



**O**scillation  
**P**roject with  
**E**mulSION  
**tR**acking  
**A**pparatus

L'esperimento OPERA per la  
ricerca delle oscillazioni  $\nu_{\mu} - \nu_{\tau}$   
con fascio di neutrini del CERN

**Corso: FNSN II**

**Tutor: Pier Ferruccio Loverre**

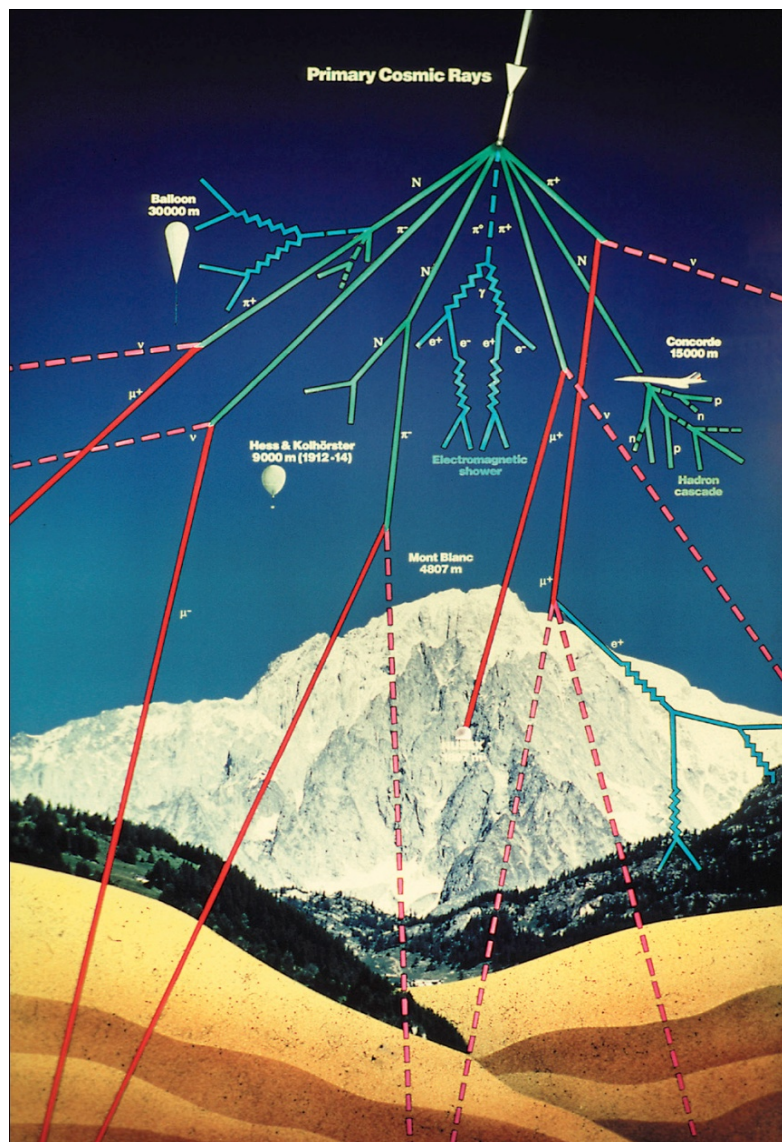
**Professore: Carlo Dionisi**

**Studente: Alessandro Minotti**

# Indice

- La scoperta delle oscillazioni del neutrino
- Teoria delle oscillazioni di neutrino
- L'esperimento OPERA per lo studio dell'oscillazione  $\nu_\mu - \nu_\tau$
- Fascio, tecnica di rivelazione (emulsioni), apparato elettronico
- Raccolta dei dati e analisi delle emulsioni
- Obiettivi e prospettive
- Stato dell'esperimento (misura di eventi con charm)

# Neutrini atmosferici



Dallo studio dei raggi cosmici a terra è possibile ricavare un valore atteso di neutrini

$$\forall \pi^\pm \approx 2\nu_\mu + 1\nu_e$$

Tuttavia i dati sperimentali disattendono le previsioni



Interpretazione di oscillazione:

I Neutrini intesi come autostati deboli sono sovrapposizione di 3 stati di massa  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_j U_{\alpha j}^* |\nu_j\rangle$$

L'evoluzione temporale di tali stati può far oscillare i neutrini da uno stato di flavor all'altro

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_j U_{\alpha j}^* e^{-iE_j t} |\nu_j\rangle$$

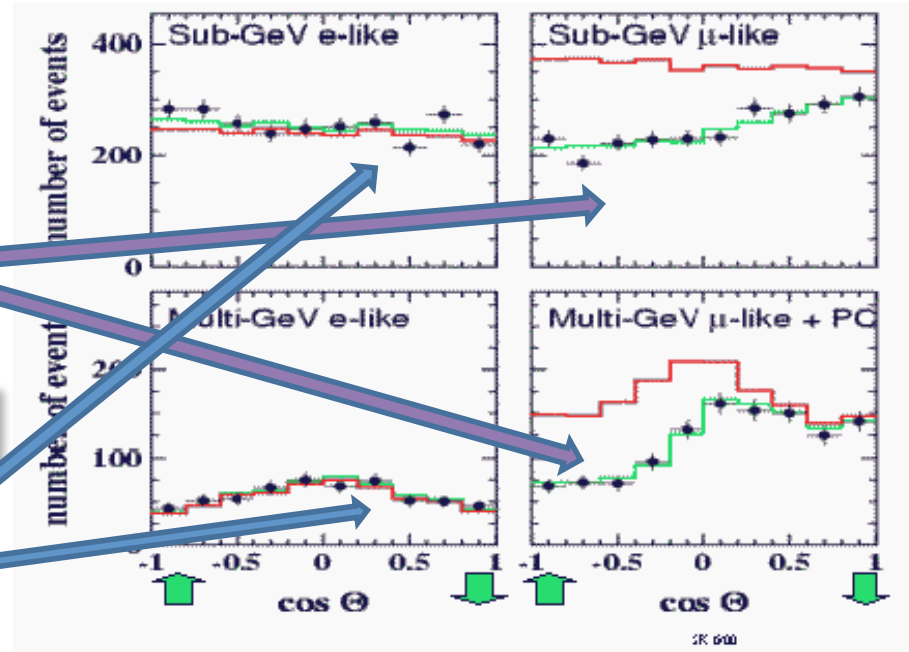
# Esperimenti sulle oscillazioni

## SuperKamiokande

Deficienza significativa nell'osservazione di neutrini  $\mu$  atmosferici rispetto al valore atteso

