

Le oscillazioni dei neutrini

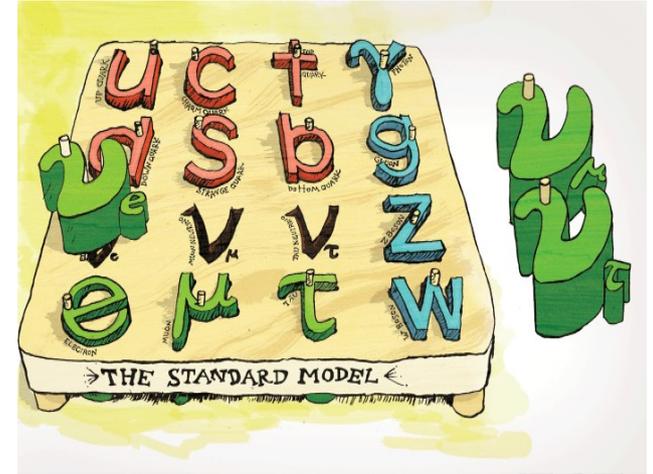
Marta Torti

INFN Milano Bicocca



Cos'è il neutrino?

- Ipotizzato nel 1930 da Pauli per spiegare lo spettro continuo dei decadimenti β .
- Rivelato da Cowan and Reins nel 1956.
- Nel **Modello Standard** sono previsti tre sapori: ν_e, ν_μ, ν_τ
→ massa nulla.
- Particella neutra → studiarla tramite i suoi prodotti di interazione
- Piccolissima sezione d'urto → rivelatori di grandi dimensioni

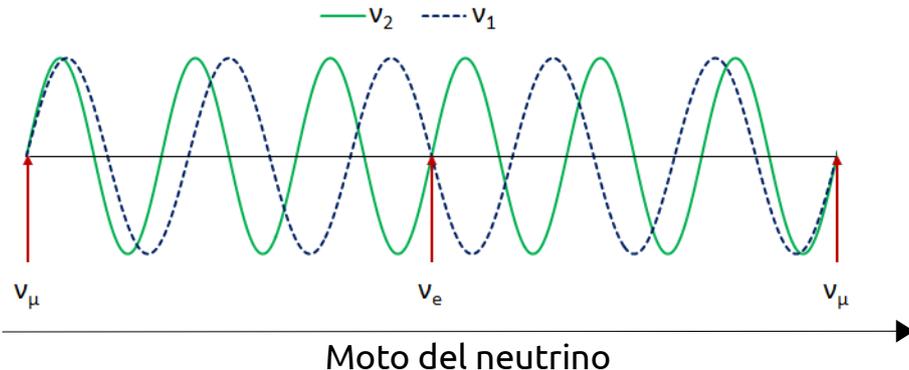


- Possono essere studiati mediante diverse **sorgenti**:
 - **Naturali**: Sole, Terra, Supernova, raggi cosmici, eventi astrofisici;
 - **Artificiali**: acceleratori, reattori, sorgenti radioattive

