

La fisica dei neutrini al Fermilab



Masterclass di Minerva

Lea Di Noto

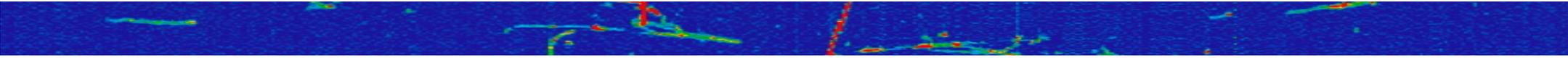


14 marzo 2025



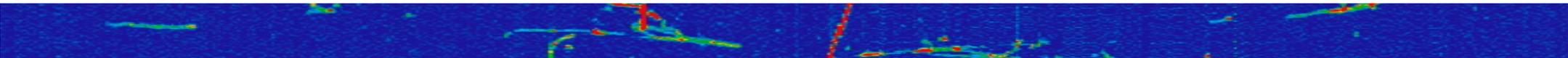
Università
di Genova





Sommario

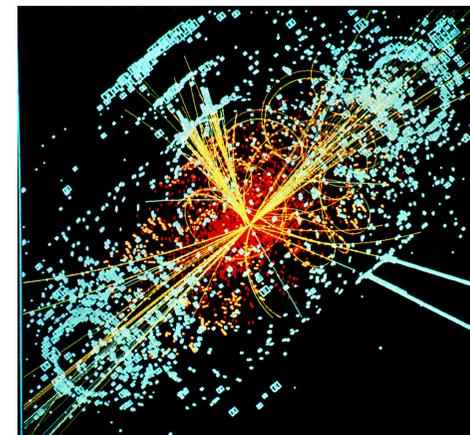
- Introduzione alla fisica dei neutrini
- Le oscillazioni dei neutrini e gli esperimenti
- Cosa è un rivelatore
- Il rivelatore Minerva
- Riconoscere le particelle



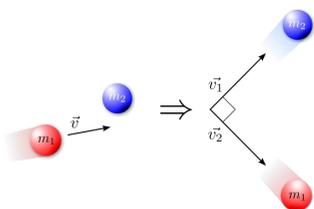
La fisica sperimentale delle particelle

Per studiare/scoprire le diverse particelle e le loro proprietà si sviluppano **esperimenti** che si basano sul fatto che:

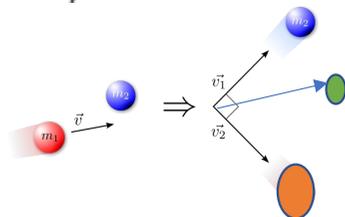
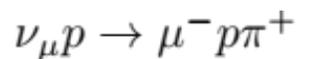
Le particelle possono **interagire**, possono **decadere**, possono essere **create** secondo processi definiti da leggi precise (conservazione dell'energia, conservazione della quantità di moto)



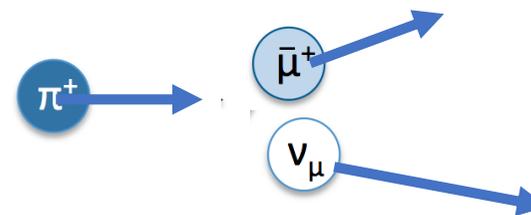
URTI/INTERAZIONI



$$E = mc^2$$



DECADIMENTI



Le particelle possono interagire nel rivelatore ed essere osservate.

Tutte le particelle **cariche** interagiscono con la materia che attraversano e perdono energia,
→ i **rivelatori** sono in grado di produrre un segnale misurabile generato dall'energia depositata

I neutrini

Proprietà

Sono particelle elementari, con carica nulla e una massa piccolissima hanno una probabilità estremamente piccola di interagire con la materia e questo li rende difficili da osservare! (interazione elettro-debole)

Esistono **3 tipi** di neutrini finora osservati: il neutrino dell'elettrone, il neutrino del muone ed il neutrino del tau.

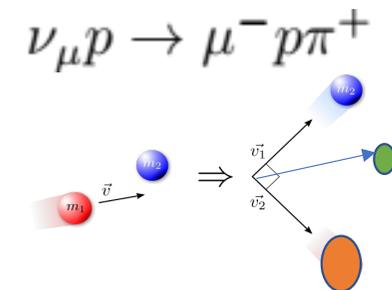
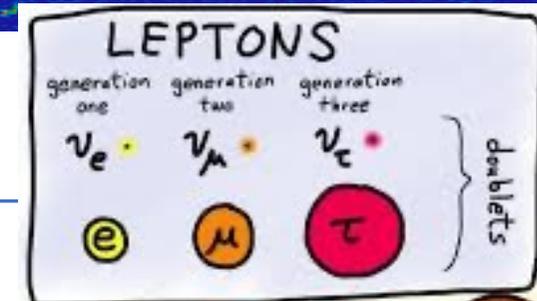
Come li distinguiamo?

Rivelando il leptone che è presente nell'interazione!

Se è il neutrino elettrone che interagisce allora vedrò un elettrone nello stato finale

Come vengono prodotti i neutrini? **Sempre in interazioni elettro-deboli**

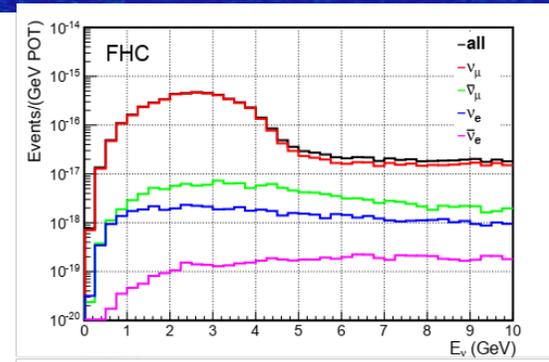
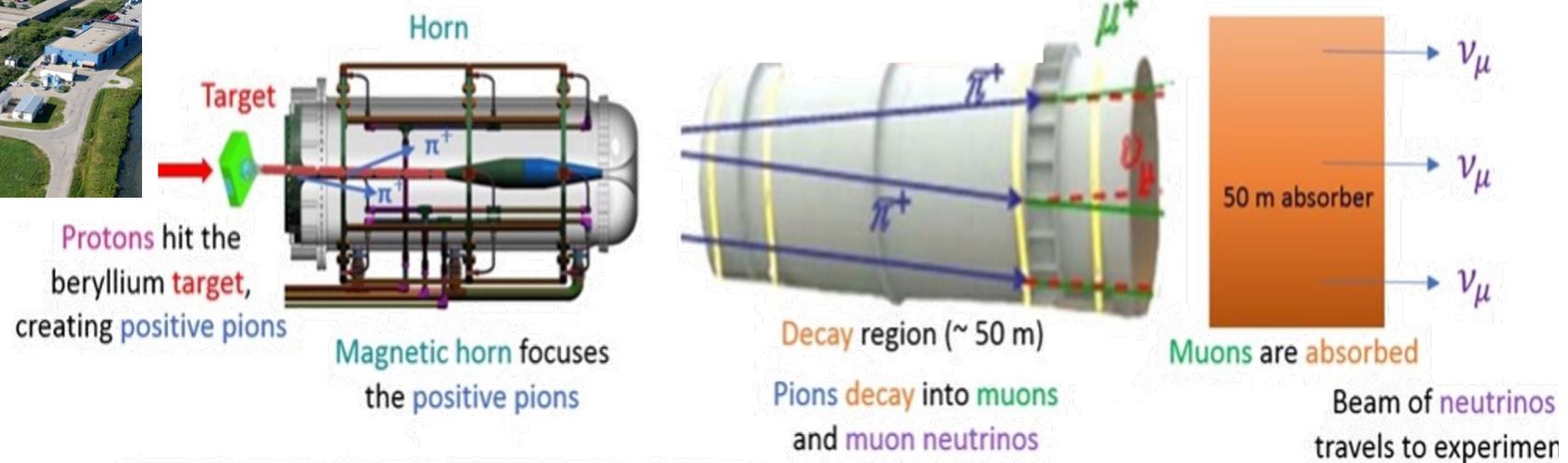
- **Nel Sole**: ne produce circa 10^{38} al secondo e di questi circa 60 miliardi attraversano ogni cm^2 della superficie terrestre ogni secondo,
- **Nell'atmosfera**: dall'interazione dei raggi cosmici in atmosfera,
- **Dal Big Bang**, dalla nostra stessa **Terra** (geoneutrini).
- Nei **reattori nucleari** o agli **acceleratori** di particelle



