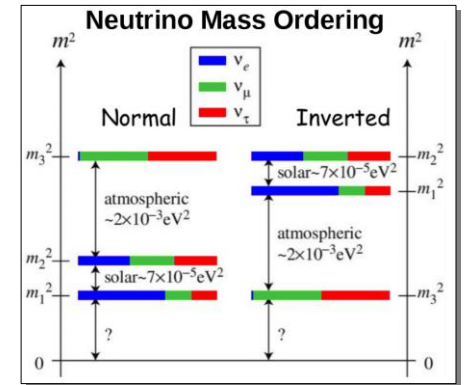


Nobel Prize in Physics for Neutrinos

- 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

Nonostante una ricca produzione di risultati sperimentali alcune fondamentali domande attendono ancora risposta:

- ▶ Grazie alla scoperta delle oscillazioni sappiamo che i neutrini hanno massa ma la probabilità di oscillazione dipende dalla DIFFERENZA delle masse
 - Qual è la massa del neutrino più leggero?
 - E come sono ordinati?
- ▶ La probabilità di oscillazione dei neutrini è uguale a quella degli antineutrini?
 - **Posc(ν) VS Posc($\bar{\nu}$)** ↔ **violazione di CP nel settore leptónico?**
 - **Asimmetria materia/antimateria** nell'universo
- ▶ Esistono altri tipi di neutrino? → **Neutrini "sterili"** = Partecipano alle oscillazioni ma non interagiscono!



Neutrini da Acceleratore e da Reattore: **Esperimenti che hanno lo scopo di determinare:**

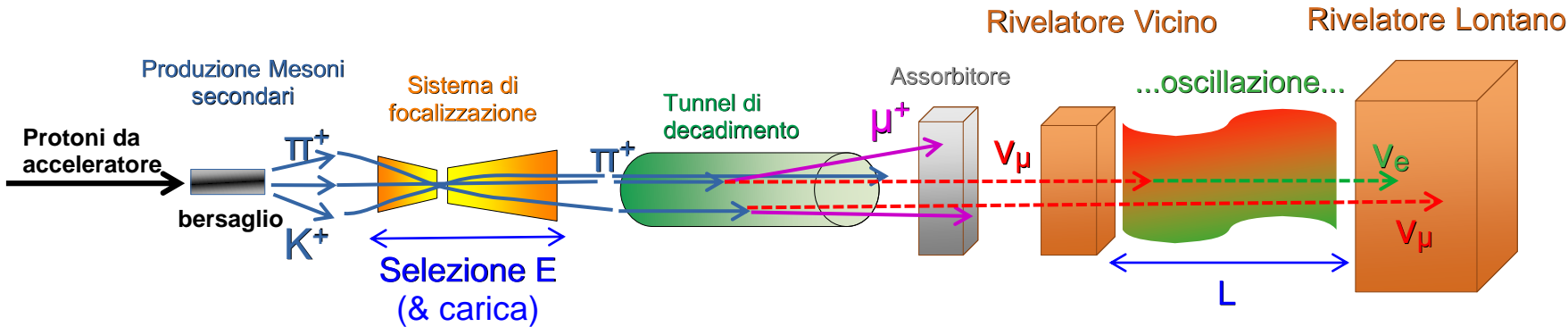
L'ordine delle masse

Se $\text{Posc}(\nu) = \text{Posc}(\bar{\nu})$

Se esistono i neutrini sterili

I neutrini da Acceleratore e da Reattore

- **I fasci di neutrini da acceleratore:** la ricetta classica per produrre un fascio di neutrini

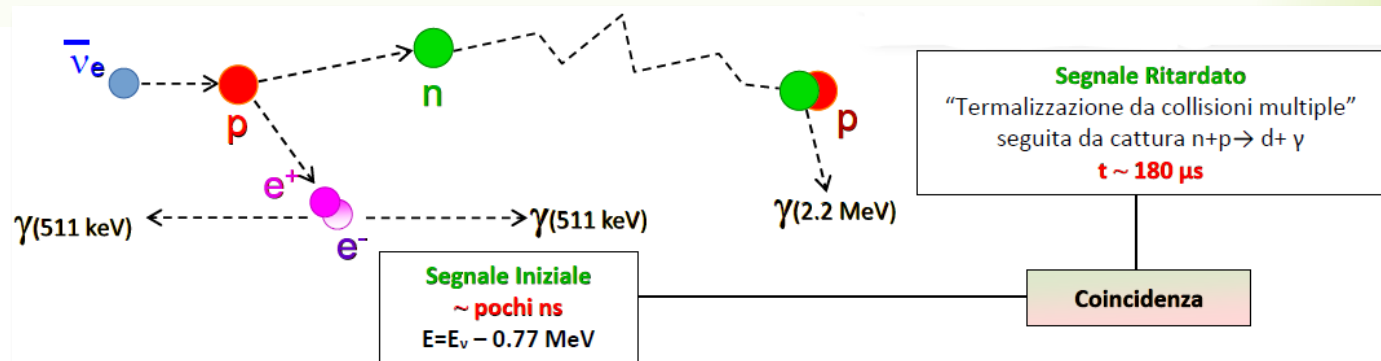


- **Soprattutto** ν_μ
- Oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ & $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
- Il **rivelatore vicino** misura i neutrini in partenza e quello **lontano** la **sparizione dei ν_μ** e **l'apparizione dei ν_e**

I neutrini da reattore

- $\bar{\nu}_e$ prodotti nei processi di fissione nucleare (decadimento β dei frammenti)
- **Sorgenti intense e isotropiche**
- Lo spettro energetico è determinato sperimentalmente e sono neutrini nel **range del MeV** ($E \leq 10$ MeV, $\langle E \rangle \approx 3$ MeV) \rightarrow Sotto soglia produzione $\mu, \tau \rightarrow$ Si fanno **misure di sparizione**