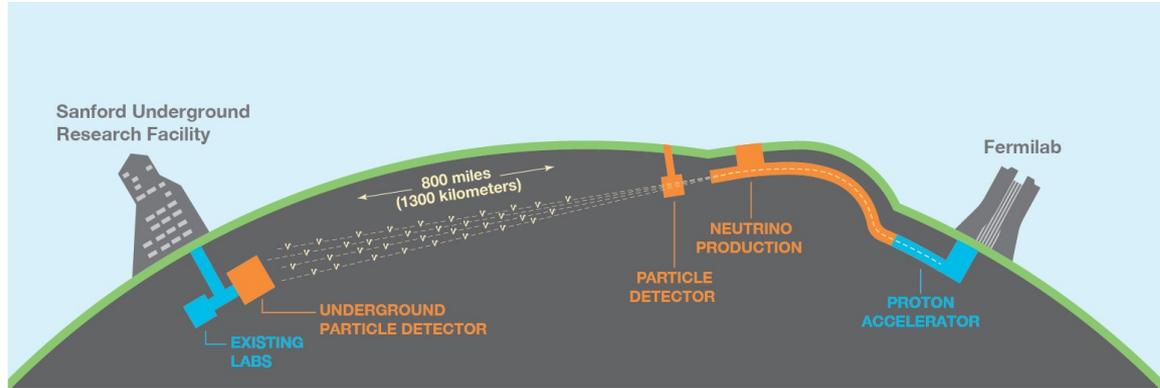
Il fenomeno delle oscillazioni

- Problema dei neutrini solari: il flusso dei neutrini solari ipotizzato non corrisponde a quello rivelato!
- Pontecorvo ipotizza il **fenomeno delle oscillazioni**: durante il loro viaggio, il sapore dei neutrini cambia
 - la massa deve essere diversa da zero,
 - fuori dal Modello Standard!

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



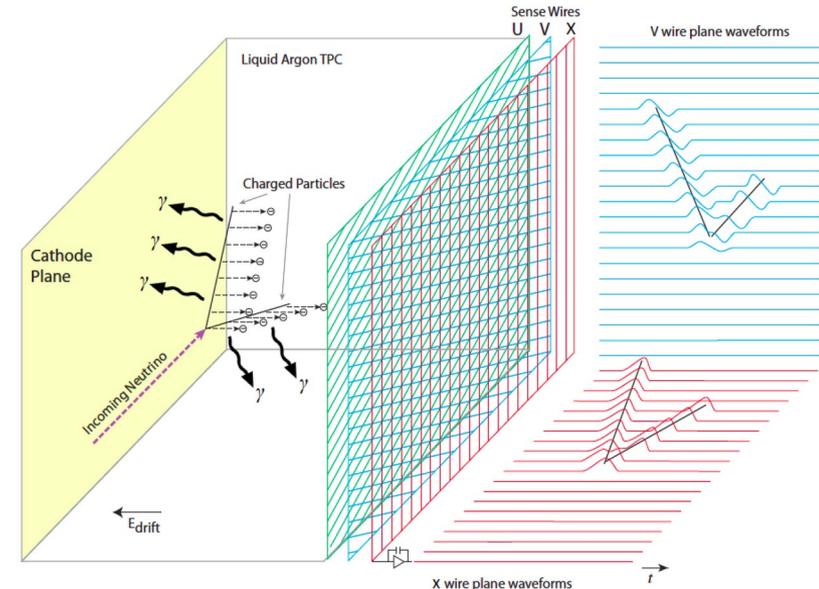
Neutrini da acceleratore: DUNE



Referenti: 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.

Per informazioni tesi:
francesco.terranova@unimib.it

- **Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)**, è un esperimento in costruzione negli USA.
- Userà un fascio di ν_μ per misurare con precisione i parametri di oscillazione.
- 3(4) **LArTPC** da 17 kton ($12 \times 14 \times 60 \text{ m}^3$):
 - misura della carica prodotta da particelle ionizzanti,
 - luce di scintillazione per il tempo zero dell'evento.
- Prototipo di due moduli (fra poco) in funzione al CERN per testare le nuove tecnologie appositamente sviluppate.



Attività a Bicocca:

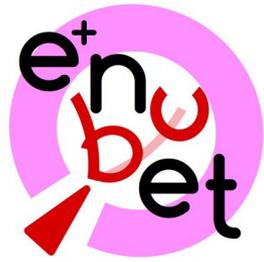
- Sviluppo e test del sistema di rivelazione della luce di scintillazione (PDS):
 - Caratterizzazione SiPM a temperature criogeniche.
 - Analisi della risposta di luce del rivelatore X-ARAPUCA.
 - Ganging attivo per il PDS .
 - Scheda di acquisizione DAPHNE .
- Simulazione per i neutrini solari.
- Sviluppo algoritmo per calorimetria combinata carica e luce.

Referenti: 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.

