

# ***L'esperimento ENUBET e la sua implementazione al CERN***

Filippo Bramati

a nome della Collaborazione ENUBET

Università di Milano-Bicocca & INFN

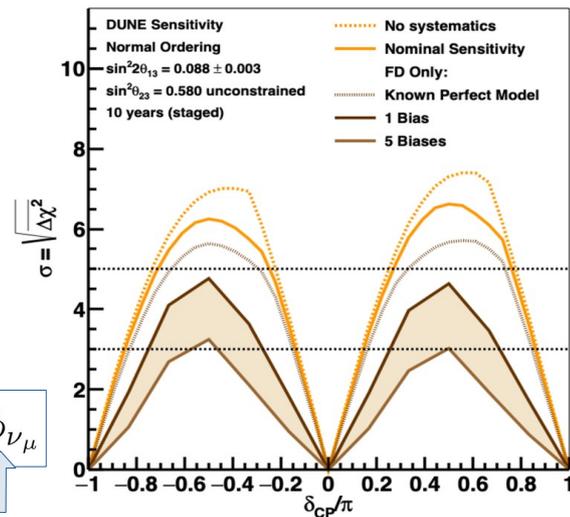
**Incontri di Fisica delle Alte Energie 2023**

Catania, 12-14 Aprile 2023, Monastero dei Benedettini

# Sezioni d'urto dei neutrini ... ancora poco note !

La prossima generazione di esperimenti long-baseline (DUNE, HyperK) è concepita per misure di precisione di oscillazioni dei  $\nu$  :

- ♦ test del paradigma a 3 famiglie dei  $\nu$
- ♦ determinazione dell'ordinamento delle masse dei  $\nu$
- ♦ test della violazione di CP nel settore leptonic



Il portale per studiare la **violazione di CP** e la **gerarchia di massa**:  
 misure di alta precisione della probabilità di appearance  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  e  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ .

➤ una conoscenza precisa della **sezione d'urto**  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  è necessaria

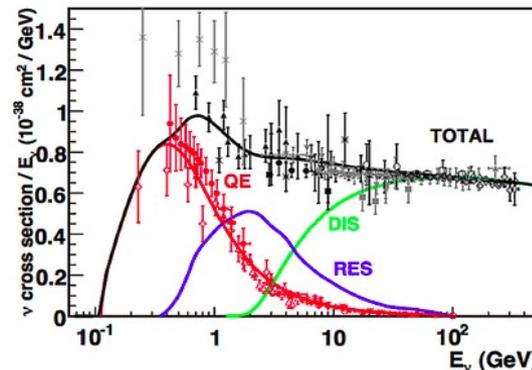
$$N_{\nu_e} = P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \cdot \sigma_{\nu_e} \cdot \phi_{\nu_\mu}$$

Inoltre, misure precise di sezioni d'urto sono indispensabili per sviluppare modelli teorici di interazione  $\nu$ -nucleo.

La sezione d'urto dei  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  è nota al livello O(10 – 30%) nel range di energia di pochi GeV

– **precisione limitata da incertezze sistematiche**

La sorgente di sistematica dominante sulle sezioni d'urto è il **flusso di neutrini**, noto con una **precisione peggiore del O(5-10%)**.



# Lo scopo del progetto ENUBET

- **Lo scopo di ENUBET:** ideare un fascio narrow-band di neutrini capace di misurare
  - ◆ **sezione d'urto** e **sapore** dei  $\nu$  al livello di **precisione** del  $O(1\%)$
  - ◆ **energia** dei  $\nu_\mu$  al livello di **precisione** del  $O(10\%)$



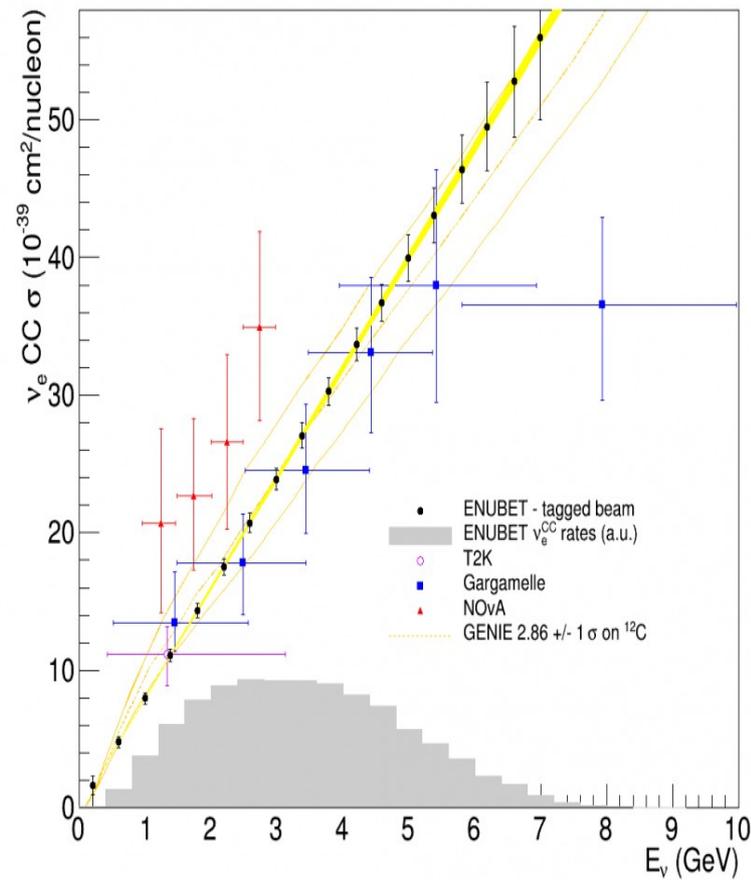
Estratto da **“European Strategy for Particle Physics Deliberation document”** :  
(10.17181/ESU2020Deliberation)

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.

Estratto da **“Physics Briefbook for the European Strategy for Particle Physics”** :  
(arXiv:1910.11775)

A dedicated study should be set-up to evaluate the possible implementation, performance and impact of a percent-level electron and muon neutrino cross-section measurement facility (based on e.g. ENUBET or nSTORM) with conclusion in a few years time.

## Impatto di ENUBET sulla sezione d'urto $\nu_e$

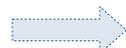


# ENUBET : il primo fascio monitorato di neutrini

I **fasci monitorati di neutrini** sono una nuova tecnologia volta a misurare il flusso ed il sapore dei neutrini al livello del per-cento.

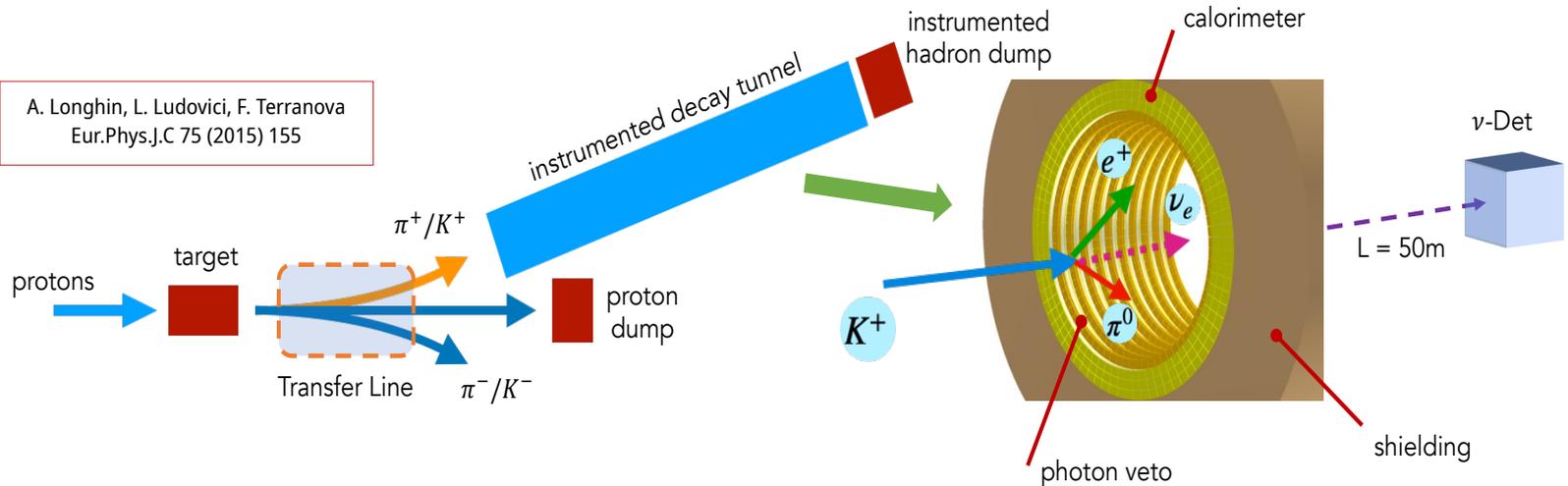


Linea di fascio convenzionale con un **tunnel di decadimento strumentato** per l'identificazione dei leptoni carichi