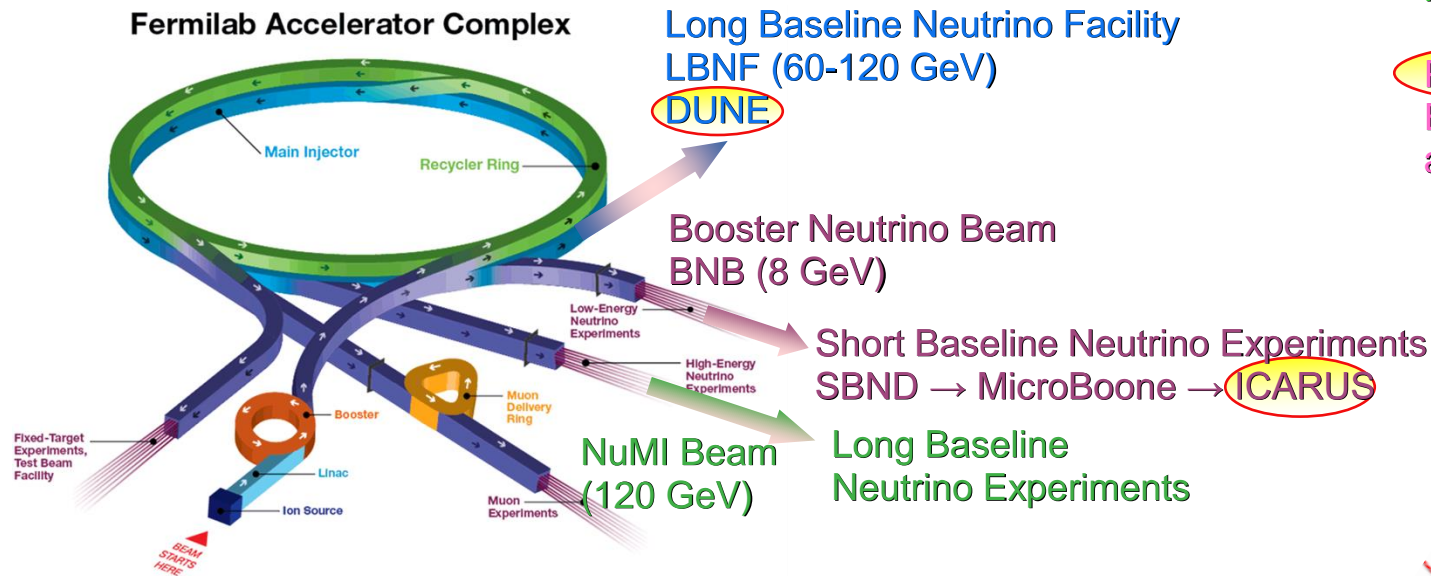
Si rivelano con il decadimento β inverso \rightarrow **coincidenze di segnali:**



I neutrini da Acceleratore: Gli Esperimenti

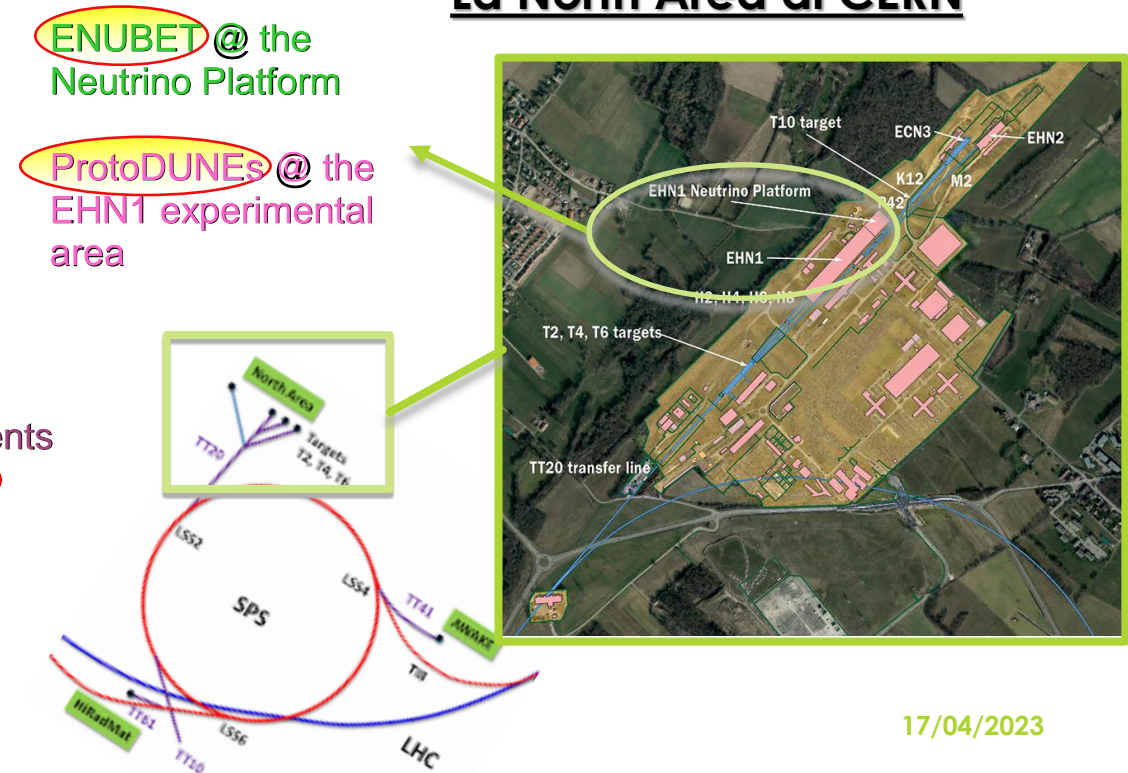
- ▶ **DUNE @ Fermilab, USA** → OSCILLAZIONI LONG BASELINE
 - ▶ Due Far Detectors: Liquid Argon TPC con Drift Orizzontale e Verticale → Due Prototipi: **Proto-DUNEs** al **CERN**
- ▶ **ICARUS @ SBN @ Fermilab, USA** → OSCILLAZIONI SHORT BASELINE & NEUTRINI STERILI
- ▶ **NP06/ENUBET @ CERN** → FASCI MONITORATI di NEUTRINI