I neutrini prodotti al Fermilab



Come produrre un fascio di neutrini



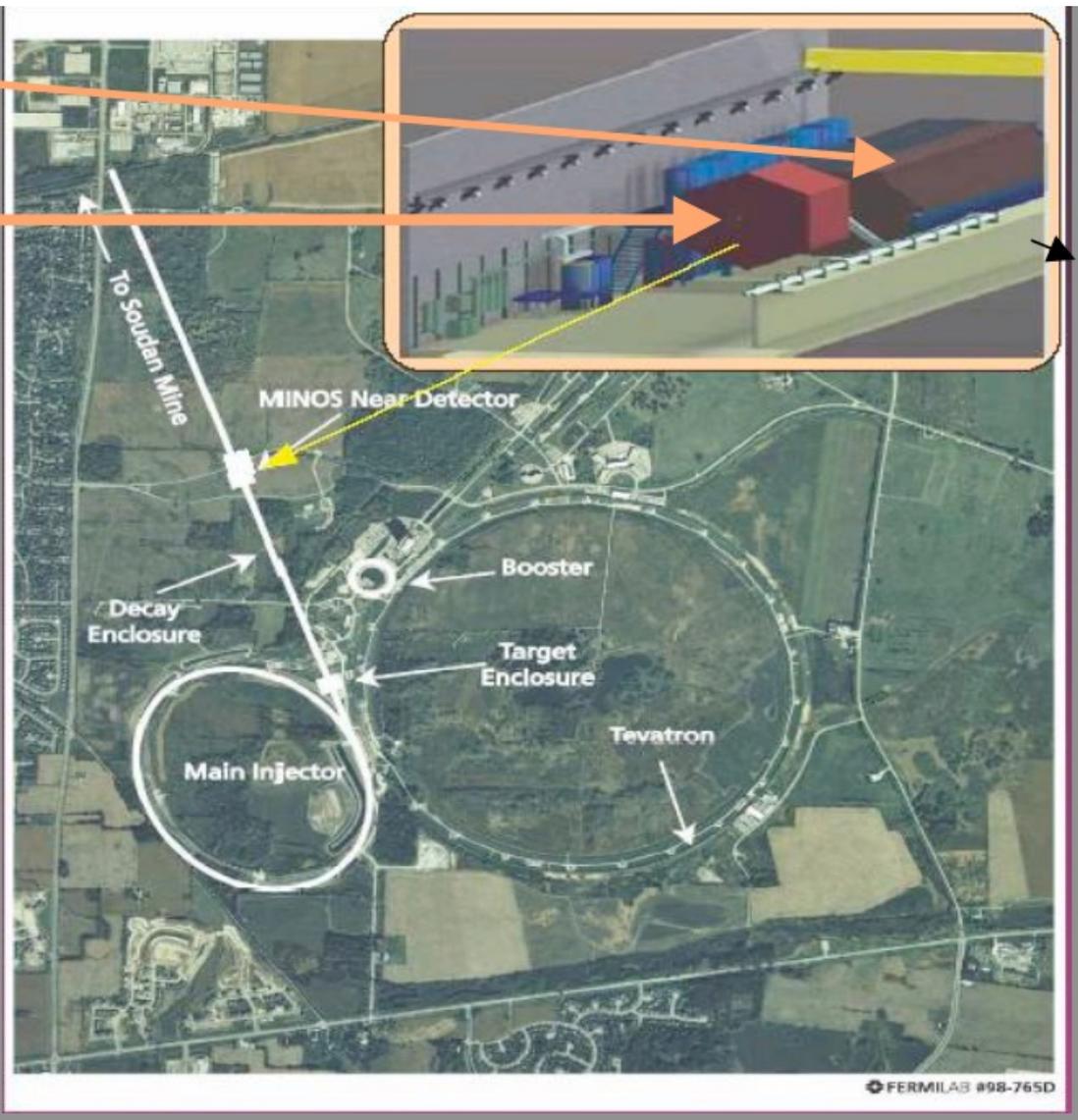
Il fascio contiene neutrini

-> in un range di energia (non hanno tutti la stessa energia)

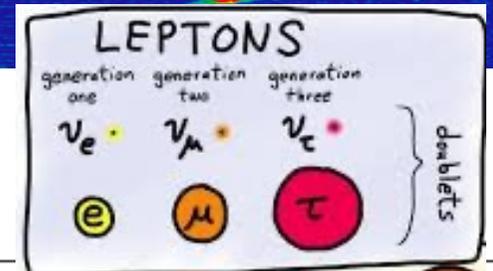
-> prevalentemente muonici, ma c'è anche una piccola componente elettronica

MINOS ND

MINER_vA



Le oscillazioni dei neutrini



Le osservazioni hanno dimostrato che lungo il loro cammino possono cambiare "aspetto": un neutrino-muone può ad esempio trasformarsi in un neutrino-elettrone.

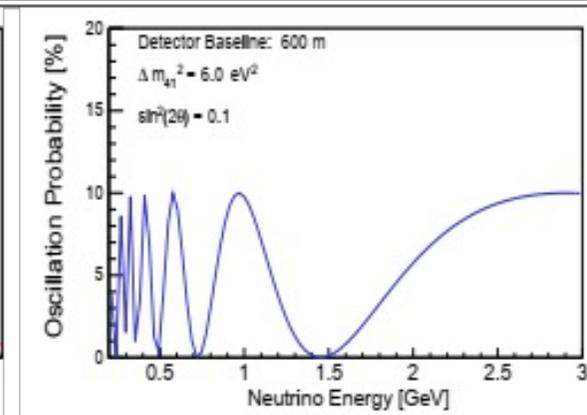
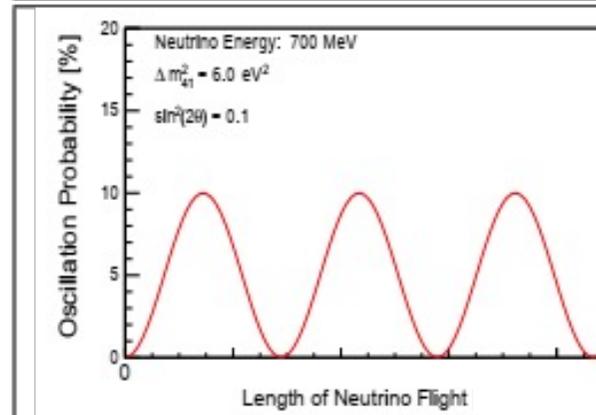
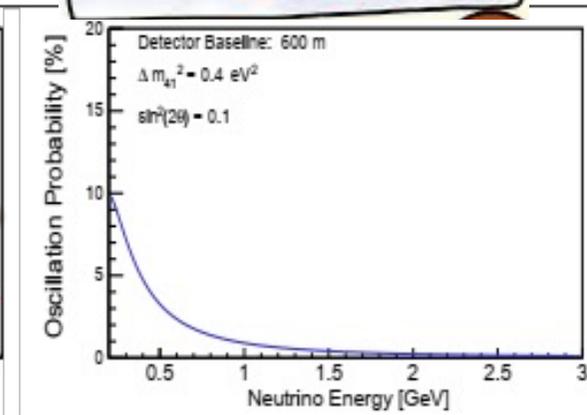
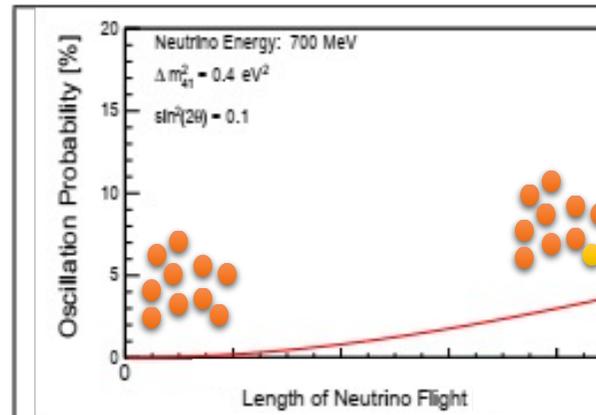
La probabilità di trasformazione dipende da L/E

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = A \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E_{\nu}} \right)$$

I neutrini oscillano!!