Per informazioni tesi:
francesco.terranova@unimib.it



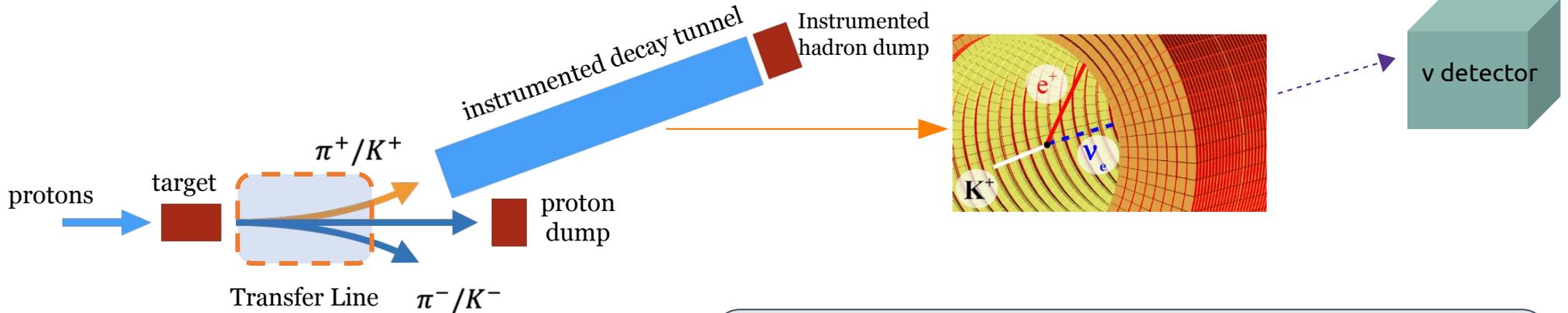
Neutrini da acceleratore: ENUBET



- Monitorare un fascio di neutrini permette di ridurre errore sistematico sulle misure di sezione d'urto.
- **Enhanced NeUtrino BEams from kaon Tagging (ENUBET)** propone il primo fascio taggato di neutrini:

misurare il rate di leptoni \rightarrow misurare il flusso di ν .

- Instrumentare il tunnel di decadimento e l'hadron dump per contare i leptoni prodotti dal decadimento di π e K.



Referenti: 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.
Per informazioni tesi: francesco.terranova@unimib.it

Neutrini da acceleratore: ENUBET



Attività a Bicocca:

- Valutazione delle performance del dimostratore mediante l'analisi dei dati raccolti durante il testbeam al CERN.
- Stima delle coincidenze accidentali in un tagged neutrino beam.
- Trasformazione del beam dump in un range-meter strumentato.



Testbeam del dimostratore al CERN

Fascio e, μ , π

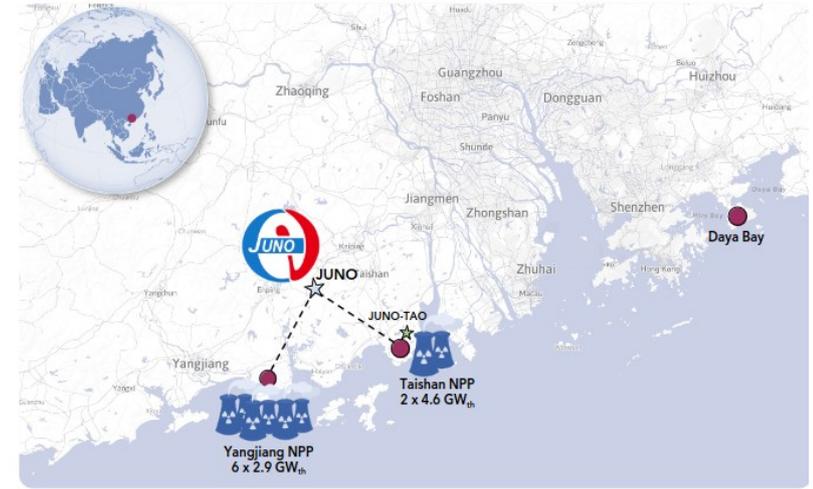
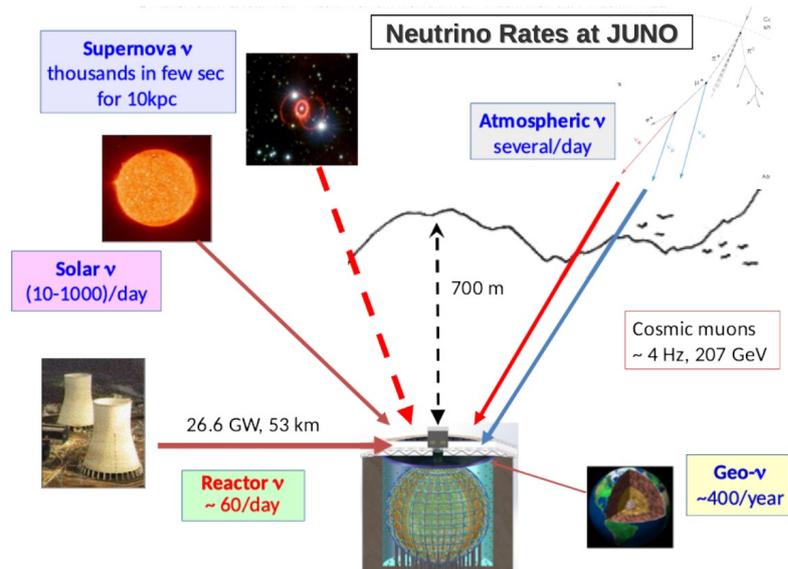
Referenti: F. Terranova, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, C. Cattadori, E. Cristaldo, M. Delgado, A. Falcone, C. Gotti, D. Guffanti, L. Meazza, A. Minotti, G. Pessina, M. Torti, E. Vallazza.

