

Tesi Triennali in Fisica del Neutrino @ Unimib



Attività dei gruppi di ricerca in Fisica delle Astroparticelle

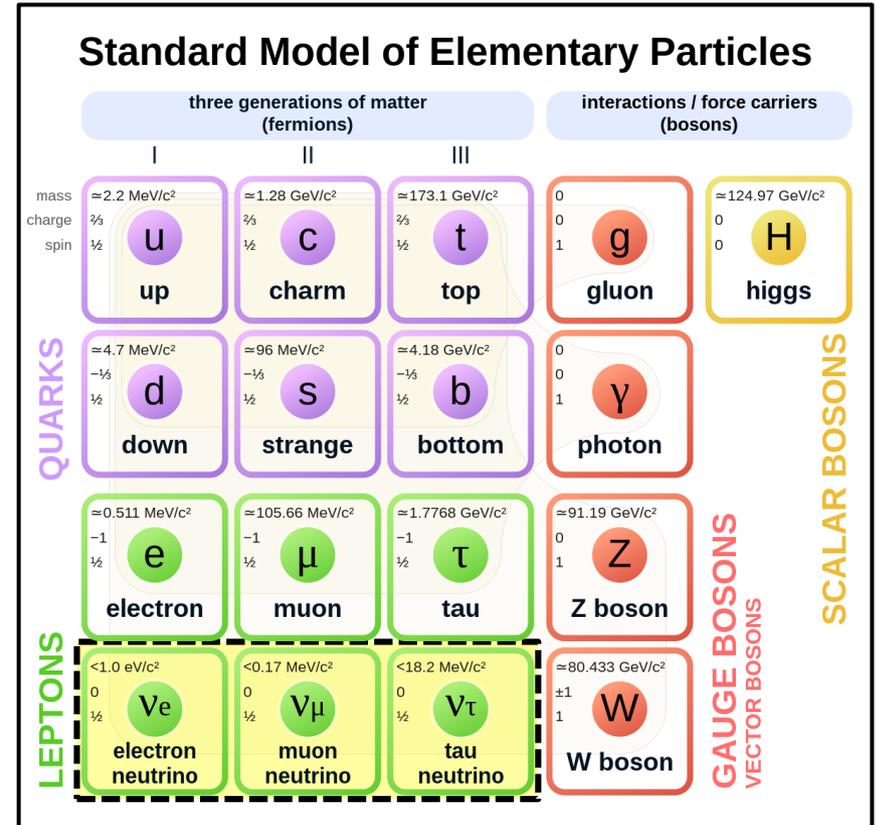
Oscillazioni dei Neutrini

Giulia Brunetti
Università e Sezione INFN di Milano-Bicocca



I Neutrini nel Modello Standard

- Sono **particelle elementari** e sono **leptoni**
- Sono **neutri**
- **3** famiglie, o **SAPORI**
→ **neutrino elettronico, muonico e tau**
- Interagiscono SOLO debolmente
- Hanno **piccolissima sezione d'urto**
→ *Scoperti 26 anni dopo essere stati ipotizzati!*
→ **Servono rivelatori di grande massa!**
- Hanno **massa nulla: $m=0$...**



Oscillazioni di Neutrini



MA...

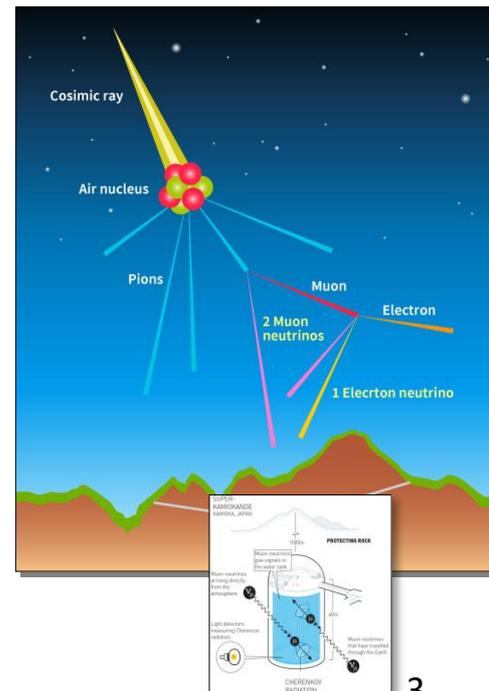
- **1968: Rivelazione dei Neutrini Solari:** Esperimento di R. Davis a Homestake

Con un serbatoio di 380m³ di tetracloroetene 1478m sottoterra vengono per la prima volta rivleati i neutrini elettronici emessi dalla fusione nucleare all'interno del Sole... **MA solo un terzo di quelli previsti!**



- **1985: Rivelazione dei Neutrini Atmosferici:** Esperimento Kamiokande

Rivelatore Cherenkov ad acqua per rivelare i neutrini prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera: il numero di neutrini muonici attesi è circa il doppio di quelli elettronici... **MA ne rivelano meno!**



Oscillazioni di Neutrini



E...

