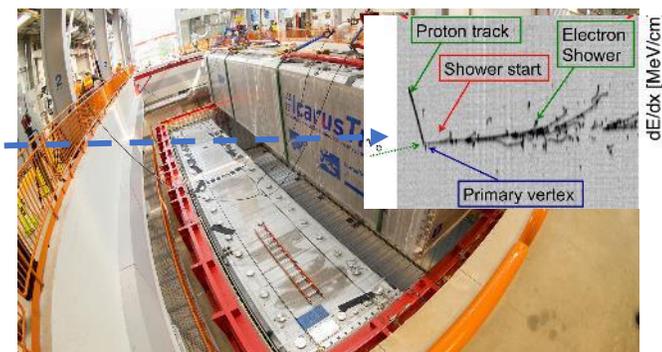
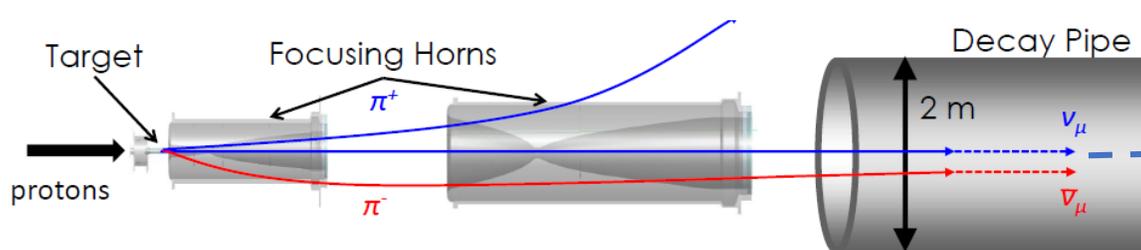


# Fisica del neutrino agli acceleratori



E' uno dei settori più vivaci della fisica delle particelle (Nobel Prize 2015, Breakthrough Prize 2016 etc.) grazie alla scoperta delle **oscillazioni dei neutrini**. E' un settore che ha avuto una crescita esponenziale (di esperimenti, investimenti e fisici coinvolti) dal 2012

B. The existence of non-zero neutrino masses is a compelling sign of new physics. The worldwide neutrino physics programme explores the full scope of the rich neutrino sector and commands strong support in Europe. Within that programme, the Neutrino Platform was established by CERN in response to the recommendation in the 2013 Strategy and has successfully acted as a hub for European neutrino research at accelerator-based projects outside Europe. *Europe, and CERN through the Neutrino Platform, should continue to support long baseline experiments in Japan and the United States. In particular, they should continue to collaborate with the United States and other international partners towards the successful implementation of the Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and the Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE).*

European strategy for Particle Physics (2020)



USA Congress and Department of Energy (2018)

**NEW**  
**ハイパーカミオカンデ(HK)計画の推進**  
 (東京大学宇宙線研究所)  
 (高エネルギー加速器研究機構)

**ハイパーカミオカンデ**  
 (岐阜県飛騨市神岡町)

**大型検出器**  
 (直径74m, 高さ60m)  
 →従来の5倍規模

**新型光検出器**  
 (約4万本)  
 →従来の2倍の光検出

**大強度陽子加速器J-PARC**  
 (茨城県東海村)

日本が切り拓いてきたニュートリノ研究の次世代計画として、超高感度光検出器を備えた総重量26万トンの大型検出器の建設及びJ-PARCの高度化により、ニュートリノの検出性能を著しく向上。素粒子物理学の大統一理論の鍵となる未発見の陽子崩壊探索やCP対称性の破れなどのニュートリノ研究を通じ、新たな物理法則の発見、素粒子と宇宙の謎の解明を目指す。【ロードマップ2017掲載事項】

Japanese Ministry of Science (2019)

