

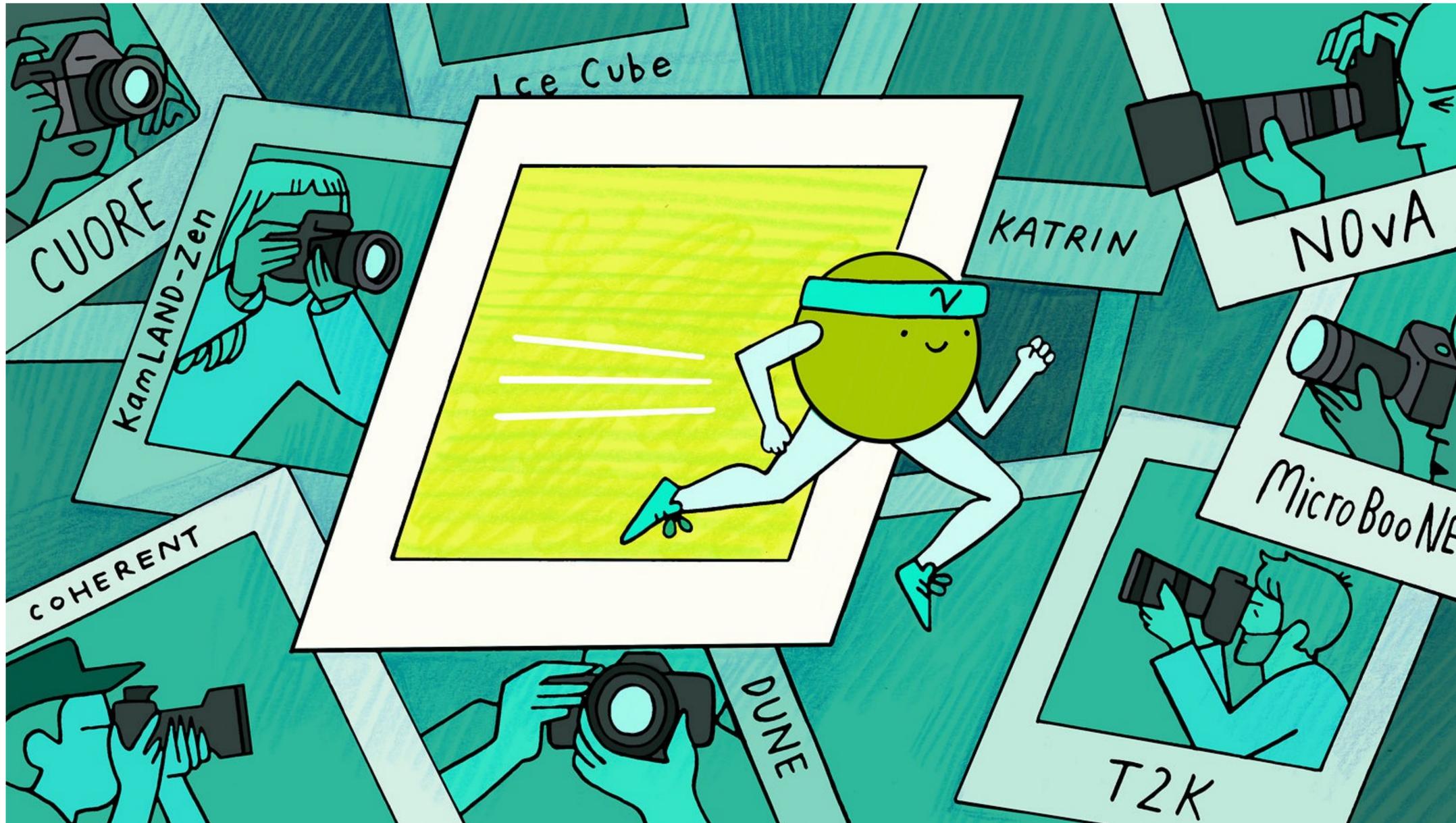
UNIMIB E LE OSCILLAZIONI DEL NEUTRINO

PRESENTAZIONE DEGLI ARGOMENTI DI TESI TRIENNALE

Antonio Branca @ antonio.branca@unimib.it

Incontro del 14/01/2025

IL NEUTRINO: UN V.I.P. TRA LE PARTICELLE



- Si ma cos'è il neutrino?
- Perché è così interessante?
- Chi lo studia e in che modo?
- Dove posso fare una tesi sul neutrino....e su quale argomento?

1930: "NASCE" UNA NUOVA PARTICELLA

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

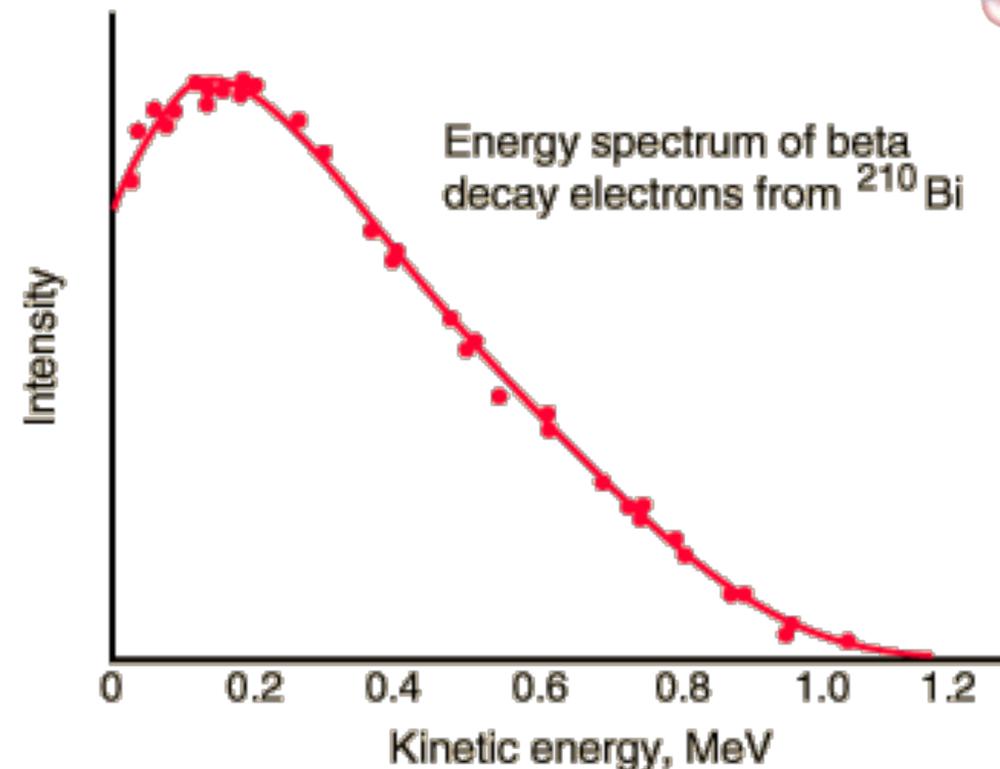
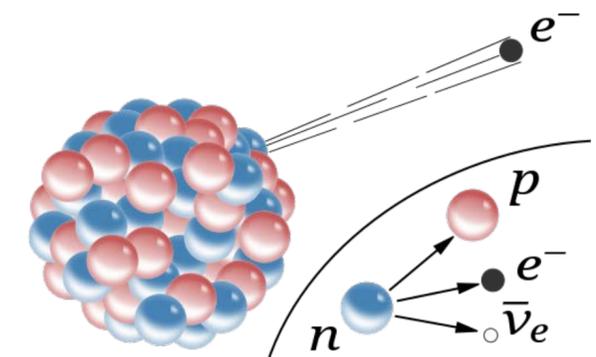
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

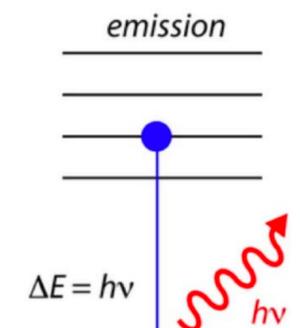
Nel 1930 Pauli introduce l'idea di **neutrino** in una lettera aperta indirizzata ad un meeting di fisica:

- un tentativo "disperato" di salvare una legge fondamentale della fisica: la conservazione dell'energia;

Perché?



Analogia: emissione monocromatica



Semplice!
Costruiamo un
esperimento per
rivelare il neutrino.