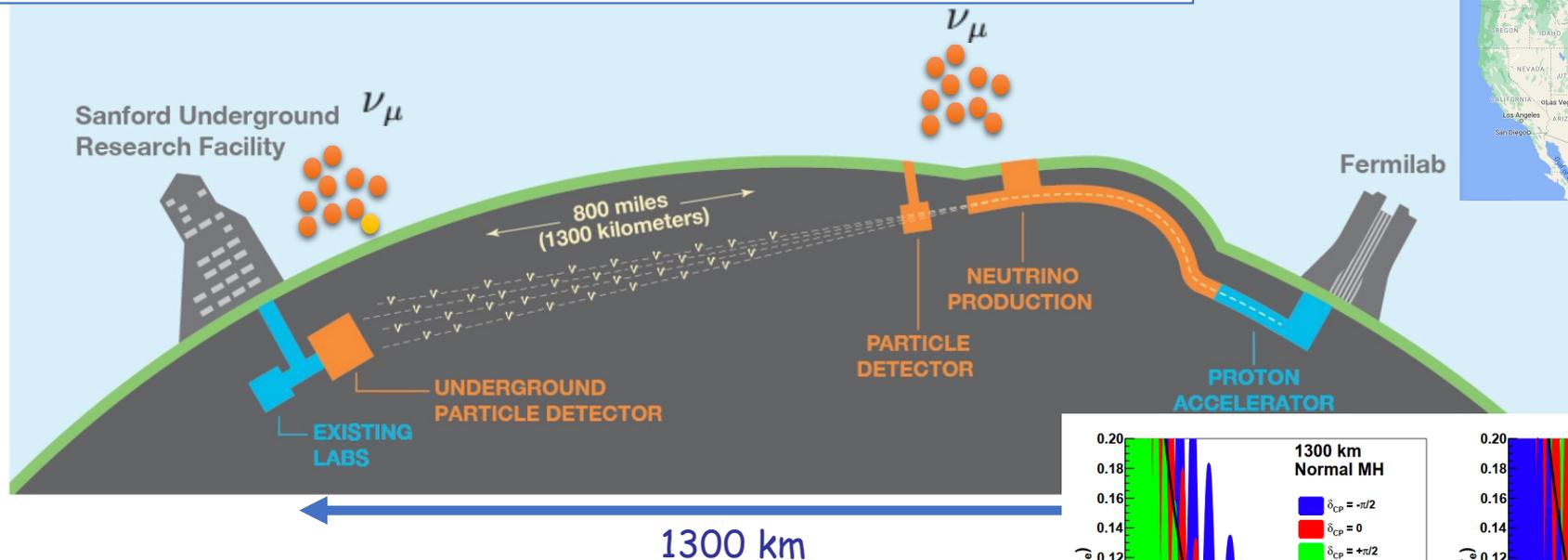
→ $\Delta m \neq 0$: non è previsto dal MODELLO STANDARD!!

→ CI SONO TANTI PARAMETRI DA MISURARE!



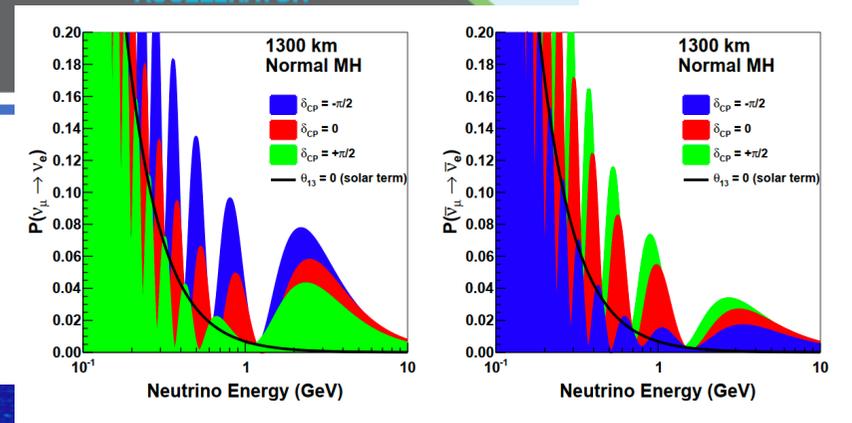
Gli esperimenti per la misura delle oscillazioni

MODELLO DELLE OSCILLAZIONI: i neutrini oscillano se percorrono grandi distanze

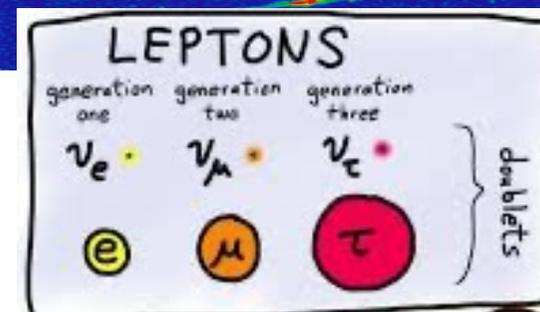


A lunga distanza per misurare bene tutti i parametri (specialmente quelli ancora non conosciuti)!!

$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} \stackrel{?}{=} P_{\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e}$$



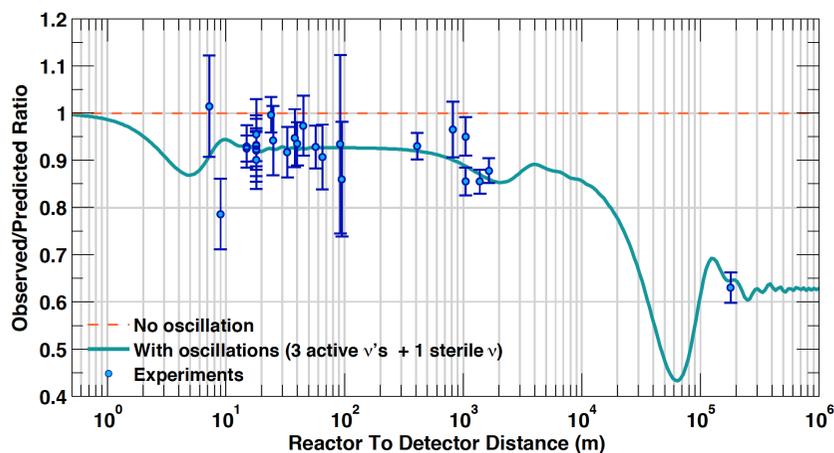
Eppure qualcosa non torna...



Se il nostro rivelatore è a corta distanza (<1 Km) non dovrei vedere nessuna oscillazione, ...
e invece alcuni esperimenti indipendenti hanno misurato:

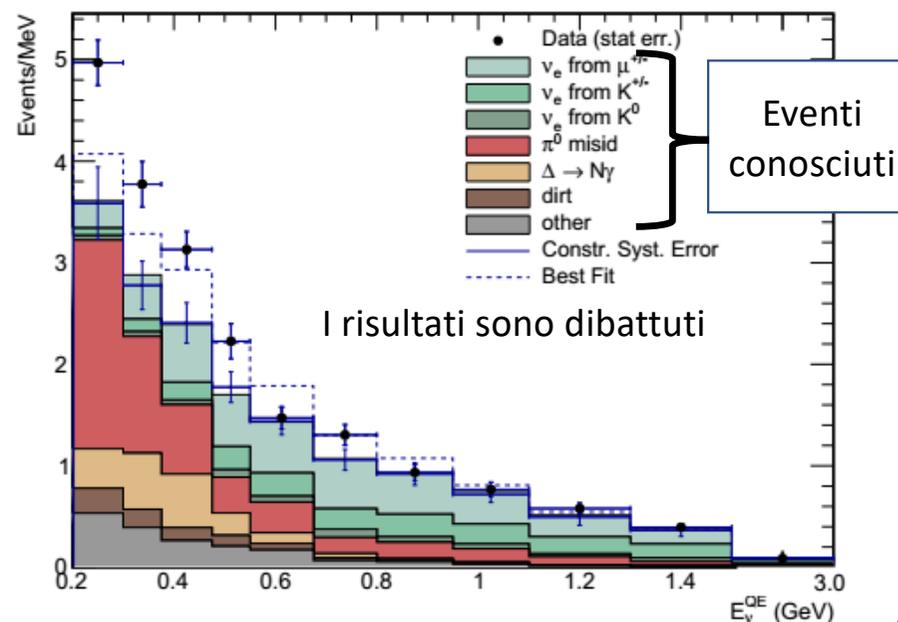
meno neutrini elettronici di quelli previsti

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \neq 0$$

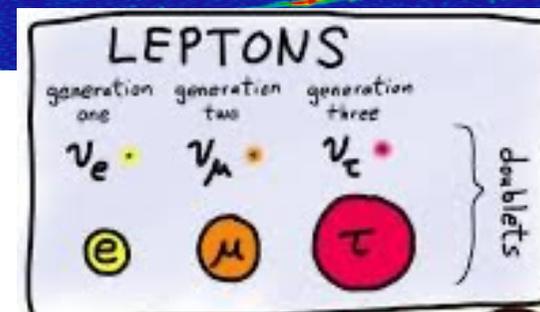


un eccesso di neutrini elettronici da un fascio di neutrini muonici

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} \neq 0$$



Eppure qualcosa non torna...