Le linee di fascio di neutrini del Fermilab



G. Brunetti

La North Area al CERN



DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment

<https://www.dunescience.org/>

DUNE @ UNIMIB

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, E. Parozzi, G. Pessina, M. Torti, E. Vallazza
Per info tesi: francesco.terranova@unimib.it

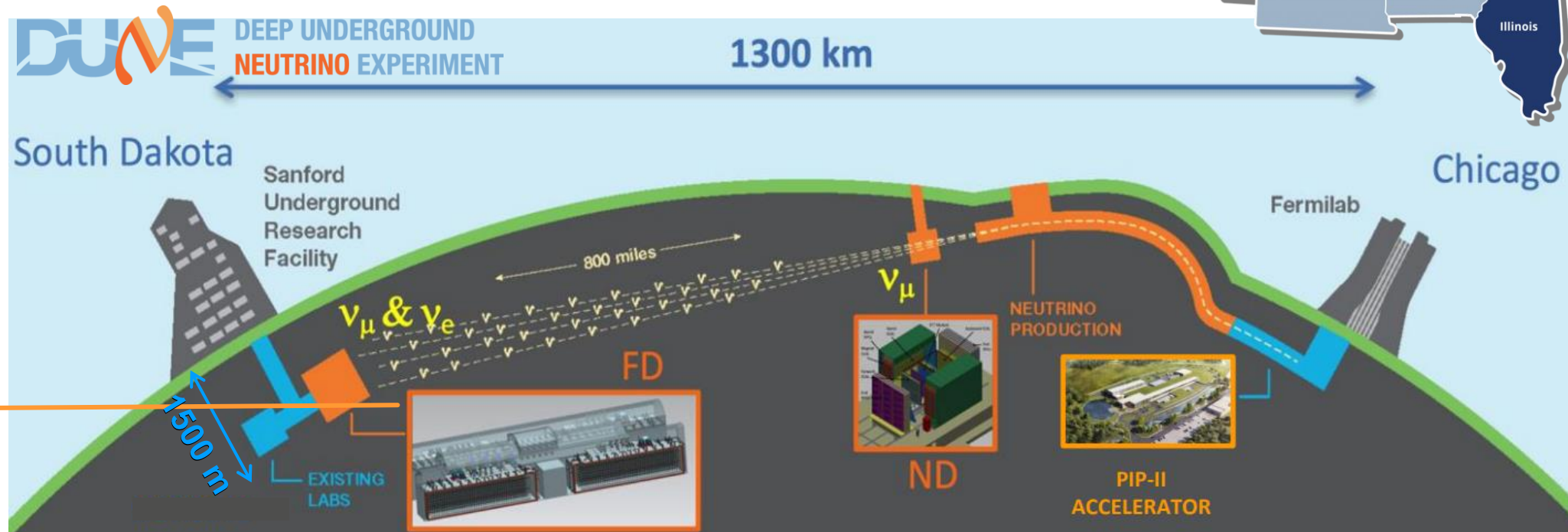
Obiettivi principali:

- ▶ Misura della violazione CP: $\text{Posc}(\nu)$ VS $\text{Posc}(\bar{\nu})$
- ▶ Determinare l'ordine delle masse

Ma anche:

- ▶ Neutrini Solari, Atmosferici, da Supernova
- ▶ Fisica eventi rari

6



Due Far Detectors (Liquis Argon TPCs):