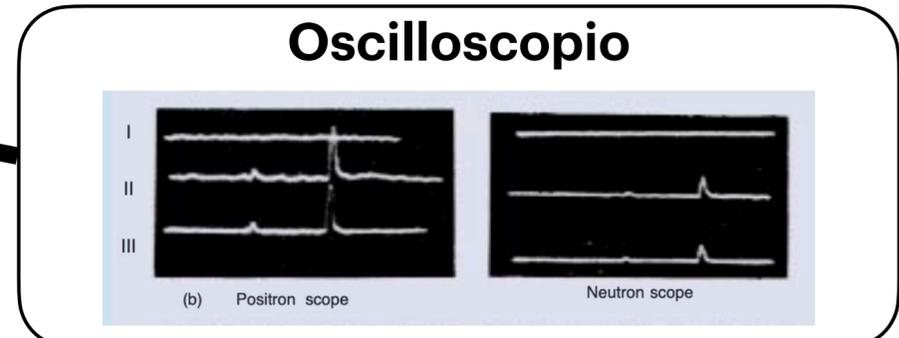
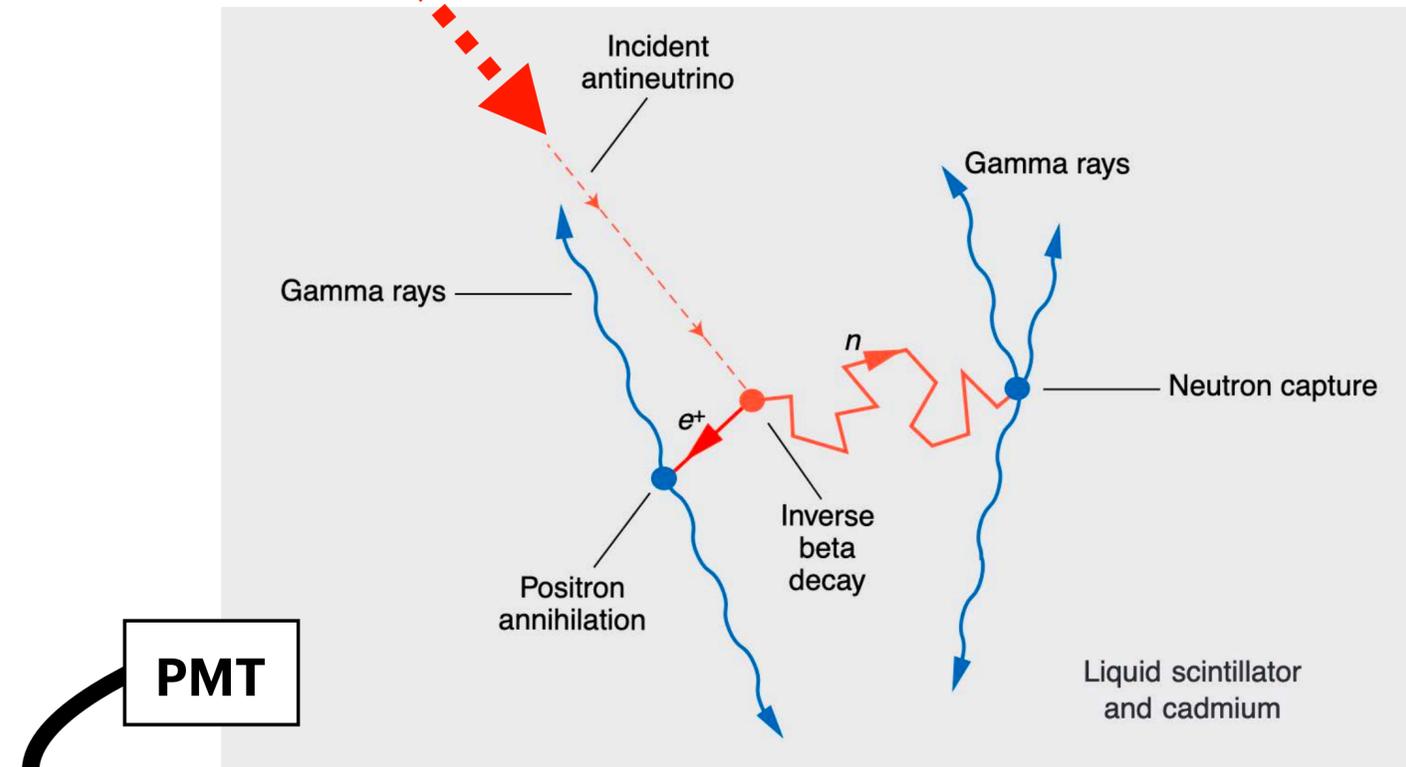
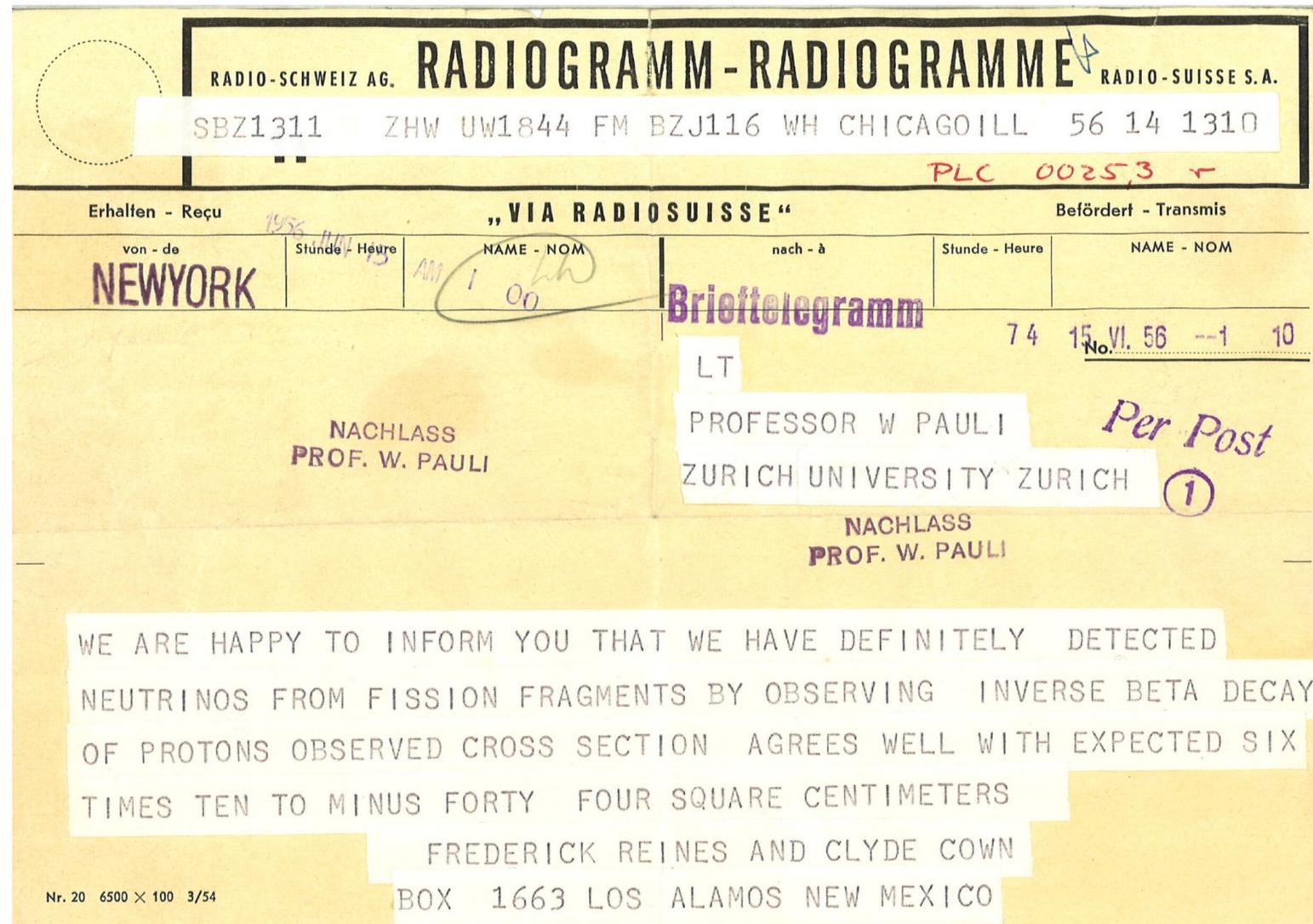
1956: PRIMA RIVELAZIONE DI NEUTRINI

Nell'esperimento di Reines & Cowan per la prima volta vengono osservati dei neutrini: dopo 26 anni viene annunciato il successo con un telegramma a Pauli



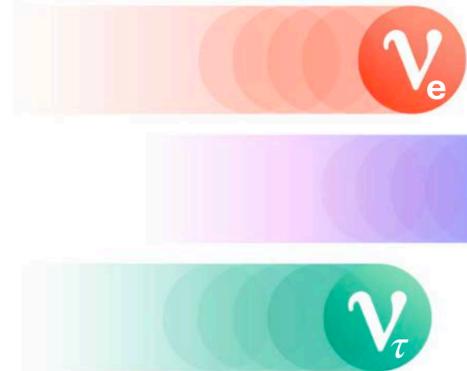
Perché così tanto tempo?

- neutrini interagiscono molto poco (**interazione debole**): sorgenti ad alta intensità sono indispensabili



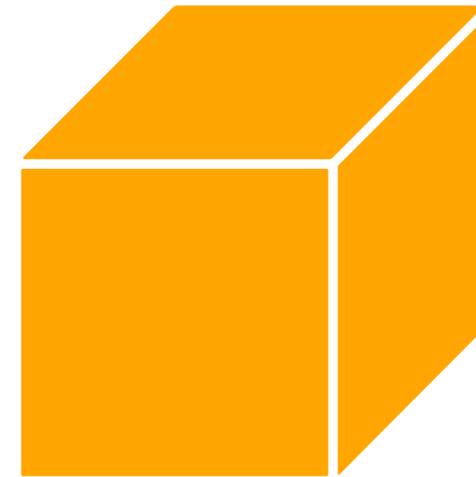
DOPO CIRCA 1 SECOLO ANCORA IMPORTANTI?

Dopo circa un secolo abbiamo imparato tanto, ma non tutto, anzi! **Cosa sappiamo sui neutrini?**



Tre tipi (sapori) diversi:

ad esempio un ν_e quando interagisce può produrre solo elettroni



I neutrini sono le particelle di materia più abbondanti nell'universo:

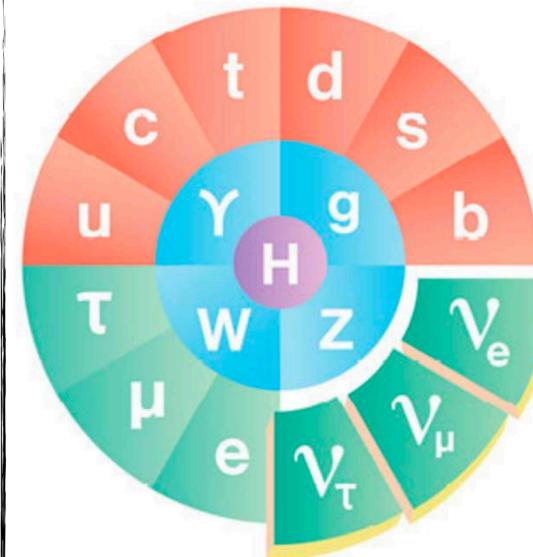
In media in $1 m^3$ nell'universo troviamo:

- 10 protoni;
- 300.000 neutrini;

Interagiscono molto poco:

Sole è sorgente di ν_e : $\sim 10^{11} cm^{-2}s^{-1}$ sulla superficie terrestre;

Avremmo bisogno di un blocco di piombo lungo un anno luce per fermare circa metà dei neutrini solari;



Assieme alle altre particelle completano la torta descritta con elevata precisione dal Modello Standard:

- nel modello $m_\nu = 0$;

Un momento, ma.....?

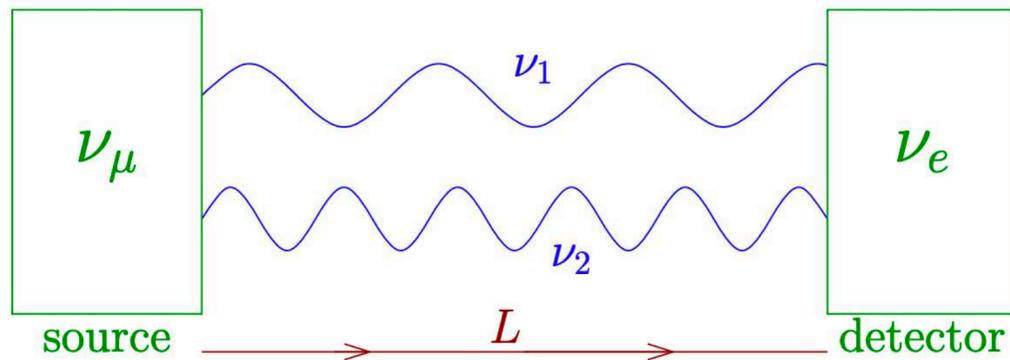


DOPO CIRCA 1 SECOLO ANCORA IMPORTANTI?