# Perché?

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

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

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

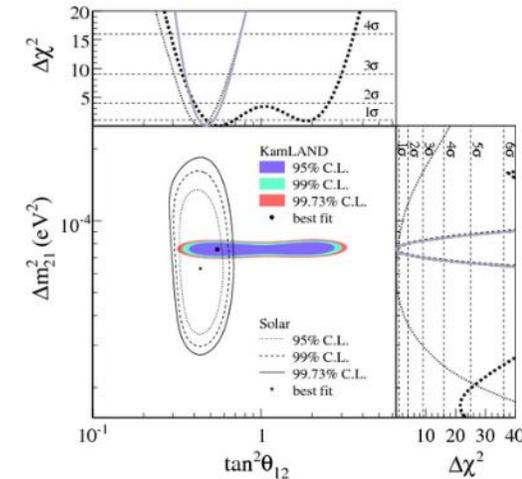
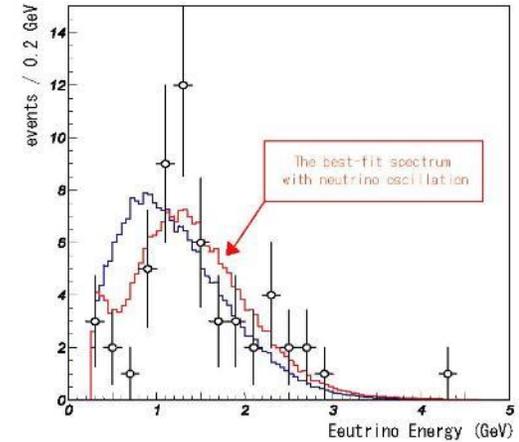
Si possono vedere le oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  nei fasci di neutrini?

Sono quasi tutti  $\nu_\mu$  e con energie di qualche GeV

**Si!** Noto fin dal 2004. [In gergo  $\theta_{23}$  grande]

**Sii!** Si possono vedere l'interferenza di tutte le funzioni d'onda dei neutrino (3 family)? [In gergo  $\Delta m^2_{12}$  non troppo piccolo]

**Siii!** Scoperto nel 2012 (breakthrough price 2016). In gergo  $\theta_{13}$  non troppo piccolo



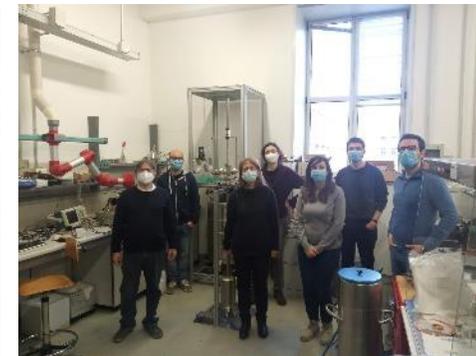
E' da vent'anni che lo stavamo aspettando! Queste tre condizioni dimostrano che:  
**un esperimento sufficientemente potente basato su un fascio di neutrini da acceleratori è in grado di ricostruire tutti i termini della Lagrangiana del Modello Standard che riguardano i neutrino (tranne la massa assoluta: v. il prossimo talk) e misurare la violazione di CP nel settore leptonic**

## Il gruppo di fisica dei neutrino agli acceleratori

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
D. Giuffanti	DUNE	Unimib
A. Minotti	DUNE	Unimib
E. Parozzi	DUNE	Unimib/CERN
M. Spanu	DUNE – ICARUS	Unimib
F. Terranova (*)	DUNE – ENUBET	Unimib
M. Torti	DUNE – ICARUS	Unimib
V. Mascagna	ENUBET	INFN Mib (Unilns.)
E. Vieira de Souza	DUNE	Visiting scientist