Misura del **rate di leptoni**  $\Leftrightarrow$  monitoraggio del **flusso di  $\nu$**

A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova  
Eur.Phys.J.C 75 (2015) 155



Il **progetto ERC** si è focalizzato su :

misura dei **positroni** emessi dal  $K_{e3}$  ( $K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu_e$ ) con il **tunnel di decadimento strumentato**  $\Rightarrow$  misura **flusso  $\nu_e$**

Come **esperimento CERN NP06/ENUBET** si estende a :

misura dei **muoni** emessi dal  $K_{\mu\nu}$  ( $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ) con il **tunnel di decadimento strumentato** e dal  $\pi_{\mu\nu}$  ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ) tramite un **hadron dump strumentato** con un **range meter**  $\Rightarrow$  misura **flusso  $\nu_\mu$**

**Monitorando i leptoni vengono aggirate le principali sistematiche:** adroproduzione, geometria della beamline e focusing, protoni su bersaglio.

# La linea di trasferimento di ENUBET : lo schema finale

Linea di fascio basata esclusivamente su elementi **statici** ("in corrente continua"), i.e. **senza** impiego di **horn magnetici** :

- ◆ **estrazione lenta dei protoni primari** ⇒ tutta l'intensità è estratta in modo continuo in pochi secondi (~ 2 sec)
  - ✓ rate di particelle nel tunnel ridotto ad un livello sostenibile per i rivelatori
  - ✓ elementi **statici** : **dipoli** e **quadrupoli** ⇒ più economici e stabili
- ◆ lunghezza corta per minimizzare i decadimenti dei K ⇒ con  $L = 20\text{ m}$  si perde il 30% dei K; rapporto  $K/\pi$  si riduce di ~ 25%
- ◆ **target di grafite** ottimizzato ( $L = 70\text{ cm}$ ,  $R = 3\text{ cm}$ )
- ◆ **foglio di tungsteno** (5 cm) dopo il target per sopprimere fondo  $e^+$

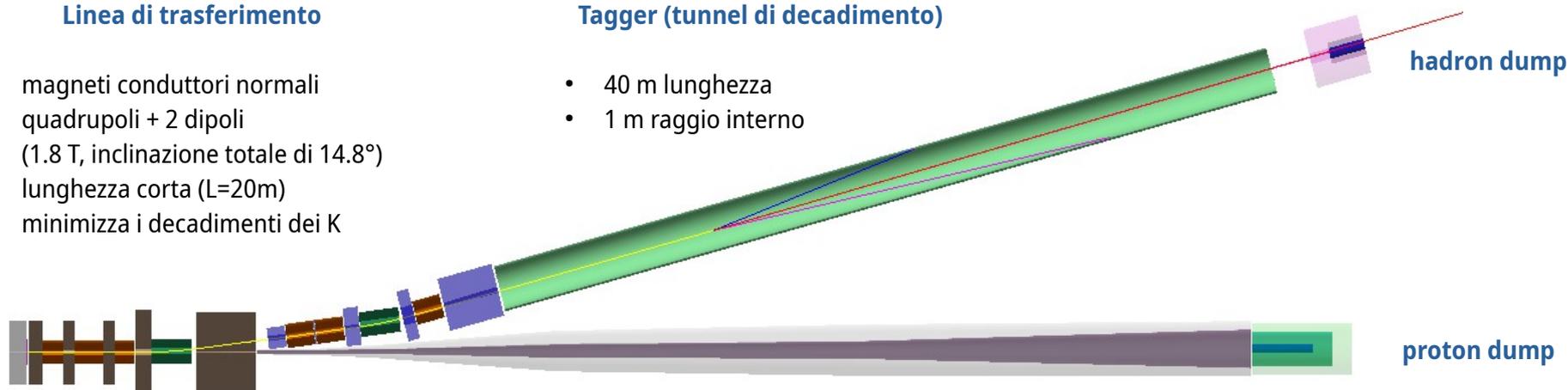
Linea di fascio **narrow-band** : selezione dei mesoni secondari  $K^+ / \pi^+$  con  **$p = 8.5\text{ GeV}/c \pm 10\%$**  → ottimizzata per la regione di interesse (r.d.i.) di DUNE ( $E_\nu \sim 3\text{ GeV}$ )

## Linea di trasferimento

- magneti conduttori normali
- quadrupoli + 2 dipoli (1.8 T, inclinazione totale di 14.8°)
- lunghezza corta ( $L=20\text{m}$ ) minimizza i decadimenti dei K

## Tagger (tunnel di decadimento)

- 40 m lunghezza
- 1 m raggio interno



# Spettro di eventi $\nu_e^{CC}$ al rivelatore

**Statistica totale di  $\sim 10^4$  eventi  $\nu_e^{CC}$  in  $\sim 2.2$  anni di presa dati**

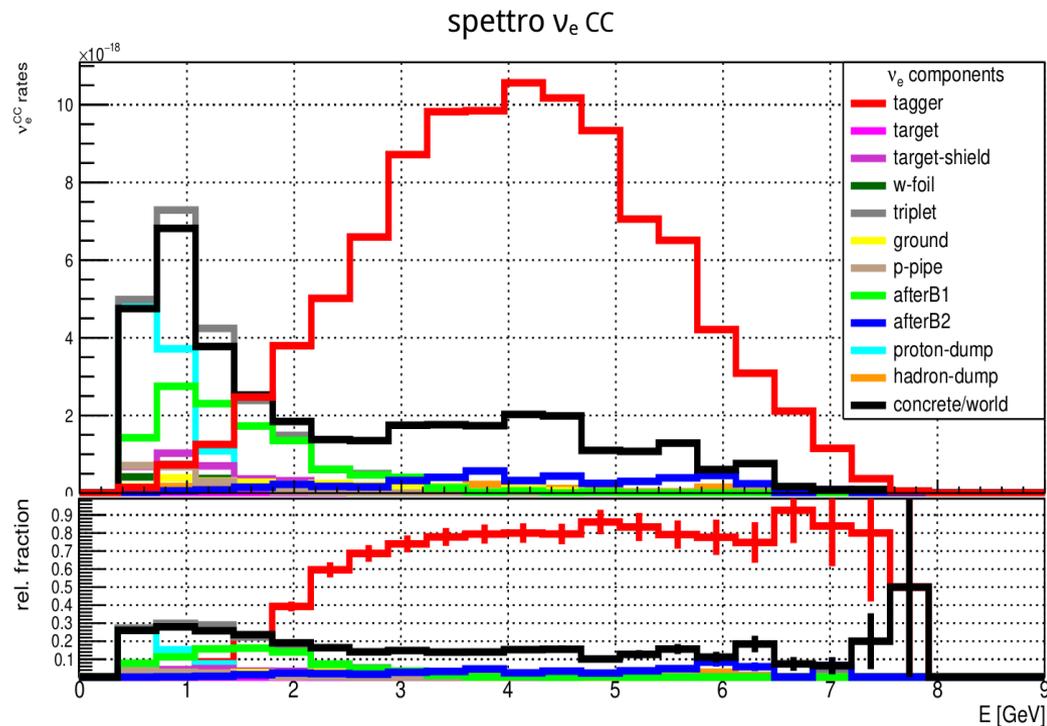
- acceleratore SPS con  $4.5 \cdot 10^{19}$  POT / anno
- rivelatore di **500 ton LAr** posto a 50 m dall'uscita del tunnel