$$R = 0.63 \pm 0.025 \text{ (stat)} \pm 0.054 \text{ (syst)}$$

I neutrini elettronici osservati rispettano le attese

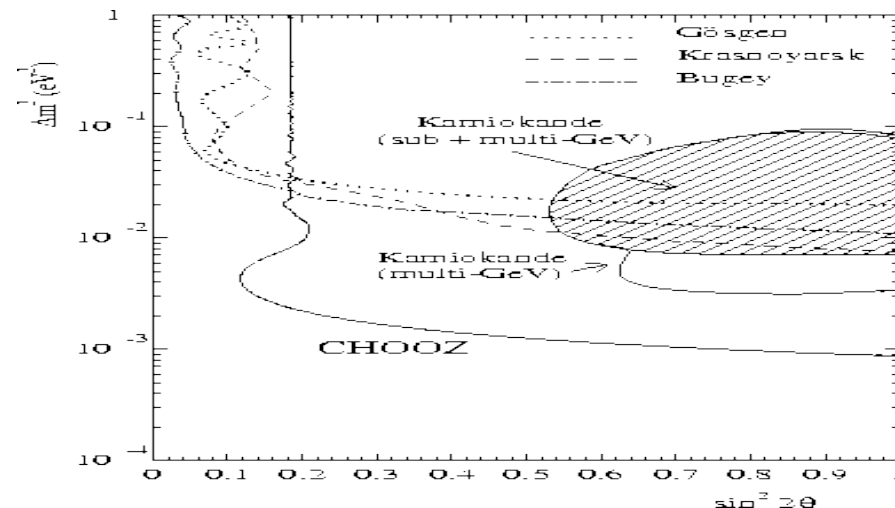


## Chooz

Esclude la possibilità di un'oscillazione  $\nu_\mu - \nu_e$



I neutrini  $\mu$  atmosferici oscillano cambiando flavor e lo fanno praticamente solo in neutrini  $\tau$



# Mixing a 2 neutrini

Semplificazione del mixing a 2 neutrini



- 2 autostati di massa:  $\nu_1, \nu_2$
- 2 autovalori di massa:  $m_1, m_2$



Relazione tra flavor e autostati di massa

$$\begin{bmatrix} |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{bmatrix}$$

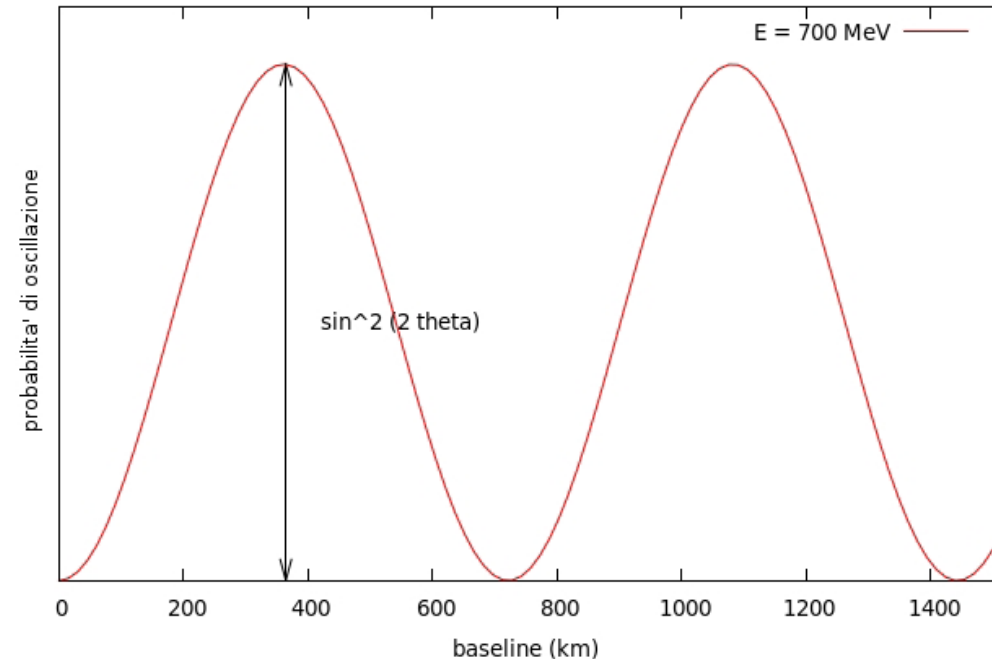
$\theta$  è l'angolo di mixing (analogo dell'angolo di Cabibbo)

Termine oscillatorio

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left[ 1,27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right]$$

Ampiezza di oscillazione

L = distanza percorsa  
E = energia del neutrino



# Ricerca diretta di $\nu_\mu - \nu_\tau$

Neutrini atmosferici (L ed E noti)