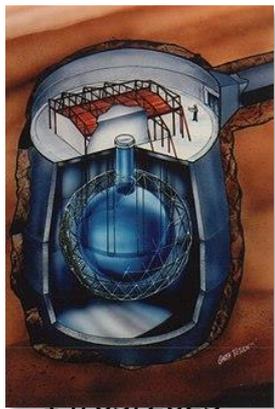
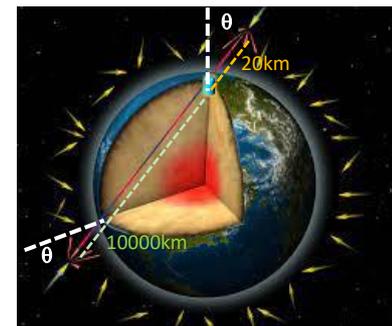
- **1957: Predizione di Bruno Pontecorvo:** [Le Oscillazioni di Neutrini](#)

Pontecorvo aveva ipotizzato che i neutrini potessero oscillare da un tipo all'altro, cioè **cambiare da un sapore all'altro**

La Soluzione

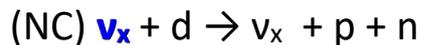
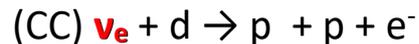
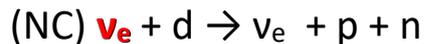
- **1998: La prima evidenza sperimentale:** [Super-Kamiokande](#)

L'esperimento dimostrò che parte dei neutrini atmosferici muonici “sparivano” nel loro viaggio fino al rivelatore su distanze ~1000-10000km



- **2002: La soluzione al problema dei neutrini solari:** [Esperimento SNO](#)

Rivelatore ad una profondità 2000m nella miniera di Sudbury in Canada, contenitore da 1000 ton d'acqua pesante visto da 9600 fotomoltiplicatori. Misura:



E gli eventi possono essere distinti fra loro! → I \mathbf{v}_e diventano “ \mathbf{v}_x ” nel viaggio Sole-Terra!

Oscillazioni di Neutrini

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!

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

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

E...

$\Delta m^2 \neq 0 \rightarrow$

I neutrini

hanno massa!

Neutrini – Cosa Non Sappiamo

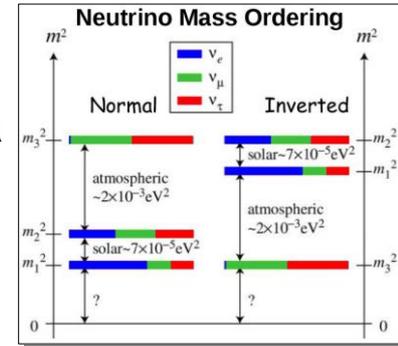


Nobel Prize in Physics for Neutrinos

- 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?
 - $P_{osc}(\nu)$ VS $P_{osc}(\bar{\nu})$ ↔ violazione di CP nel settore leptonic?
 - asimmetria materia/antimateria nell'universo
- Esistono altri tipi di neutrino? → Neutrini “sterili” = Partecipano alle oscillazioni ma non interagiscono!



Neutrini – Le sorgenti

Naturali:

- Terra (radioattività naturale)
- Sole
- Atmosfera – Raggi Cosmici
- Universo: Eventi Astrofisici, Supernovae ...

Artificiali:

- Acceleratori
- Reattori

Se li produciamo noi abbiamo maggior conoscenza e controllo sulla loro ENERGIA

+

Sappiamo dov'è la sorgente → possiamo scegliere dove mettere i rivelatori per fare misure a DISTANZE ottimali

→ Esperimenti che hanno lo scopo di determinare:

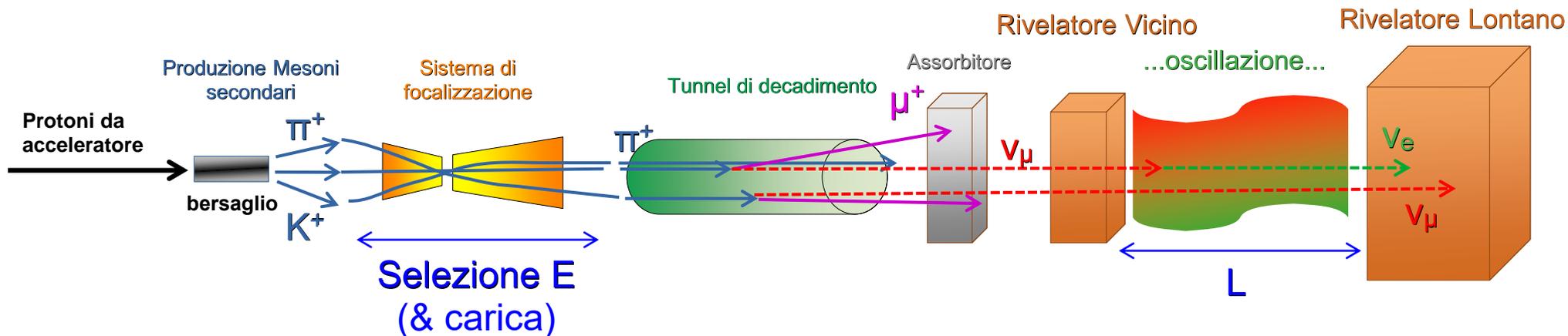
l'ordine delle masse

Se $P_{osc}(\nu) = P_{osc}(\bar{\nu})$

Se esistono i neutrini sterili

Gli Esperimenti

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**



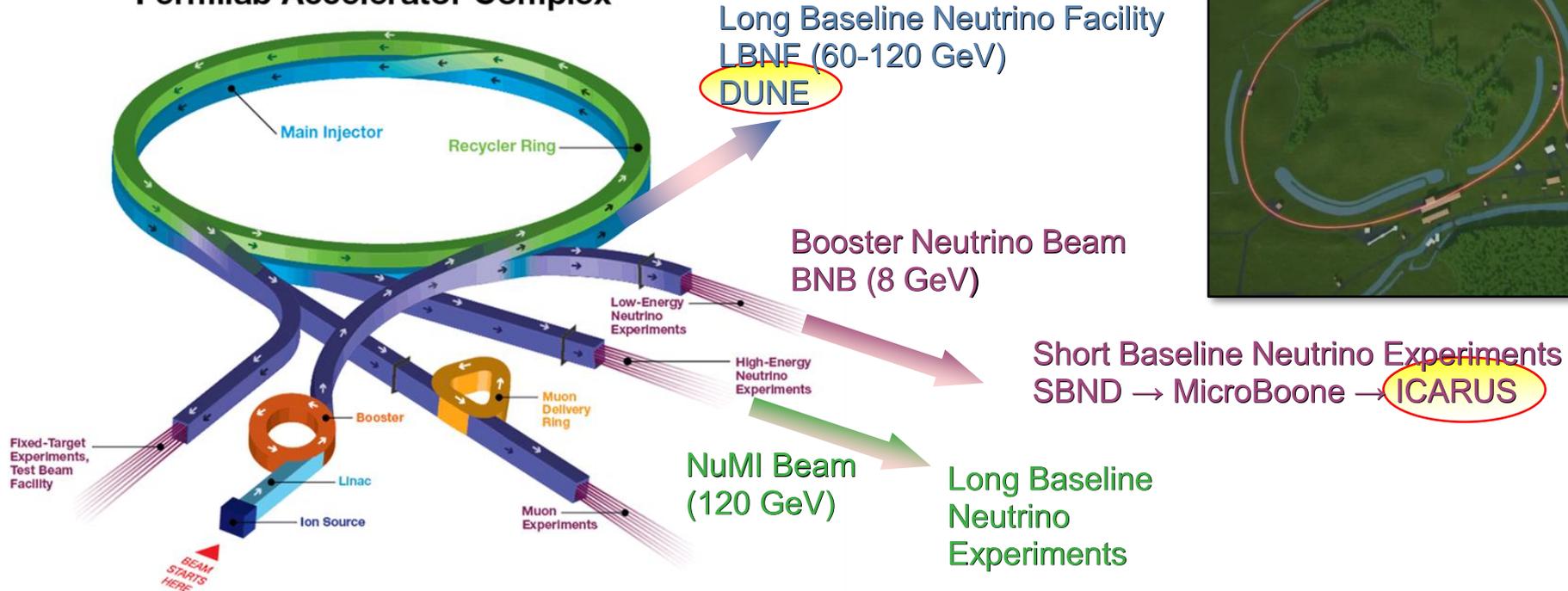
- ✓Esperimento **DUNE**
 - ✓Esperimento SBN (**ICARUS** detector)
 - ✓Progetto **ENUBET**: Esperimento **CERN** NP06/ENUBET
- } @ **Fermilab**, USA