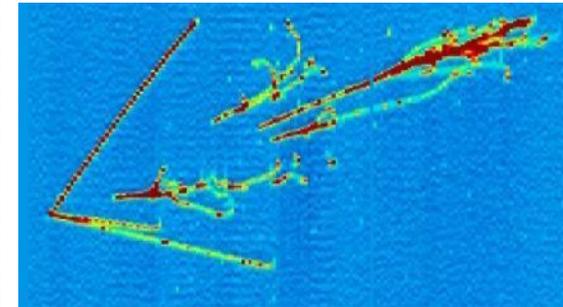
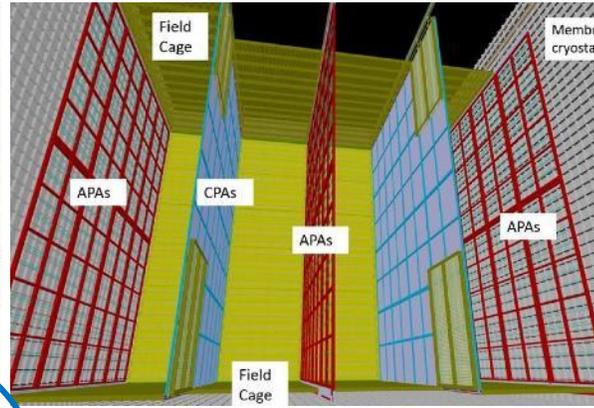
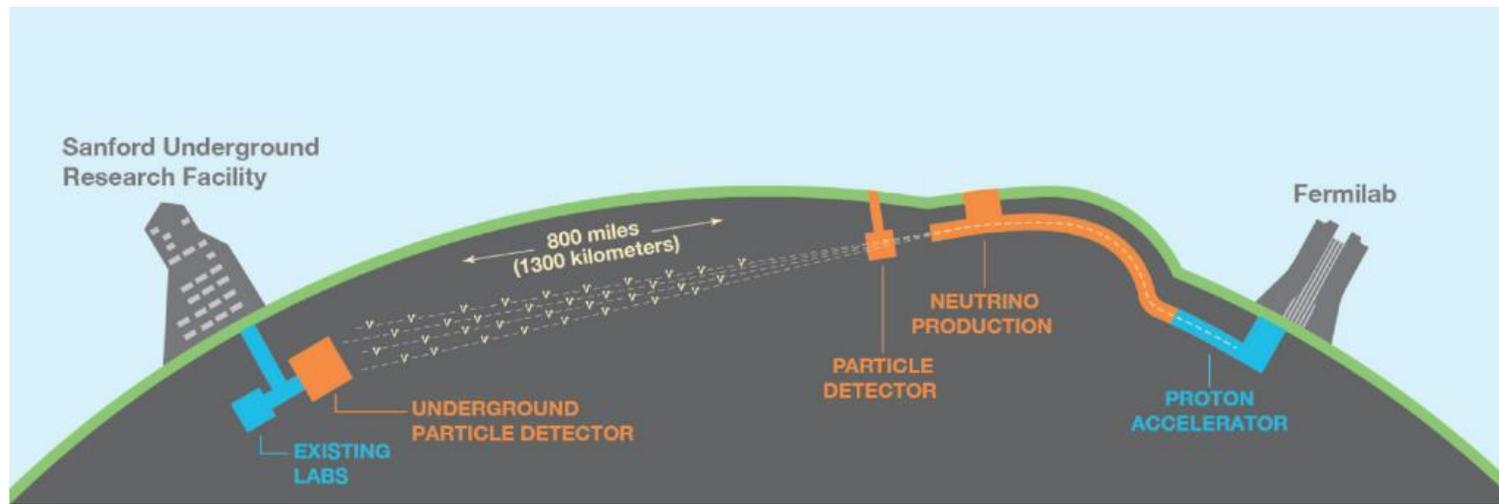
## Gruppo e laboratori coinvolti

Unimib e INFN, CERN (Geneva),  
LNL (Padova), Fermilab (Chicago)



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

# DUNE



Protodun  
e Run II

PDS construction

Installation

2021

2023

2025

2026

2027

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

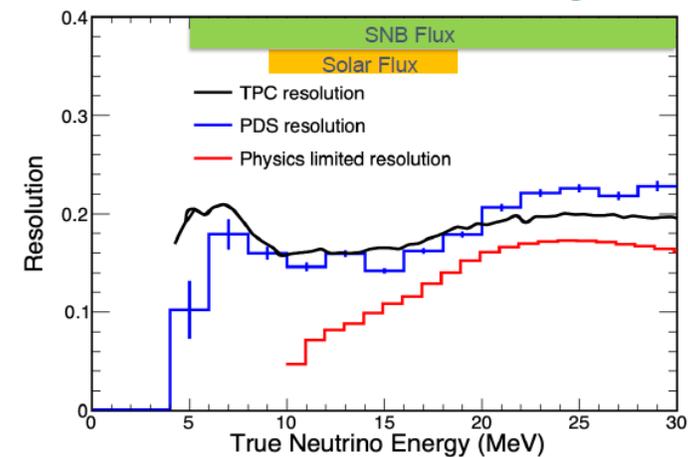
Sviluppo di rivelatori:

- 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

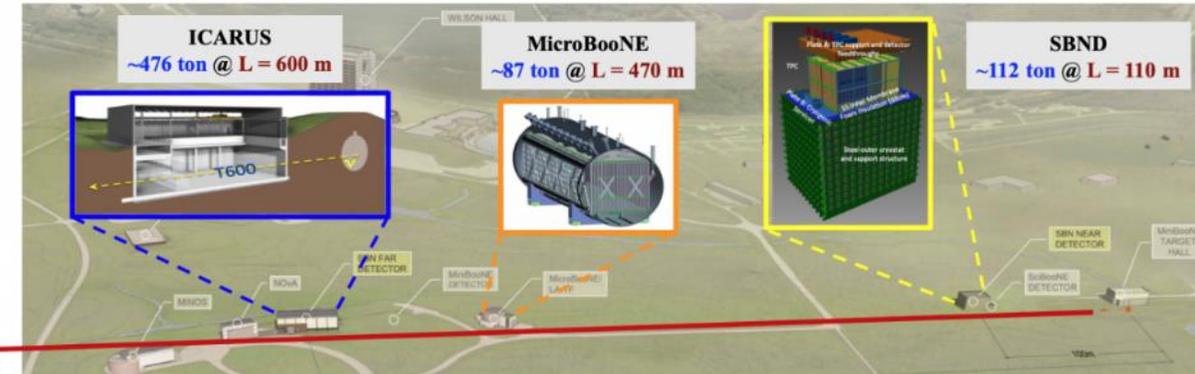




## Il “nonno” di DUNE

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 (S. Ragazzi, T. Tabarelli, M. Bonesini, N. Redaelli, F. Terranova...)

Ha raggiunto la maturità grazie alla **Collaborazione ICARUS** che ha fatto funzionare una LArTPC da 600 tonnellate al Gran Sasso e, proprio in questi mesi, al Fermilab



Oggi questo detector “di size modesta” 😊 (600 tons) viene usato per lo studio dei neutrino sterili al Fermilab assieme ad altre due LArTPC. Noi siamo coinvolti nel sistema di rivelazione della luce, nell’analisi dei dati e nella costruzione del Cosmic Ray Veto, che è essenziale per far funzionare una LArTPC in superficie

# WA104 al CERN e FNAL: refurbishing del T600

- Programma WA104 al CERN: concluso refurbishing T600 per utilizzo sul fascio SBN al CERN [R. Acciarri et al., arXiv:1503.01520]
- Principalmente: nuovi cold vessels, nuova elettronica e nuovo sistema per la raccolta di luce di scintillazione in LAr a 128 nm tramite PMTs (incluso sist calibr laser)



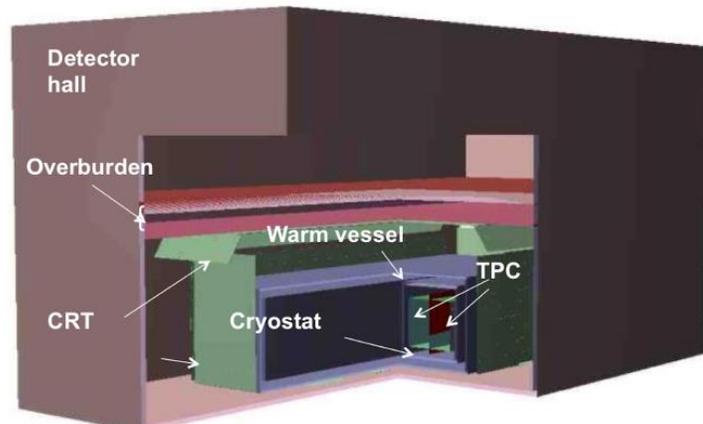
- I due semi-moduli sono stati trasportati a FNAL
- Installazione del T600 a Fermilab