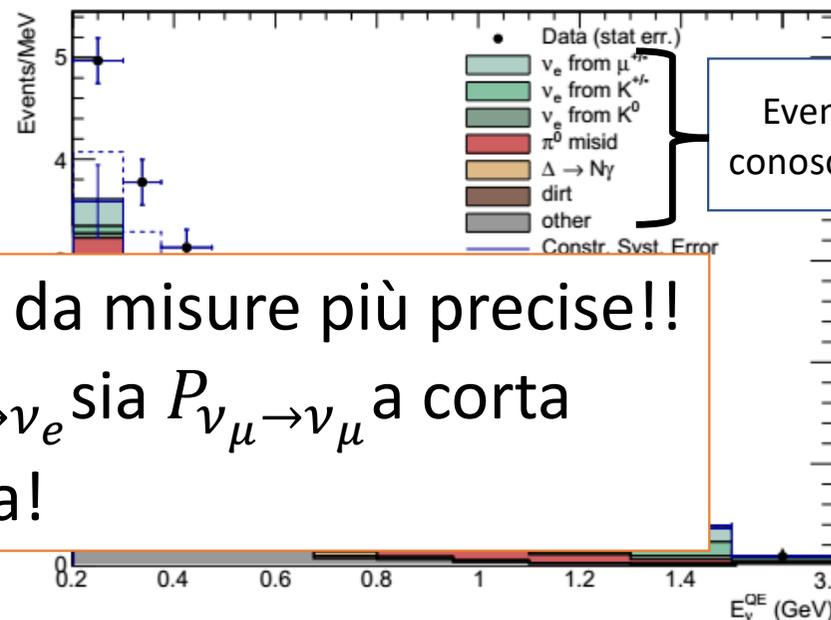
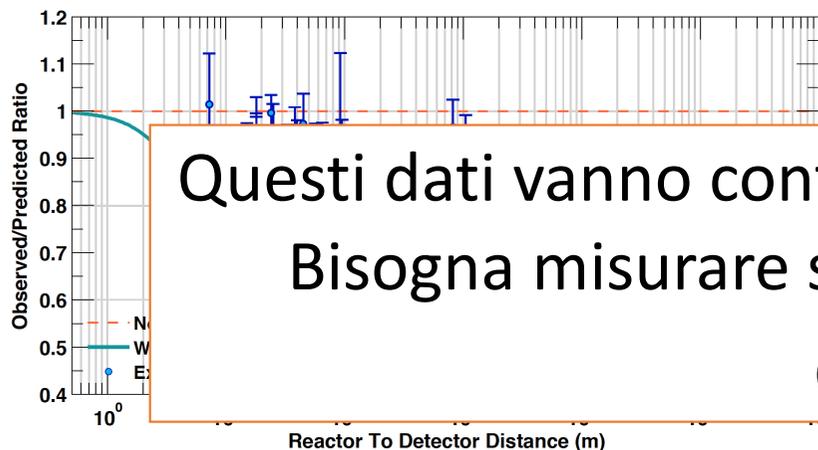


Se il nostro rivelatore è a corta distanza (<1 Km) non dovrei vedere nessuna oscillazione, ...
e invece alcuni esperimenti indipendenti hanno misurato:

un eccesso di neutrini elettronici da un fascio di neutrini muonici
 $P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} \neq 0$

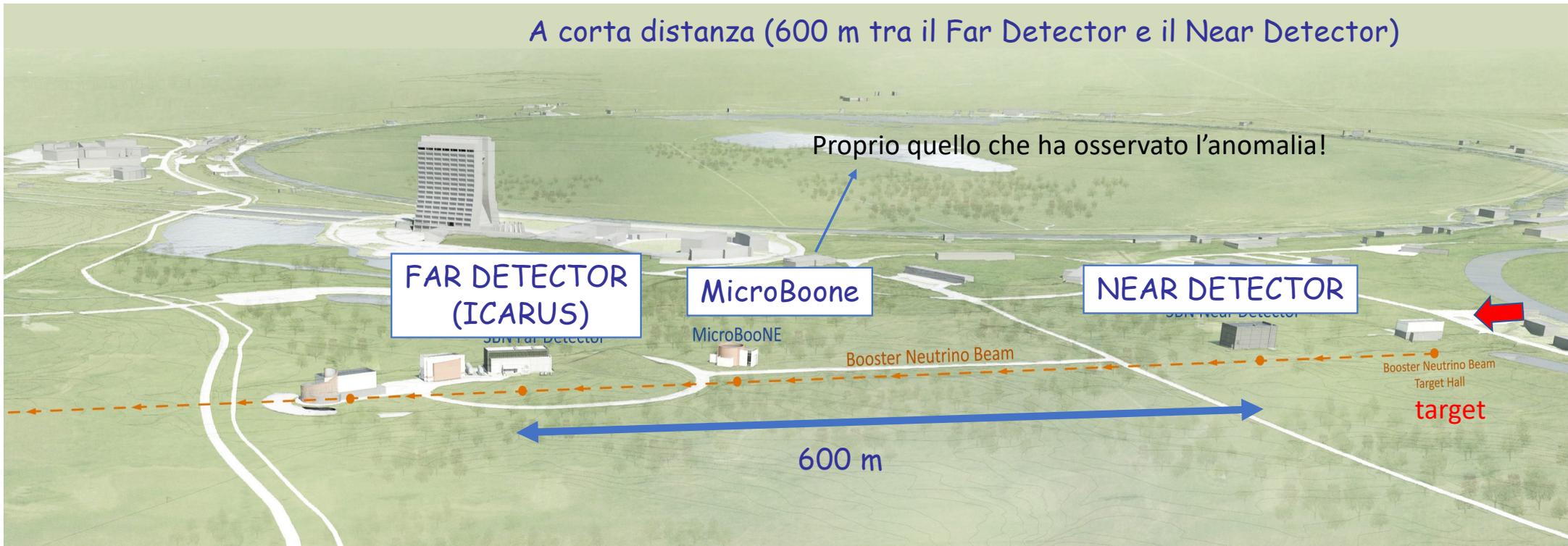
meno neutrini elettronici di quelli previsti