- FD1 = Horizontal Drift
- FD2 = Vertical Drift



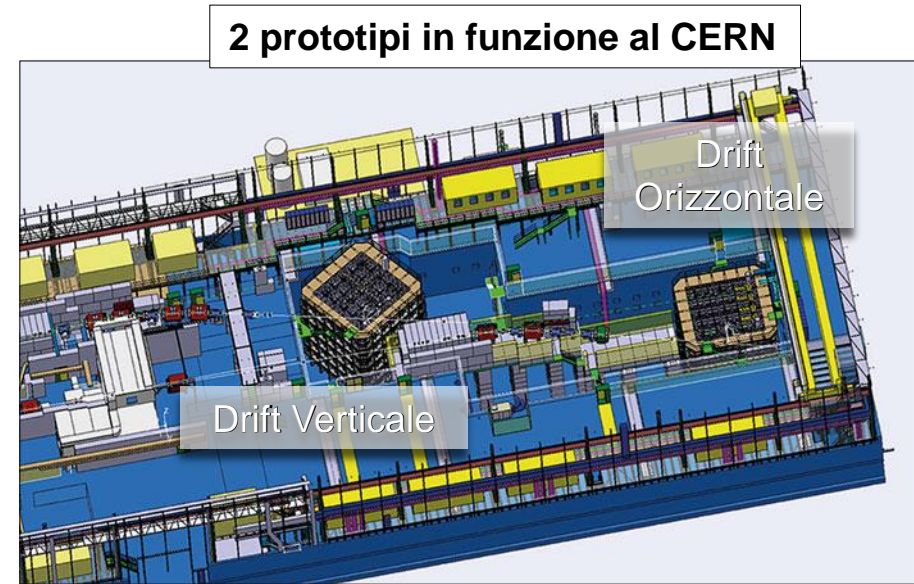
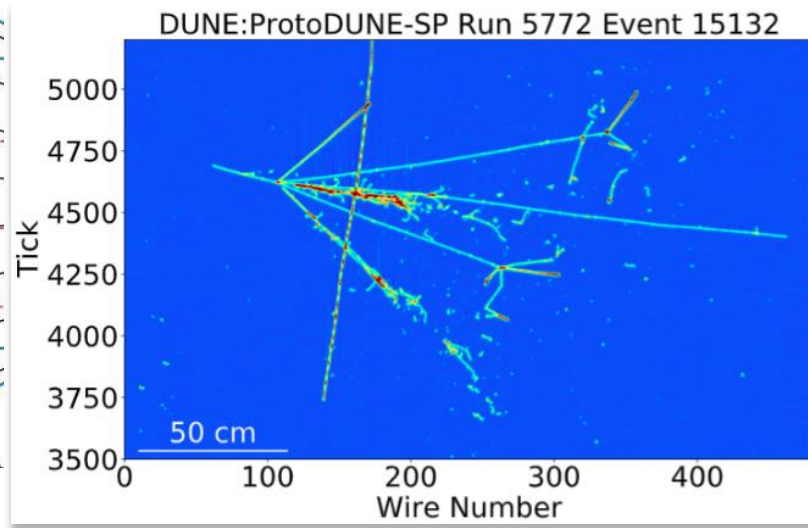
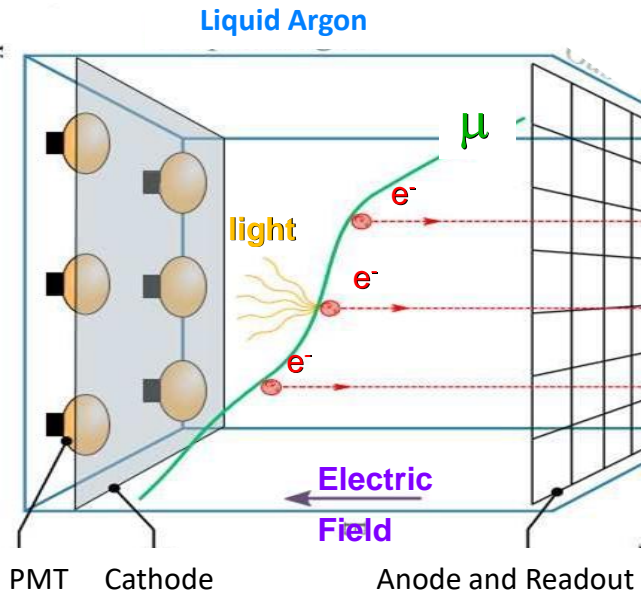
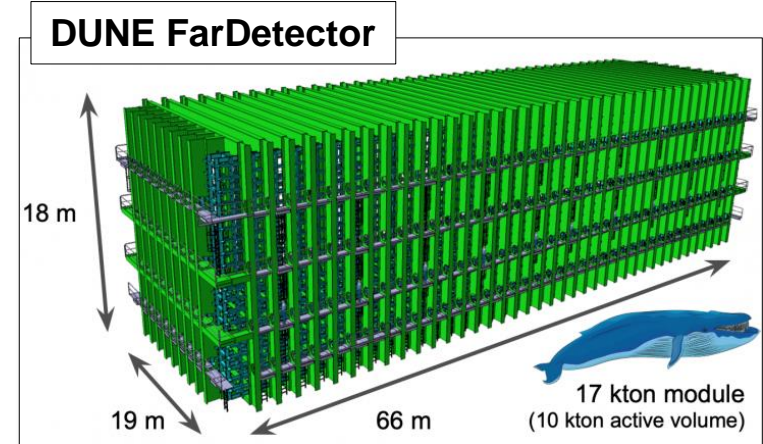
DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment

7

I Rivelatori: Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC)

Il neutrino interagisce nell'Argon Liquido → le particelle prodotte depositano energia sottoforma di:

- ▶ **IONIZZAZIONE** → **CARICA** → Si applica un campo elettrico → gli e^- viaggiano fino all'anodo e vengono misurati da fili
- ▶ **ECCITAZIONE** → **LUCE di SCINTILLAZIONE** → I fotoni prodotti vengono misurati con SiliconPM

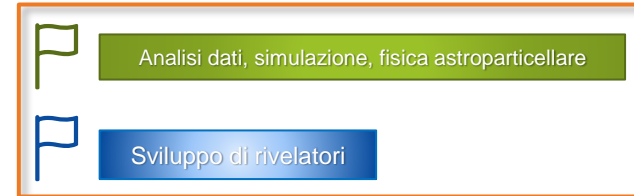


DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment

8

Le Tesi: siamo in una fase particolare ed importante dell'esperimento:

- ▶ ProtoDUNE Horizontal & Vertical Drift al CERN in costruzione e presa dati!
- ▶ DUNE Far Detectors: Molte interessanti analisi in corso!
- ▶ Possibilità di acquisire **esperienza sia in campo hardware che software!**
- ▶ Possibilità di svolgere un periodo di tesi al CERN e al Fermilab!



le tesi che prevedono soggiorni all'estero sono svolte in collaborazione con l'INFN → richiesta una media dei voti > 26