## componente monitorabile

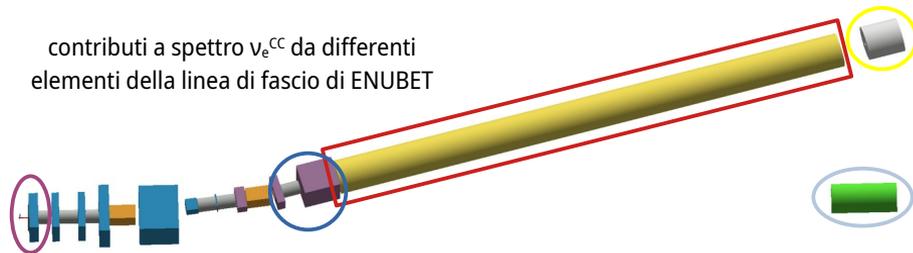
$\sim 80\%$  del flusso  $\nu_e$  prodotto da decadimenti nel tunnel ( $E_\nu > 1$  GeV)

## componenti non-monitorabile :

- $E_\nu < 1$  GeV : componente principale prodotta al proton-dump
  - separazione dalla componente monitorabile con un semplice **taglio in energia**
- $E_\nu > 1$  GeV : contributi da elementi prima del tagger e hadron-dump
  - per queste componenti occorre fidarsi della simulazione  $\rightarrow$  l'informazione data dalle misure sperimentali è meno stringente



contributi a spettro  $\nu_e^{CC}$  da differenti elementi della linea di fascio di ENUBET



# Spettro di eventi $\nu_{\mu}^{CC}$ al rivelatore

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

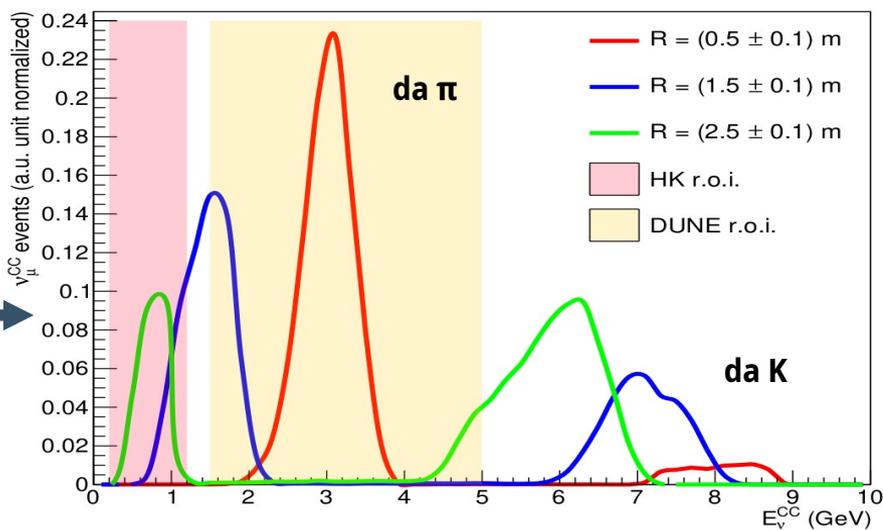
**Tecnica narrow-band off-axis**  
 fascio di momento stretto O(10%)

↓

**( $E_{\nu}$ , R) fortemente correlati**

- $E_{\nu}$  = energia del  $\nu$
- R = distanza radiale del vertice di interazione dall'asse del fascio

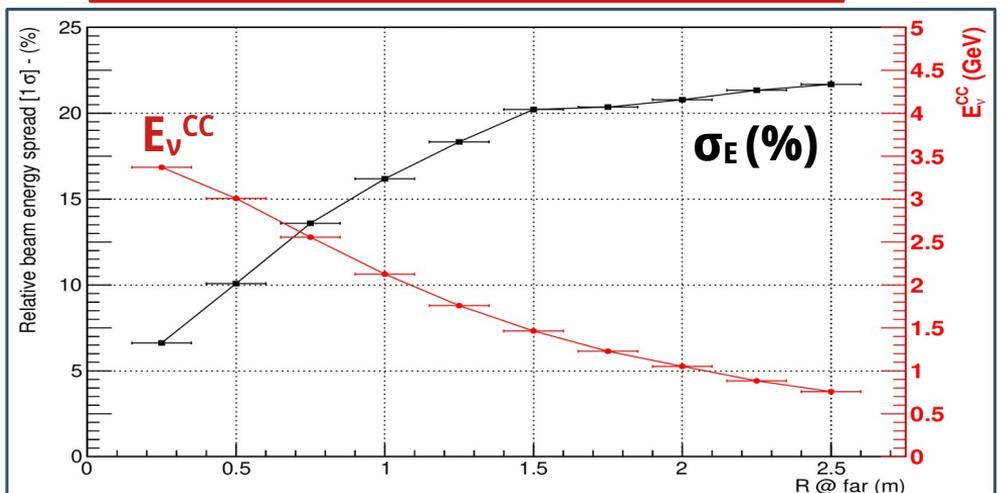
**misura precisa di  $E_{\nu}$  :**  
**senza affidarsi alla ricostruzione di particelle in stato finale da interazione  $\nu_{\mu}^{CC}$**



popolazioni  $\pi$ /K ben separate

F. Acerbi et al.,  
 CERN-SPSC-2018-034

dai picchi dei  $\pi$  a diversi R



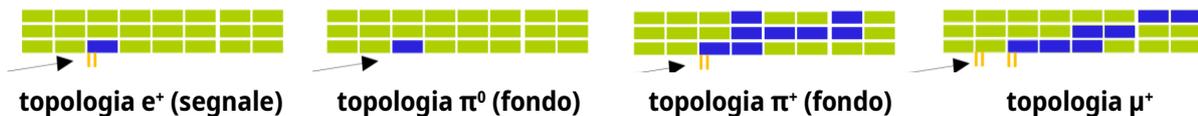
- **8 - 25% risoluzione in  $E_{\nu}$  da  $\pi$  nella r.d.i. di DUNE**
- ~ 30% risoluzione in  $E_{\nu}$  da  $\pi$  nella r.d.i. di HyperK
- sono in corso studi per realizzare una linea di trasferimento che seleziona p con diversi valori di momento (4.5, 6 e 8.5 GeV)  
 ⇒ ottimizzata per HyperK e DUNE

# Tunnel di decadimento strumentato

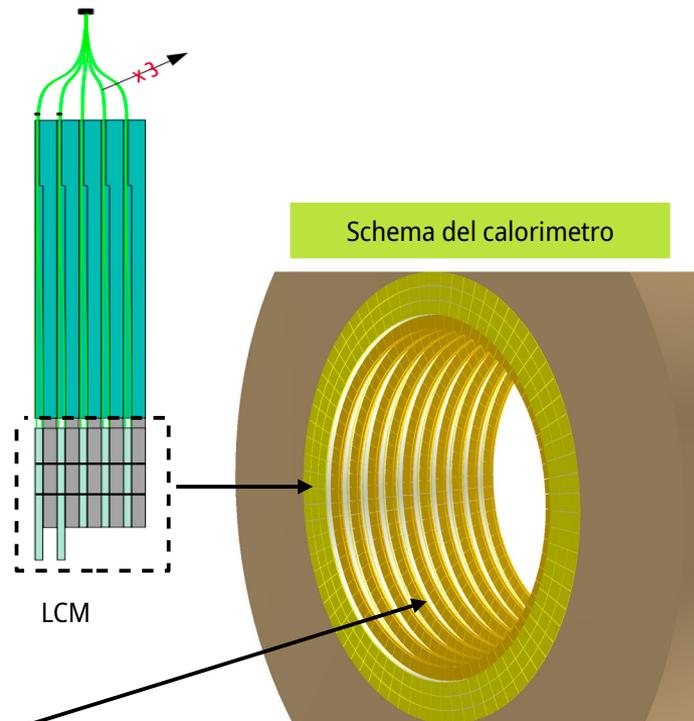
- Sviluppare un rivelatore con **capacità di separazione  $e^+ / \pi^+ / \mu^+$**  utilizzando una tecnologia economicamente vantaggiosa.
- Tunnel di decadimento lungo 40 m strumentato con **3 strati di moduli calorimetrici segmentati longitudinalmente** ed un **sistema per la reiezione di fotoni** costituito da **anelli di scintillatore plastico**.