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} \neq 0$$

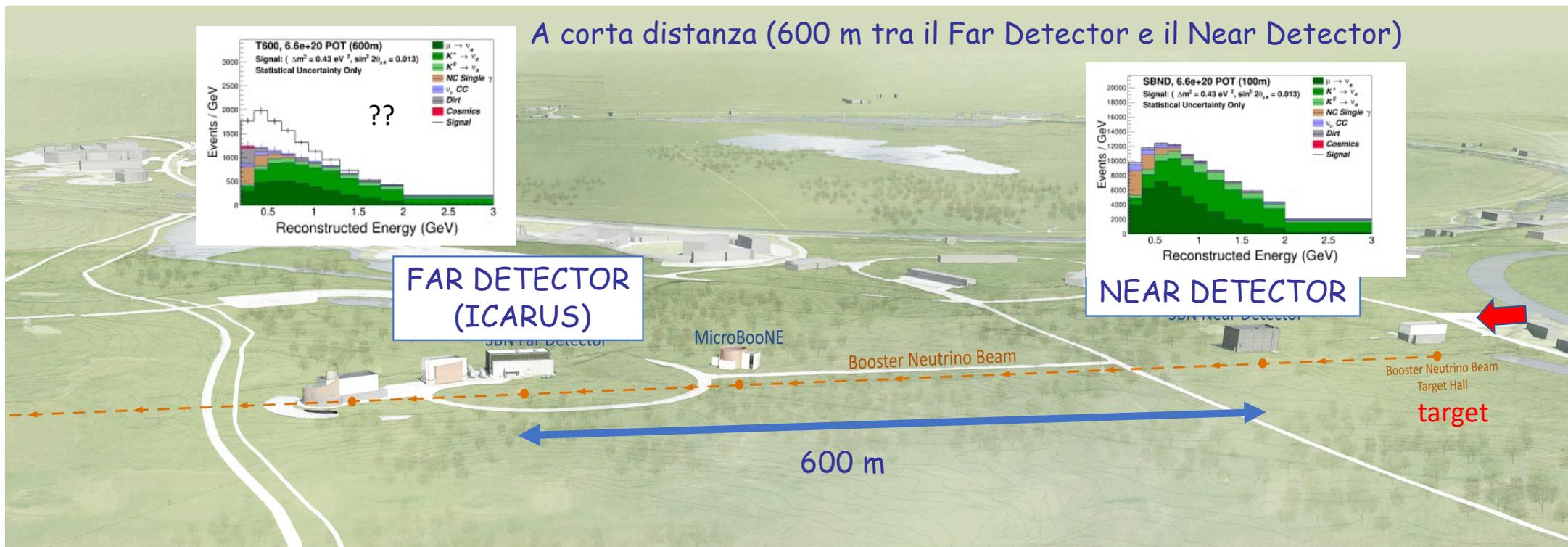


Questi dati vanno confermati da misure più precise!!
 Bisogna misurare sia $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}$ sia $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}$ a corta distanza!

Gli esperimenti per la misura delle oscillazioni



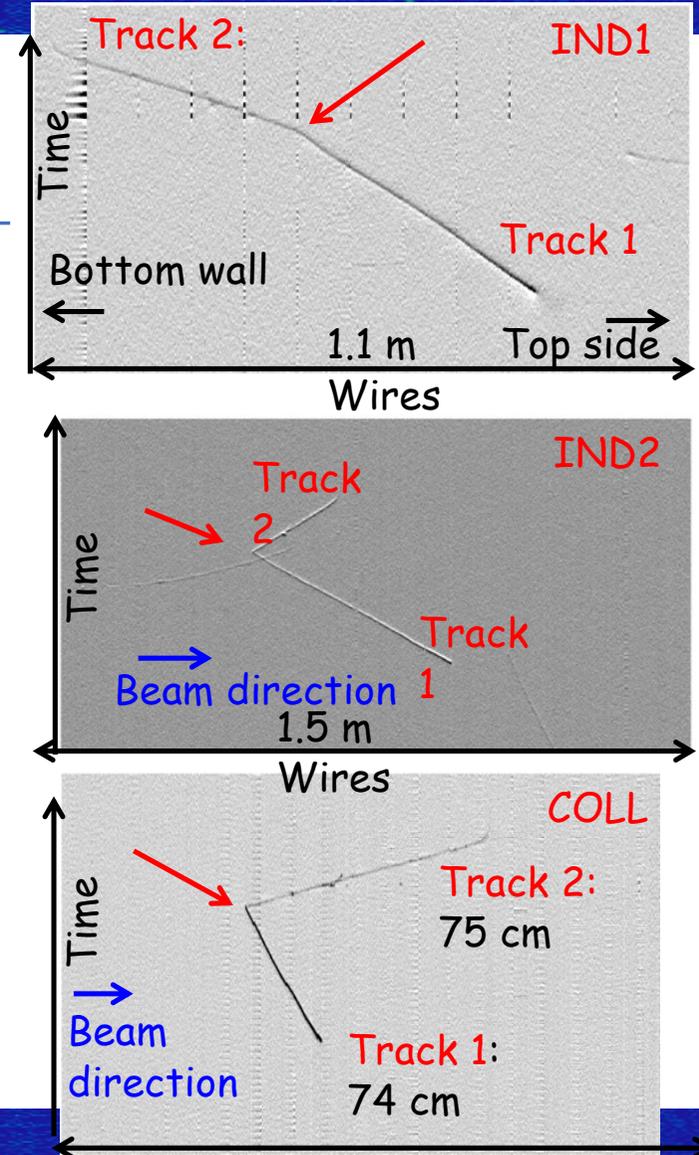
Gli esperimenti per la misura delle oscillazioni



Per risolvere un «puzzle»

Il vero segnale per icarus

- Interazioni di neutrino nel volume attivo: 2000 eventi/giorno
- Interazioni di neutrini muoni: 1900 eventi/giorno
- Interazioni di neutrini in cui non si conosce il sapore: 100 eventi/giorno
- Interazioni di neutrini elettronici presenti nel fascio : 500/ anno!
- Interazioni di neutrini elettronici se oscillano: 200/anno!

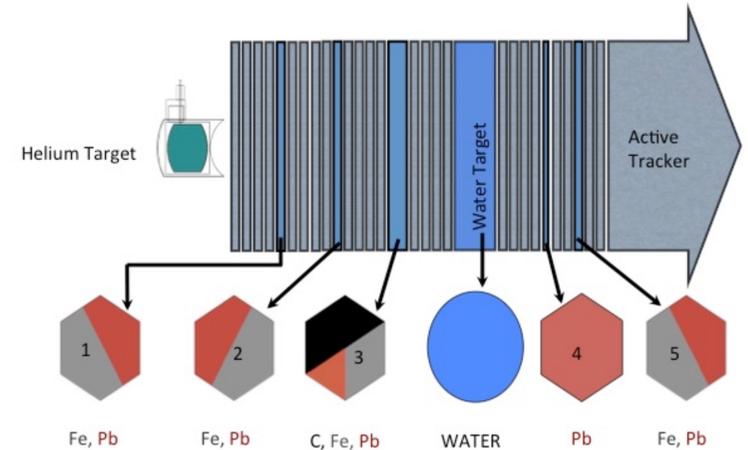
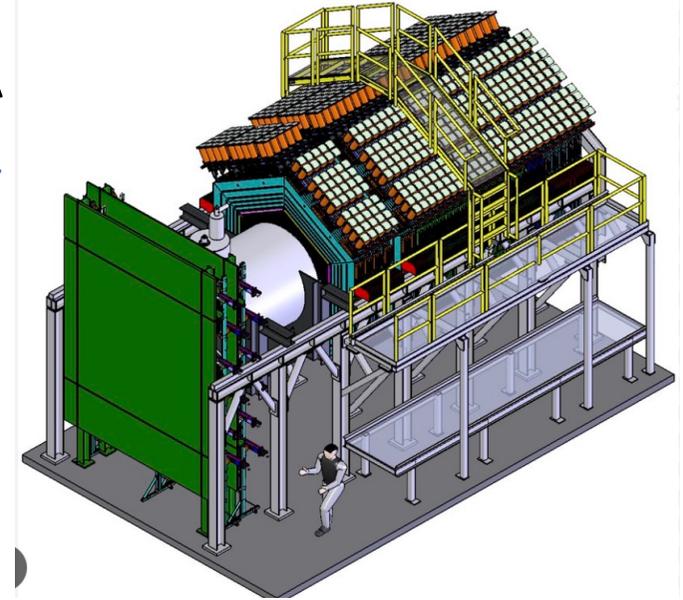


Minerva: Main INjector ExpeRiment for ν -A

Progettato per realizzare misure ad alta precisione delle interazioni di neutrino su una varietà di materiali quali : acqua, carbonio, elio, ferro, piombo e plastica.

