

# Fisica del neutrino agli acceleratori

E' uno dei settori più vivaci della fisica delle particelle (Nobel Prize 2015, Breakthrough Prize 2016 etc.) grazie alla scoperta delle **oscillazioni dei neutrini**: i neutrini cambiano tipo di flavor a grandi distanze e questo permette di studiare la violazione della simmetria di CP nel settore leptonic, la **simmetria materia-antimateria** nell'universo e **l'origine delle masse laddove il meccanismo di Higgs non è più predittivo**: la frontiera del Modello Standard.

Il nostro dipartimento è impegnato in tre esperimenti:

**DUNE**: il più grande esperimento al mondo per la fisica delle oscillazioni. In costruzione (40000 tonnellate) negli Stati Uniti (Chicago e South Dakota) e in fase di prototipazione (400 tonnellate) con due rivelatori al CERN. Milano Bicocca ha la responsabilità di tutto il **sistema per la rivelazione dei fotoni** (Tech. Coord. F. Terranova; Engineer Coordinator: P. Carniti; Cold Electronics coord.: C. Gotti; Photon Trapping: C. Cattadori)

**NP06/ENUBET**: è una nuova tecnica per la misura di precisione dei flussi di neutrini proposta da Milano Bicocca nel 2015 e approvata dal CERN nel 2019 (Spokesperson: F. Terranova, Tech. Coord: V. Mascagna).

**ICARUS** al Fermilab: ricerca di neutrini sterili con la prima TPC ad argon liquido mai realizzata

# Perché questo settore è così popolare (dal 2012!)?

I neutrini agli acceleratori sono ben conosciuti in flavor, energia e flusso ma...



sono quasi tutti  $\nu_\mu$  e con energie di qualche GeV. Poco "flessibili" ...

Le oscillazioni di neutrino si vedono a queste energie per distanze dell'ordine di 10-1000 km?



OK!

Si vedono almeno le oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  Scoperto nel 2004 in Giappone e confermato definitivamente nel 2011 in Italia. In gergo " $\theta_{23}$  grande".

Si possono vedere l'interferenza di tutte le funzioni d'onda dei neutrino (3 family)?



OK!!

Si! Scoperto nel 2003-2005 in Canada e Giappone. In gergo " $\Delta m_{12}$  grande"

Si possono vedere le oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  nei fasci di neutrino?



OK!!!

Si! Scoperto nel 2012 (breakthrough price). In gergo " $\theta_{13}$  grande".

**E' da vent'anni che lo stavamo aspettando(\*)!** Queste tre condizioni dimostrano che: un esperimento sufficientemente potente basato su un fascio di neutrini è in grado di ricostruire tutti i termini della lagrangiana del modello standard che riguardano i neutrino.. tranne la massa assoluta: v il prossimo talk.