## Moduli Calorimetrici a Lettura Laterale (LCMs)

- Calorimetro a **sampling**: 1.5 cm strati in Fe alternati con 0.5 cm di scintillatore plastico
- LCM :  $3 \times 3 \times 10 \text{ cm}^3 (= 4.3 X_0)$
- **Segmentazione longitudinale**  $\Rightarrow$  sfrutta la topologia degli eventi per  **$e^+ / \pi^+ / \mu^+$  PID**

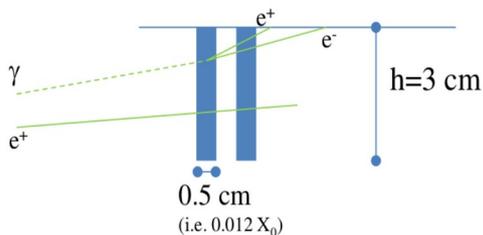


- Luce di scintillazione trasportata da **fibre WLS** verso **SiPMs** schermati da 30 cm di **polietilene borato (BPE)**  $\Rightarrow$  riduzione  $\sim 18$  della fluenza di neutroni



## Veto di fotoni

- Sistema per la **reiezione di  $\pi^0$**
- **Misure di tempo** : risoluzione  $\sigma_t \sim 400 \text{ ps}$
- Scintillatore plastico  $3 \times 3 \times 0.5 \text{ cm}^3 (= 0.012 X_0)$



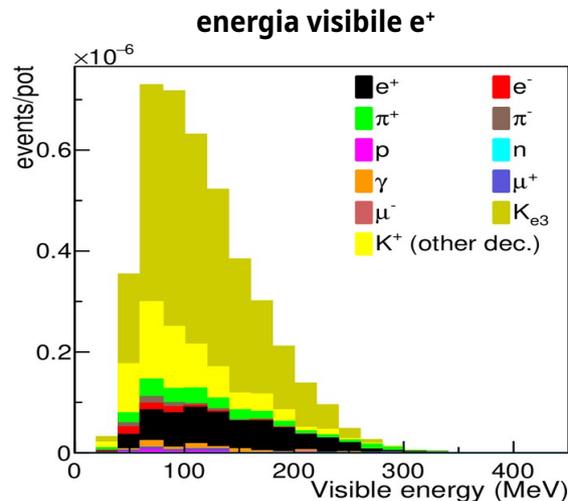
# Prestazioni del monitoraggio dei leptoni carichi

## Simulazione GEANT4 del tunnel di decadimento strumentato :

- validata con misure di test su prototipi al CERN nel 2016-2018
- risposta del rivelatore hit-level
- effetti di pile-up inclusi (studi su forme d'onda in corso)
- algoritmi di **ricostruzione eventi** e **identificazione del segnale**

## Ricostruzione e selezione eventi :

1. **Ricostruzione eventi** : associazione dei depositi energetici compatibili in spazio e tempo con uno sciame EM ( $e^+$ ) o traccia dritta ( $\mu^+$ )
2. **Separazione  $e^+$  /  $\pi^+$  /  $\mu^+$  /  $\gamma$**  : analisi multivariata (MLP-NN di TMVA) che utilizza un set di variabili discriminanti basate su :
  - depositi di energia nel calorimetro
  - topologia degli eventi
  - veto dei fotoni

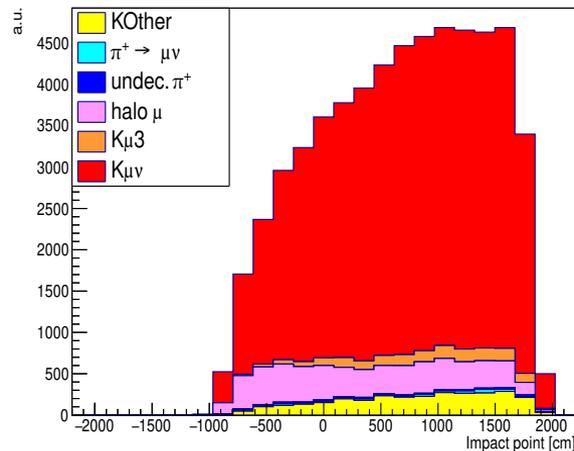


**Selezione  $e^+$  da  $K_{e3}$  :**

**S/N = 2**

**$\epsilon = 22\%$**

## punto impatto $\mu^+$ lungo il calorimetro



**Selezione  $\mu^+$  da  $K_{\mu\nu}$  :**

**S/N = 5.2**

**$\epsilon = 35.6\%$**

efficienza  $\epsilon \sim$  metà geometrica

# La valutazione delle sistematiche sul flusso di $\nu$ : adroproduzione

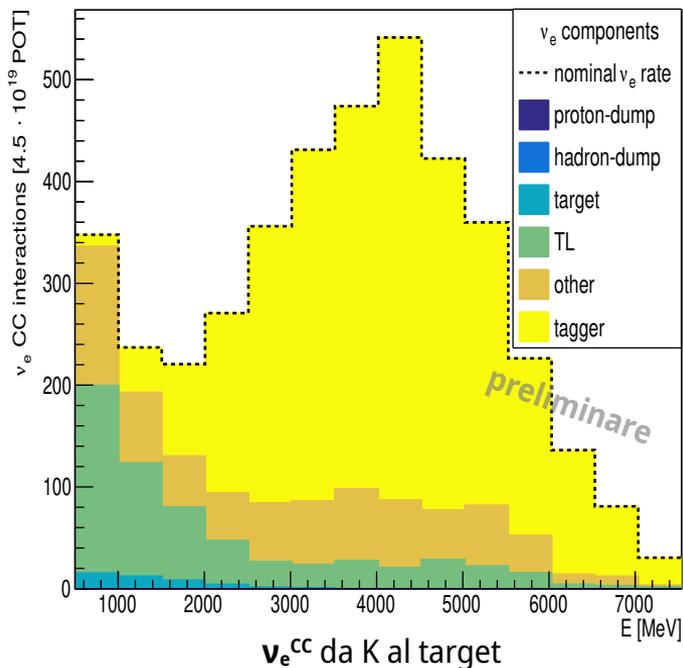
**Monitoraggio dei leptoni carichi  $e^+ / \mu^+$**   
fit delle osservabili dei leptoni utilizzando un modello segnale + fondo



**Monitoraggio del flusso  $\nu_e / \nu_\mu$**   
riduzione dell'incertezza sistematica di adroproduzione utilizzando le informazioni a posteriori date dal fit

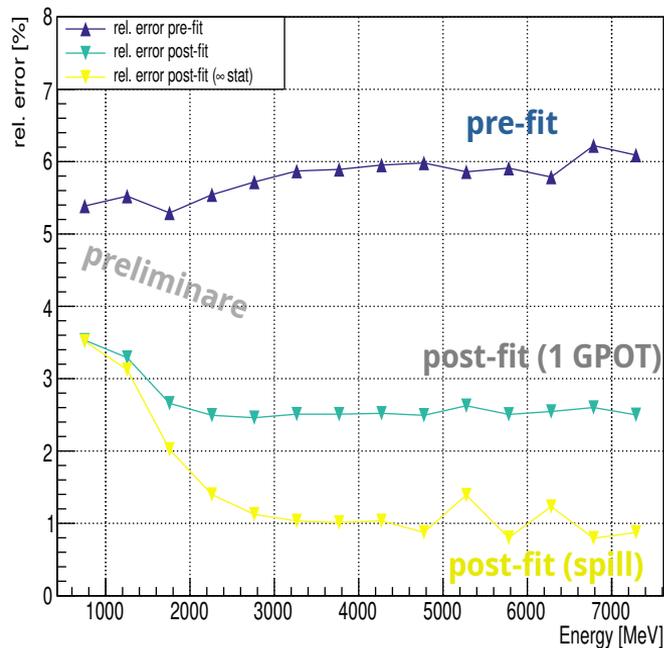
## rate di interazione $\nu_e$ CC al rivelatore

nominal  $\nu_e$  CC interactions [ $4.5 \cdot 10^{19}$  POT]



## errori relativi su rate $\nu_e$ CC : pre e post-fit

$\Phi_{\nu_e}$  @ detector - relative bin errors



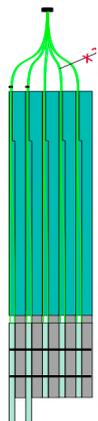
- **Pre-fit** : ~ 6% sistematiche dovute ad incertezza su adroproduzione
- **Post-fit** : sistematica di adroproduzione ridotta al livello O(1%) utilizzando il fit alle osservabili dei leptoni misurati al tagger