Per informazioni tesi:
francesco.terranova@unimib.it

Neutrini da reattore: JUNO



- Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) è un esperimento in costruzione in Cina.
- Due complessi di reattori a ~ 50 km, 700 m di profondità.
- 20 kton di scintillatore liquido (LAB), letto da 18k+25k PMT.
- Obiettivo primario: gerarchia delle masse, misura di precisione dei parametri di oscillazione.
- Importanti possibilità per neutrini solari, atmosferici, geo-neutrini e neutrini da Supernova.



Referenti: M. Sisti, D. Chiesa, M. Nastasi, E. Previtali
Per informazioni tesi: monica.sisti@mib.infn.it

Neutrini da reattore: JUNO



- Jiangmen **U**nderground **N**eutrino **O**bservatory (JUNO) è un esperimento in costruzione in Cina.
- Due complessi di reattori a ~ 50 km, 700 m di profondità.
- 20 kton di scintillatore liquido (LAB), letto da 18k+25k PMT.
- Obiettivo primario: gerarchia delle masse, misura di precisione dei parametri di oscillazione.
- Importanti possibilità per neutrini solari, atmosferici, geoneutrini e neutrini da Supernova.

Rigorosa selezione dei materiali, caratterizzazione e soppressione del fondo radioattivo.

Attività a Bicocca:

- Misure ultrasensibili di contaminanti radioattivi nei materiali del rivelatore.
- Studio al simulatore con metodo Monte Carlo dello spettro di neutrini emesso da un reattore nucleare di potenza.
- Modellizzazione del fondo radioattivo atteso in JUNO in vista dell'avvio della presa dati a fine 2024.



Referenti: M. Sisti, D. Chiesa, M. Nastasi, E. Previtali
Per informazioni tesi: monica.sisti@mib.infn.it

Neutrini sterili



- “LSND anomaly”: eccesso di ν_e in un fascio di ν_μ .
- Risultato non compatibile con il modello a tre neutrini.
- Possibile spiegazione mediante l’introduzione di un **quarto**.
- Che però interagisce **solo gravitazionalmente!**
→ rivelazione possibile solo tramite le oscillazioni!
- Non è ancora stata verificata la sua esistenza...
- o confutata la sua ipotesi!
- Se esiste...solo un neutrino sterile oppure più di uno?