- ▶ **@ UniMIB:**
 - ▶ Trapping e rivelazione di luce nell'estremo ultravioletto a temperatura criogenica: Dimostrare che il sistema è in grado di raggiungere le specifiche di progetto sia per efficienza di rivelazione sia di performance di fisica.
 - ▶ Neutrini solari in DUNE. Sviluppo di nuovi algoritmi per la prima osservazione assoluta dei ν solari provenienti dalla fusione He-p. Collab. con **Madrid**
- ▶ **@ UniMIB & CERN:**
 - ▶ Test e installazione del nuovo Photon Detection System: Partecipazione alle attività di preparazione del Run II ProtoDUNE-SP in collab. con i gruppi **CERN, CIEMAT (Madrid), Praga, Fermilab e Brasile**
 - ▶ Optoelettronica criogenica in DUNE: sviluppo di un sistema di trasmissioni dati puramente ottico per segnali analogici a 87 K. Collab. con **Milano Statale, Parigi (Univ. de Paris e APC) e il CERN**
 - ▶ Elettronica criogenica: Sviluppo e caratterizzazione di SiPM con amplificazione a freddo per la rivelazione della luce di scintillazione nel Lar + Test @ CERN nell'ambito del Cold Box Test 3 e 4 del DUNE Vertical Drift. Collab. con **Milano-Statale e il CERN**
 - ▶ Studio del neutrinoless double beta decay con Argon liquido dopato con Xenon: Il doping incrementa il light yield → esplorare la possibilità di realizzare nel terzo modulo di DUNE (FD3) un esperimento di $0\nu\beta\beta$ a grandissima sensibilità
- ▶ **@ UniMIB & FNAL:**
 - ▶ Double calorimetry in DUNE: Simulazione e test preliminari della risoluzione energetica di DUNE usando simultaneamente la carica raccolta dalla TPC e la luce raccolta dal Photon Detection System.

DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment & Quantum Computing

Quantum Computing @ UNIMIB

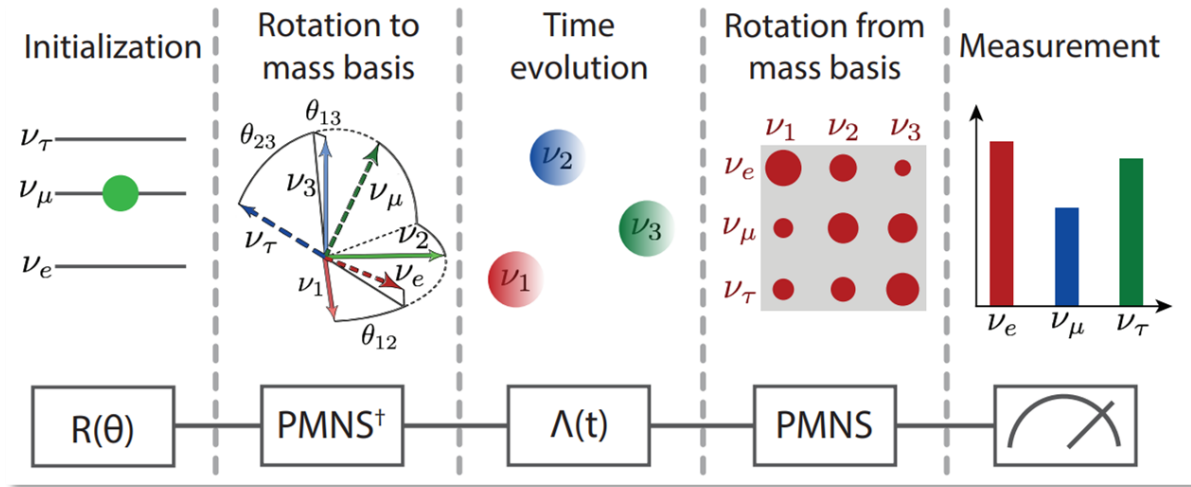
A. Giachero, D. Labranca, R. Moretti, A. Nucciotti, Per info tesi: andrea.giachero@mib.infn.it



Tecniche avanzate di machine learning per lo studio degli eventi in DUNE

La Tesi: Interessante possibilità di collaborazione con il gruppo UNIMIB di Quantum Computing:
Simulazioni delle oscillazioni di neutrino su un sistema quantistico multi-level

- Quantum Computing: Piattaforma attrattiva per molte applicazioni di fisica delle particelle!
- Le Oscillazioni di neutrino sono regolate dalla **matrice PMNS** che può essere rappresentata con un *Unitary Quantum Circuit*
- Lo **stato di sapore del neutrino** può essere **rappresentato con un Qutrit state**
- **Come codificare l'evoluzione temporale? Come simulare gli effetti di materia?**
- Simulazioni effettuate su real quantum backends forniti da IBM



[arXiv:2212.14170](https://arxiv.org/abs/2212.14170)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{PMNS} \\ \text{matrix} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

From qubits to qutrits

► Tesi in Collaborazione con:



QUANTUM TECHNOLOGY INITIATIVE



periodo al CERN supportato dall'Exchange Extra-UE Program

ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

<https://www.pd.infn.it/eng/enubet/>

ENUBET @ UNIMIB: 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, E. Parozzi, G. Pessina, M. Torti, E. Vallazza
Per info tesi: francesco.terranova@unimib.it

Obiettivi principali:

- Misure di sezioni d'urto di neutrini ad alta precisione

10



Perché? Attualmente le sezioni d'urto sono note con un'incertezza del 10-30%

→ è il contributo principale alle sistematiche degli esperimenti di oscillazione!

→ necessità di abbassarla a livello dell'1%

- L'incertezza maggiore nelle misure di sezione d'urto con fasci di neutrini deriva dall'incertezza sulla conoscenza del flusso, attorno al 10% → Se si riesce a misurare il **FLUSSO di neutrini** con precisione < 1% si abbatte la sistematica dominante!