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

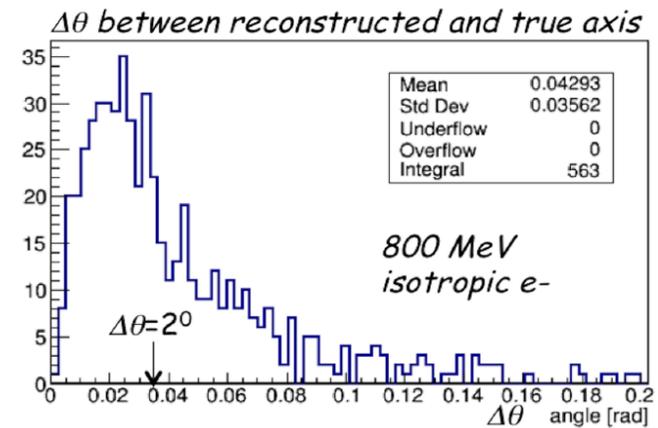
Sviluppo di rivelatori:

- Sistema di calibrazione dei fotosensori criogenici
- Realizzazione del cosmic ray tagger



Analisi dati, simulazione, studi di fisica delle oscillazioni:

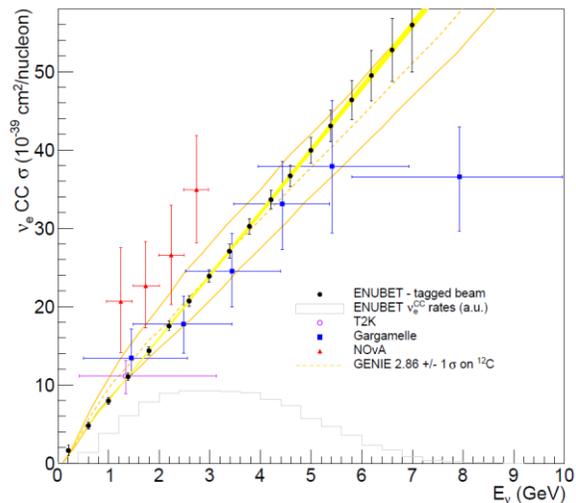
- Analisi dei dati di commissioning al Fermilab
- Effetti di charge distortion
- Studio del fondo dei raggi cosmici



# Potenza o precisione?

Misurare la matrice di mixing leptonica, la violazione di CP, il pattern di masse dei neutrino richiede fasci potenti. Ma gli effetti osservabili sono sottili (effetti di interferenza) e richiedono un'ottima conoscenza delle interazioni dei neutrino nella materia e, in particolare, delle sezioni d'urto. **Altrimenti la potenza è sprecata e le misure sono dominate dall'errore sistematico.**

Dal 2012 abbiamo bisogno di fasci **potenti** per le oscillazioni e **precisi** per misurare le sezioni d'urto con rivelatori piccoli e posti a piccola distanza (in modo che le oscillazioni siano trascurabili)



To extract the most physics from DUNE and Hyper-Kamiokande, a complementary programme of experimentation to determine neutrino cross-sections and fluxes is required. Several experiments aimed at determining neutrino fluxes exist worldwide. The possible implementation and impact of a facility to measure neutrino cross-sections at the percent level should continue to be studied. Other important

[European Strategy for Particle Physics Deliberation document \(pag. 5\)](#)