Dopo circa un secolo abbiamo imparato tanto, ma non tutto, anzi! **Cosa (non) sappiamo?**

Il sapore dei neutrini oscilla: scoperta nel 1998

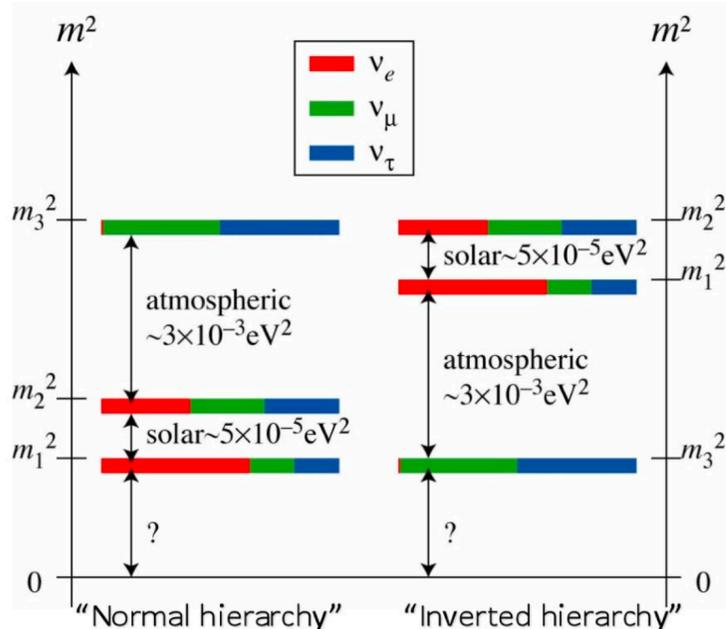
se produco un ν_μ con una certa probabilità rivelerò un ν_e nel detector



Fenomeno spiegato dalla meccanica quantistica se ammettiamo che

$$m_\nu \neq 0$$

$$\nu(L > 0) = c_1(t) \cdot \nu_1 + c_2(t) \cdot \nu_2$$



Cosa sappiamo sulle masse dei neutrini?

- misuriamo le loro differenze;
- non conosciamo il valore assoluto (ma solo che $m_\nu < 1 \text{ eV}$);

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the
2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



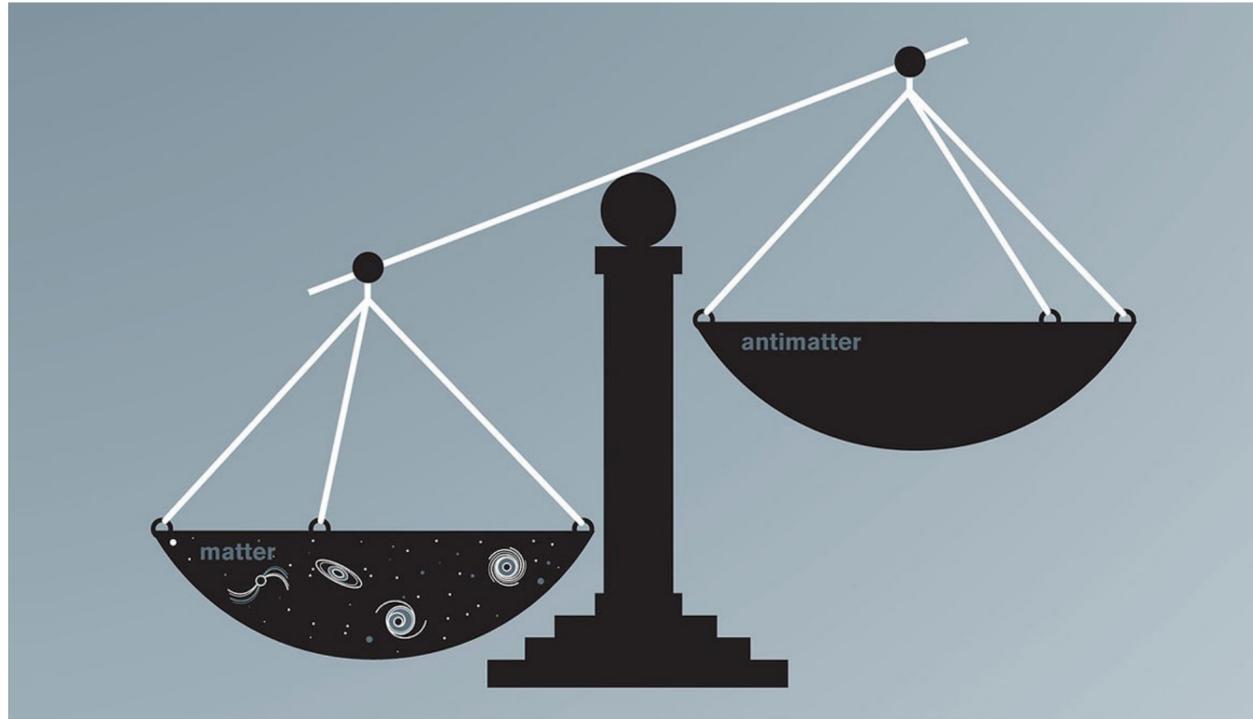
Nobel Prize Press Release:

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.

UNA SOLUZIONE AI MISTERI DELL'UNIVERSO

Perchè l'universo è costituito solo da materia?



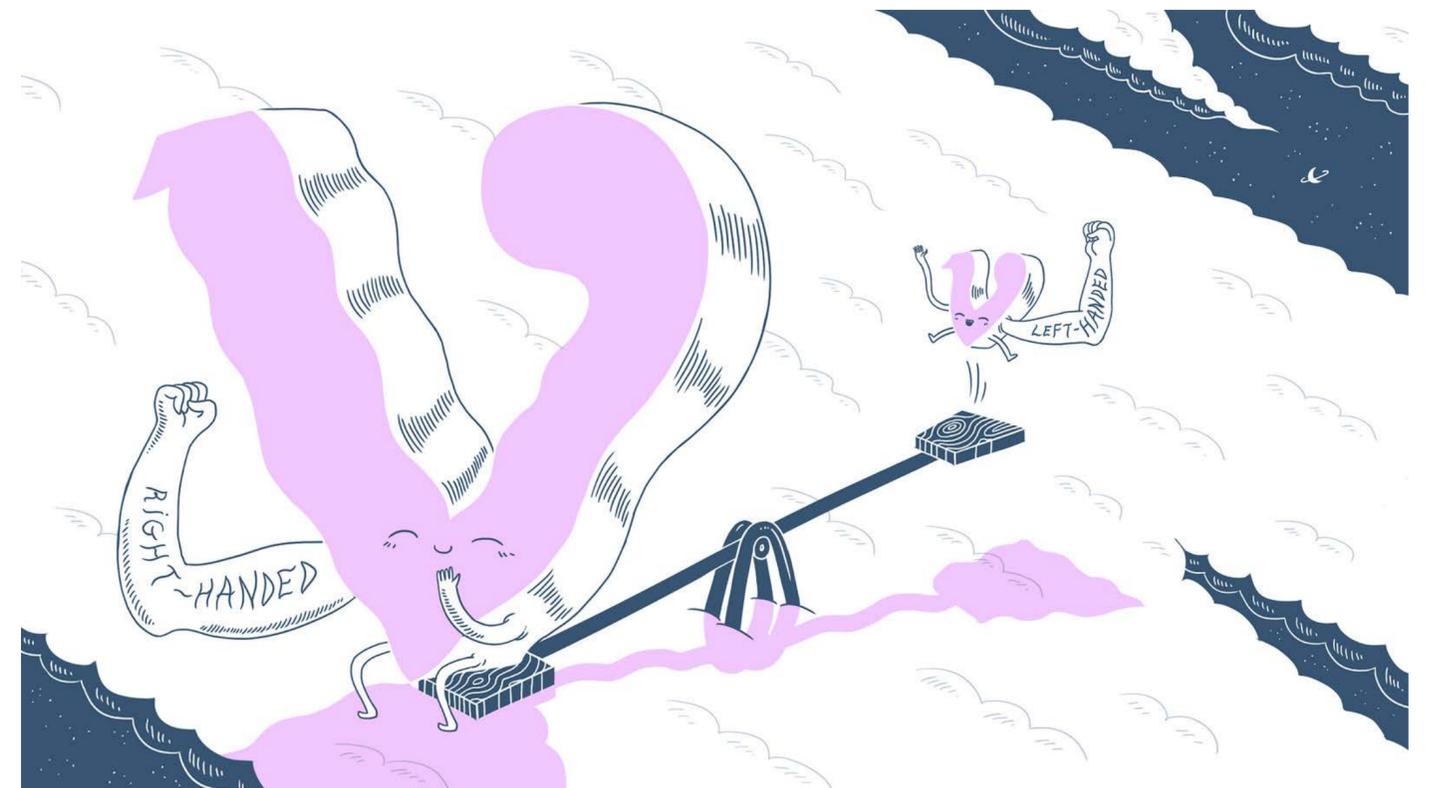
Il **neutrino massivo** può dare vita a fenomeni nuovi in cui riusciamo a **produrre più materia rispetto ad anti-materia**:

- se i neutrini e gli anti-neutrini si comportano in modo leggermente differente (**in gergo: violazione della simmetria CP**);
- se il neutrino è l'anti-particella di se stesso (**in gergo: violazione del numero Leptonico**);

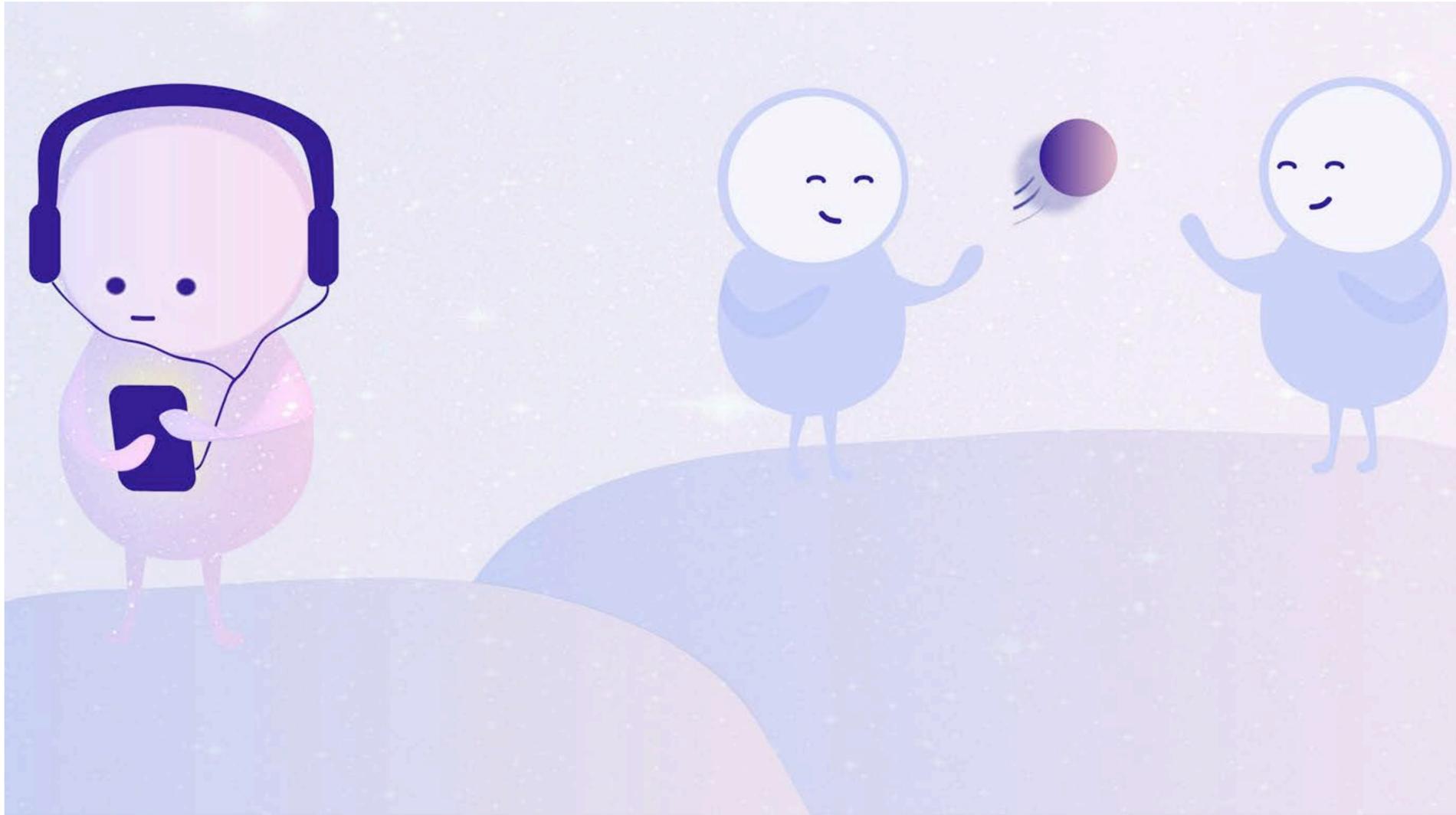
Da che cosa è costituita la materia oscura?