Realizzazione dei cosiddetti

FASCI DI NEUTRINI MONITORATI

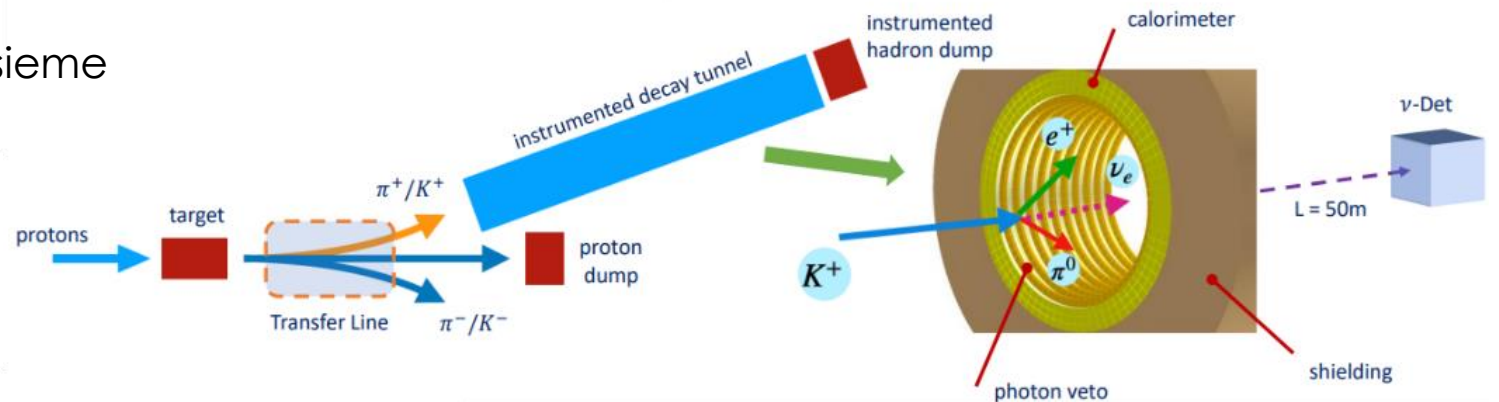
Si misura il rate dei leptoni (e^+) prodotti insieme

ai neutrini nei decadimenti dei mesoni

⇔ si monitora il flusso dei ν

Come?

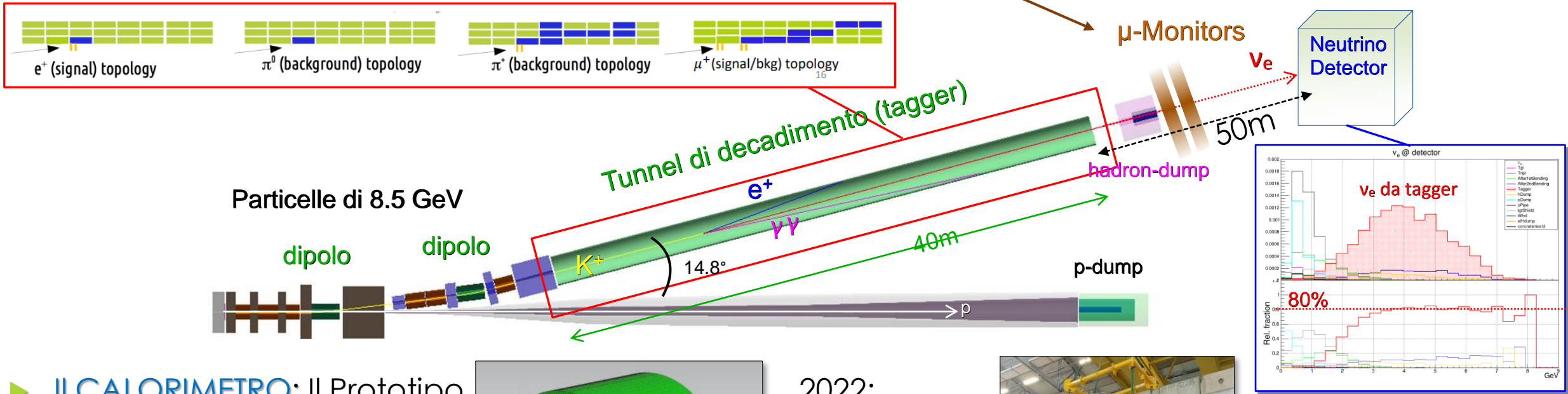
Si instrumenta il tunnel di decadimento con dei calorimetri!



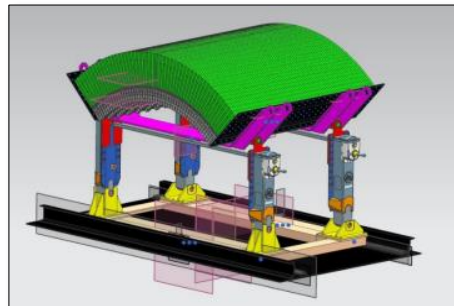
A. Longhin, L. Ludovici and F. Terranova, **A novel technique for the measurement of the electron neutrino cross section**, Eur. Phys. J. C 75 (2015) 155

ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

- **Determinazione del flusso dei ν_e ad alta precisione:** si misurano i POSITRONI prodotti nei **decadimenti K_{e3}** ($K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu_e$) nel tunnel, il corrispettivo neutrino raggiunge il neutrino detector
- **Determinazione del flusso dei ν_μ ad alta precisione:** si misurano i MUONI dei **decadimenti $K_{\mu\nu}$** nel tunnel e dei **decadimenti $\pi_{\mu\nu}$** instrumentando con dei **muon monitors** il dump dopo il tunnel di decadimento



► II CALORIMETRO: Il Prototipo



2022:
il dimostratore
al CERN!




ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

12

- ▶ Simulazioni relative al disegno della beamline e alla selezione eventi completate
→ Ottimi valori di S/N sia per ν_e che per ν_μ
- ▶ R&D dei rivelatori ha avuto successo!