(\*) Se vi piace l'archeologia, leggete cosa scrivevamo poco prima del 2012 ☺

R. Battiston, M. Mezzetto, P. Migliozzi, F. Terranova, Riv. Nuovo Cim. 33, 313-343 (2010)

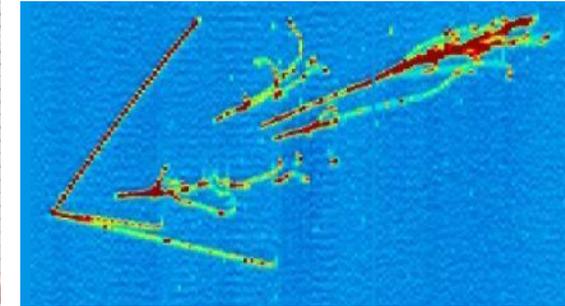
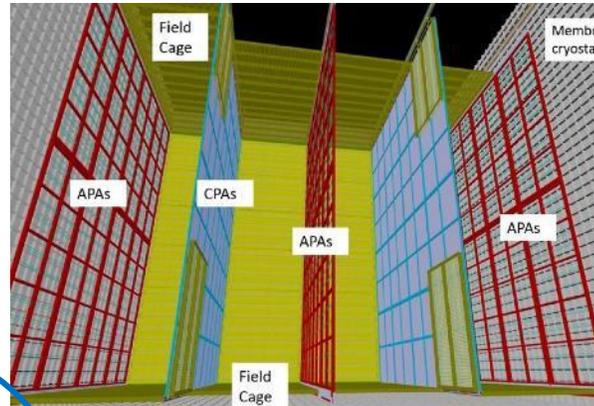
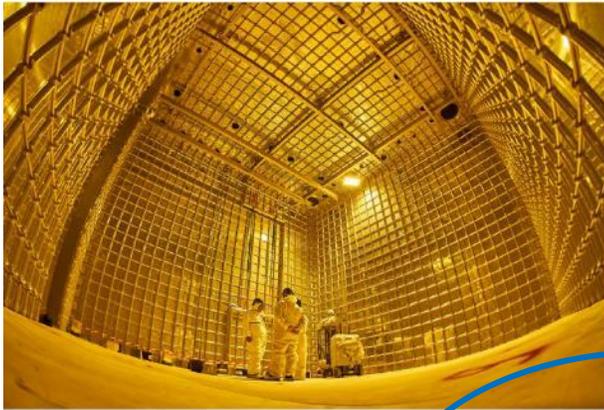
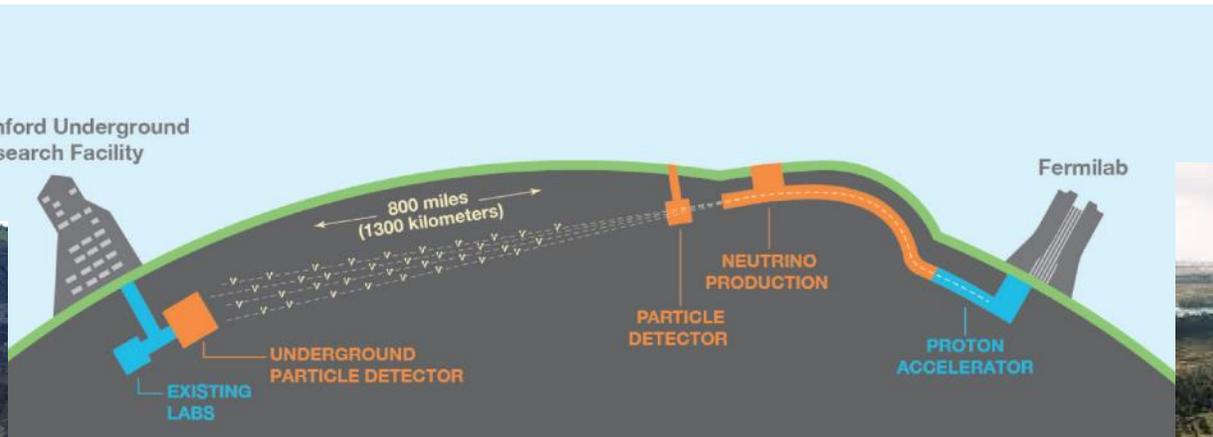
M. Bonesini	ICARUS- DUNE	INFN Milano-Bicocca
A. Branca	ENUBET-DUNE	INFN Milano-Bicocca
C. Brizzolari	ENUBET – DUNE	Unimib
G. Brunetti	ENUBET – DUNE	Unimib
P. Carniti	DUNE	Unimib
C. Cattadori	DUNE	INFN Milano-Bicocca
E. Cristaldo	DUNE	INFN Milano-Bicocca
M. Delgado	DUNE	Unimib
A. Falcone	DUNE – ICARUS	Unimib
C. Gotti	DUNE	INFN Milano Bicocca
D. Guffanti	DUNE	Unimib
L. Meazza	ENUBET-DUNE	Unimib
A. Minotti	DUNE	Unimib
E. Parozzi	ENUBET-DUNE	Unimib/CERN
G. Pessina	DUNE	INFN Milano Bicocca
E. Lutsenko	ENUBET - DUNE	Unimib
F. Terranova (*)	DUNE –ENUBET	Unimib
M. Torti	DUNE – ICARUS	Unimib