Neutrini da acceleratore: ICARUS

- Imaging **C**osmic **A**nd **R**are **U**nderground **S**ignal (ICARUS) è stata la prima LArTPC di grandi dimensioni funzionante!
- Due moduli da 300 t ($3.6 \times 3.9 \times 19.6 \text{ m}^3$) ciascuno.
- Raccolse dati dal 2010 al 2014 ai LNGS, poi trasferita al FermiLab per prendere parte, come rivelatore lontano, all'esperimento SBN.
- **S**hort **B**aseline **N**eutrino program (SBN) ha lo scopo di ricercare l'eventuale neutrino sterile: 3 LAr TPC posizionate a distanze diverse lungo un fascio di ν_μ .
- ICARUS ha iniziato a raccogliere dati al FermiLab nel 2021.

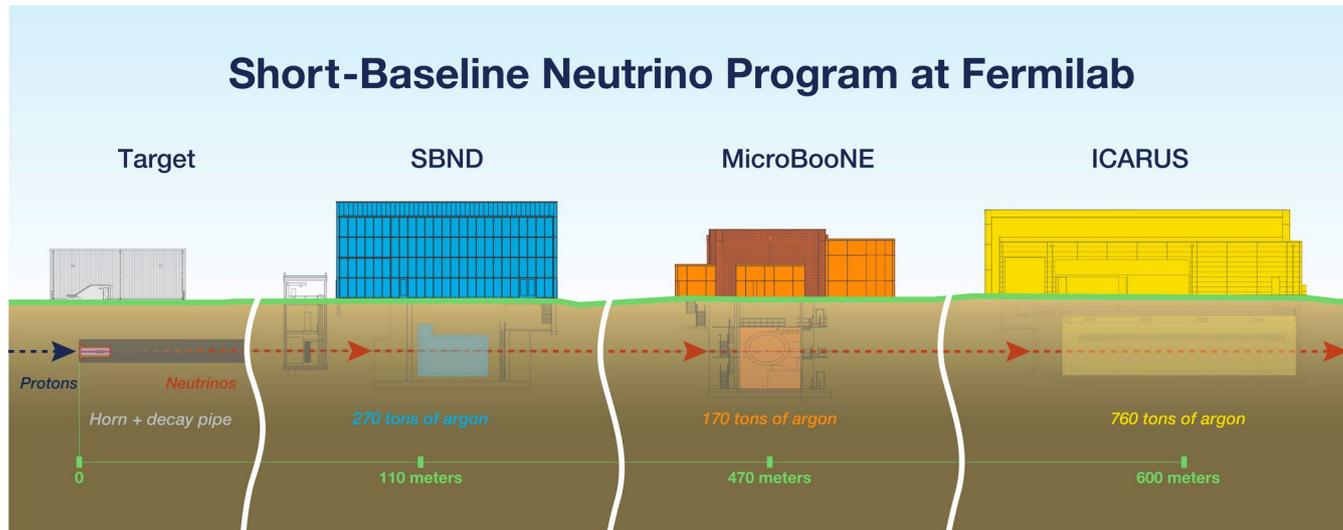
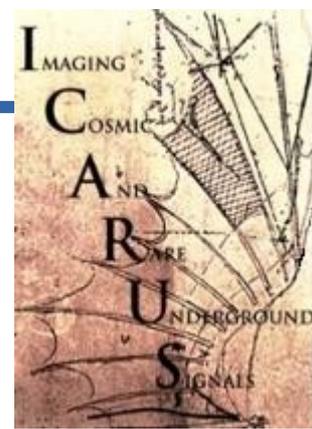


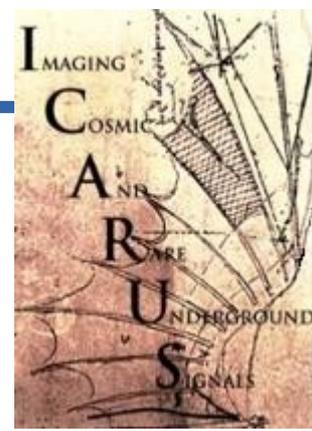
Image credits: Sandbox Studio for Symmetry Magazine

Referenti: M. Bonesini, R. Benocci, A. Falcone, M. Torti
Per informazioni tesi:
maurizio.bonesi@mib.infn.it