Raggiunto goal di ENUBET di sistematiche 1% utilizzando il monitoraggio della rate dei leptoni

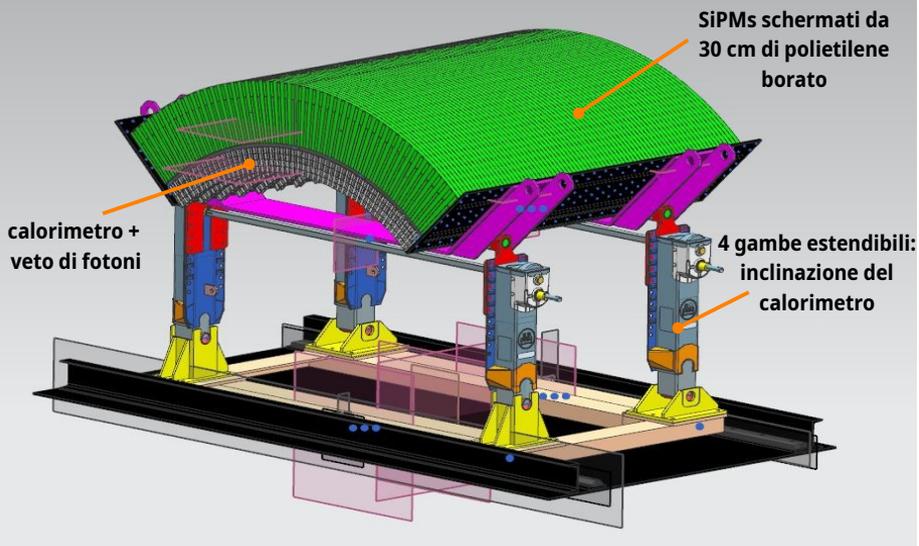
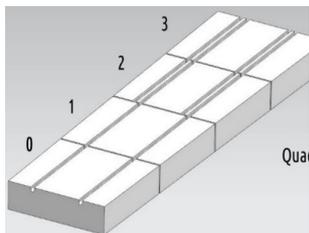
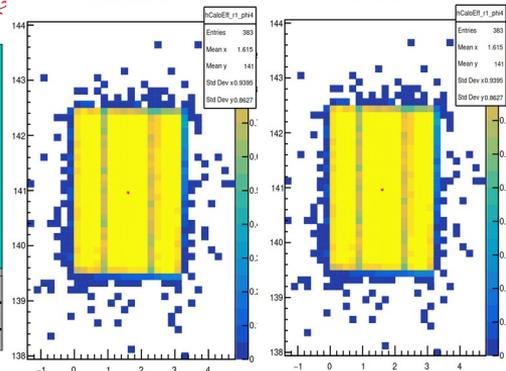
# Il dimostratore di ENUBET

## Nuovo schema di lettura frontale e raggruppamento delle fibre

10 fibre WLS  
raggruppate verso  
un SiPM 4 x 4 mm<sup>2</sup>



calorimetro : mappe di efficienza (MC)

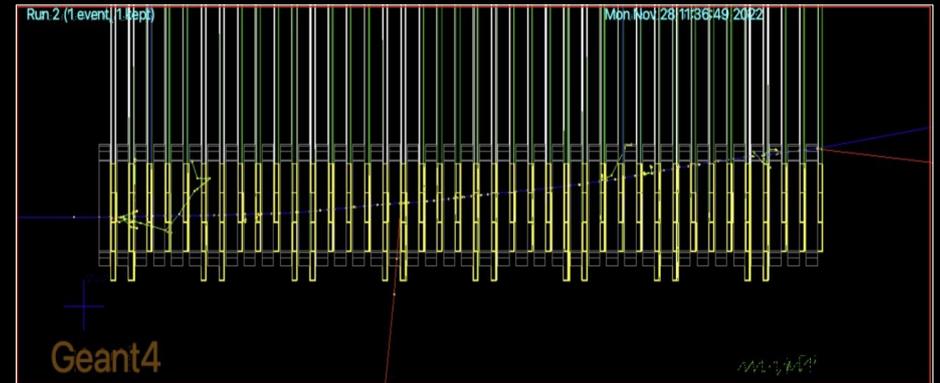
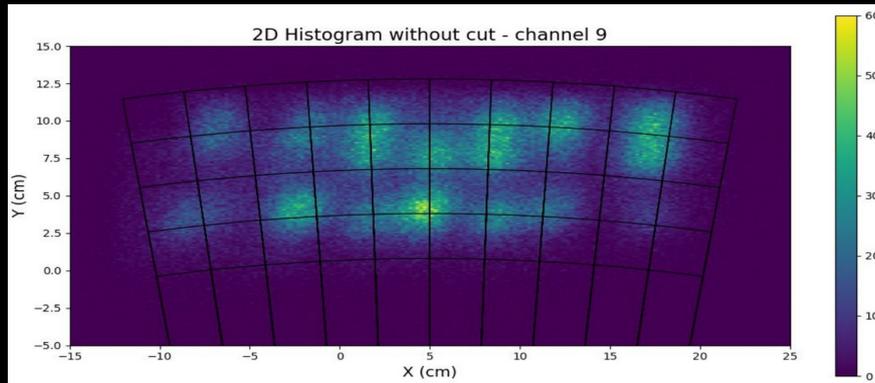
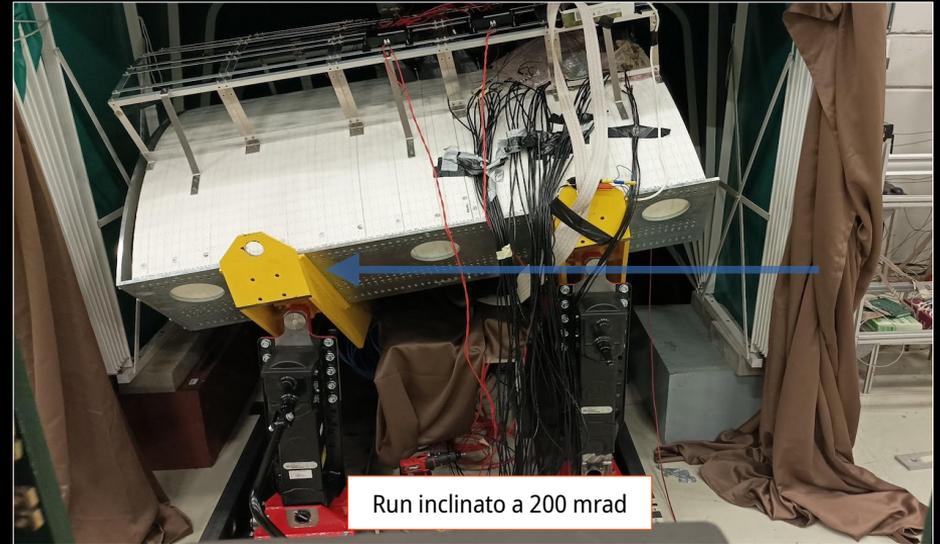


- Una sezione del tunnel di decadimento è stata costruita per dimostrare :
  - performance / scalabilità / economicità
- **Il dimostratore è stato testato su fascio al CERN in Ottobre 2022 :**
  - lunghezza 1.65 m, massa 7 ton, copertura angolare  $\Delta\Phi = 90^\circ$
  - 75 strati di 1.5 cm assorbitore Fe + 7 mm scintillatore  $\Rightarrow 10 \times 3$  LCMs
- **strumentata solo la parte centrale (10 settori in  $\Phi$ )** : la restante è mantenuta per considerazioni meccaniche
- **design modulare**: geometria estendibile ad una copertura angolare di  $2\pi$  unendo 4 rivelatori simili (zone morte minime)
- **nuovo schema di lettura della luce** con scanalature frontali invece che laterali  $\Rightarrow$  risponde a necessità di produzione scintillatori su larga scala e più sicura, garantisce una raccolta di luce più uniforme
- **scintillatori**: prodotti da SCIONIX e fresati da compagnie locali
- l'analisi dei dati è in corso ed è stata sviluppata una simulazione GEANT4 del dimostratore per confrontare dati/MC
- la copertura della parte strumentata verrà aumentata per il prossimo test su fascio (previsto per la seconda metà del 2023)