Gli Esperimenti

Neutrini da Acceleratore: Le linee di fascio di neutrini del Fermilab



Fermilab Accelerator Complex



DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment

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

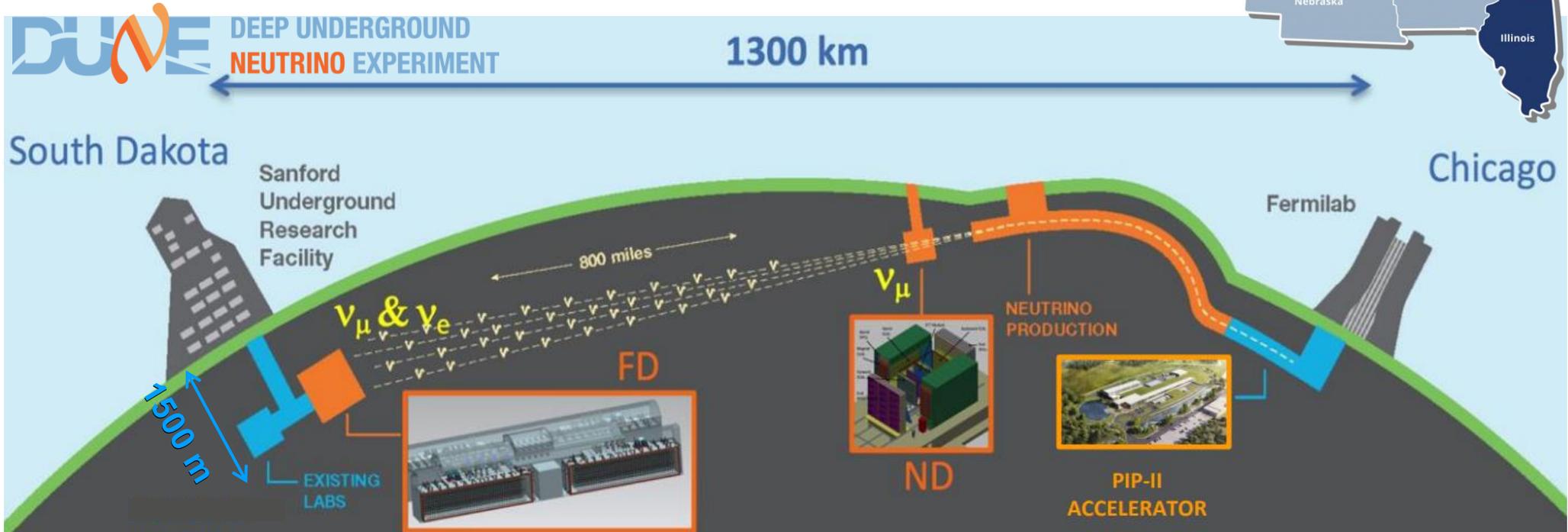
DUNE @ UNIMIB

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: $P_{osc}(\nu)$ VS $P_{osc}(\bar{\nu})$**
- **Determinare l'ordine delle masse**

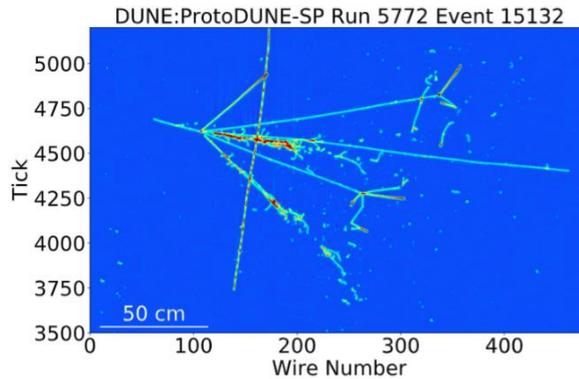
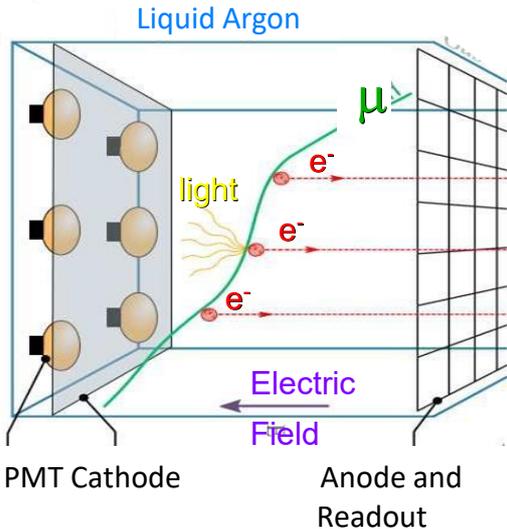


DUNE — Deep Underground Neutrino Experiment

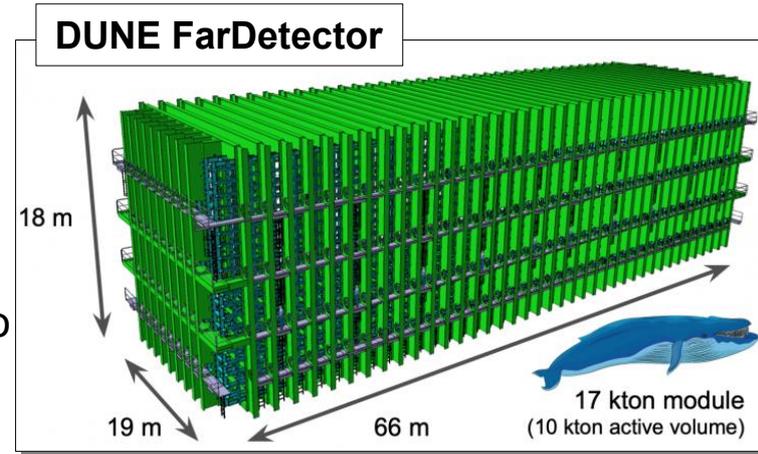
I rivelatori: Liquid Argon Time Projection Chambers (LArTPC)