È possibile che esista un fratello più pesante del neutrino:

- il **neutrino pesante** potrebbe spiegare la natura della materia oscura;
- un meccanismo ad **"altalena"** tra neutrino leggero e pesante spiegherebbe i valori di massa dei neutrini;



UN POSSIBILE NEUTRINO “STERILE”



Diversi esperimenti sui neutrini (LSND, MiniBooNE,...) hanno osservato segnali anomali

- Potrebbero essere spiegati proprio tramite l'introduzione di un neutrino pesante
- Interagisce solo gravitazionalmente, però si rivela nelle trasformazioni da un tipo di neutrino all'altro, cioè nelle oscillazioni
- Magari ne esiste più di uno!

NEUTRINI & UNIMIB: RUOLO INTERNAZIONALE IMPORTANTE

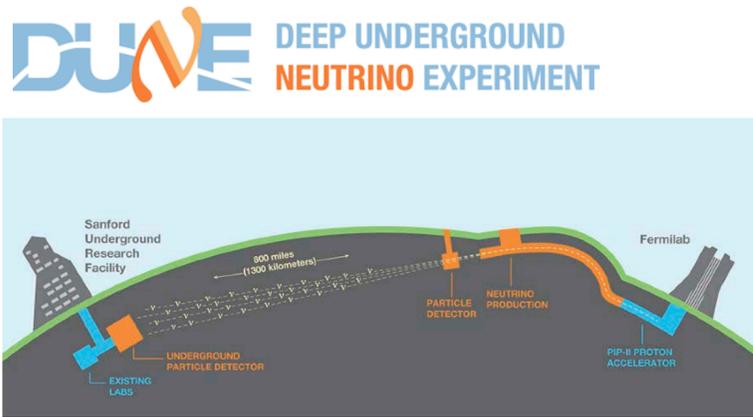
Coinvolti nella realizzazione di esperimenti per rispondere a domande fondamentali:

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

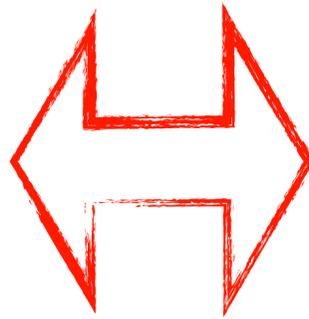
D: qual è il più leggero?

D: come interagiscono con la materia?

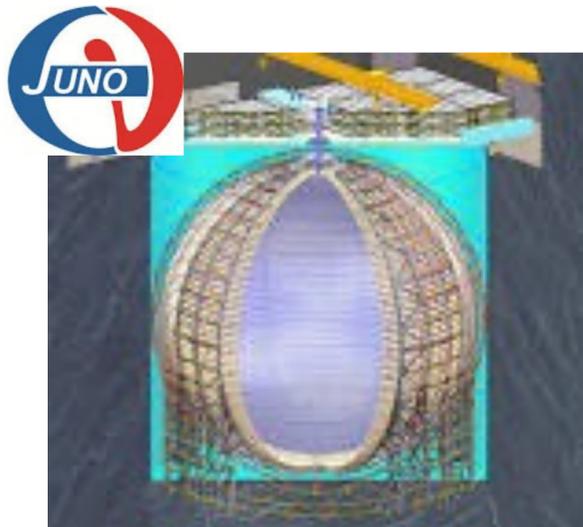
D: esiste un neutrino pesante?



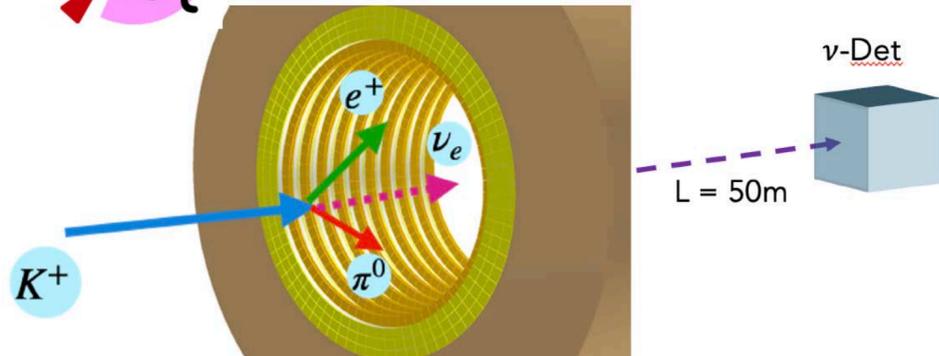
Fermilab



Sanford Underground Research Facility



e⁺ n_u bet



JUNO





DUNE: UN GIGANTE AD ARGON LIQUIDO

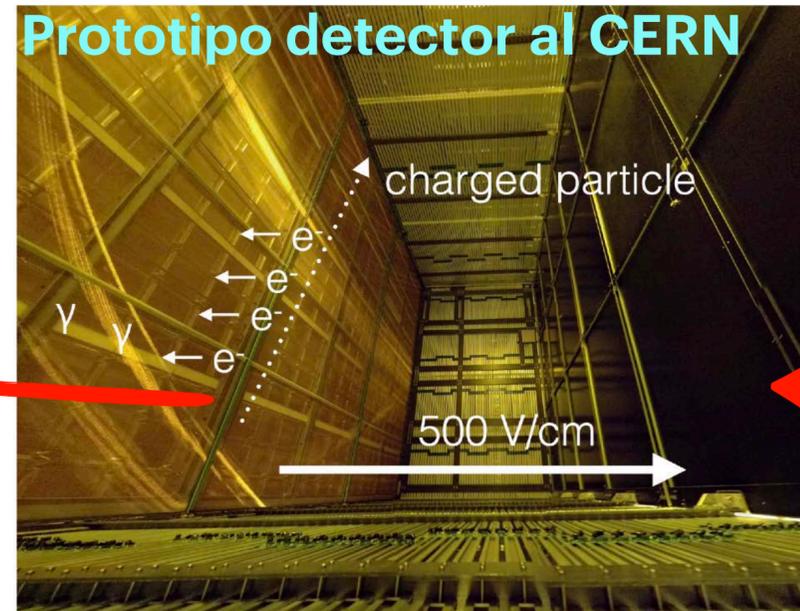
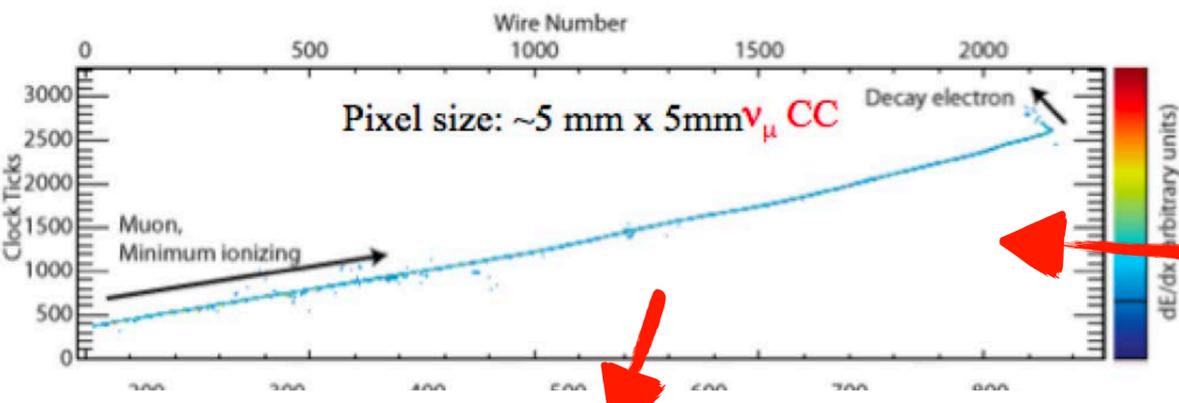
D: neutrini e anti-neutrini si comportano in modo diverso? E di quanto?