Situato ad 1 km from the target
Rivela i neutrini dei fasci BNB e NuMI del Fermilab
Energia dei neutrini (GeV)

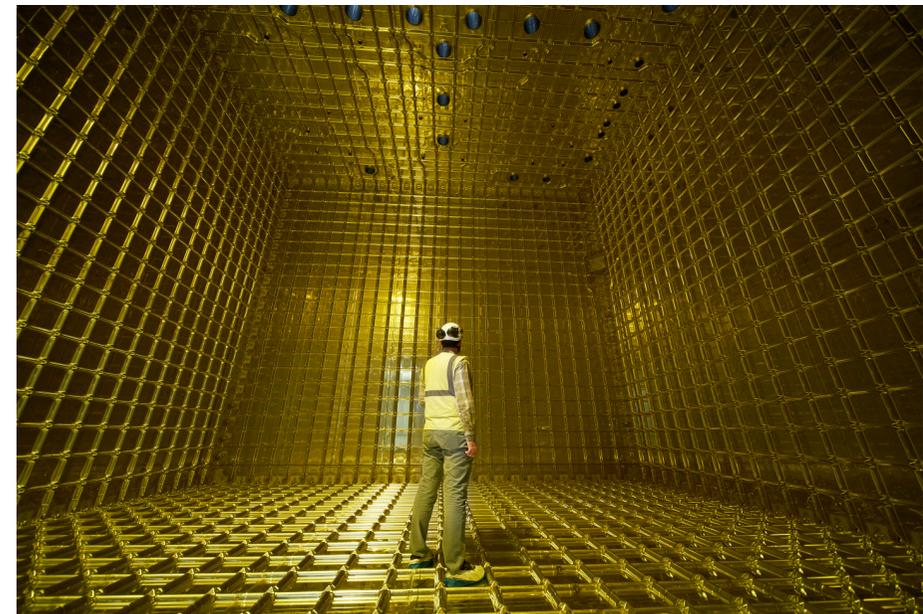
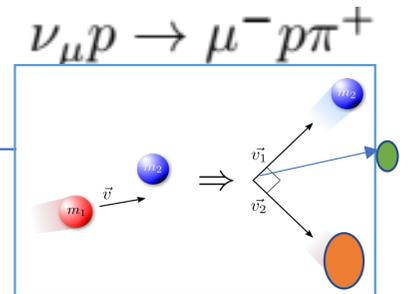
In combinazione con Minos (secondo rivelatore per la misura del momento dei muoni)



I rivelatori

Come possiamo osservare i neutrini?

- Osservando nel modo migliore possibile le **particelle prodotte** dalle interazioni
 - Le particelle cariche passando nel rivelatore perdono energia producono un segnale visibile
 - Le particelle neutre si vedono solo se interagiscono e producono altre particelle o se decadono
-
- Le probabilità di oscillazione sono piccole e il fascio non è formato da neutrini di un solo tipo
 - La probabilità di interazione dei neutrini nel rivelatore sono basse: 1 neutrino ogni $2 \cdot 10^{15}$ protoni al target
 - Servono **fasci intensi e rivelatori molto grandi!!**
(più si è lontano più i rivelatori devono essere grandi!!)
 - DUNE: 160 000 ton (1300 km). 4 moduli: 60 m x 10 m x 10 m
 - ICARUS: 600 ton (600 m) 1 modulo: 18 m x 6 m x 3 m
 - MINERVA 5 ton



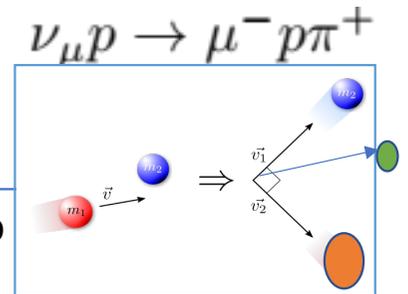
I rivelatori di particelle

Un rivelatore è uno strumento che si utilizza in fisica per identificare il passaggio di particelle.

Sebbene esistano tanti tipi di rivelatori molto diversi fra loro, il principio di base del loro funzionamento è il **trasferimento di una parte dell'energia della particella incidente** alla massa del rivelatore.

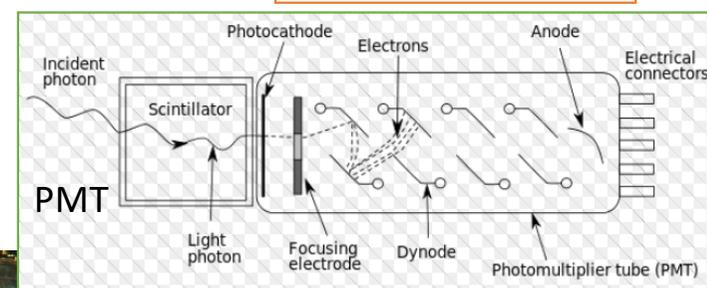
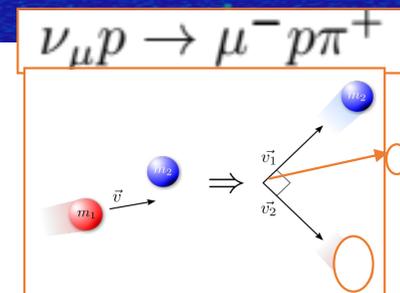
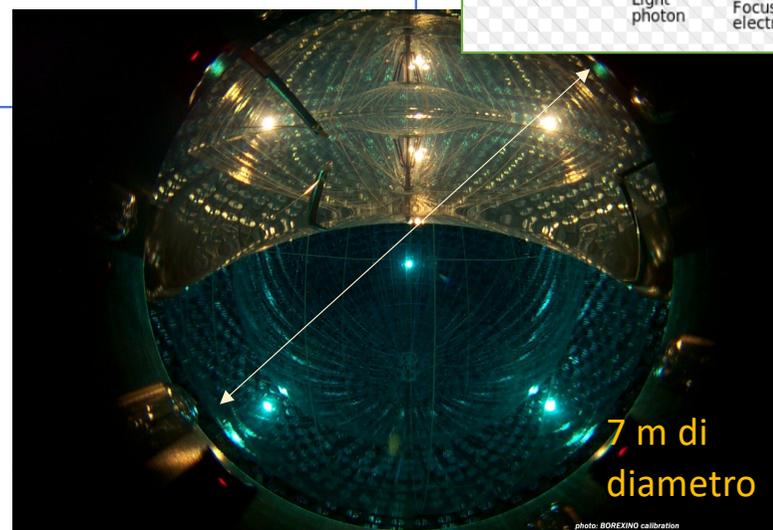
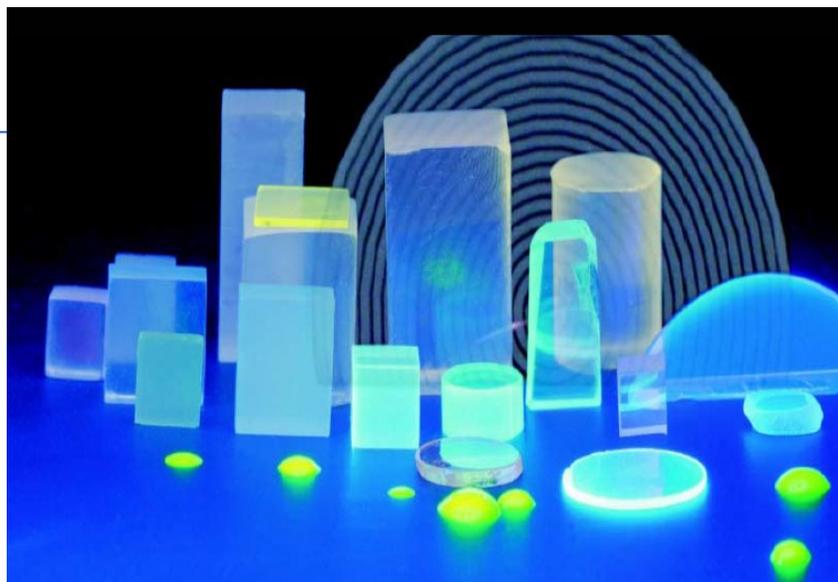
L'energia rilasciata viene convertita in un segnale misurabile (generalmente un segnale elettrico) che ci permette di ottenere diverse informazioni:

- Quale/quali particelle hanno attraversato il rivelatore;
- Quanta energia hanno rilasciato nel materiale di cui è costituito.



Gli scintillatori

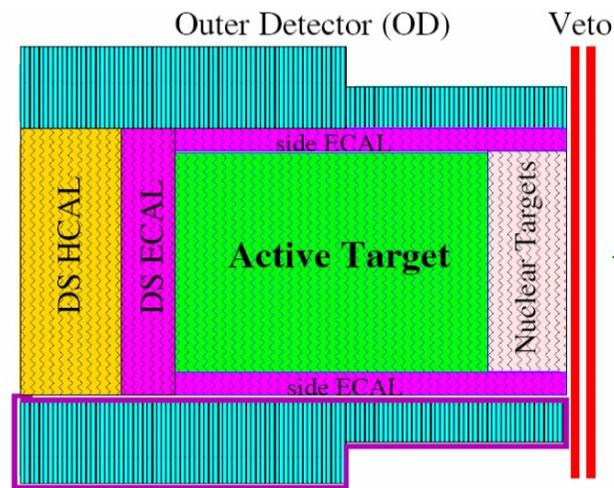
Sono rivelatori basati sulla proprietà di alcuni materiali di emettere un **lambo di luce** se colpiti da una particella (*luminescenza*). Generalmente viene accoppiato a uno strumento PMT che amplifica il segnale luminoso e lo converte in un impulso elettrico.