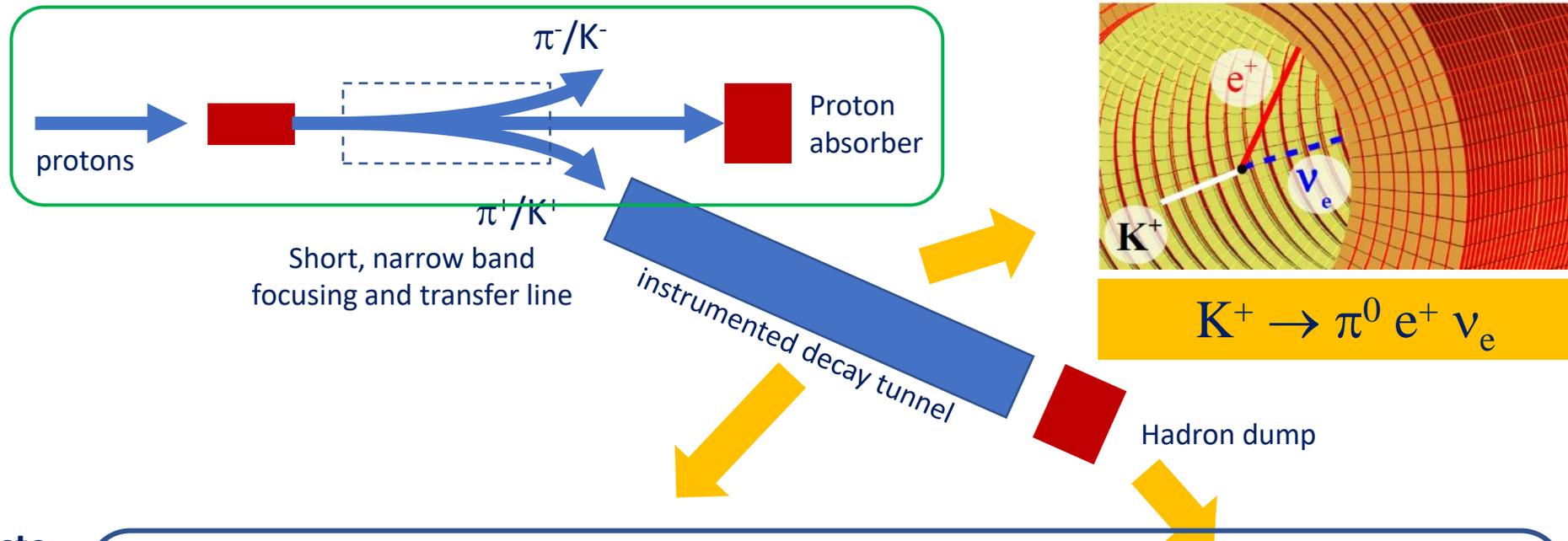
ENUBET and NUSTORM  
(see also the European  
Strategy Physics Briefbook,  
arXiv:1910.11775)

Flux at per-cent level  
measured in a direct  
manner

Good knowledge of the  
neutrino energy without  
using final-state particle  
reconstruction

Superior control  
of flavor and  
contamination at  
source

# 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  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

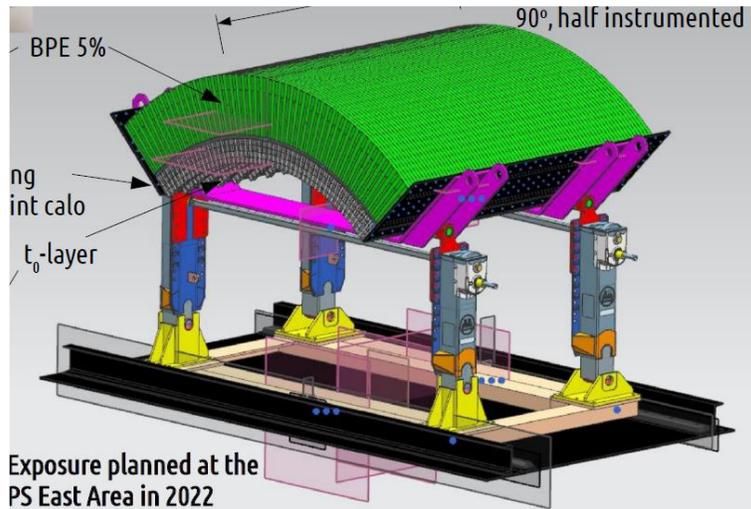
ENUBET will be the first “**monitored neutrino beam**” where nearly all systematics are bypassed monitoring the leptons in the decay tunnel at single particle level