# Il dimostratore di ENUBET : test su fascio al CERN

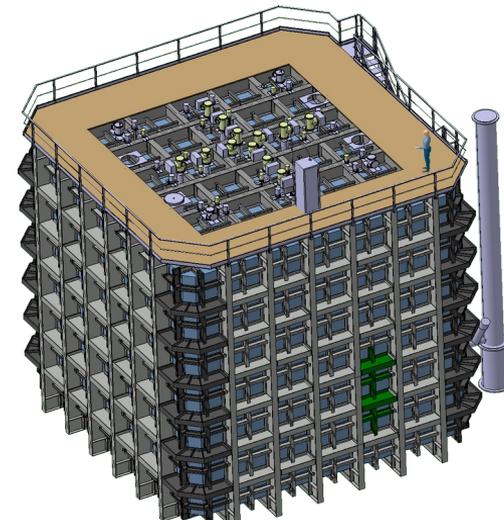
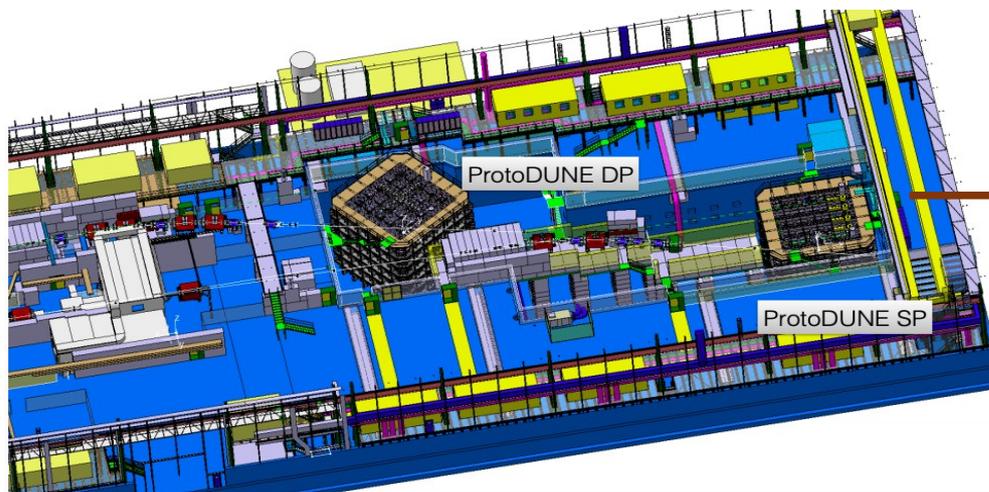


# Il dimostratore di ENUBET : test su fascio al CERN [cont']



# L'implementazione di NP06/ENUBET alla CERN North Experimental Area

- La proposta di un fascio di  $\nu$  short-baseline al CERN per il 2029 (Run 4 di LHC, in parallelo a DUNE e HyperK) richiede una sua implementazione dettagliata sul sito della **CERN North Experimental Area**, utilizzando possibilmente i **rivelatori di  $\nu$  ProtoDUNE-SP** e **ProtoDUNE-VD**.
- L'implementazione più economica** : una linea di fascio dedicata estratta dalla North Area e diretta verso i rivelatori ProtoDUNE
  - ✓ massimizza l'utilizzo delle strutture già esistenti
  - ✓ estrazione lenta dei protoni facile da implementare
  - ✗ interferenza con altri esperimenti
  - ✗ potenziali problemi di dosi di radiazioni
- L'implementazione più pulita** : costruire una linea di estrazione dedicata vicino alla North Area e diretta verso i rivelatori ProtoDUNE
  - ✓ nessuna interferenza con altri esperimenti
  - ✓ minori problemi di dosi di radiazione
  - ✗ costoso