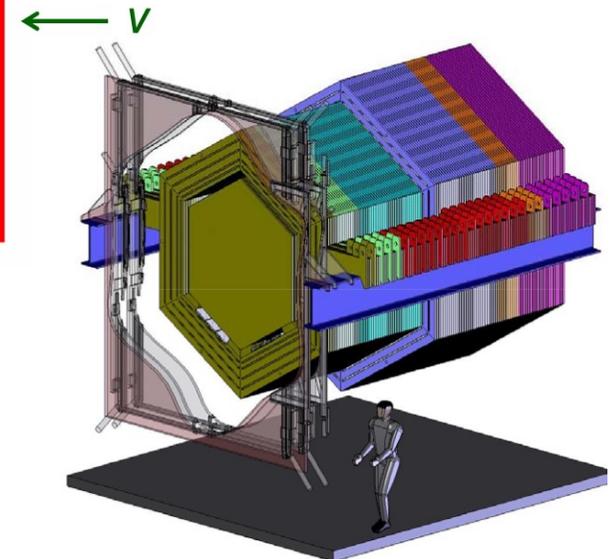
Minerva: Main INjector ExpeRiment for ν -A

Costituito da tanti piani esagonali trasversali:

- target
- un tracciatore interno
- 2 calorimetri
- rivelatori esterni per veto



5.87 ton active segmented scintillator target



~1 ton of nuclear targets (C, Fe, Pb) intermingled with the upstream planes

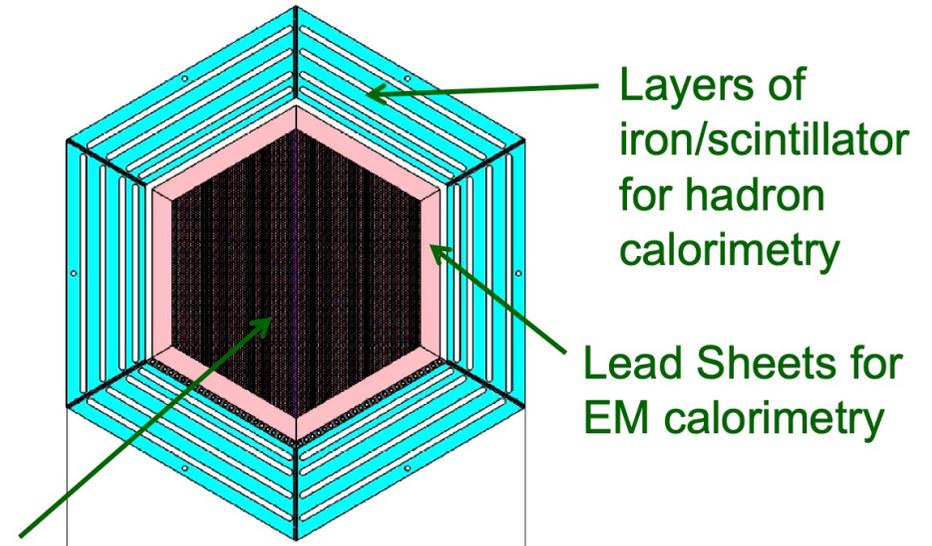
Il tracciatore e i calorimetri

Active tracker

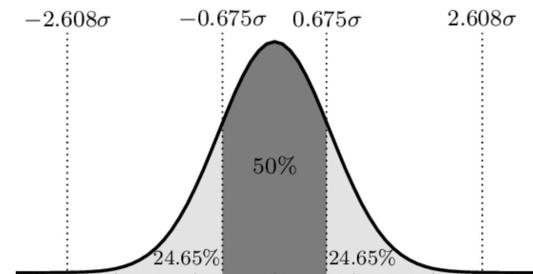
Costituito da 200 pannelli esagonali, ciascuno costituito da 127 barre a sezione triangolare di scintillatori plastici con una fibra ottica al centro di ciascuna barra

Le regioni del calorimetro contengono barre di scintillatore intervallate da piani di piombo o alluminio → per i pioni e neutroni

Misura di p: 8% per i muoni, 2 % per i protoni

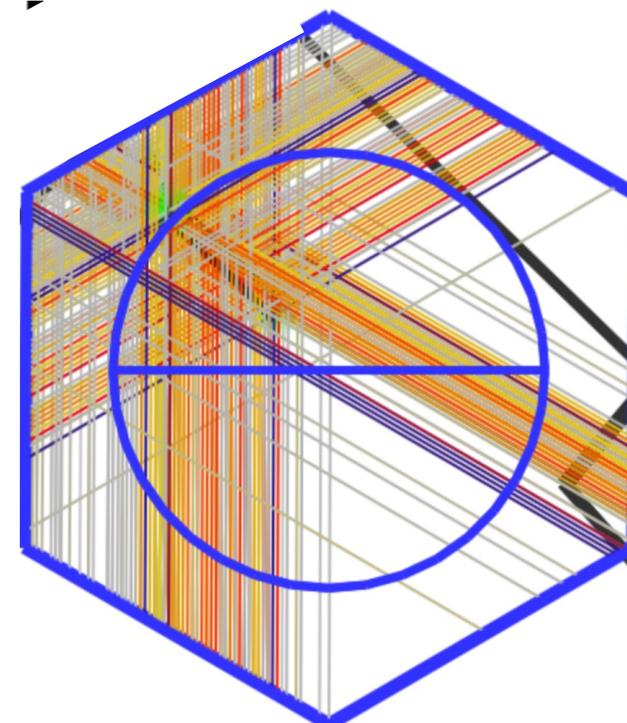
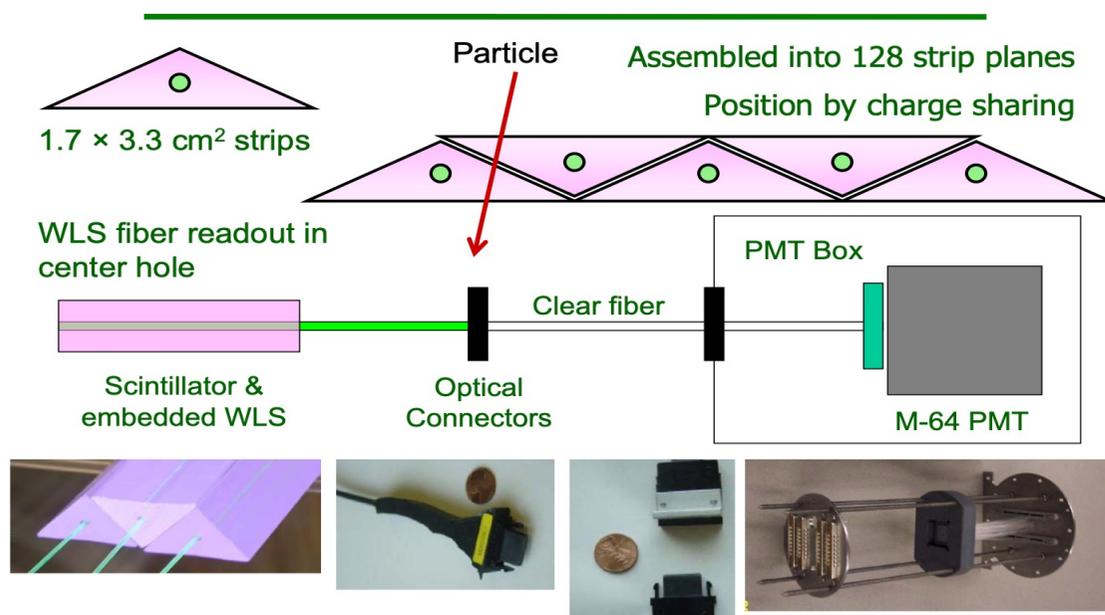


Inner Detector – X, U, V planes for stereo view

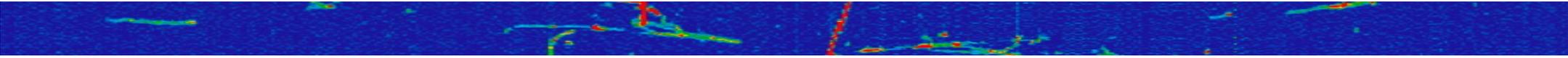


Gli scintillatori

Ogni pannello è costituito da 127 barre a sezione triangolare di scintillatori plastici con una fibra ottica al centro di ciascuna barra



Gli scintillatori sono disposti su 3 angoli per ricavare le 3 coordinate 3D



Gli eventi di neutrino

Questo rivelatore fornisce la possibilità di fotografare le interazioni che avvengono al suo interno secondo 3 angolazioni diverse e cio' permette di ricostruire l'evento raccolto in 3D con una **precisione di 1 mm** sulle coordinate ricostruite.