$$\Delta m^2 \approx 2,4 \cdot 10^{-3} eV^2$$

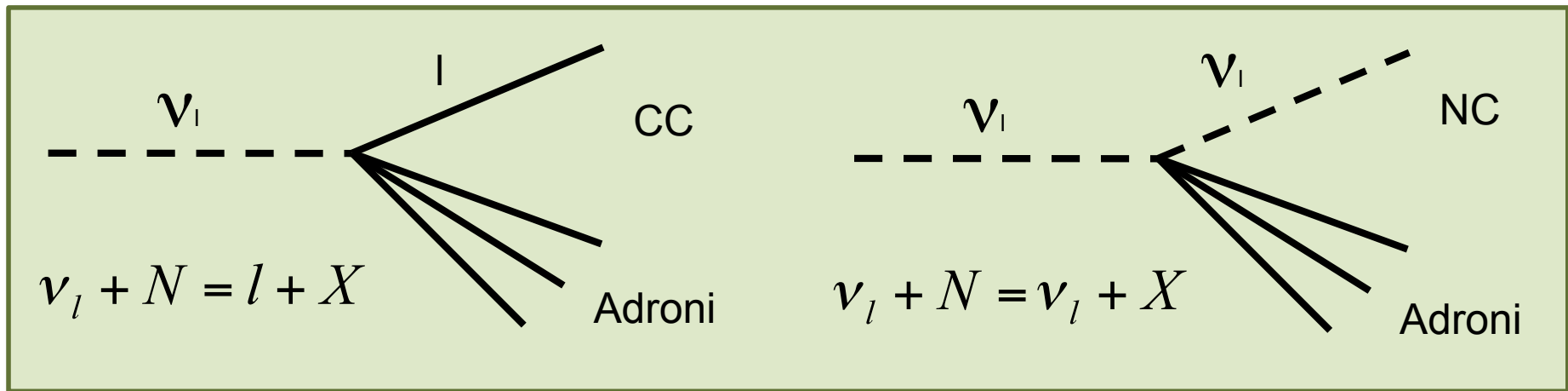
$$\sin^2(2\theta) \approx 1$$

Ipotesi (supportata dai dati sperimentali)



La quasi totalità dei neutrini muonici che oscillano, oscillano in neutrini  $\tau$

Interazioni di neutrino CC e NC  $\sigma(\nu N) \approx 10^{-43} cm^2 MeV^{-2} E_\nu^2$



Se da un fascio puro di  $\nu_\mu$  osservo interazione di neutrini con produzione di leptoni  $\tau$  (quindi in corrente carica) ho la prova dell'avvenuta oscillazione  $\nu_\mu - \nu_\tau$

# OPERA

Dai dati sperimentali raccolti su  $\Delta m$  e  $\theta$  si può ricavare il rapporto L/E di massima oscillazione

$$\frac{L}{E} = 515 \text{ Km GeV}^{-1} \quad (\text{8775 Km per 17 GeV})$$

L'oscillazione è possibile con un fascio  $\nu_\mu$  dal CERN al Gran Sasso (730Km) di energia 15GeV

## OPERA

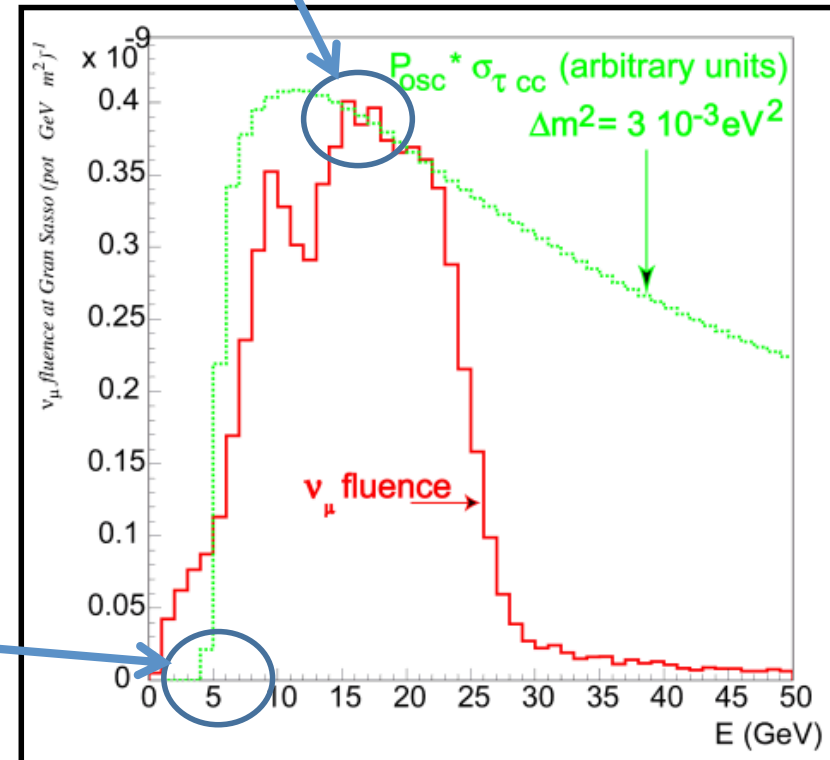
- Interazioni identificate nel bersaglio più spettrometro di tracciamento prodotti
- $\tau$  identificato dal decadimento in emulsioni nucleari

$m(\tau) = 1,777 \text{ GeV}$  Soglia di produzione di  $\nu_\tau$

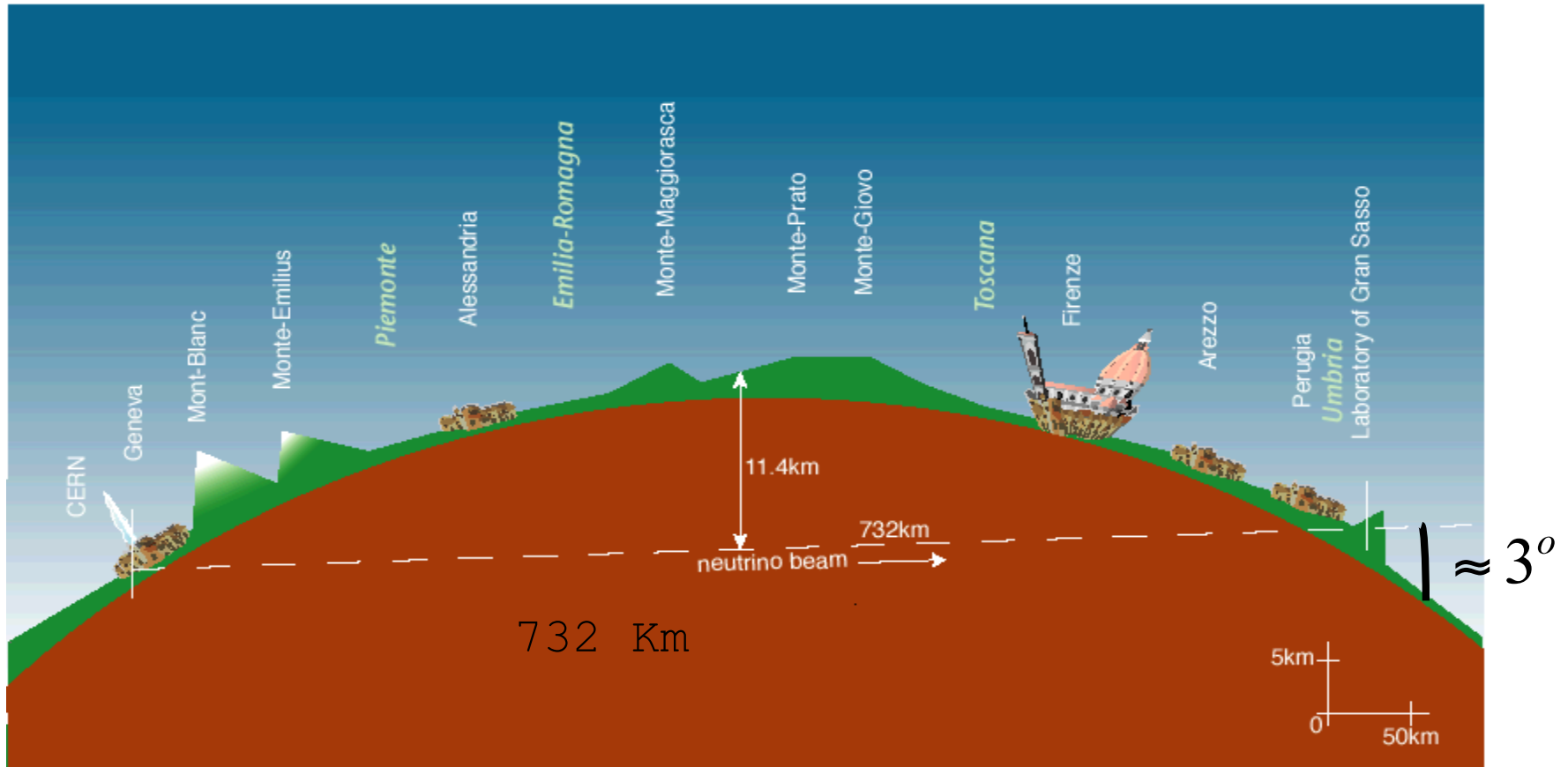
Ad OPERA  $p(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = 1,7\%$