Protoni su bersaglio: produciamo un fascio di neutrini intenso, di energia definita e ben collimato;

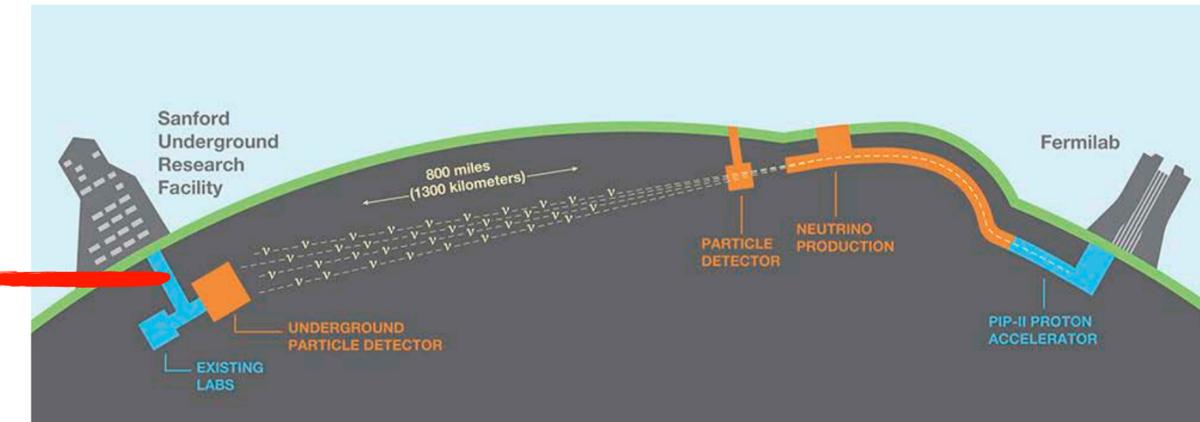
I neutrini viaggiano su una distanza molto lunga: hanno tempo di "trasformarsi" da un tipo all'altro;

Alcuni interagiscono con il detector: posso misurare di che tipo sono e confrontarli con ciò che mi aspetto;

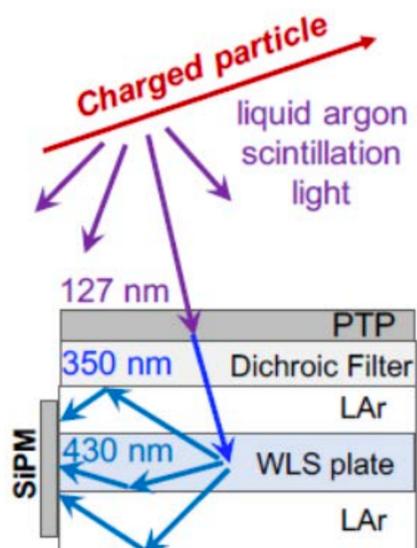
Misuriamo tracce particelle cariche...



Schema di insieme esperimento



...ma anche la luce di scintillazione



- DUNE: Deep Underground Neutrino Experiment, il più grande esperimento con TPC ad argon liquido nei prossimi anni
- Fascio di ν_μ per misura precisa dei parametri di oscillazione
- 4 TPC ad argon liquido con massa totale da 40 kton: misuriamo carica ionizzazione e luce di scintillazione!
- Prototipi (ProtoDUNE) in funzione al CERN per testare le tecnologie sviluppate



DUNE: UN GIGANTE AD ARGON LIQUIDO

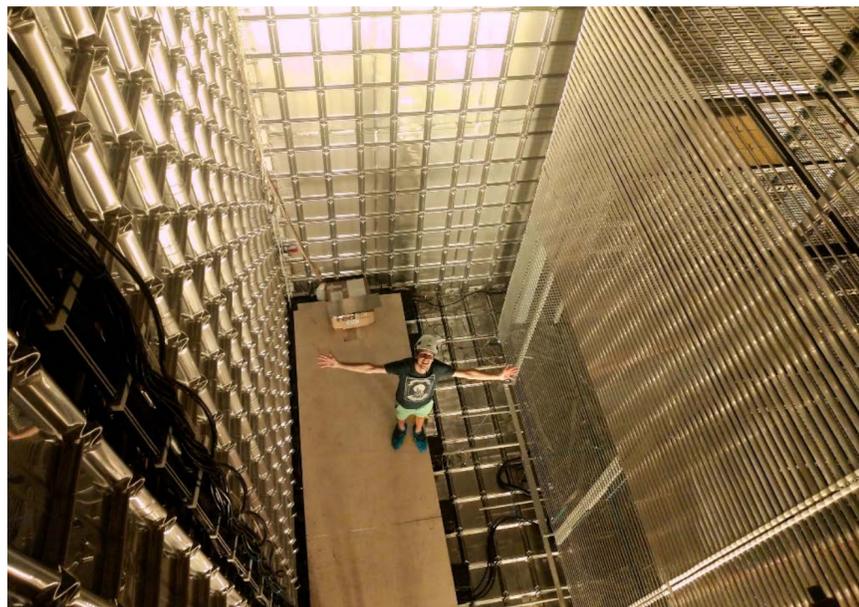


Il gruppo UniMib è coinvolto in molteplici attività, una vasta scelta di argomenti di tesi!

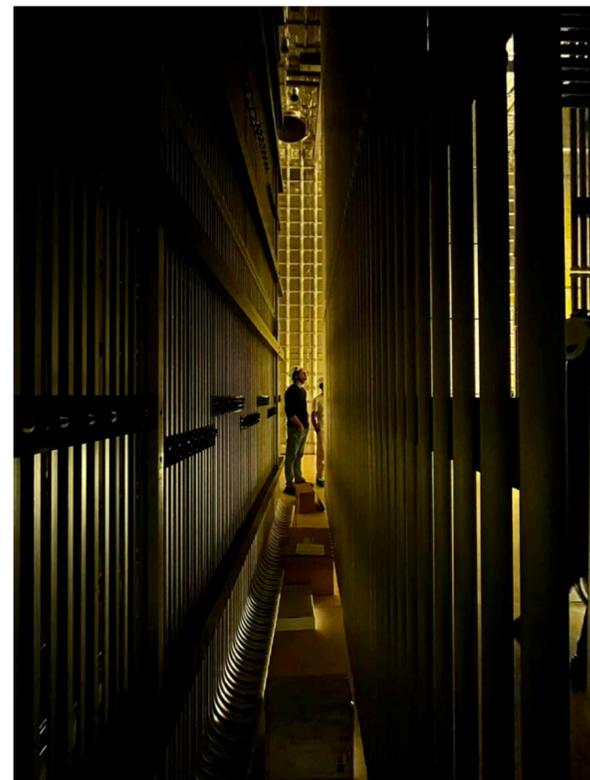


Attività alla CERN Neutrino-Platform

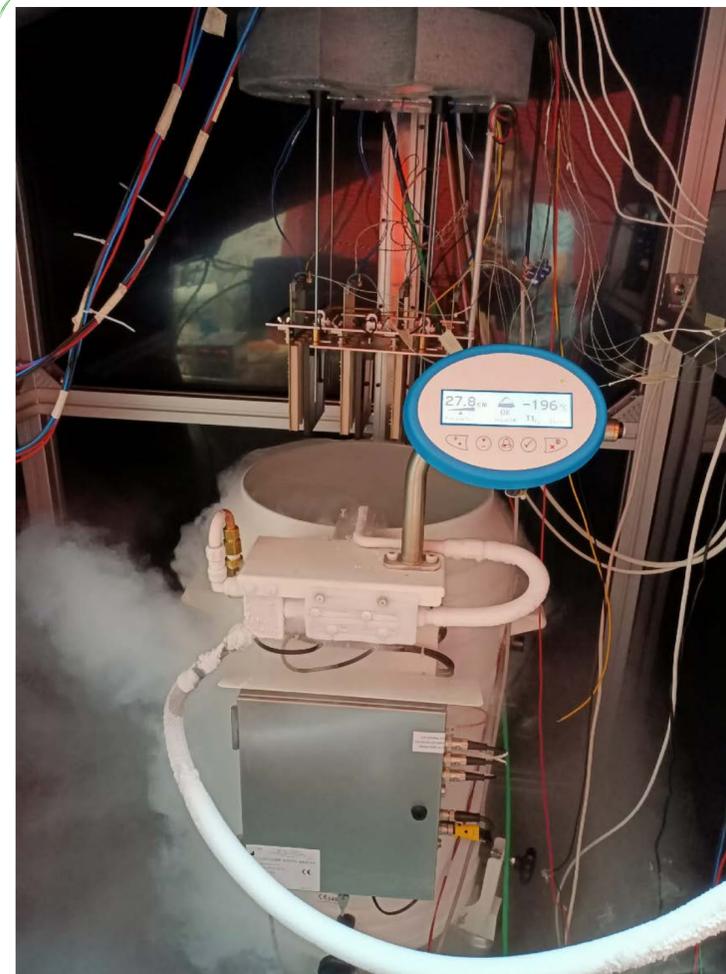
ProtoDUNE tests



ColdBox VD



E tra un'attività e l'altra una LArBeer!