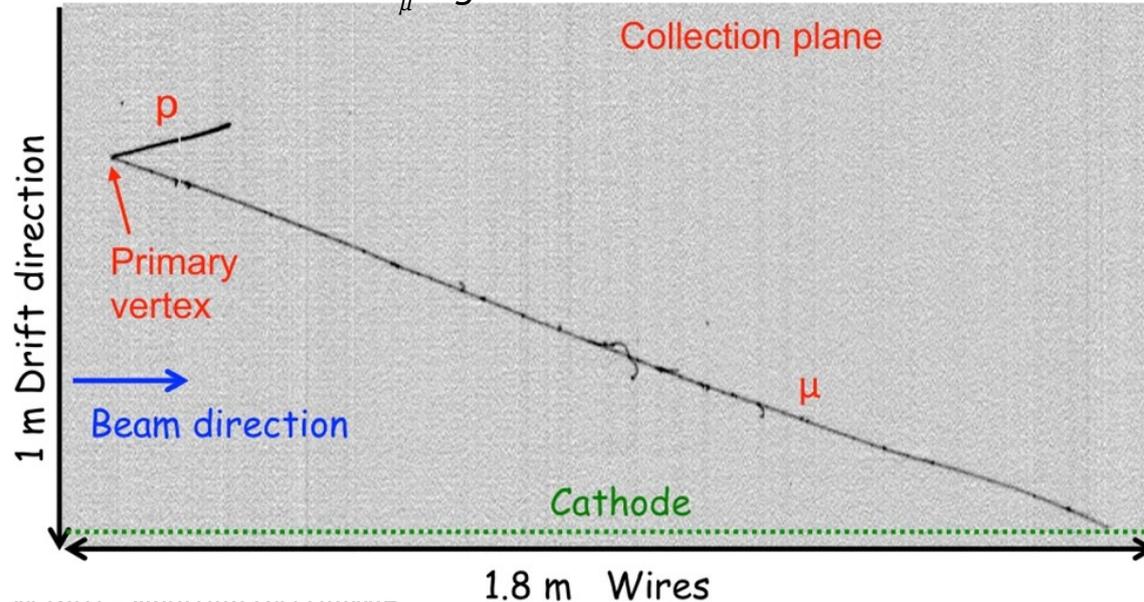
Neutrini da acceleratore: ICARUS

Attività a Bicocca:

- 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.



Primo candidato di ν_{μ} registrato da ICARUS al FermiLab



Sistema di calibrazione dei PMT



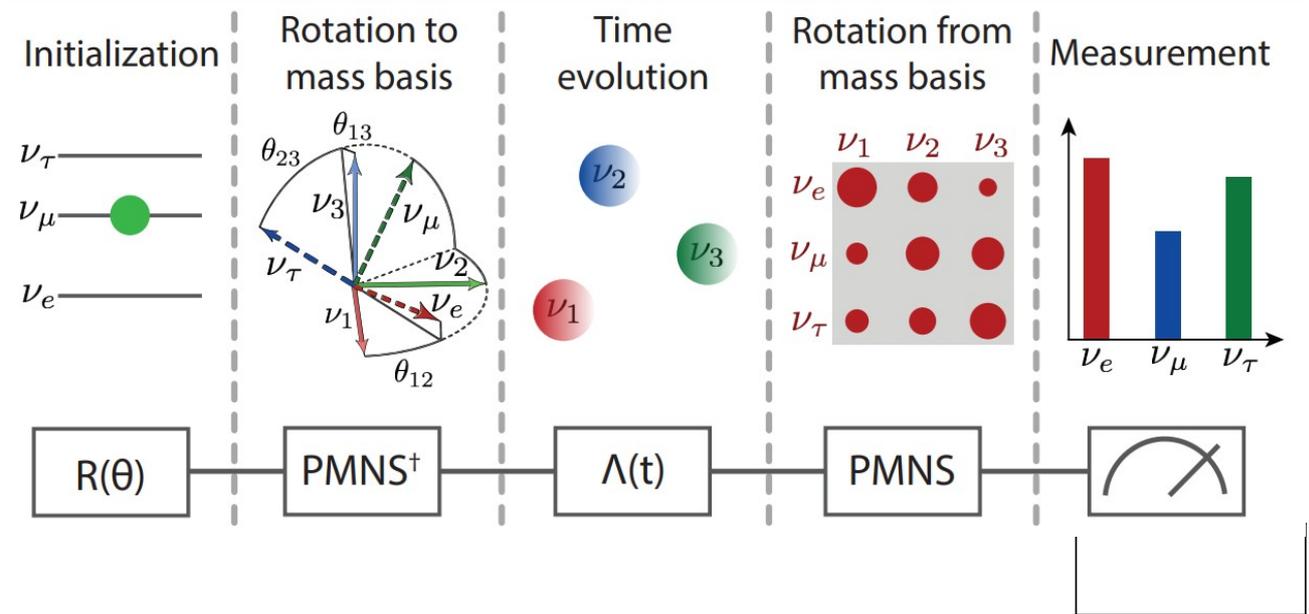
Neutrino oscillation simulation with a qutrit