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

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

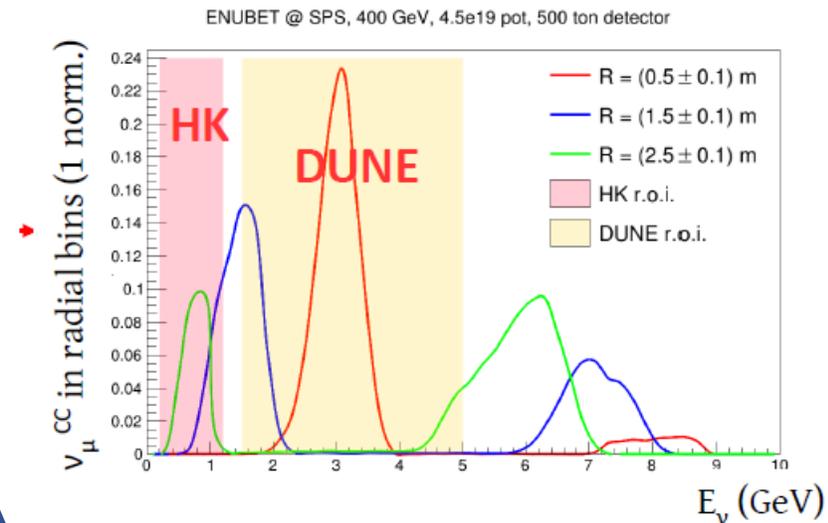
Sviluppo di rivelatori:

- Il Dimostratore di ENUBET
- Timing
- Elettronica custom (triggerless digitizers)



Analisi dati, simulazione, studi di fisica delle oscillazioni:

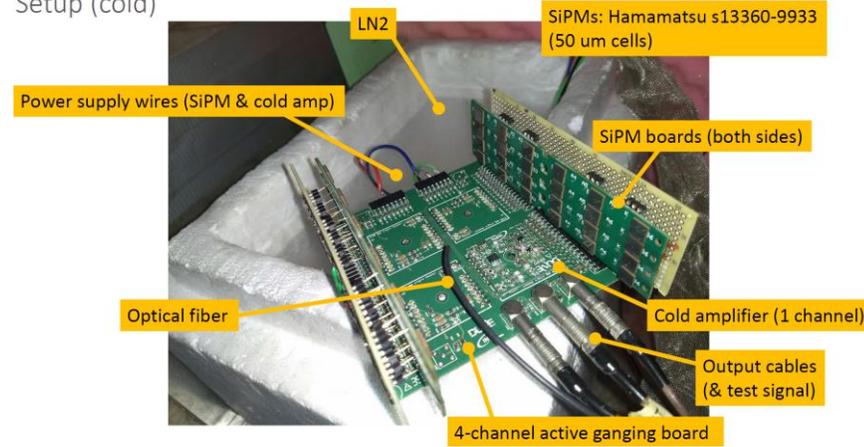
- Analisi dei dati dal Dimostratore
- Simulazione dell'ambiente estremo di ENUBET (tunnel di decadimento)
- Precisione nella misura delle sezioni d'urto



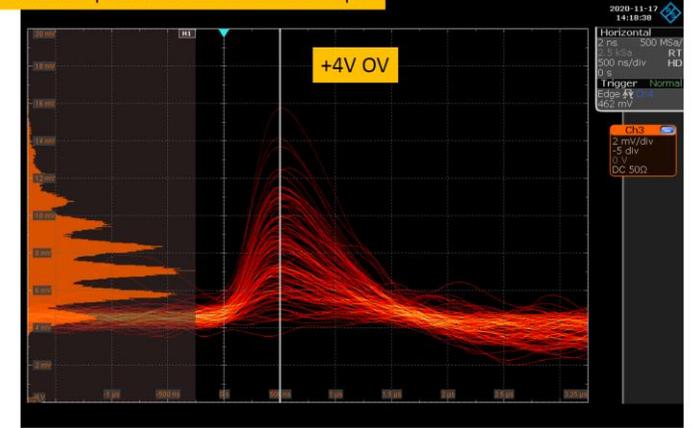
# Tipologie di tesi

**Sviluppo di rivelatori  
(fotosensori e ottica nel VUV a  
temperatura criogenica)  
Calorimetria a risposta rapida  
Timing e optoelettronica**