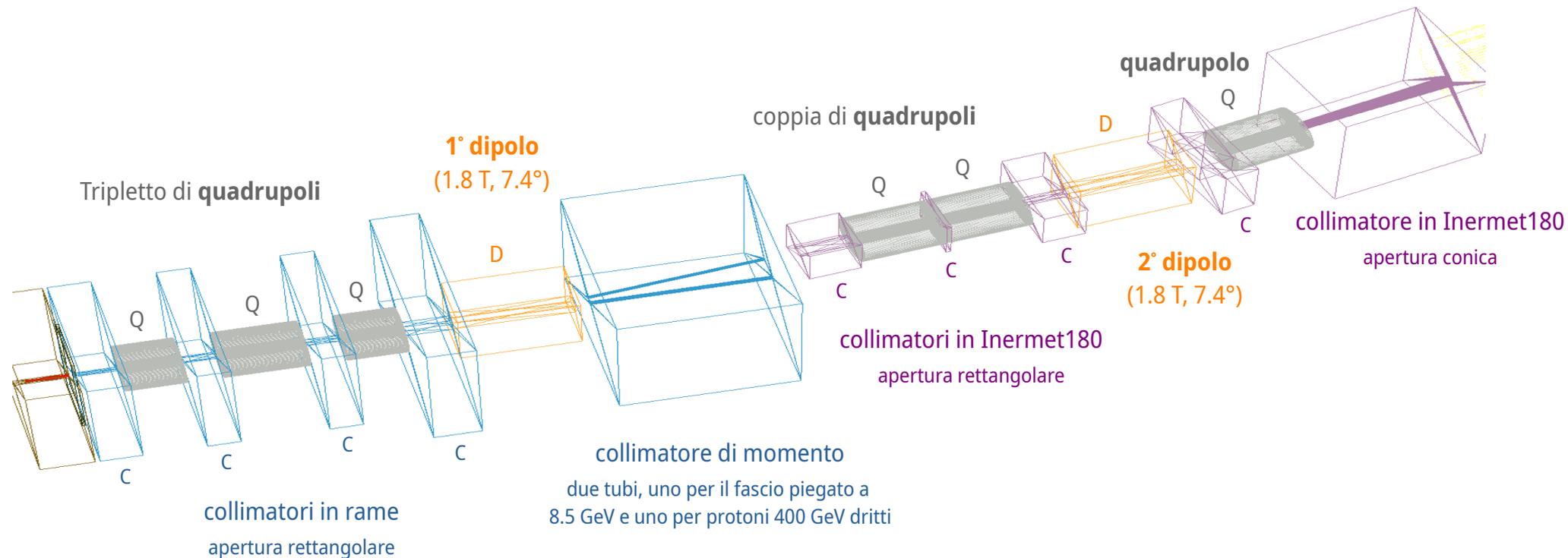


# Conclusioni e prospettive future

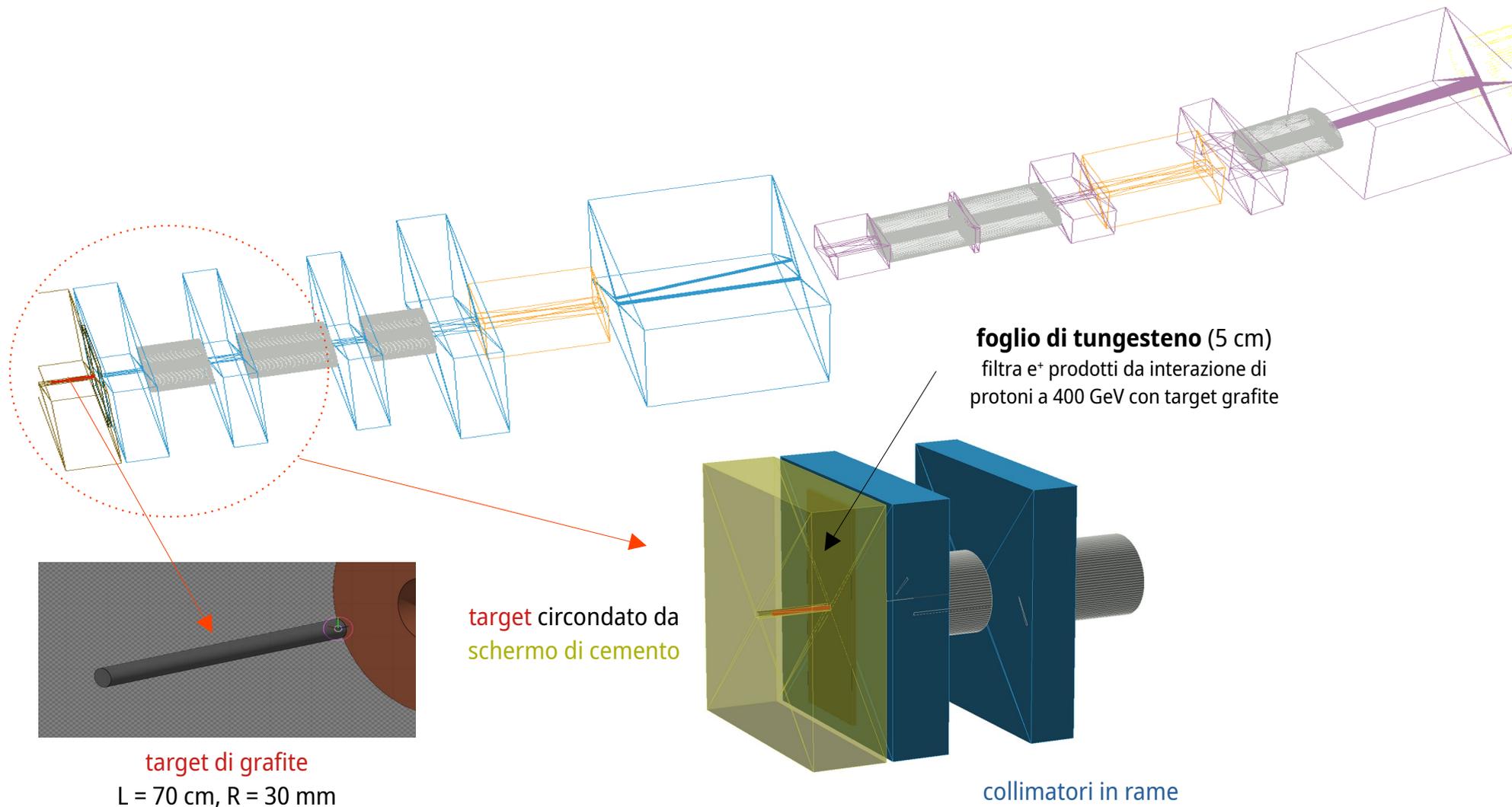
- ENUBET sarà il primo fascio monitorato di neutrini per misure di sezioni d'urto al livello di precisione  $O(1\%)$  :
  - il design finale della linea di fascio consente di ottenere  $\sim 10^4$  eventi  $\nu_e^{CC}$  in  $\sim 2$  anni di presa dati utilizzando SPS
  - design del tunnel di decadimento terminato : dimostratore testato su fascio al CERN in Ottobre 2022
  - simulazione del rivelatore e studi PID : raggiunta una buona identificazione per positroni e muoni
  - impatto della sistematica di adroproduzione sul flusso ridotta al livello dell'1%
  - in corso di valutazione : impatto delle sistematiche di rivelatore e della linea di trasferimento (sottodominanti)
- Studi di implementazione della linea di fascio di NP06/ENUBET alla CERN North Area (Physics Beyond Collider)
- Utilizzo del rivelatore di neutrini NP04/ProtoDUNE-SP e NP02/ProtoDUNE-VD
- Progetto ERC terminato  $\Rightarrow$  preparazione del Conceptual Design Report (2023-2024)  $\Rightarrow$  proposal dell'esperimento atteso nel 2024

# ***Backup***

# La linea di trasferimento di ENUBET : lo schema finale [cont']



# La linea di trasferimento di ENUBET : lo schema finale [cont']



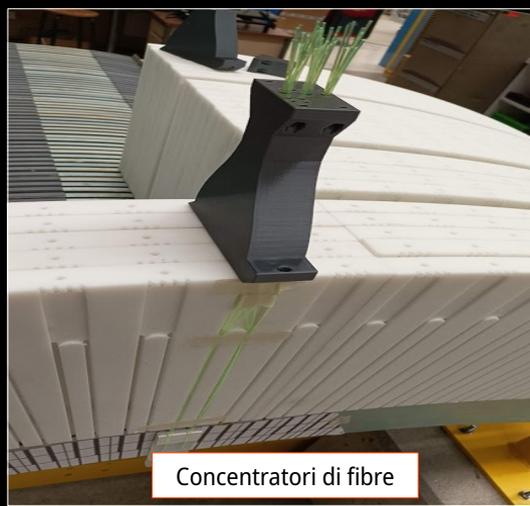
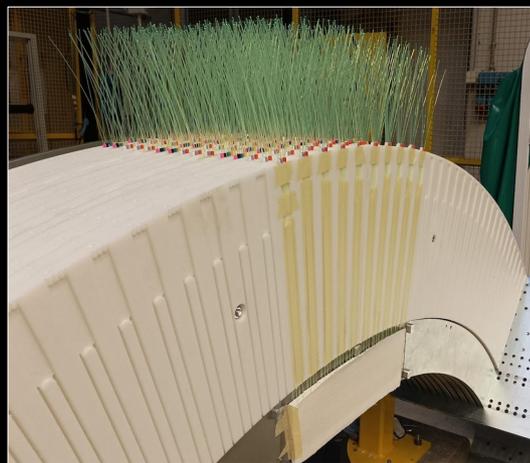
target di grafite  
 $L = 70 \text{ cm}$ ,  $R = 30 \text{ mm}$

**foglio di tungsteno (5 cm)**  
filtra  $e^+$  prodotti da interazione di  
protoni a 400 GeV con target grafite

target circondato da  
schermo di cemento

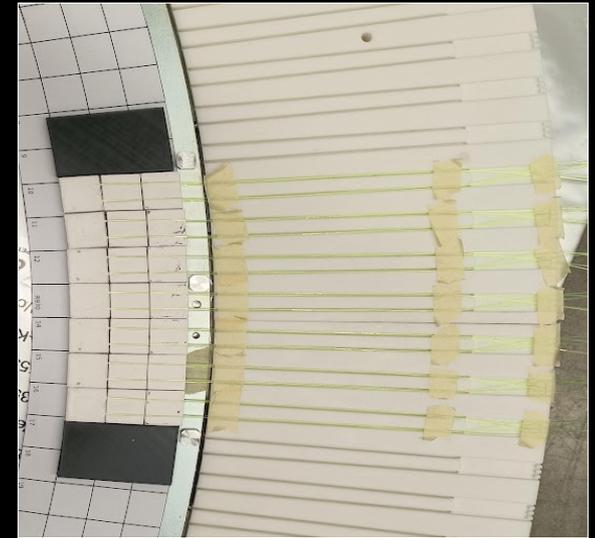
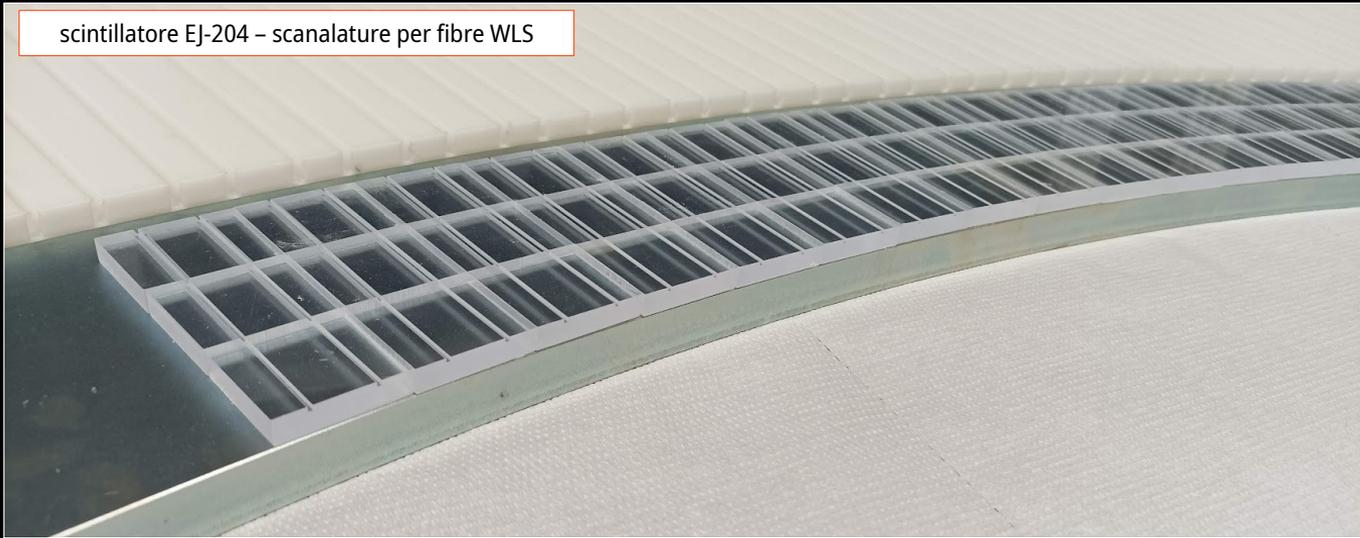
collimatori in rame