$$N_\tau = N_A M_D \int \phi_{\nu_\mu}(E) P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E) \sigma_{\nu_\tau}^{CC}(E) \varepsilon(E) dE$$

Massimo degli eventi

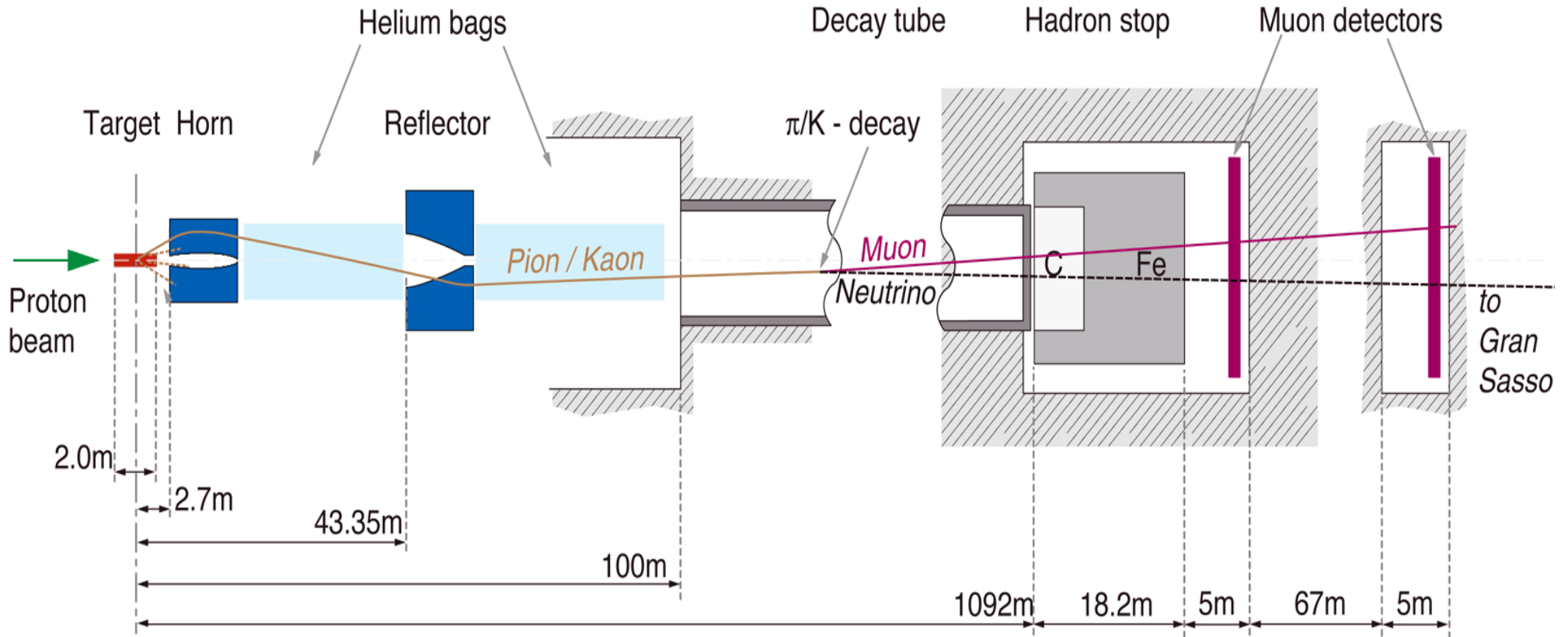
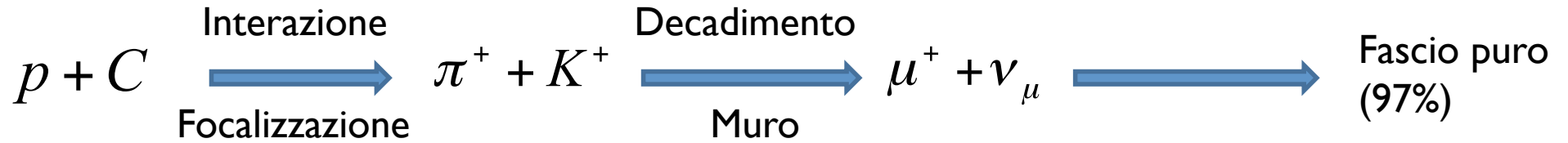