Le Tesi: Sarà un anno speciale: Il progetto ENUBET si avvia a scrivere **la proposta di esperimento per realizzare il fascio di neutrini al CERN usando come neutrino detector ProtoDUNE!**

- ▶ Test del dimostratore di ENUBET: partecipazione al completamento del prototipo e ai suoi test al CERN a ottobre 2023.
Tesi @ **Milano Bicocca, Laboratori di Legnaro e CERN**
- ▶ Simulazione delle interazioni di neutrino prodotti da ENUBET su ProtoDUNE-SP: Simulazione delle interazioni di ν_e e ν_μ in ProtoDUNE-SP e la ricostruzione degli stati finali. Tesi @ **Milano Bicocca, Padova, Zagabria, Bordeaux**
- ▶ Machine learning per l'identificazione degli eventi in ENUBET: Realizzazione di algoritmi per l'identificazione di particelle in regime di alto rate. Tesi @ **Milano Bicocca, Padova, Bordeaux**
- ▶ Fasci taggati di Neutrino: Simulazione dell'associazione temporale (time tagging) tra i leptoni prodotti nel tagger di ENUBET e il rivelatore di neutrini ProtoDUNE-SP. Tesi @ **Milano Bicocca & CERN**
- ▶ Studio dei fondi di raggi cosmici nel rivelatore di neutrini per ENUBET: Design di un sistema di veto attivo per l'eliminazione del fondo da raggi cosmici. Tesi @ **Milano Bicocca & CERN**
- ▶ Studio delle sistematiche sui flussi della beamline di ENUBET: Stima degli errori sistematici sui flussi di ENUBET utilizzando algoritmi bayesiani e/o template (statistica frequentista). Tesi @ **Milano Bicocca & Padova**
- ▶ Fasci di neutrini monitorati alla European Spallation Source. **Tesi finanziata dal progetto europeo ESSnuSB+**
Studio di un fascio di neutrini monitorati (tecnica ENUBET) alle energie di 0.2-1 GeV e, in particolare, lo sviluppo dei rivelatori per il tagging dei muoni e la loro identificazione con metodi di machine learning
- ▶  Tesi come «CERN Technical Student»: Implementazione della beamline di ENUBET al CERN

DUNE

Ricerca:

- ▶ Sviluppo di rivelatori
- ▶ Criogenia
- ▶ Fasci di particelle

- ▶ Analisi dati
- ▶ Computing
- ▶ Fisica astroparticellare
- ▶ Radioattività

Industria:

- ▶ Fotonica
- ▶ Elettronica analogica
- ▶ Criogenia e vuoto
- ▶ Dispositivi a semiconduttore

- ▶ Calcolo scientifico
- ▶ Machine learning
- ▶ Tecniche di data mining
- ▶ Metodi statistici
- ▶ Metodi numerici per la simulazione di sistemi complessi

ENUBET

Ricerca:

- ▶ Sviluppo di rivelatori
- ▶ Fotosensori a semiconduttore
- ▶ Tecniche di analisi

- ▶ Fisica degli acceleratori
- ▶ Radioprotezione
- ▶ Tecniche numeriche per la simulazione dei fasci di particelle cariche

Industria:

- ▶ Rivelatori a semiconduttori
- ▶ Elettronica analogica e digitale
- ▶ Calcolo scientifico
- ▶ Metodi statistici

- ▶ Acceleratori per la medicina
- ▶ Radioprotezione
- ▶ Elettronica di Potenza

SBN - ICARUS

<https://sbn.fnal.gov/>
<http://icarus.fnal.gov/>

ICARUS @ UNIMIB

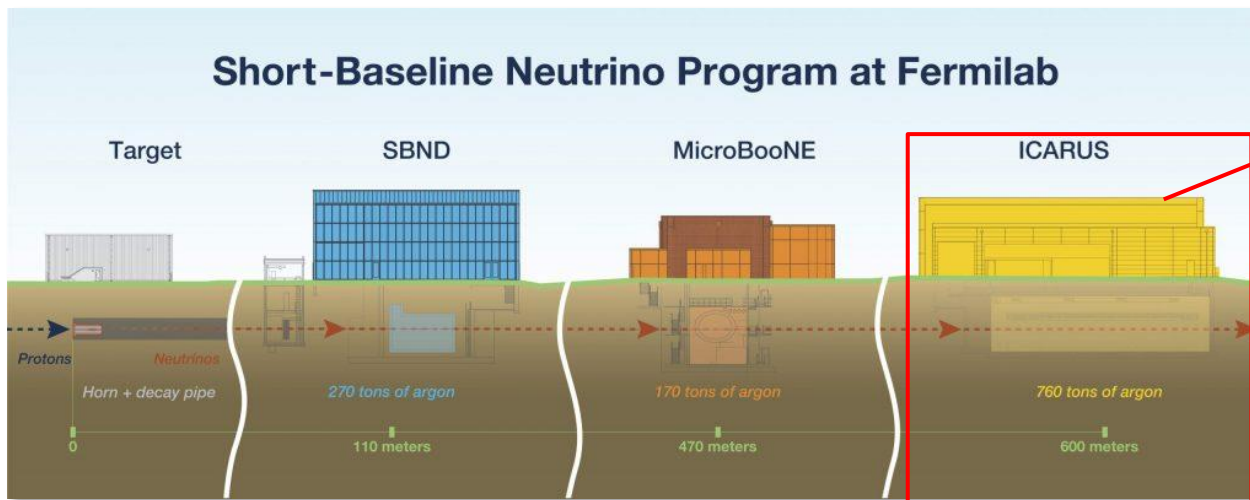
M. Bonesini, R. Benocci, M. Torti

Obiettivi principali:

- ▶ Misure precise di apparizione ν_e e sparizione ν_μ
- ▶ Misura dei neutrini sterili

14

FNAL
Booster
Neutrino
Beam



Short-Baseline Far Detector The ICARUS T600

- 500 tons di Argon Liquido
- Recentemente installato, con nuova elettronica di read-out, un nuovo sistema criogenico
- Sta prendendo dati!