## Gruppo e laboratori coinvolti

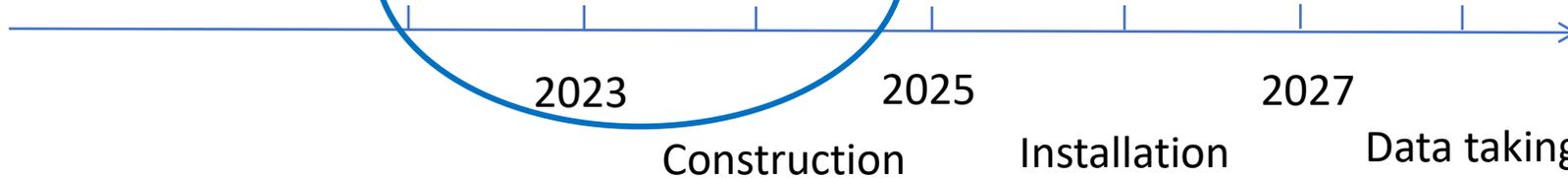


(\*) per informazioni sulle proposte di tesi:  
[francesco.terranova@unimib.it](mailto:francesco.terranova@unimib.it)

# DUNE



**Protodune-SP**  
**Protodune-VD**



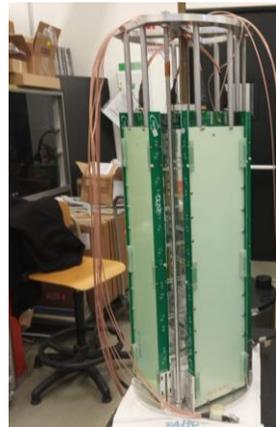
**Le nostre proposte di tesi riguardano soprattutto questa fase (CERN)**

# Cosa facciamo (e cosa vogliamo che facciate in tesi 😊 )

Siamo responsabili della realizzazione del **Photon Detection System** di DUNE

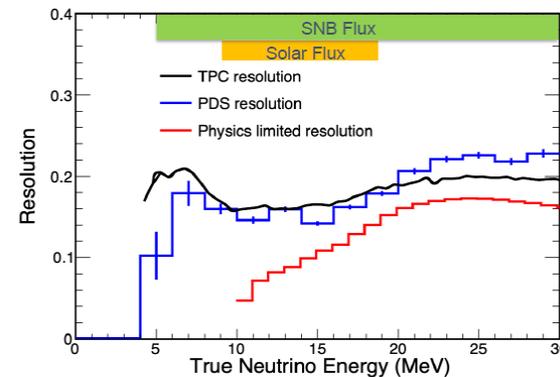
Sviluppo di rivelatori:

- Sistemi di intrappolamento di fotoni nel VUV (Unimib-Brasile)
- Fotosensori criogenici (Unimib-Spagna)
- Installazione e validazione a ProtoDUNE-SP (CERN)



Analisi dati, simulazione, studi di fisica astroparticellare:

- Analisi dei dati di ProtoDUNE-SP (CERN)
- Sviluppo di algoritmi per double-calorimetry in DUNE
- Osservazione di neutrino solari e da supernove
- Neutrinoless double beta decay in DUNE



# Che competenze potete acquisire?

## Sviluppo di rivelatori:

- Sistemi di intrappolamento di fotoni nel VUV (Unimib-Brasile)
- Fotosensori criogenici (Unimib-Spagna)
- Installazione e validazione a ProtoDUNE-SP (CERN)

## Analisi dati, simulazione, studi di fisica astroparticellare:

- Analisi dei dati di ProtoDUNE-SP (CERN)
- Sviluppo di algoritmi per double-calorimetry in DUNE
- Osservazione di neutrino solari e da supernove (Manchester)
- Neutrinoless double beta decay in DUNE

## Ricerca:

Sviluppo di rivelatori  
Criogenia  
Fasci di particelle

## Industria:

Fotonica  
Elettronica analogica  
Criogenia e vuoto  
Dispositivi a semiconduttore