# Cern- GS





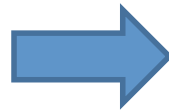
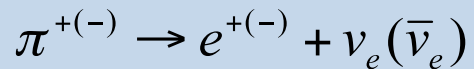
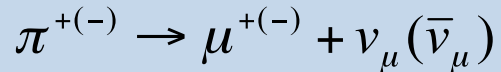
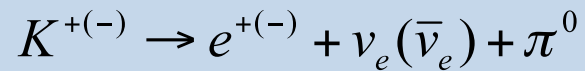
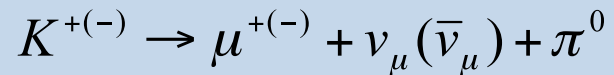
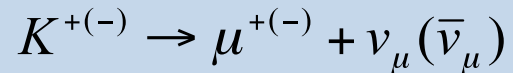
# Cern Neutrinos to Gran Sasso



# Fascio del CNGS

La fonte principale di  $\nu_\mu$  è costituita dai decadimenti dei  $\pi^\pm, K^\pm$  prodotti dalle interazioni dei protoni di alta energia

$$\langle E_\nu \rangle = 17 \text{ GeV}$$



Fascio puro (97%) con contaminazioni di:

- $\bar{\nu}_\mu$  Dovuti a decadimenti di adroni negativi
- $\nu_e$  Dovuti a decadimenti in elettroni



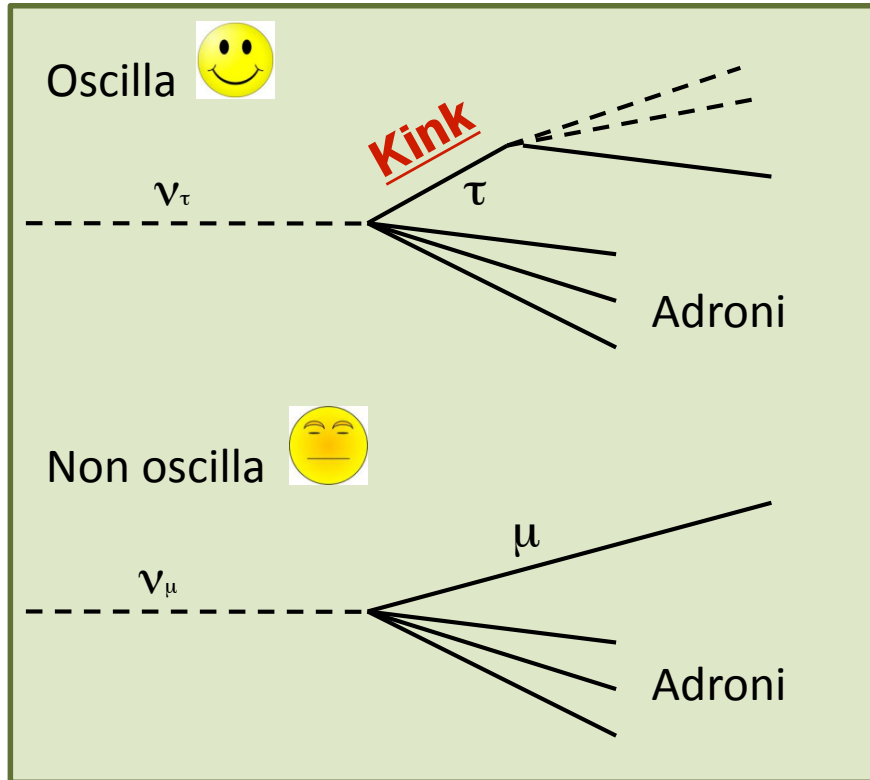
← Decay tube

Hadron stop →



# Identificazione dei $\nu_\tau$

La reazione che cerchiamo è  $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$



Occorre poi identificare i prodotti del decadimento del  $\tau$

La segnatura della reazione è rappresentata dal kink (deviazione) di decadimento del  $\tau$