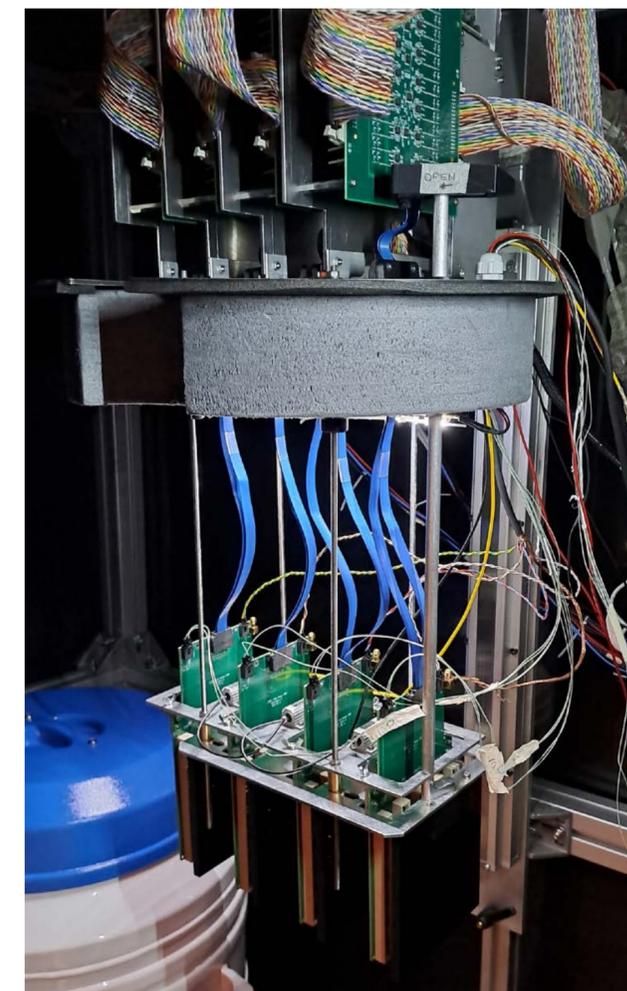
Board con fotosensori



Attività a UniMib



CACTUS test facility



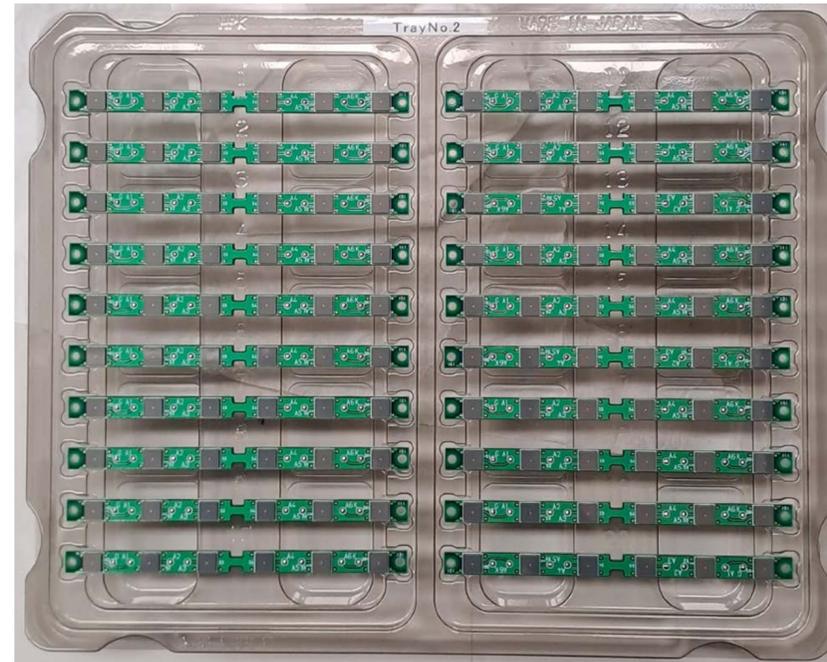
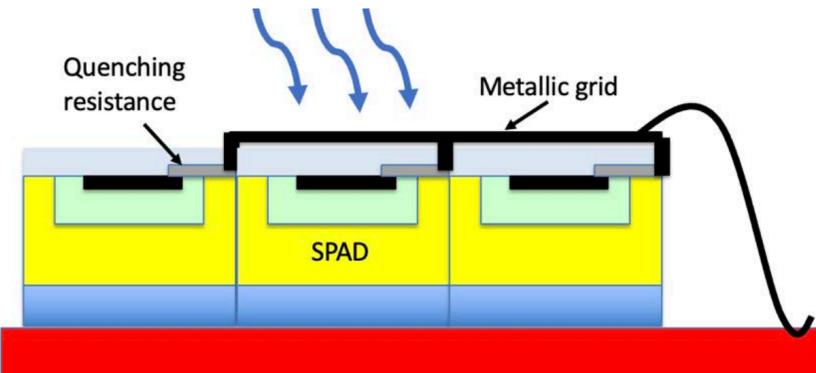


DUNE: UN GIGANTE AD ARGON LIQUIDO

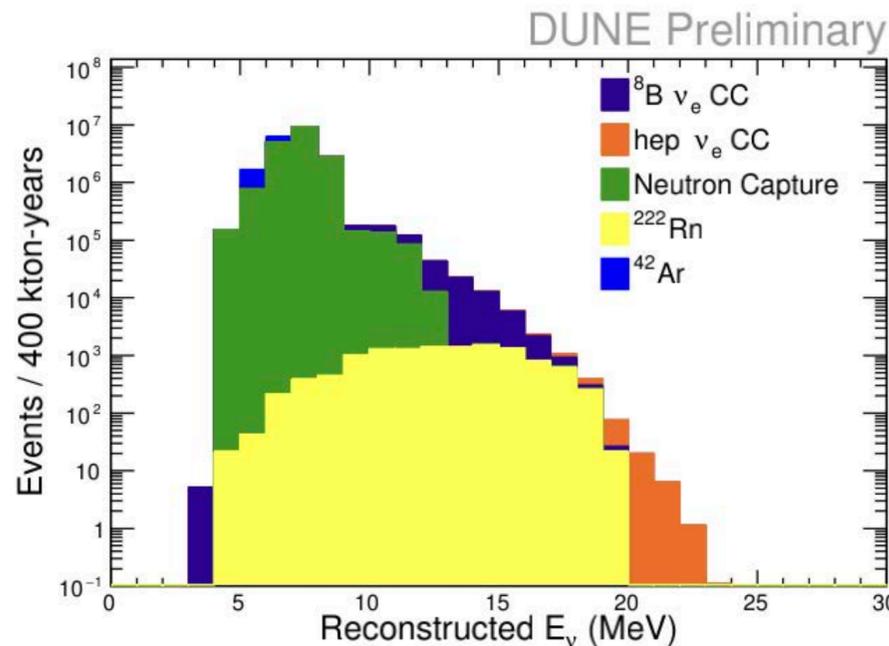
X info tesi: francesco.terranova@unimib.it

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

Silicon-Photomultiplier (SiPM)

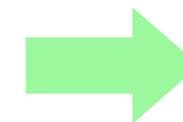


Neutrini solari in DUNE!



Opportunità di tesi:

- Sviluppo e test del sistema di rivelazione della luce di scintillazione (PDS):
 - Caratterizzazione SiPM a temperature criogeniche
 - Analisi della risposta di luce in ProtoDUNE-VD @ 
 - Validazione della scheda di acquisizione DAPHNE in ProtoDUNE-VD @ 
- Simulazione per i neutrini solari



Previsto periodo di permanenza al CERN con fondi INFN o EU



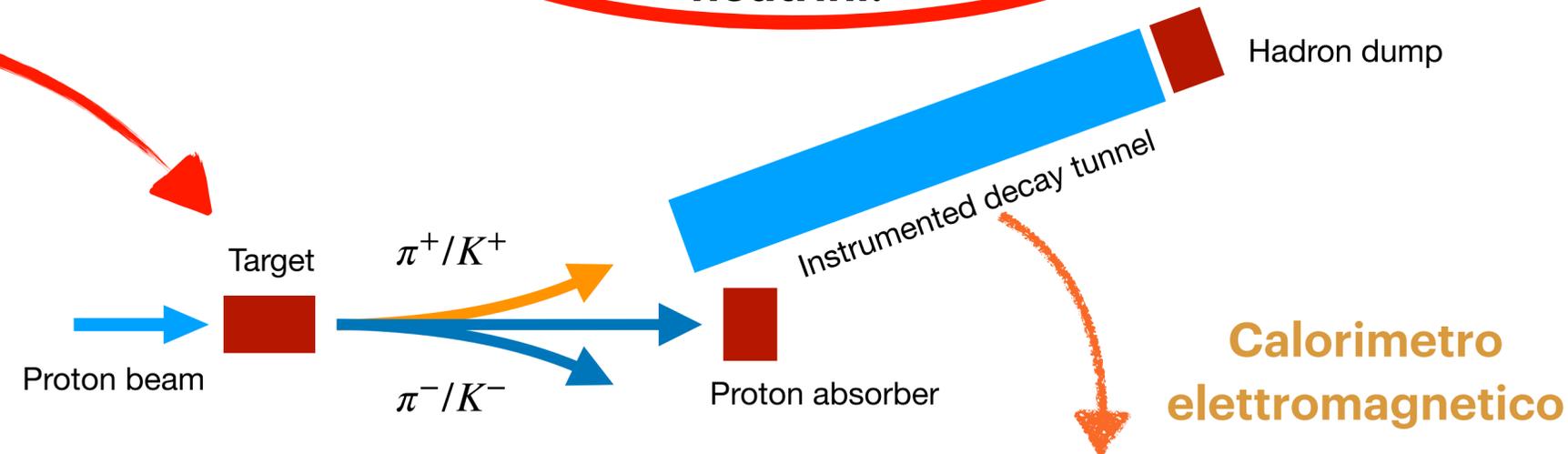
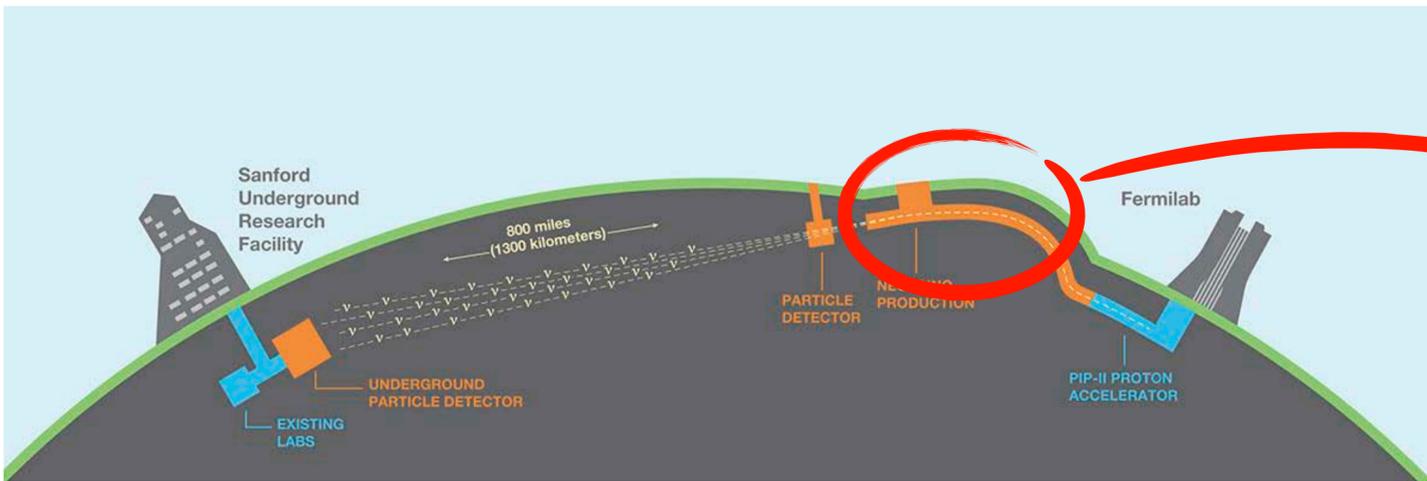
NPO6/ENUBET: COME CONTARE I NEUTRINI DA ACCELERATORE



D: come interagiscono con la materia?

La potenza è nulla senza precisione! Già siamo bravi, conosciamo il flusso di neutrini con una precisione di ~10%.
Ma se riuscissimo a fare meglio? Ad esempio arrivando a ~1%?

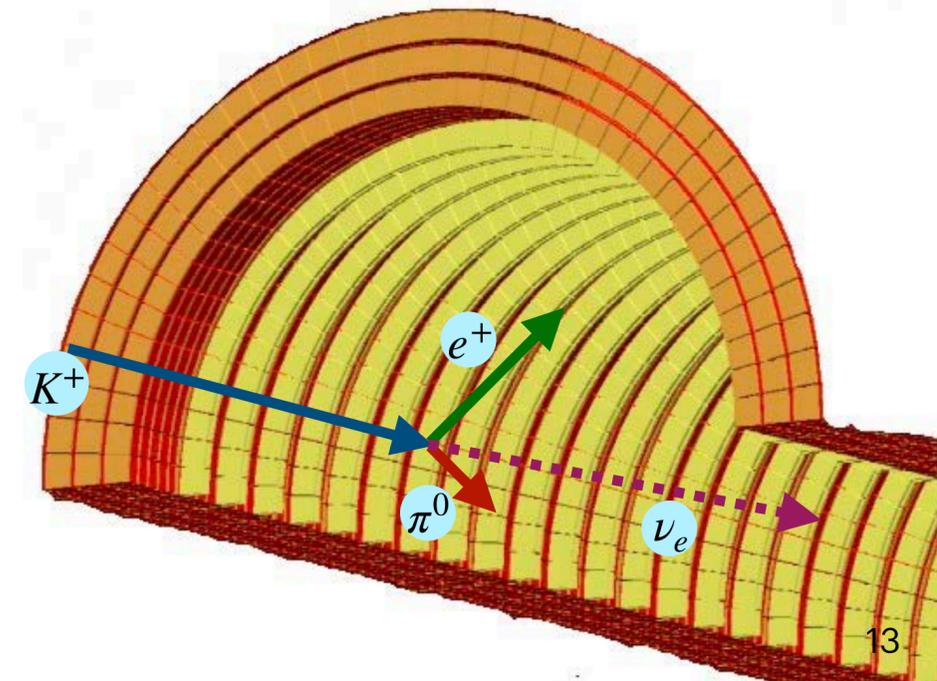
Equivale a raddoppiare l'intensità del fascio di neutrini!