## Ricerca:

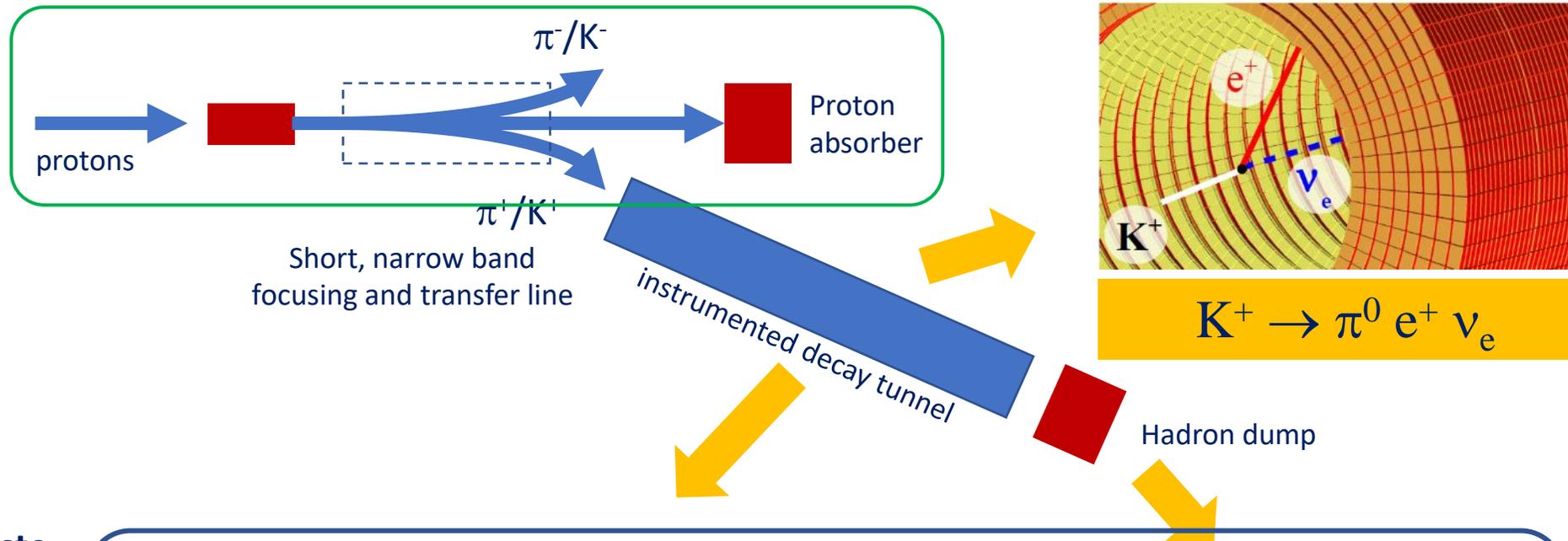
Analisi dei dati  
Computing  
Fisica astroparticellare  
Radioattività

## Industria:

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



# Monitored neutrino beams (NP06/ENUBET) (\*)



Le nostre proposte di tesi riguardano soprattutto questi nuovi sviluppi (CERN, Unimib)