$$(c\gamma\tau \sim 600 \mu\text{m})$$

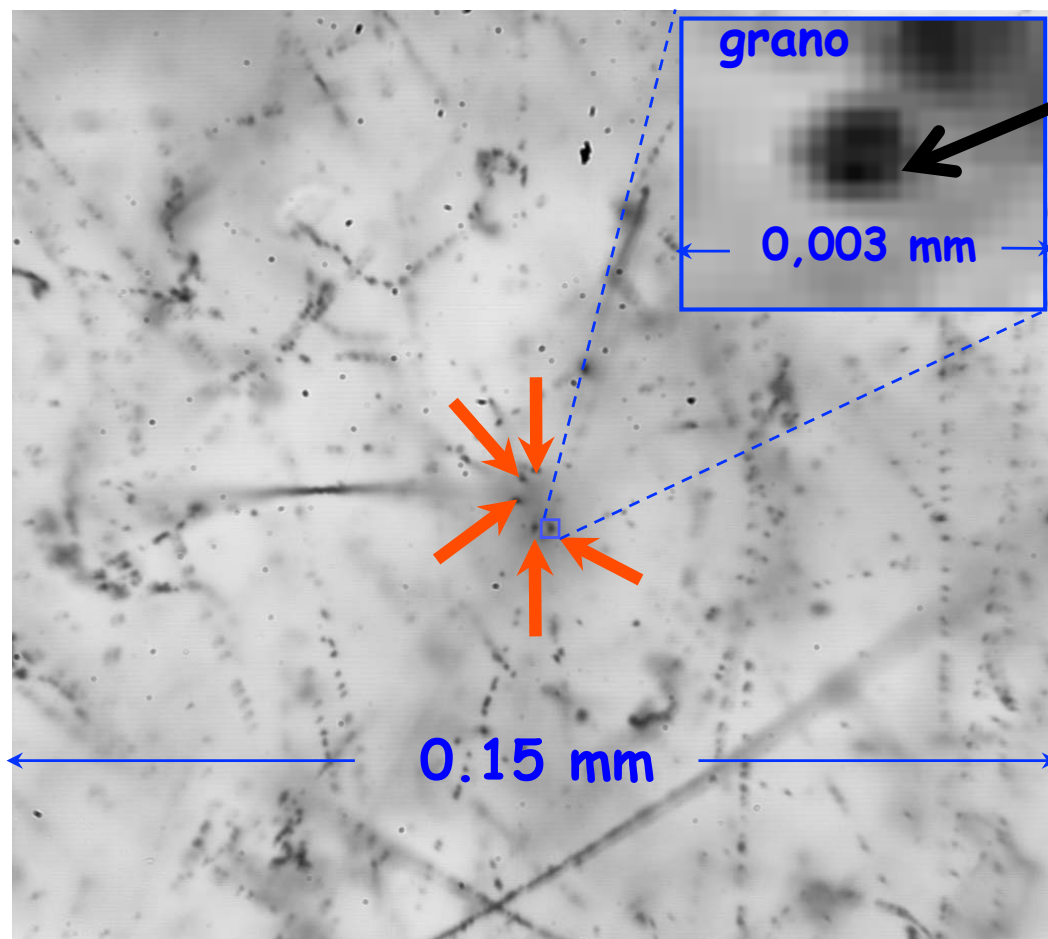


Per distinguere la traccia  $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$  è necessaria una risoluzione dell'ordine del  $\mu\text{m}$  che rilevi il kink (o eventualmente lo splitting delle tracce) del decadimento

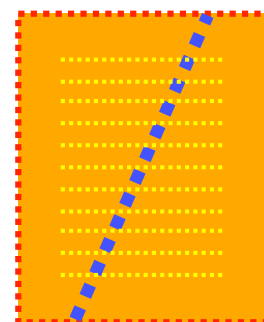
$$\tau \rightarrow \begin{cases} \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu & \approx 17\% \\ \pi^- + \nu_\tau + n(\pi^0) & \approx 49\% \\ e^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_e & \approx 18\% \\ \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \nu_\tau + n(\pi^0) & \approx 15\% \end{cases}$$

# Come individuarlo: le emulsioni

Dopo 63 anni dalla scoperta del  $\pi$ , ecco ancora utilizzate le emulsioni nucleari !



Emulsione: grani neri di  $1\mu\text{m}$   
lungo  $dE/dx$  di particella carica



Traccia ricostruita  
a partire da  
immagini acquisite  
su diversi livelli

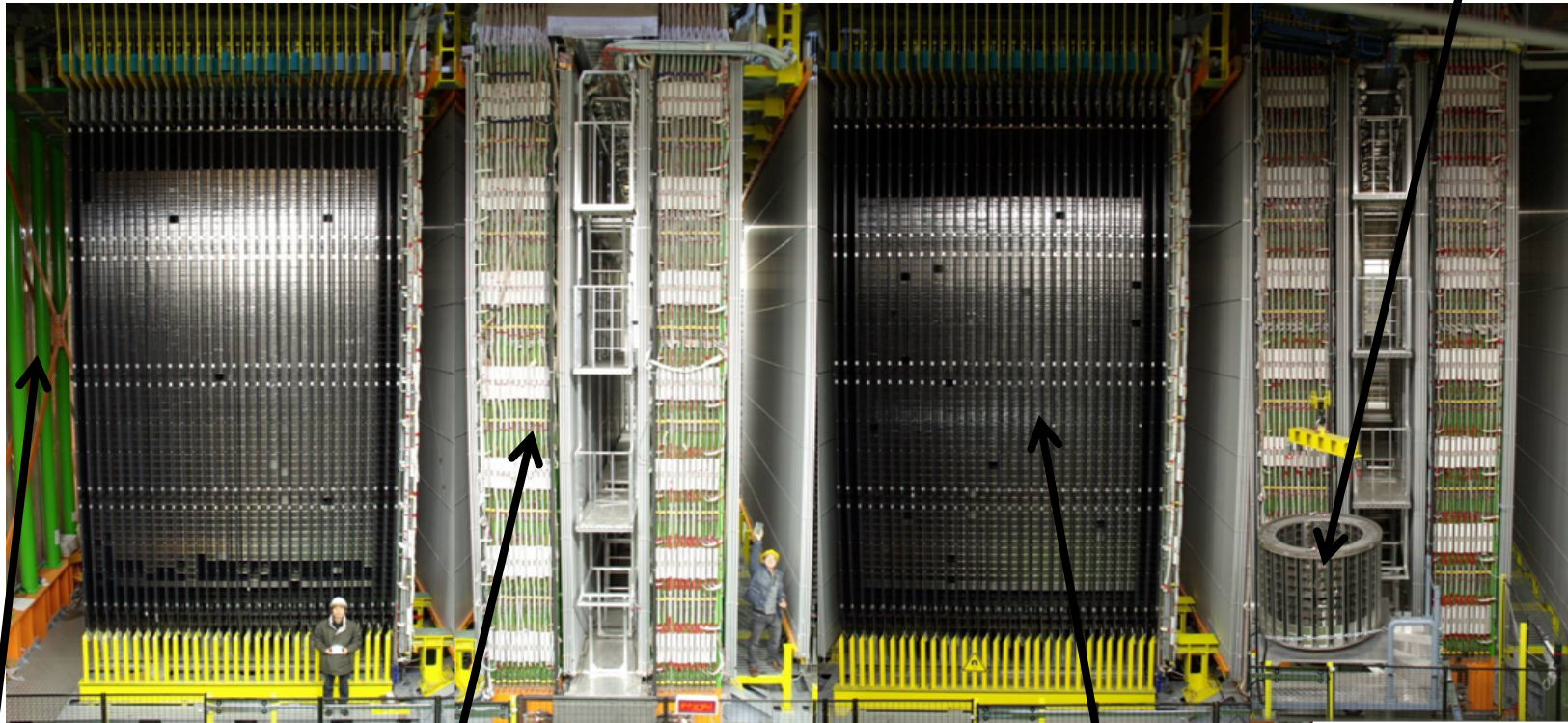
Risoluzione della ricostruzione  
delle tracce nelle emulsioni:

$$\delta x = 3 \mu\text{m} \quad \delta \theta = 2 \text{ mrad}$$

# L'apparato

Detector ibrido elettronico-emulsivo  
155000 mattoni, 1.26 kton target

Brick manipulation  
system

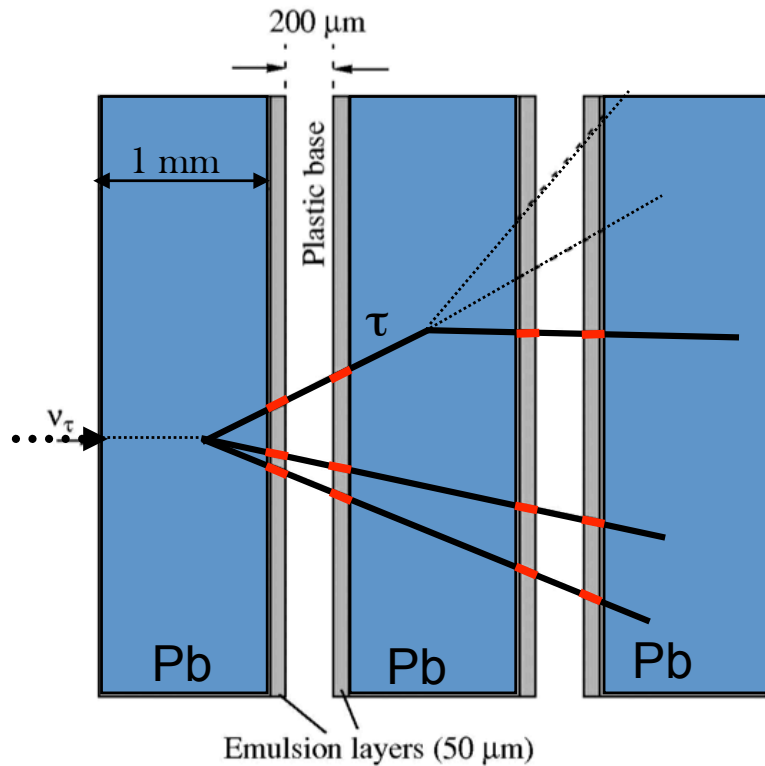


Rivelatore  
di Veto

Spettrometro ( $6 \times 10 \text{ m}^2$ ):  
22 RPC planes  
6 drift tube planes

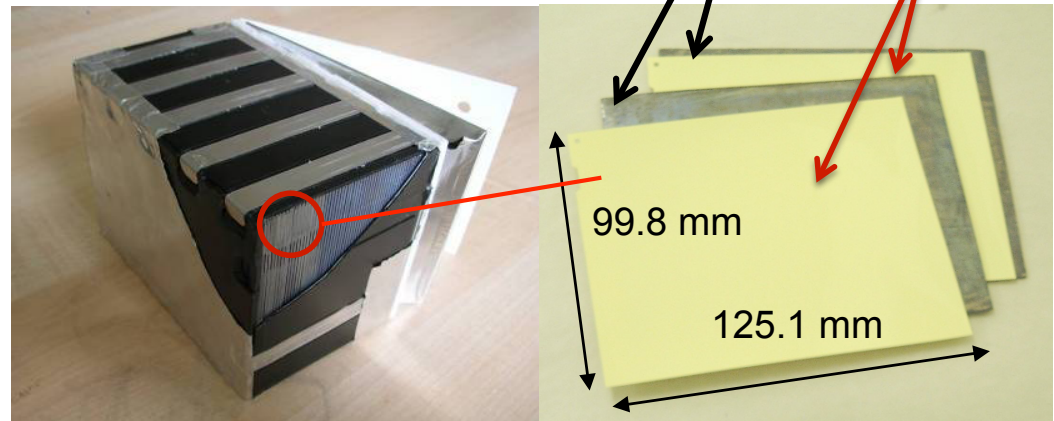
Target sections ( $6.7 \text{ m}^2$ ):  
29 muri di mattoni (77500)  
31 muri di Target Tracker (TT)

# Parte emulsiva: il mattone



Ricostruzione di un evento nel mattone attraverso il tracciamento ricavato dai fogli di emulsione

Il mattone è l'elemento principale del rivelatore



Un mattone è composto da 56 fogli di piombo intervallati da 57 fogli di emulsioni nucleari

- Il ferro costituisce la componente massiva
- Le emulsioni servono a ricostruire la traccia
- Lo spazio tra le emulsioni aumenta la risoluzione radiale (e riduce i costi)

# Parte elettronica

## Target Tracker

31 muri composti da 256 strisce verticali e 256 orizzontali.  
Individuano i mattoni coinvolti



## Spettrometro

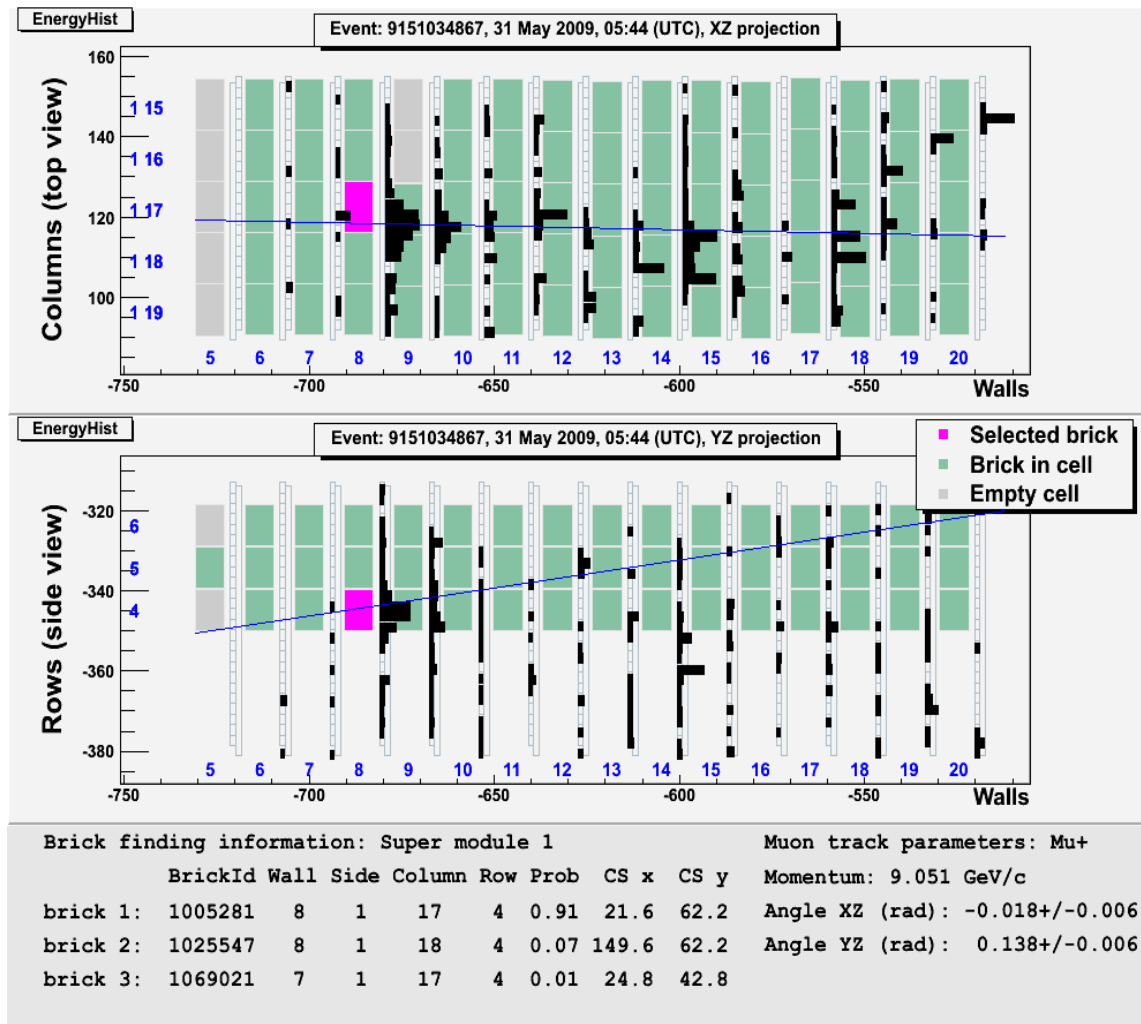
Composto da 22 fogli RPC  
(1,55T) e 6 strati di tubi a drift  
ad alta risoluzione. Identifica il  $\mu$   
prodotto dalle interazioni