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

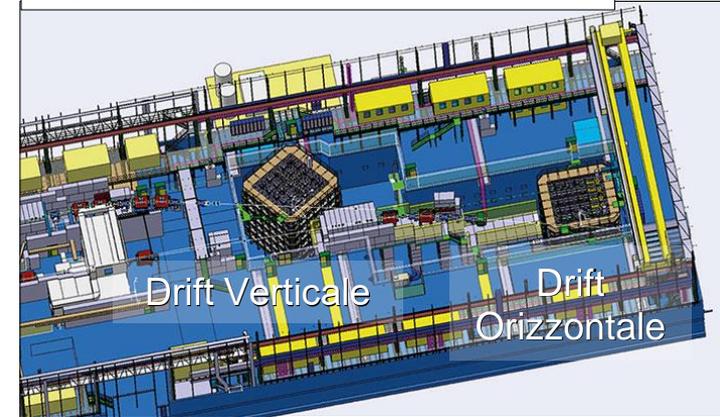
- Ionizzazione → **CARICA** → Si applica un campo elettrico → gli e^- viaggiano fino all'anodo e vengono misurati da fili
- Eccitazione → **LUCE DI SCINTILLAZIONE** → I fotoni prodotti vengono misurati con SiliconPM



Giulia Brunetti



2 prototipi in funzione al CERN



DUNE – Deep Underground Neutrino Experiment

I rivelatori: **Liquid Argon** **Time Projection Chambers (LArTPC)**

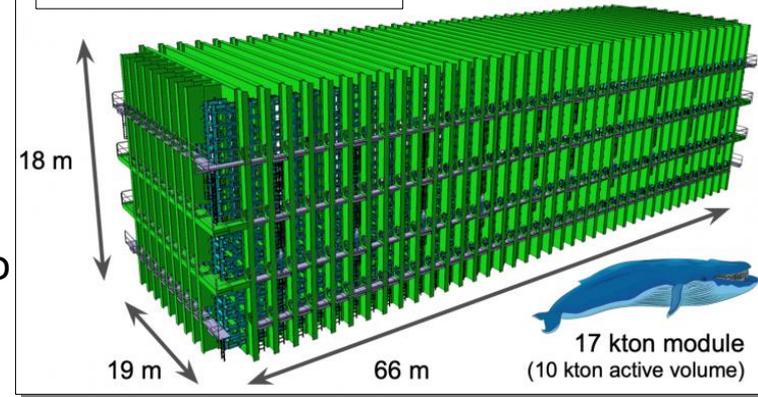
Il neutrino interagisce nell'Argon Liquido → le particelle prodotte depositano energia sotto forma di:

- 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

Le Tesi:

- **rivelatori criogenici per l'osservazione della luce (VUV) prodotta nell'argon liquido**
→ SiPM a 87 Kelvin, risposta di luce del rivelatore X-ARAPUCA, costruzione dei nuovi rivelatori ProtoDUNE-HD and ProtoDUNE-VD al CERN
- **I neutrini Solari & $0\nu\beta\beta$ in Xe** → Il rivelatore di DUNE verrà usato per tante altre misure oltre alle oscillazioni da acceleratore!

DUNE FarDetector



2 prototipi in funzione al CERN



SBN – Short Baseline Neutrino Program

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

SBN-ICARUS @ UNIMIB
Per info tesi: M. Bonesini, R. Benocci

Misure precise di **apparizione ν_e** e **sparizione ν_μ** nel Booster Neutrino Beam
...e misura dei **neutrini sterili**

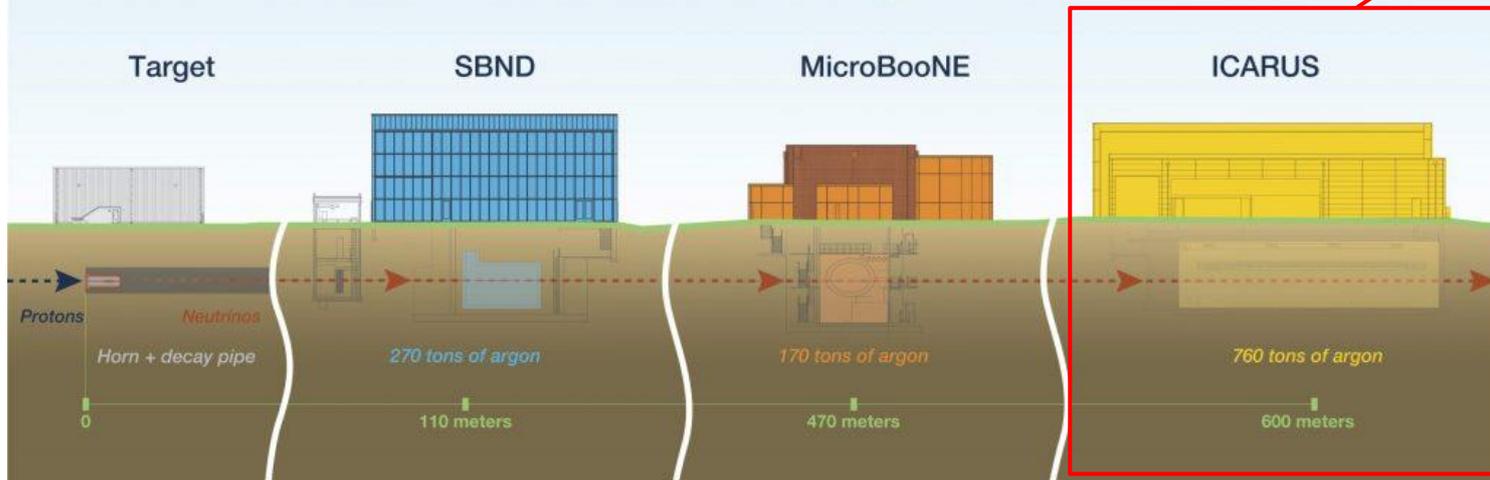
Short-Baseline **Far Detector** **The ICARUS T600**