**NEW! (2019-20)** muon identification and monitoring for  $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

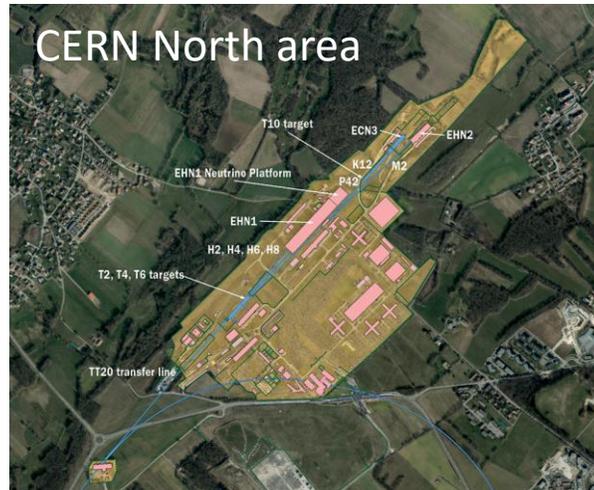
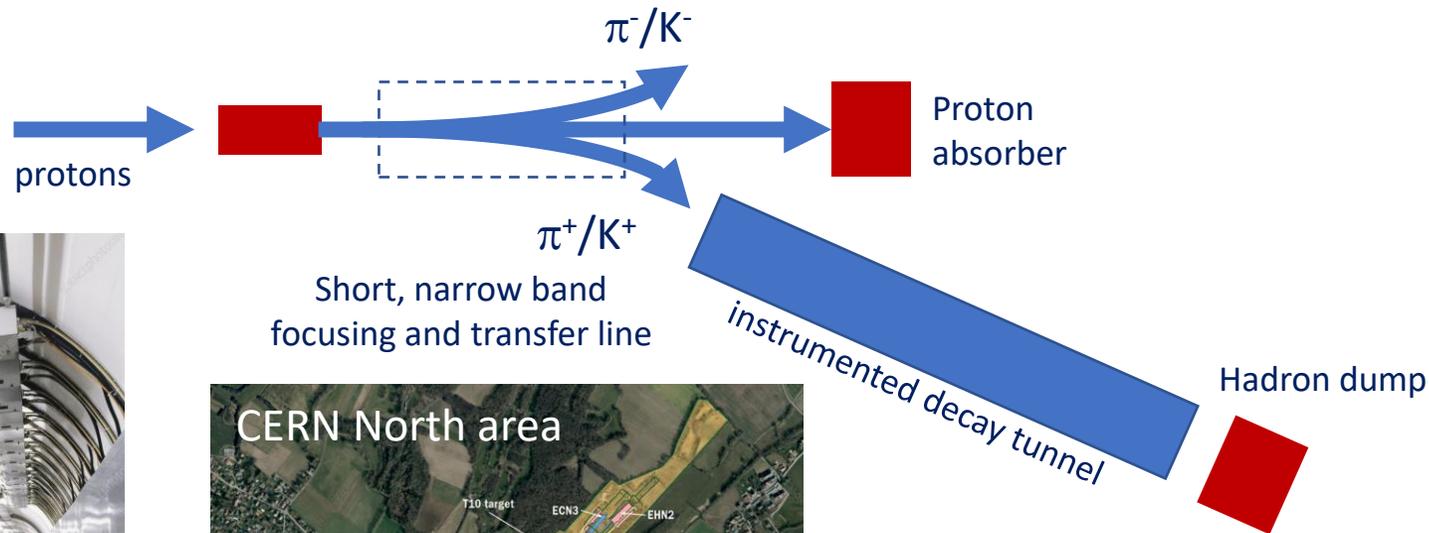
**NEW! (2019-20)** muon monitoring at single particle level replacing the hadron dump with a real range-meter  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

ENUBET will be the first “**monitored neutrino beam**” where nearly all systematics are bypassed monitoring the leptons in the decay tunnel at single particle level

(\*) A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova, EPJ C75 (2015) 155

# Un anno davvero speciale

Per la prima volta abbiamo dimostrato in modo rigoroso che ENUBET puo' misurare le sezioni d'urto con precisione dell'1% e, dunque, ci avviamo a scrivere la proposta di esperimento per **realizzare il fascio di neutrino al CERN usando come rivelatore ProtoDUNE!**



...neutrini...



# Proposte di tesi su ENUBET

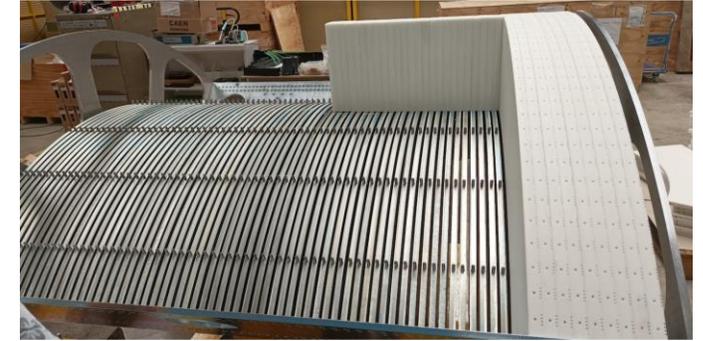
Il **Dimostratore**: una frazione del tunnel instrumentato di ENUBET