Un'interazione di neutrino si riconosce dal fatto che, da un punto all'interno del rivelatore, partono piu' particelle e questo avviene in tutte e tre le viste!!

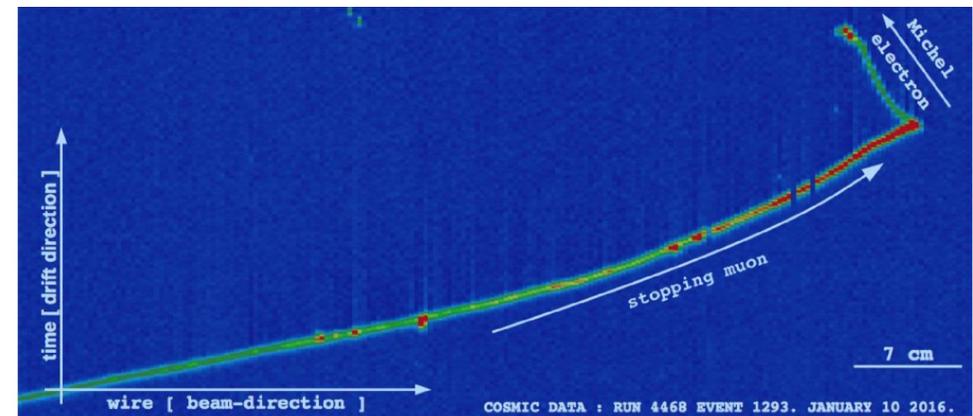
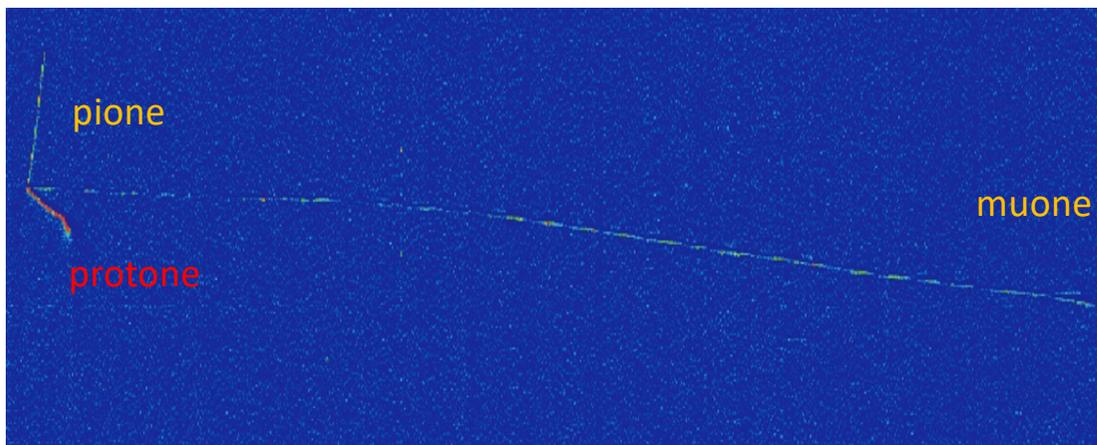
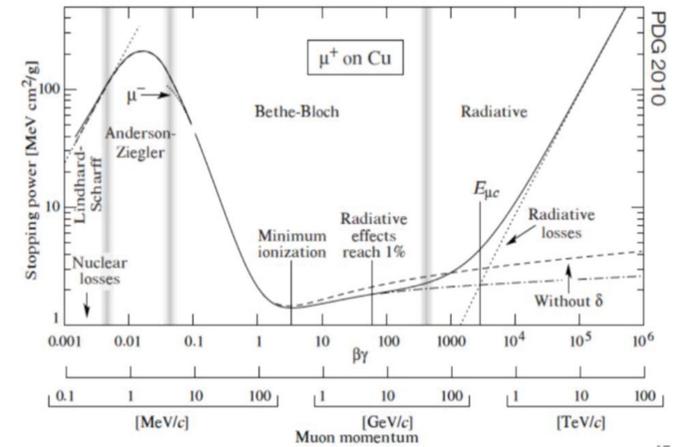
Possiamo ricostruire:

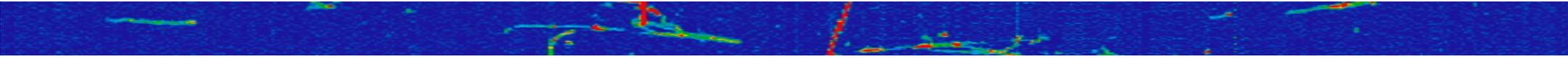
- Il tempo dell'interazione (dalla luce raccolta)
- La posizione dell'interazione
- L'impulso complessivo → deve essere nella direzione del fascio e non dall'alto al basso
- L'energia totale rilasciata → l'energia del neutrino
- Se tutte le particelle si fermano nel rivelatore → l'evento è interamente contenuto e quindi l'energia del neutrino è misurata con maggiore precisione
- Il tipo di particelle prodotte nell'interazione → il tipo di neutrino che ha interagito

I muoni e i protoni

I muoni sono più leggeri dei protoni e perdono meno energia per unità di spazio percorso (valore circa costante)

I protoni interagiscono di più e perdono molta energia in poco spazio (traccia corta)

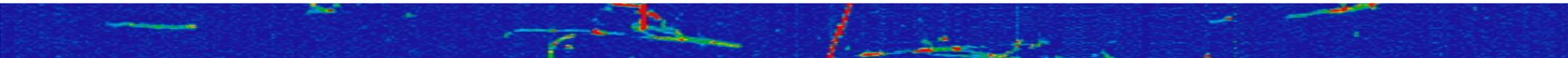




Cosa fa il fisico sperimentale?

- **Progetta, costruisce e conduce** esperimenti per:
 - verificare o confutare le ipotesi formulate dai fisici teorici
 - fornire nuove osservazioni che possono fornire spunti per nuove e più complete teorie.

- **Competenze di un fisico sperimentale** delle particelle
 - Rivelatori (interazione particelle-materia)
 - Elettronica (per “leggere” i segnali prodotti nel rivelatore)
 - Acquisizione e elaborazione dati
 - (software sviluppato ad hoc, non esistono software “commerciali” adatti allo scopo)
 - Statistica (per l’interpretazione e la comprensione dei risultati)
 - Fisica delle particelle (bagaglio minimo per poter discutere con un teorico)



STEAM INFN Summer Camp

Quest'estate, dal 13 al 17 luglio 2025, si terrà a Bertinoro (in provincia di Forlì-Cesena, Emilia-Romagna) lo **STEAM INFN Summer Camp**.

Il Summer Camp fornisce l'opportunità di approfondire i temi della fisica delle particelle, del supercalcolo e dell'intelligenza artificiale, ma anche di imparare nuove strategie comunicative che mettono insieme storytelling, fumetti, giochi e scienza. In allegato trovate una brochure con maggiori informazioni.

Gli studenti che hanno partecipato alle Masterclass hanno la possibilità di vincere uno dei sei posti riservati dalla CC3M, partecipando a un quiz di selezione. I sei vincitori avranno vitto, alloggio ed attività didattiche offerte dall'INFN e dovranno sostenere solo le spese per il viaggio.

Chi desidera partecipare a questa selezione deve registrarsi (sulla pagina delle masterclass) e caricare il **Modulo Informativa Trattamento dei Dati Personali** (firmato dai genitori se minorenne).

Faremo oggi un quiz per l'ammissione