ICARUS è in superficie: Il sistema dei PMT si usa per la rigezione del fondo di raggi cosmici e sarà essenziale per il buon funzionamento dell'esperimento

Le Tesi

- ▶ Hardware: Utilizzo del sistema di calibrazione laser di Icarus → Sviluppo rivelatori, Analisi dati
- ▶ Software: Ricerca di neutrini sterili al fascio SBN con Icarus → Simulazioni Monte Carlo, Analisi dati

ICARUS @ UniMIB

- Costruzione sistema di rivelazione della luce di scintillazione emessa nel VUV (~ 128 nm) basato su 360 fotomoltiplicatori di grande area (8")
- responsabilità della sua calibrazione con laser veloce ed un sistema distribuito basato su fibre ottiche

I neutrini da Reattore

JUNO - Jiangmen Underground Neutrino Observatory

15

JUNO @ UNIMIB
M. Sisti, D. Chiesa, M. Nastasi, E. Previtali
Per info tesi: monica.sisti@mib.infn.it

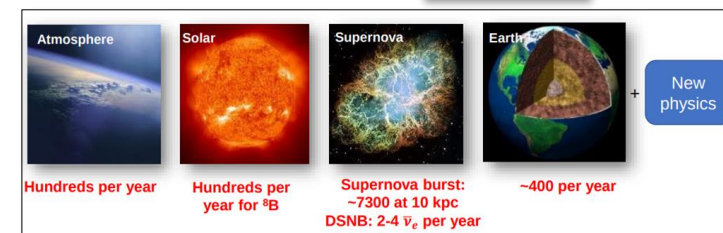


Obiettivi principali:

- Determinazione dell'ordinamento delle masse dei neutrini

ma anche:

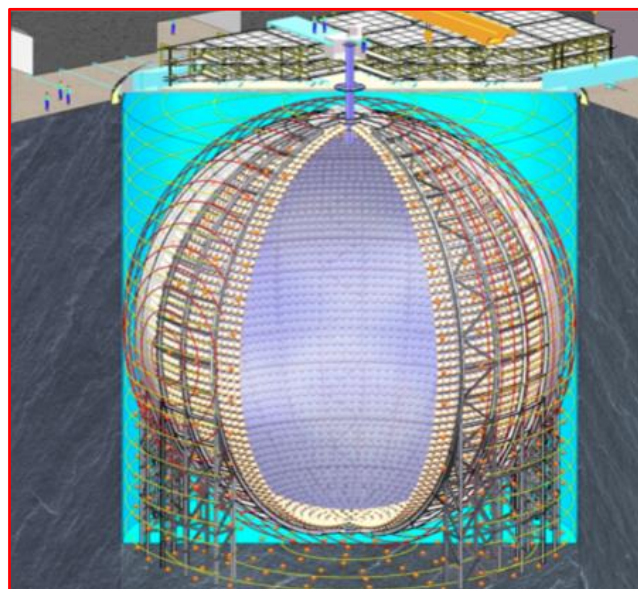
- Neutrini da supernova, solari, atmosferici, geo-neutrini...
- Decadimento del protone



Come? Misura delle **oscillazioni degli $\bar{\nu}_e$** emessi da una **decina di reattori a 53 km**

Il Rivelatore:

20.000 tonnellate di scintillatore liquido instrumentato con decine di migliaia di fotomoltiplicatori



I neutrini da Reattore

JUNO - Jiangmen Underground Neutrino Observatory

16

Le Tesi: l'esperimento si avvia verso le **fasi finali della costruzione**

→ **inizia la presa dati il prossimo anno!**

→ **molte prospettive di studi di fisica interessanti!**

Competenze che potete acquisire

- ▶ Analisi dell'evoluzione temporale dello spettro di antineutrini emessi dai reattori di potenza: Simulazione del burnup del combustibile nucleare in un reattore di potenza → ricostruzione dello spettro di antineutrini emessi dai frammenti di fissione → ricostruzione e analisi delle incertezze sistematiche dello spettro "non-oscillato" dei neutrini reattori. **Elemento essenziale per l'analisi dello spettro "oscillato" misurato da JUNO**

- ▶ Codici Monte Carlo moderni
- ▶ Modelli per reattori di potenza
- ▶ Fisica Nucleare
- ▶ Fisica del decadimento β

- ▶ Misura di contaminanti in traccia in campioni solidi e liquidi mediante attivazione neutronica e tecniche radiochimiche: Determinazione di bassissime concentrazioni di contaminanti naturali nei materiali necessari alla realizzazione dell'esperimento JUNO. **In collaborazione con il LENA di Pavia**, dove è attivo un **reattore nucleare di ricerca → conduzione e ottimizzazione della tecnica dell'analisi per Attivazione Neutronica**

- ▶ Analisi dati
 - ▶ Fisica degli eventi rari
- Attività di laboratorio! →
- ▶ Tecniche di concentrazione di campioni e irraggiamento
 - ▶ Trattamenti Radiochimici post-irraggiamento

- ▶ Studio delle componenti del fondo radioattivo atteso per l'esperimento JUNO: Simulazione Monte Carlo per la propagazione delle particelle, dalla loro generazione fino alla deposizione dell'energia nel volume attivo del rivelatore per prevedere lo spettro di fondo atteso dall'esperimento sia in termini di tasso di conteggi che di forma dello spettro energetico. **Studio di cruciale importanza per tutti i canali di fisica oggetto di studio da parte di JUNO** (in particolare per la determinazione della gerarchia di massa e per la rivelazione dei neutrini solari d ^8B).

- ▶ Codici di Simulazione
- ▶ Sviluppo di metodologie di analisi