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

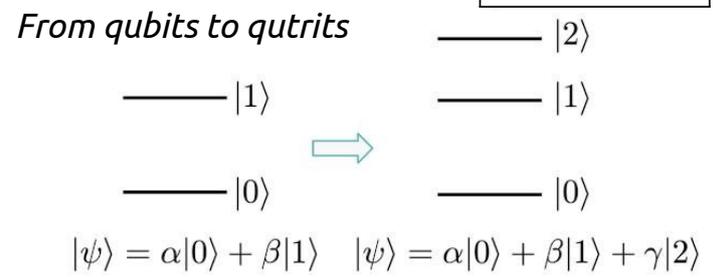


- Quantum Computing is an attractive platform for many Particle Physics applications;
- Neutrino flavor oscillations are regulated by the **PMNS** matrix, that can be represented with a Unitary Quantum Circuit;
- Straightforward **Neutrino flavor state representation** into a **Qutrit state**.
- How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

Slide from: A. Giachero



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



Thesis activity in Collaboration with:



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

Greek
symbol: ν

Family: lepton



Trillions of neutrinos
stream through your
hand every second



(but they're so antisocial,
only one might actually
interact with your body
in your whole lifetime).



Neutrinos rarely interact
and feel only two forces:

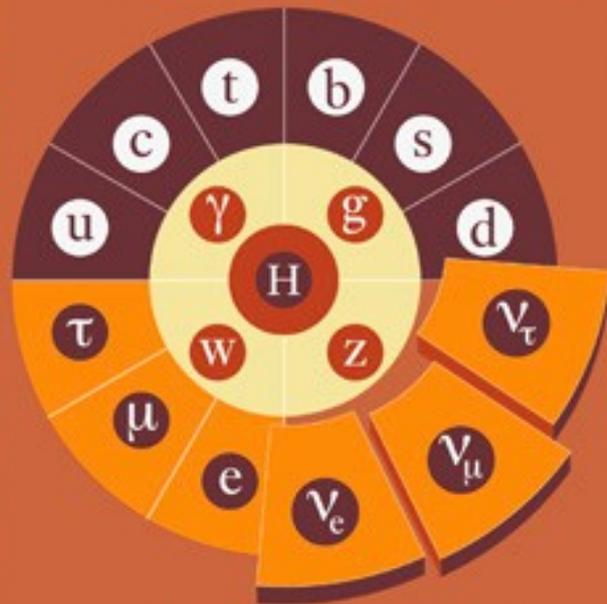
gravity

weak force



 **Antimatter version: antineutrino**
Neutrinos might be their own antiparticles!

The Intriguing Neutrino



MASS

UNKNOWN but incredibly small,
more than one million times
smaller than an electron

Spin
 $1/2$

Charge
 0

When a star explodes,
99% of the energy is
carried away by neutrinos



*~ Name means ~
"little neutral one"*



“Dear radioactive ones,
scrutinize and judge.”
– Wolfgang Pauli, in his letter proposing
the neutrino, a “desperate remedy”
he worried physicists could never detect



3 TYPES



1956



Discovered:
1962



2000

Neutrinos oscillate,
or change type, as they travel