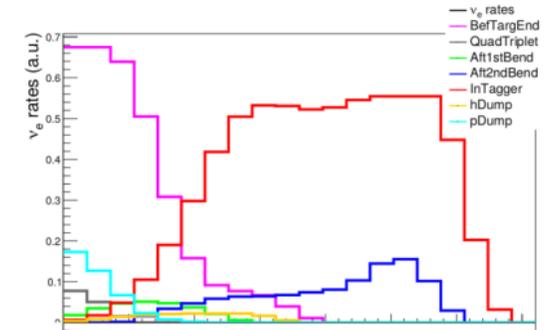
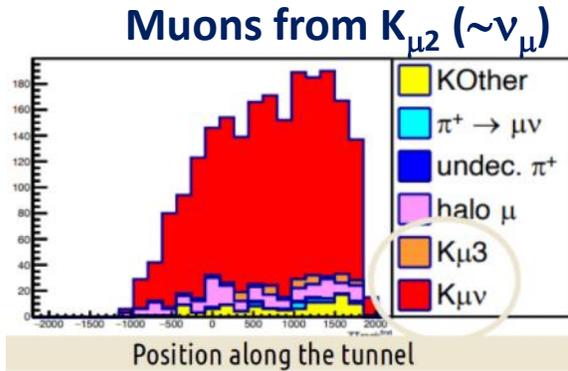
Setup (cold)



LED pulse, few photons  
1 MHz low pass filter on the oscilloscope



**Simulazione e analisi dei dati  
(GEANT4, analisi multivariate,  
machine learning)**



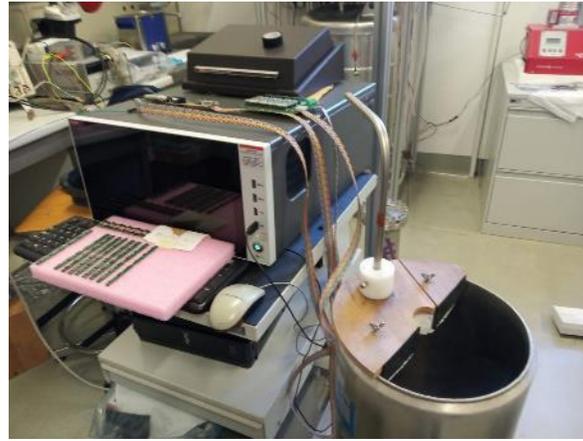
**Test su fascio al CERN, DAQ e  
analisi dei dati**



# Laboratori

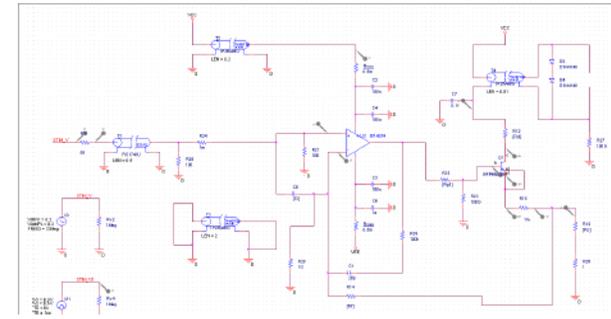
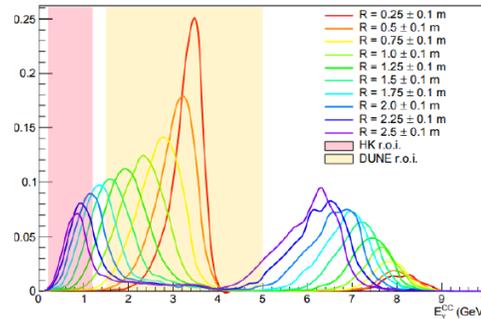
## Milano-Bicocca

Elettronica criogenica (3zo piano)  
Camere ad Argon Liquid (4to piano)  
Misure a basso background (-3)  
Simulazione e analisi dei dati  
Dal 2023, **DUNE production center in U19**



**Bordeaux, Milano-Statale, Parigi (traineeship)**  
Simulazione, elettronica,  
Optoelettronica

ENUBET @ SPS, 400 GeV, 4.5e19 pot, 500 ton detector



**CERN**  
ProtoDUNE-SP  
East-Area



# Fermilab (Chicago), SURF (South Dakota)