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

Le Tesi:

- Sistema di rivelazione della luce & **sistema di calibrazione a laser e fibre ottiche**

Short-Baseline Neutrino Program at Fermilab



ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

Lo scopo: **Misure di sezione d'urto di neutrini ad alta precisione**

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



Perchè? 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 così detti **Fasci di neutrini MONITORATI**

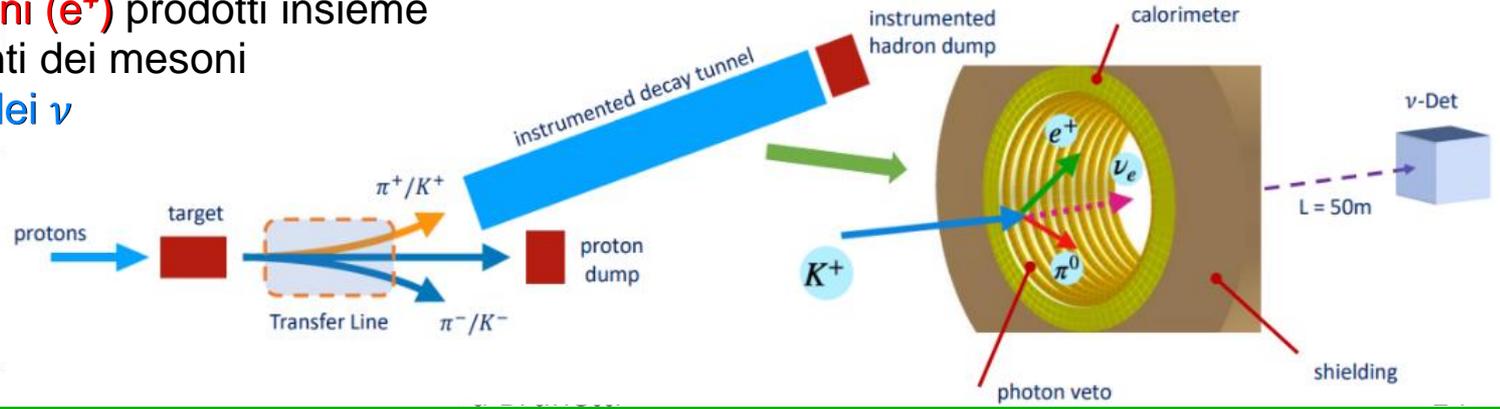
A. Longhin, L. Ludovici and F. Terranova, **A novel technique for the measurement of the electron neutrino cross section**, Eur. Phys. J. C 75 (2015) 155

Si **misura il rate dei leptoni (e^+)** prodotti insieme ai neutrini nei decadimenti dei mesoni