Idea nata qui a MiB: **monitoring dei fasci**

- nei decadimenti in cui viene prodotto il neutrino ha origine anche un leptone
- se conto quanti leptoni produco conosco il numero di neutrini nel fascio!

Da un'idea MiB è nata una collaborazione internazionale che ha dato luogo a un progetto CERN





NPO6/ENUBET: COME CONTARE I NEUTRINI DA ACCELERATORE



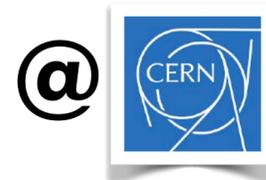
X info tesi: francesco.terranova@unimib.it

Referenti: F. Terranova, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, A. Falcone, D. Guffanti, L. Meazza, A. Scanu, M. Torti



Opportunità di tesi:

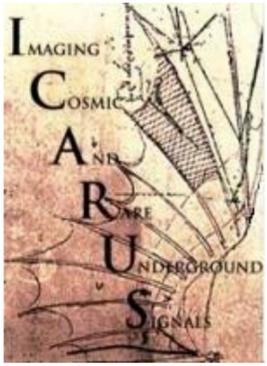
- Valutazione delle prestazioni del dimostratore mediante l'analisi dei dati raccolti nel 2024 durante il testbeam al CERN
- Stima delle coincidenze accidentali in un tagged neutrino beam
- Trasformazione del beam dump in un range-meter strumentato
- Test del prototipo del beam dump strumentato al CERN nel 2025 @ 
- Identificazione dei muoni in ENUBET alla European Spallation Source (Svezia)



Previsto periodo di permanenza al CERN con fondi INFN o EU

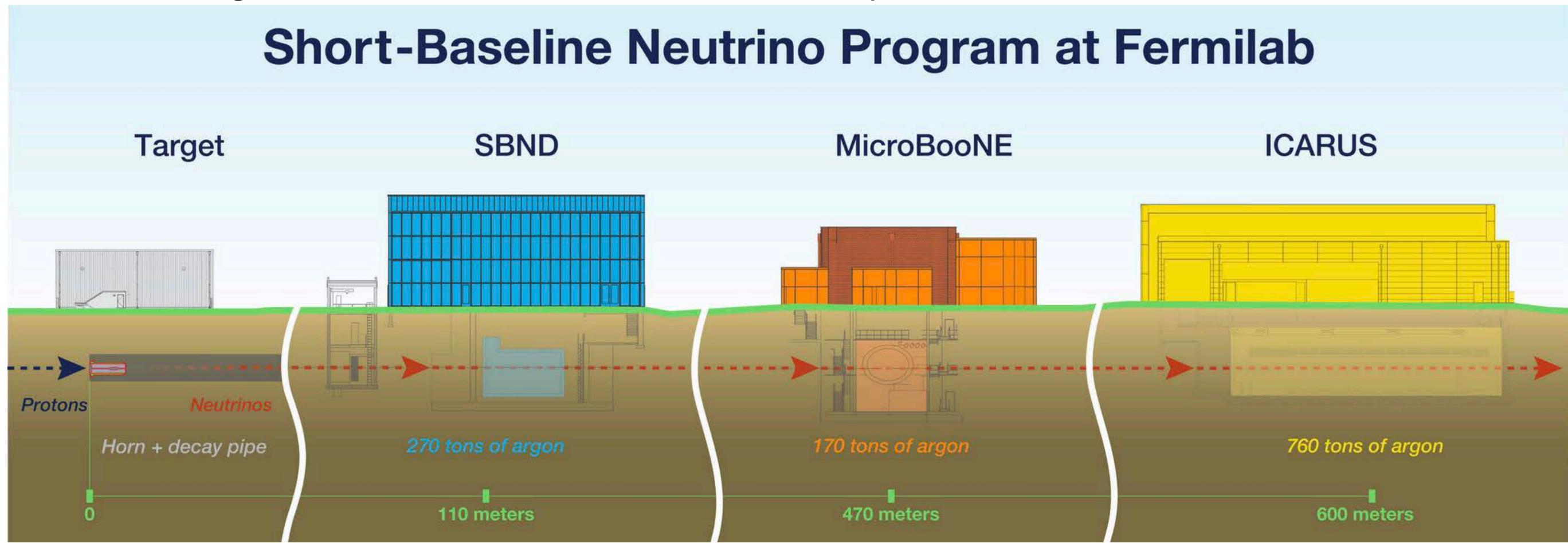


ICARUS: LA PRIMA 'KILOTON-SCALE' TPC BASATA SU ARGON LIQUIDO



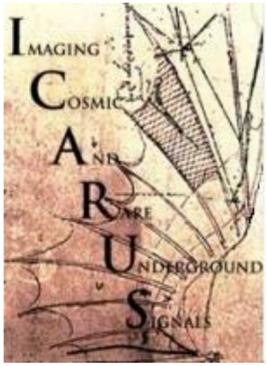
D: esiste un neutrino pesante?

- 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





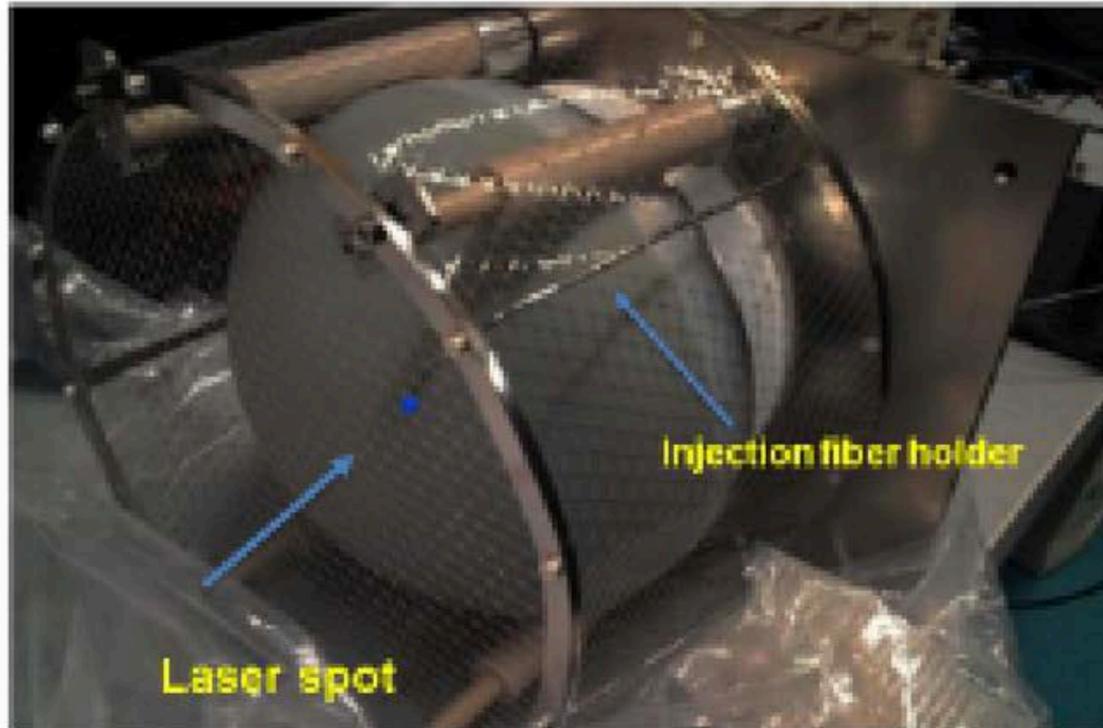
ICARUS: LA PRIMA 'KILOTON-SCALE' TPC BASATA SU ARGON LIQUIDO



Referenti:

M. Bonesini, R. Benocci, A. Falcone, M. Torti

X info tesi: maurizio.bonesini@mib.infn.it



Opportunità di tesi:

- Sviluppo e upgrade delle 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 nelle campagne di calibrazione
- Sviluppo di un toy Monte Carlo per lo studio del fascio di neutrini



JUNO: IL PIÙ GRANDE OSSERVATORIO SOTTERRANEO DI NEUTRINI



D: qual è il più leggero?

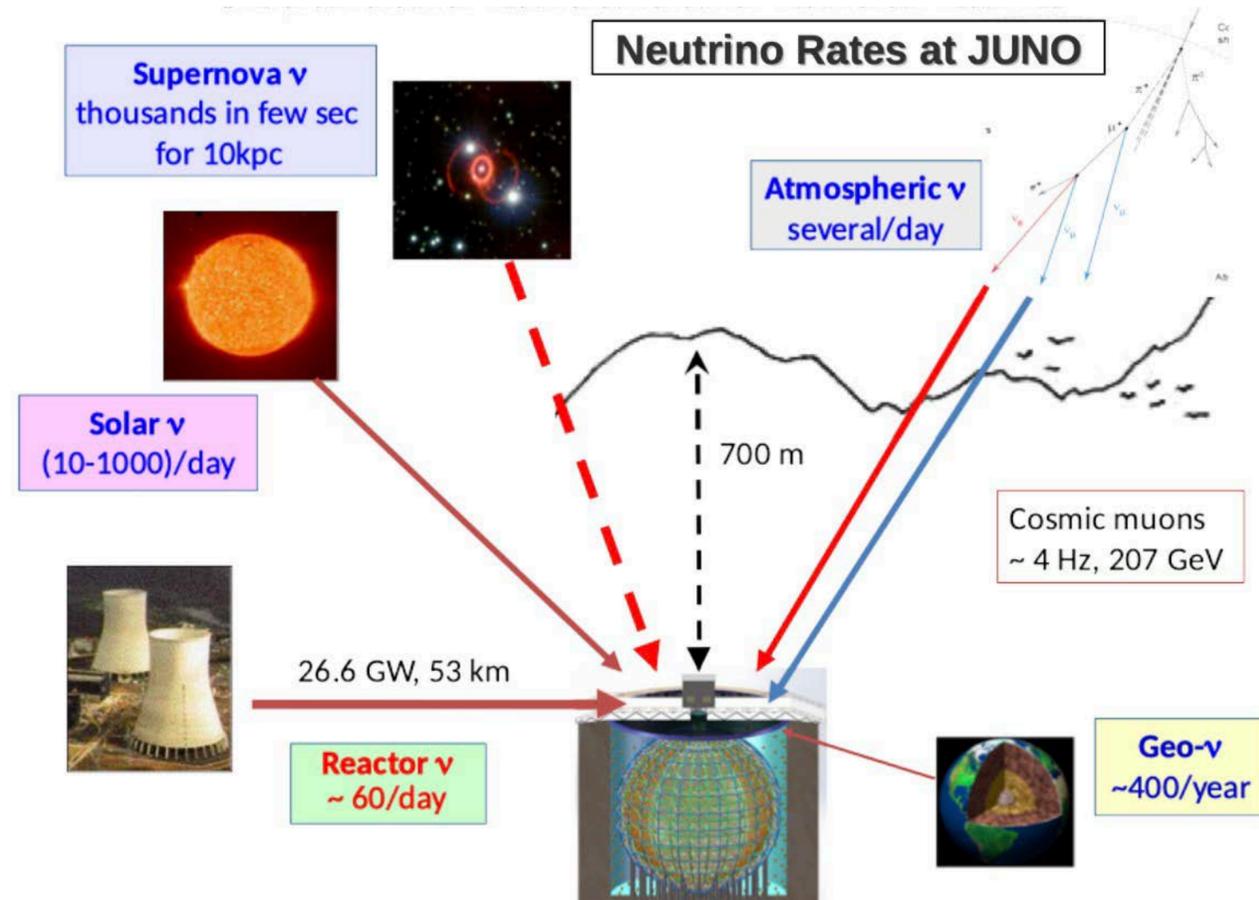
- JUNO: Jiangmen Underground Neutrino Observatory a 700 m di profondità
- 20 kton di scintillatore liquido (LAB)
- Luce di scintillazione letta tramite fotomoltiplicatori (PMT)
- Due complessi di reattori a ~50 km