# Il dimostratore di ENUBET: costruzione a Legnaro



# Il dimostratore di ENUBET: costruzione a Legnaro [cont']

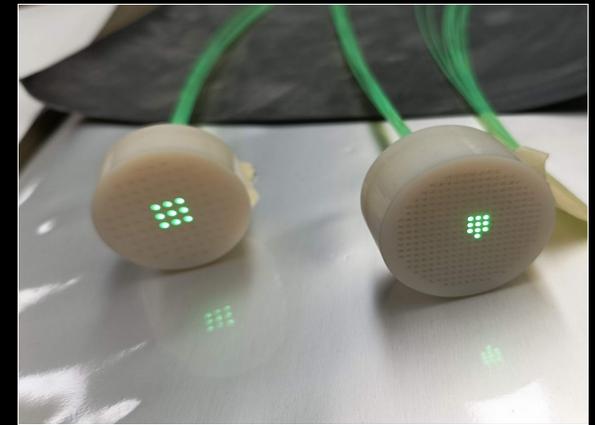
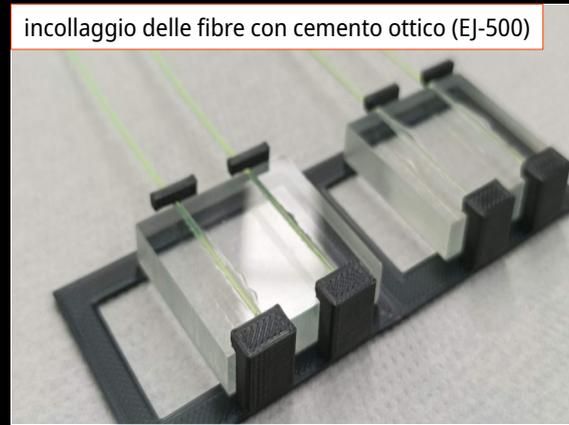
scintillatore EJ-204 – scanalature per fibre WLS



verniciatura riflettente (EJ-510 / TiO2)

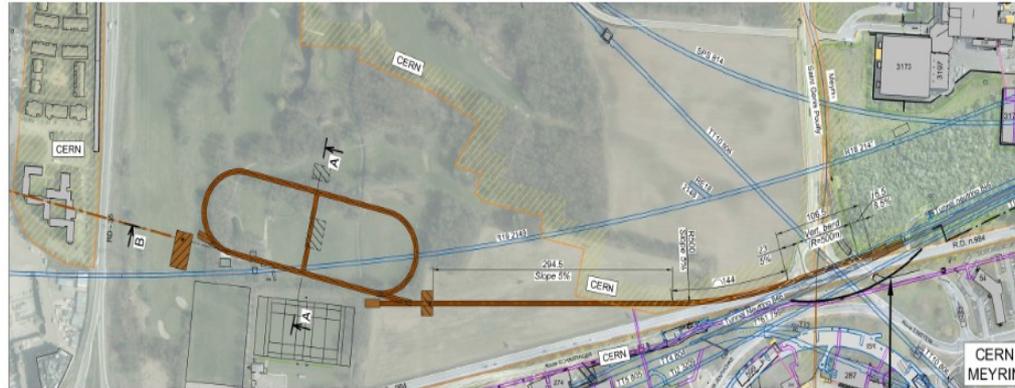
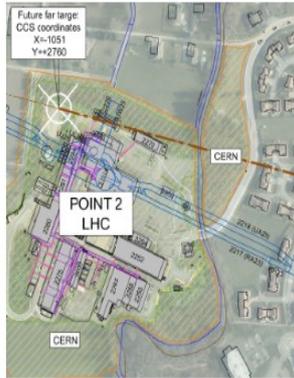


incollaggio delle fibre con cemento ottico (EJ-500)



# L'implementazione di NP06/ENUBET alla CERN North Experimental Area [cont']

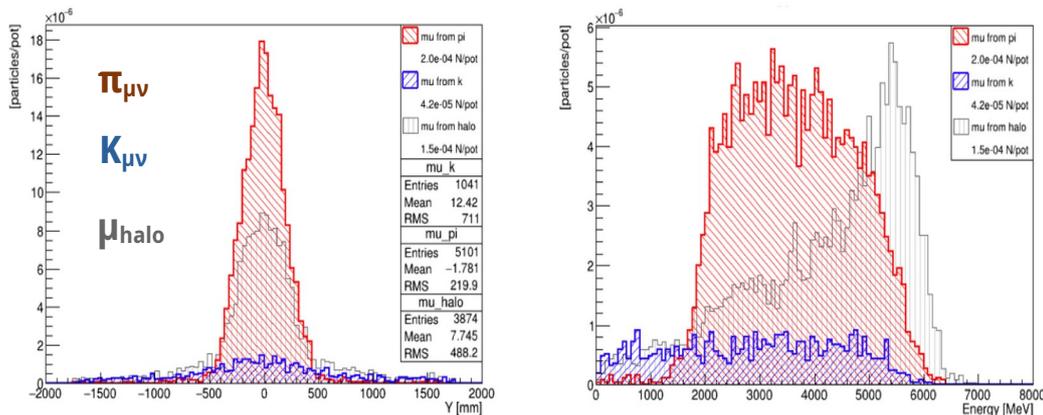
- Nel 2019 è stato condotto uno studio di design – compatibile con ENUBET – ma orientato a **nuSTORM** per una possibile **implementazione di nuSTORM al CERN**, sfruttando una linea di trasferimento esistente a Meyrin (TT60) ... richiede tuttavia un sito dedicato per i rivelatori di neutrini [ C.C. Ahida et al., CERN-PBC-REPORT-2019-003 ]



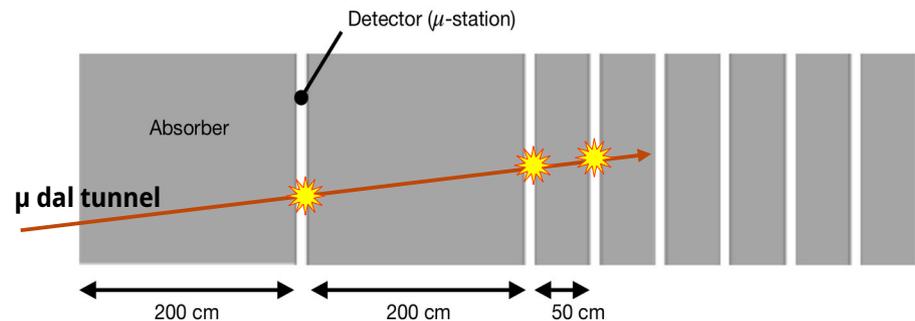
- Una terza opzione di implementazione consiste nell'utilizzare una **linea di estrazione simile a nuSTORM** :
  - ✓ **Relativamente economica**
  - ✗ **Incompatibile con i rivelatori ProtoDUNE nella loro posizione attuale**
  - ✗ **Potenziali problemi nell'estrazione lenta dei protoni**

# Hadron dump instrumentato

- Ricostruzione dei **muoni** dal decadimento dei  $\pi_{\mu\nu}$  ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_{\mu}$ ) per costringere flusso dei  $\nu_{\mu}$  di bassa energia
- **Muoni emessi in avanti a basso angolo**: fuori dall'accettanza del tagger, occorrono **stazioni di muoni dedicate dopo lo hadron-dump**



Sfruttare differenze nelle distribuzioni per disaccoppiare le componenti



- Rivelatore più caldo (stazione davanti) : devono essere capace di sostenere  $\sim 2 \text{ MHz/cm}^2$  di rate di muoni e  $\sim 10^{12} \text{ 1 MeV-neq / cm}^2$
- Possibile tecnologia candidata : rivelatori **Micromega veloci** con **radiatori Cherenkov** (progetto **PIMENT**)