⇔ **si monitora il flusso dei ν**

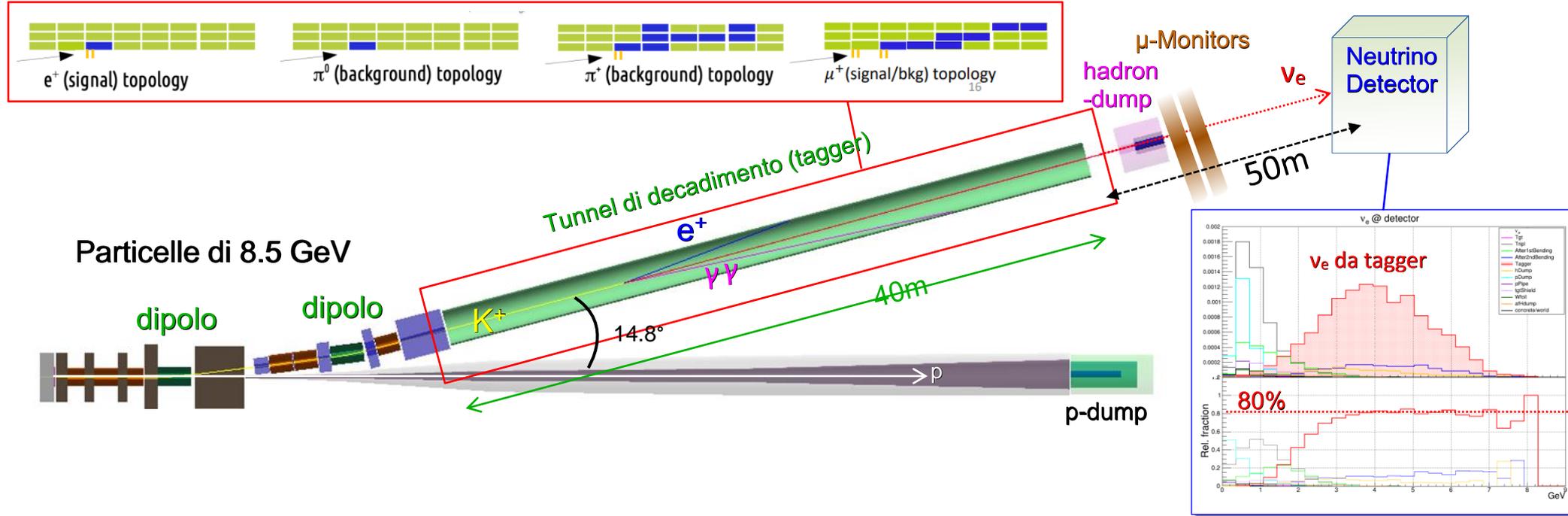
Come?

Si instrumenta il tunnel di decadimento con dei calorimetri!



ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

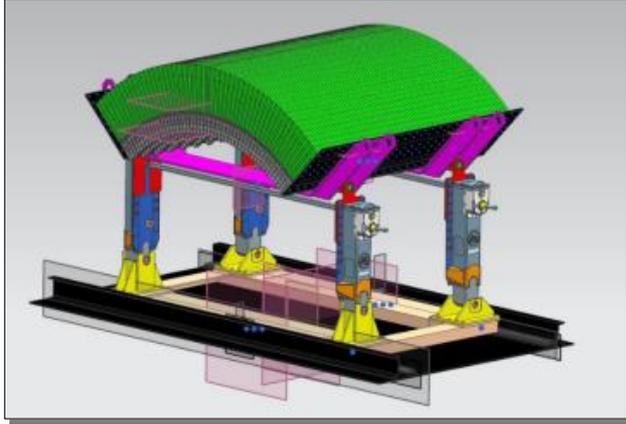
- Si misurano i positroni prodotti nei decadimenti K_{e3} ($K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu_e$) nel tunnel, il corrispettivo neutrino raggiunge il rivelatore \Rightarrow si determina con precisione il **flusso dei ν_e**
- Si misurano anche i muoni μ dei decadimenti $K_{\mu\nu}$ nel tunnel e i μ dai decadimenti $\pi_{\mu\nu}$ con dei monitors dopo il tunnel \Rightarrow si determina con precisione il **flusso dei ν_μ**



ENUBET – Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging

Il Calorimetro

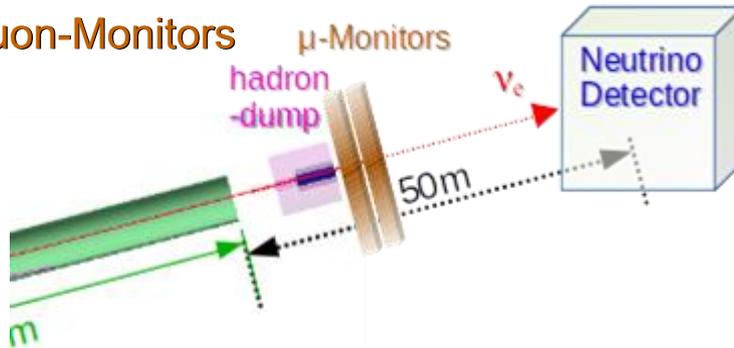
Il prototipo



2022: Il prototipo al CERN!



I Muon-Monitors



Le Tesi:

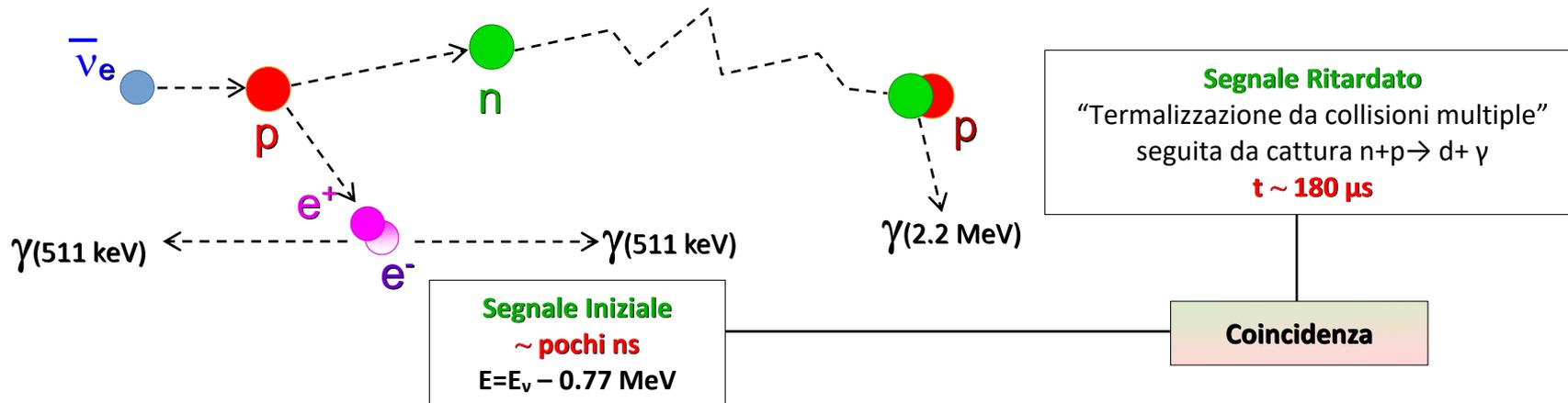
- Analisi dei dati presi con il **prototipo dimostratore del calorimetro** nel 2022 e nuovi test nel 2023: caratterizzazione nuovi fotosensori
- Studi sull'implementazione di **rivelatori per muoni** nel beam dump
- “Tagged Neutrino Beams”: tecniche non convenzionali per la fisica del neutrino agli acceleratori: **timing di particelle**
- Identificazione dei muoni a **ENUBET@ESS** al fine di ottenere un fascio monitorato di neutrino alle European Spallation Source (Lund, Svezia).

Gli Esperimenti

Neutrini da Reattore

- I reattori producono $\bar{\nu}_e$ nei processi di fissione nucleare: decadimento β dei frammenti
- Ne producono tanti: sono **sorgenti intense**
- 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
- Vengono **emessi isotropicamente**

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



JUNO – Jiangmen Underground Neutrino Observatory

Obiettivo primario: **Determinare l'ordinamento delle masse dei neutrini**

JUNO @ UNIMIB: M. Sisti, E. Previtali, D. Chiesa, M. Nastasi

Per info tesi: monica.sisti@mib.infn.it

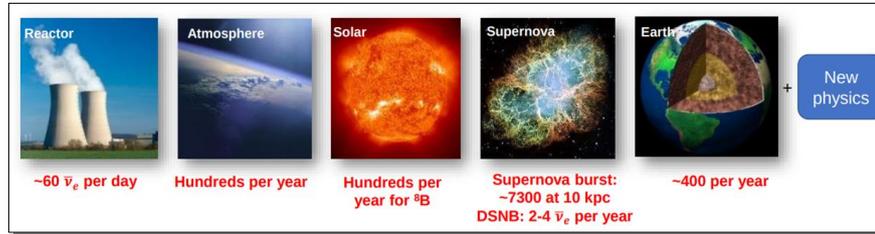
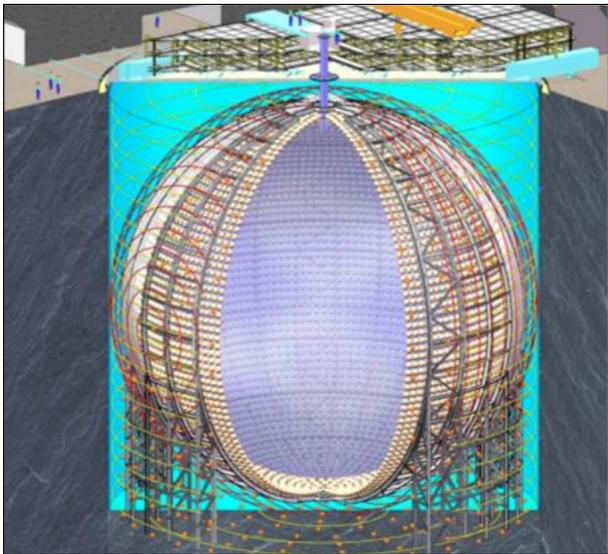


Come? **Misura delle oscillazioni degli $\bar{\nu}_e$** emessi da una **decina di reattori a 53 km**

Il rivelatore: **20.000 tonnellate di scintillatore liquido** instrumentato con **decine di migliaia di fotomoltiplicatori**



Anche neutrini solari, atmosferici, geo-neutrini...



Le Tesi:

- Hardware: **Misure di spettroscopia γ presso il laboratorio di radioattività del Dipartimento di Fisica** e collaborazioni con TRIGA di Pavia per misure ultrasensibili di contaminanti radioattivi
- Software: Studio di **simulazioni dello spettro di neutrini** emesso da reattore