Test al fascio di pioni del CERN nell'ottobre 2022

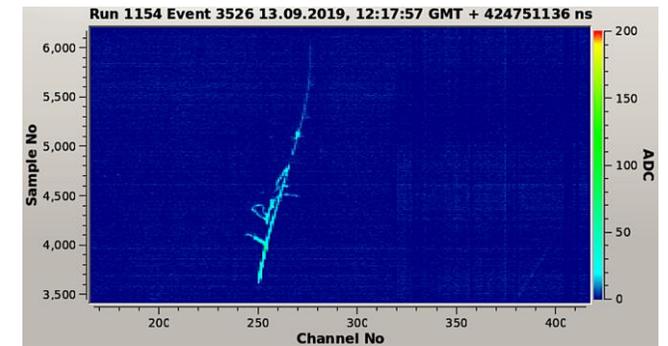
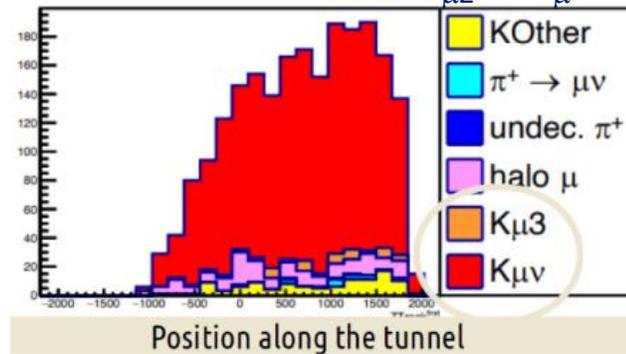
Test con l'elettronica custom nel 2023  
[Run e analisi dei dati]

L'utilizzo di **ProtoDUNE-SP** come rivelatore di neutrini per ENUBET  
[Simulazione e analisi dei dati di protoDUNE con i raggi cosmici]

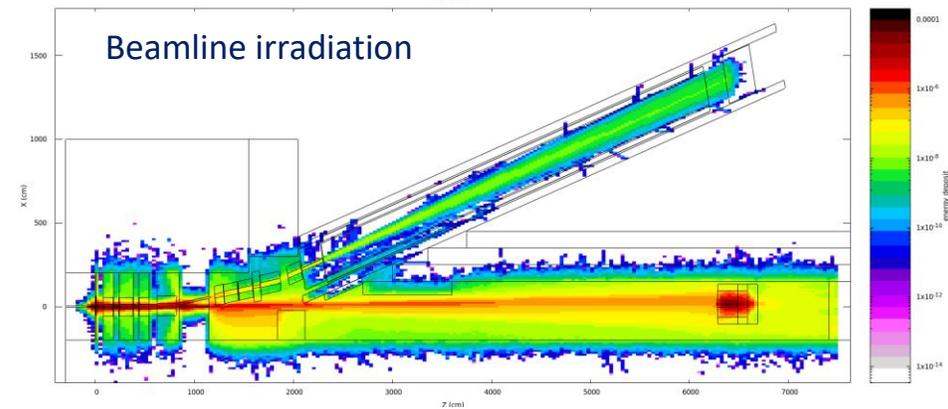
**NEW!** L'implementazione della beamline di **ENUBET al CERN**  
[tesi di fisica degli acceleratori da svolgersi interamente al CERN («CERN Technical Student»)]



Muons from  $K_{\mu 2} (\sim \nu_{\mu})$



A cosmic ray muon in ProtoDUNE-SP



# Che competenze potete acquisire?

Il dimostratore di ENUBET:

- Testbeam 2022 o 2023
- Analisi dei dati
- Assessment delle performance

ProtoDUNE-SP per l'esperimento ENUBET

L'implementazione della beamline di **ENUBET al CERN**

**Ricerca:**

Sviluppo di rivelatori  
Fotosensori a  
semiconduttore  
Tecniche di analisi

v. prima

**Ricerca:**

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

**Industria:**

Acceleratori per la medicina  
Radioprotezione  
Elettronica di Potenza



## Il “nonno” di DUNE

La tecnologia che sta alla base di DUNE (“Liquid Argon TPC”) è stata inventata da C. Rubbia nel 1977 e sviluppata in Italia. Per esempio, il nostro Dipartimento è stato il primo gruppo ad osservare neutrini in una LArTPC (M. Bonesini, N. Redaelli, S. Ragazzi, T. Tabarelli, F. Terranova (\*) ). Questa tecnologia è stata portata a maturità negli anni 2000 dalla Collaborazione ICARUS.