Obiettivo scientifico primario:

determinazione dell'ordinamento delle masse dei neutrini e misura parametri oscillazione sfruttando le oscillazioni degli anti-neutrini da reattori nucleari

Ma non solo!:

Neutrini solari, atmosferici, geoneutrini e neutrini da supernova



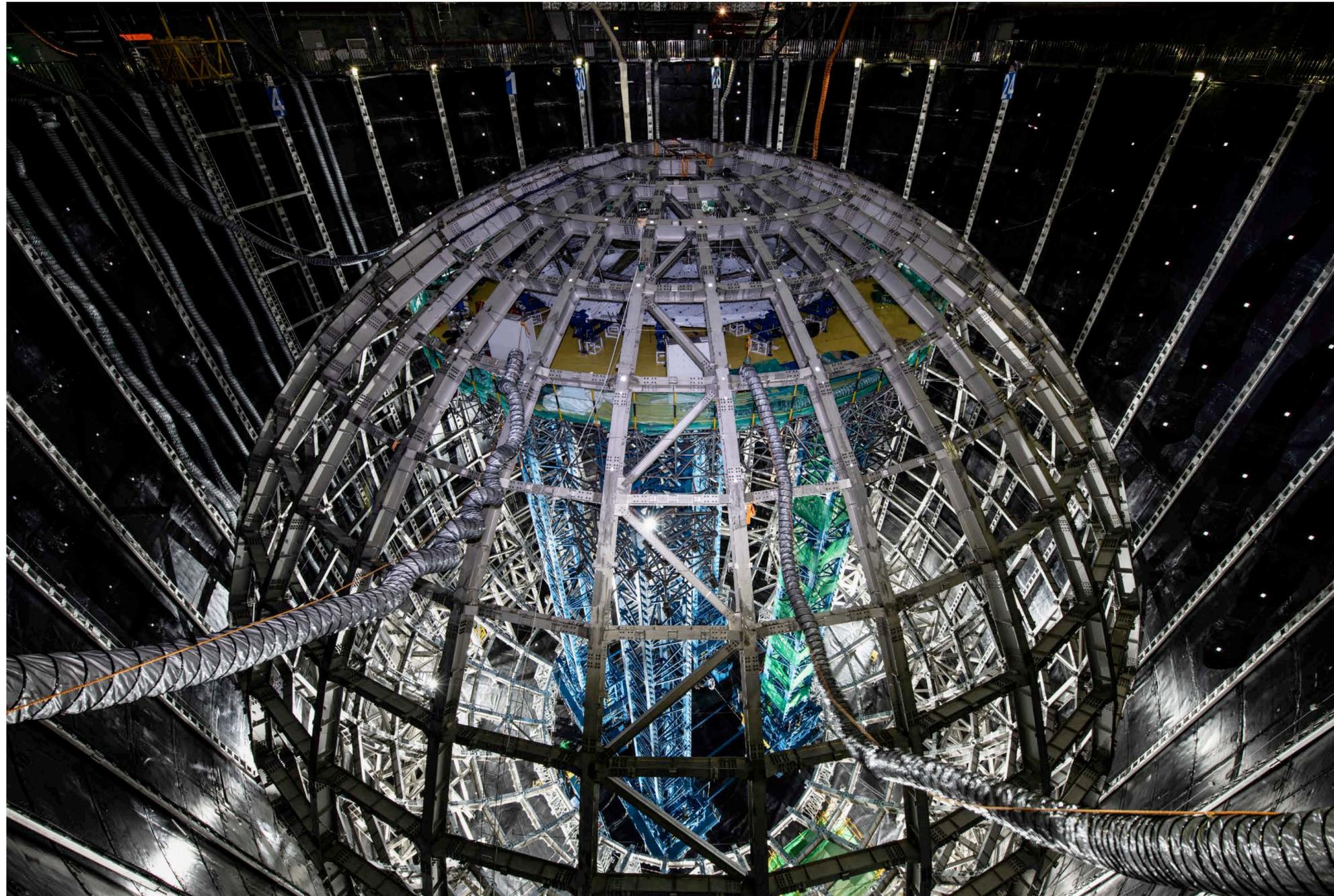


JUNO: IL PIÙ GRANDE OSSERVATORIO SOTTERRANEO DI NEUTRINI



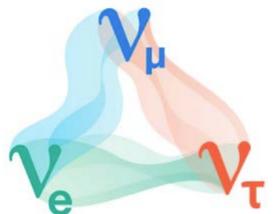
Referenti: M. Sisti, D. Chiesa, M. Nastasi, E. Previtali

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



Opportunità di tesi:

- Analisi dei primi dati acquisiti durante la fase di commissioning del rivelatore e determinazione delle sorgenti di contaminazioni dello scintillatore
- Costruzione del background model dell'esperimento
- Simulazione del flusso di neutrini da reattore e studio delle sistematiche



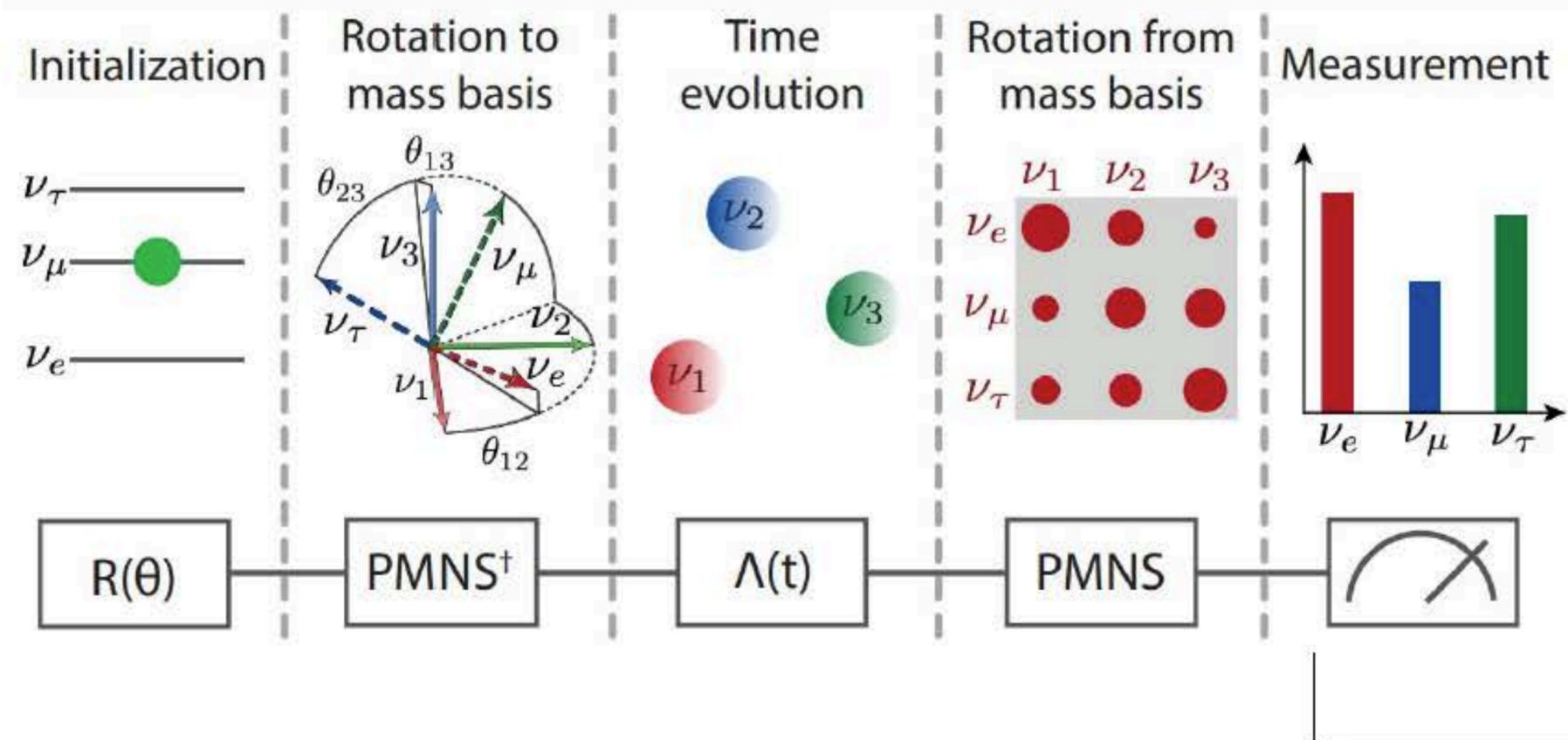
Neutrino oscillation simulation with a qutrit

Referenti: A. Giachero, D. Labranca, R. Moretti, A. Nucciotti



Slide from: A. Giachero

- Quantum Computing is an attractive platform for many Particle Physics applications;
- Neutrino flavor oscillations are regulated by the **PMNS** matrix, that can be represented with a Unitary Quantum Circuit;
- Straightforward **Neutrino flavor state representation** into a **Qutrit state**.
- How to encode time evolution? How to simulate the effects of matter?**
- Simulations on a real quantum backend provided by IBM.**



From qubits to qutrits

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

$$\begin{array}{c} \text{---} |2\rangle \\ \text{---} |1\rangle \\ \text{---} |0\rangle \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c} \text{---} |2\rangle \\ \text{---} |1\rangle \\ \text{---} |0\rangle \end{array}$$

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad |\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle$$

Thesis activity in Collaboration with:



More details on thesis activities on quantum computing are available at <https://qismib.github.io>

Grazie dell'attenzione.

Enjoy Neutrinos!