ICARUS al gran sasso (2006-2013)



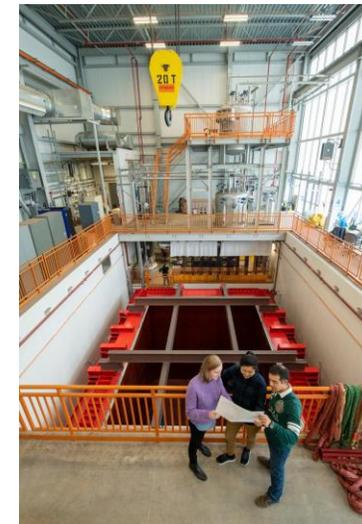
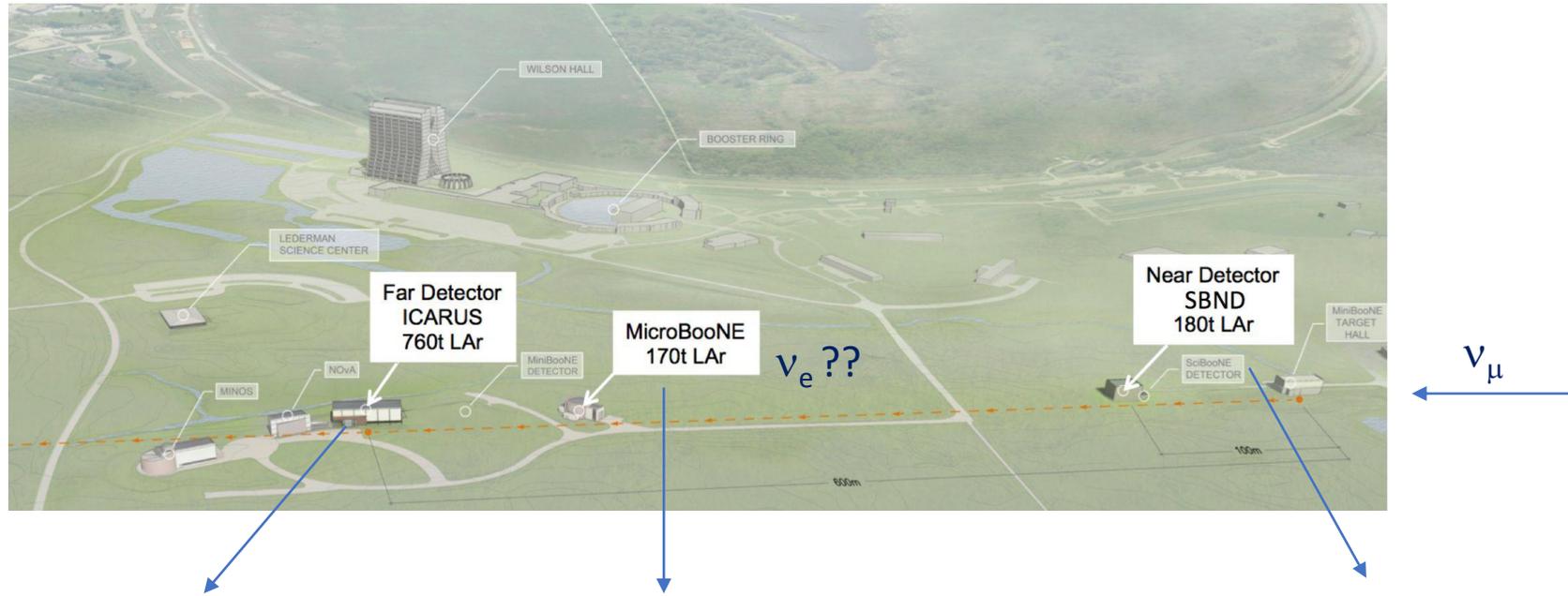
ICARUS al CERN per l'upgrade del detector (2018-2020)



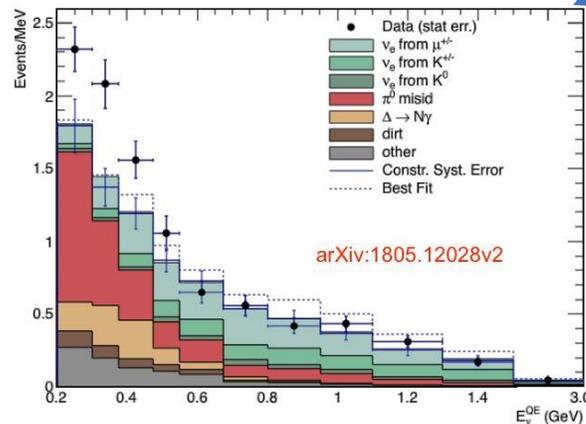
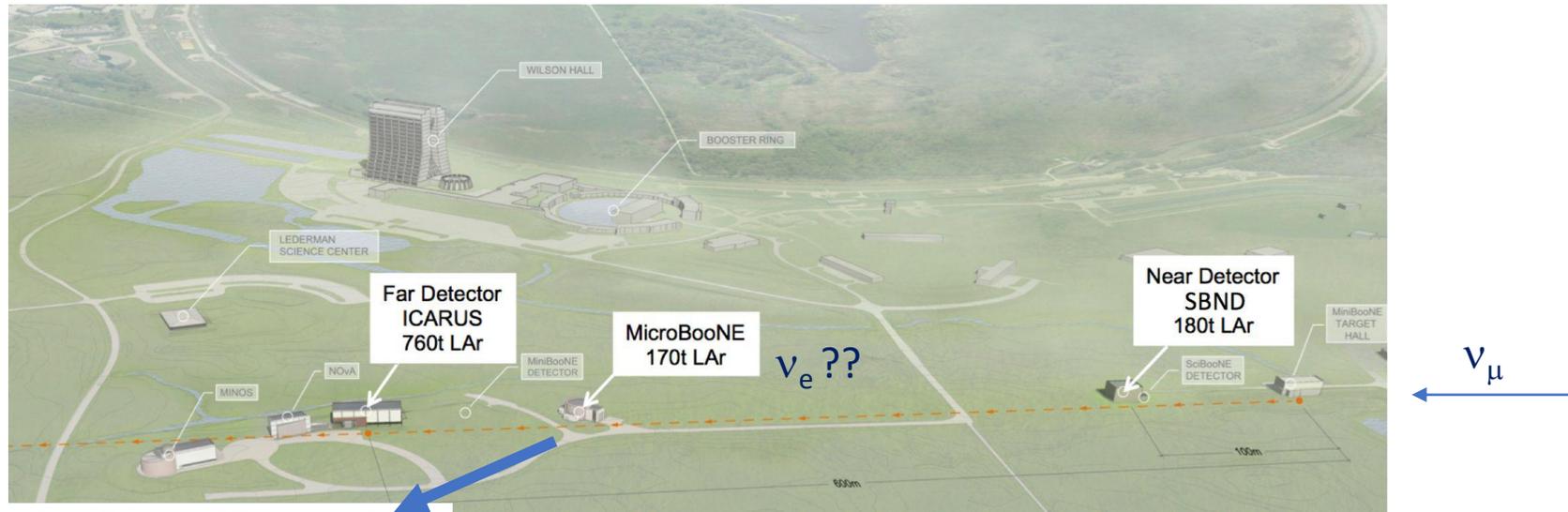
ICARUS al Fermilab (2020-oggi)

(\*) F. Arneodo et al. [Icarus-CERN-Milano Coll.] Phys. Rev. D 74 (2006) 112001

# ICARUS al Fermilab

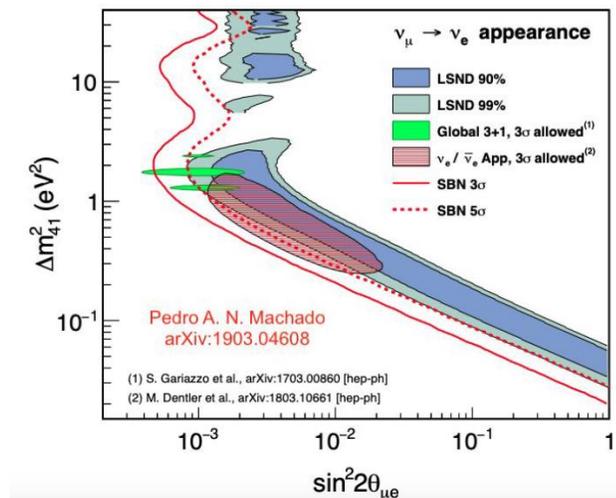


# Non si dovrebbe osservare alcun neutrino elettronico...



Cosa sta succedendo?

Eccesso visto sia in esperimenti precedenti (Miniboone) sia in Microboone



ICARUS ha appena cominciato la sua presa dati!

Il nostro dipartimento contribuisce al rivelatore attraverso il **sistema di calibrazione laser**, allo studio della **luce prodotta dalla scintillazione dell'argon liquido**, al **veto dei raggi cosmici**.

[info tesi: M. Bonesini]