Veto degli eventi esterni



Brick manipulation system



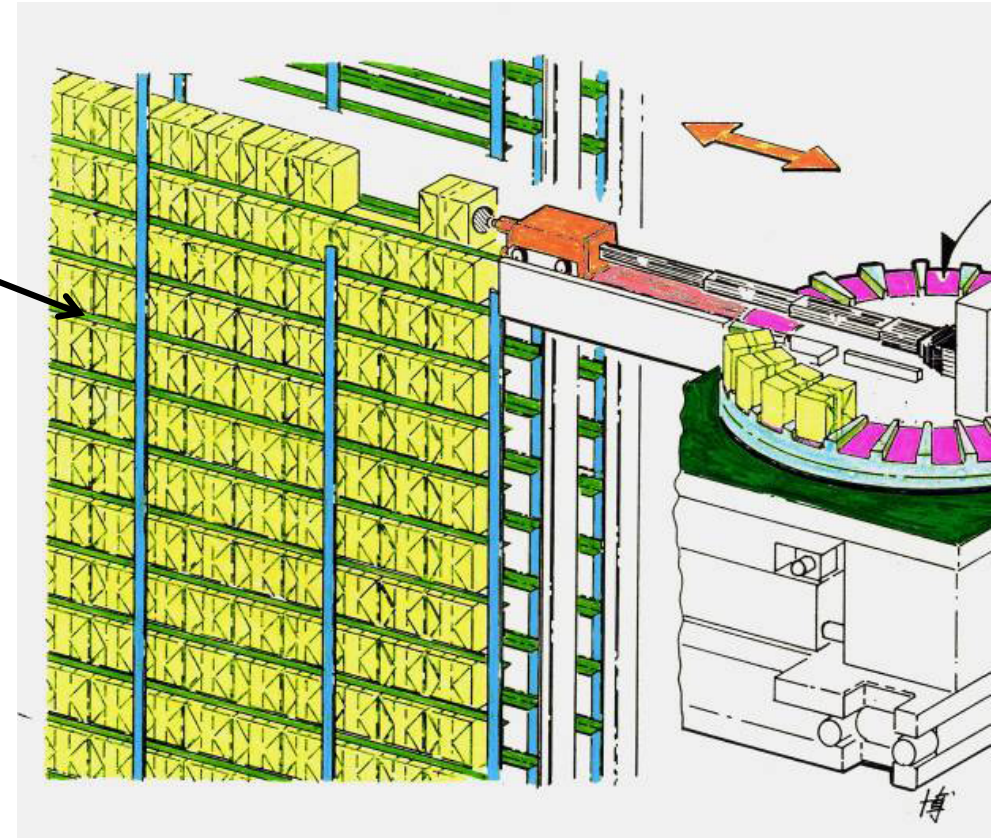
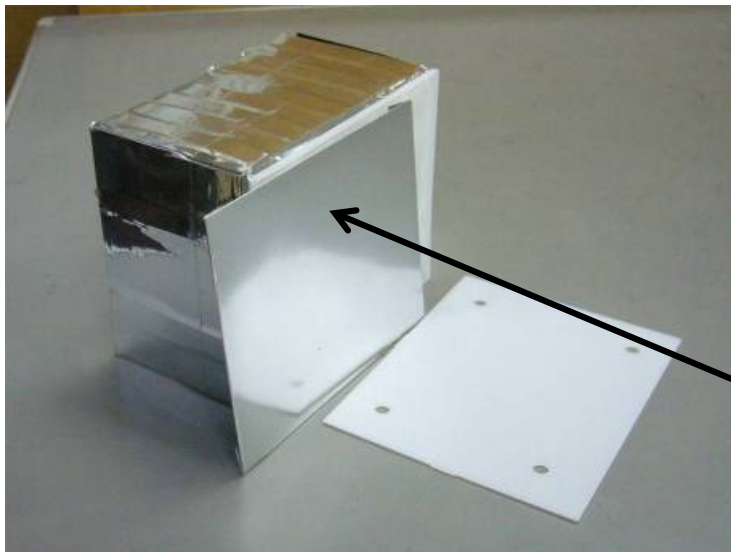
# BMS

Un sistema meccanizzato preleva il mattone interessato (e quelli adiacenti) riposizionando gli altri e permettendo alla presa dati di proseguire



Minimizza la perdita di massa del bersaglio e i tempi morti

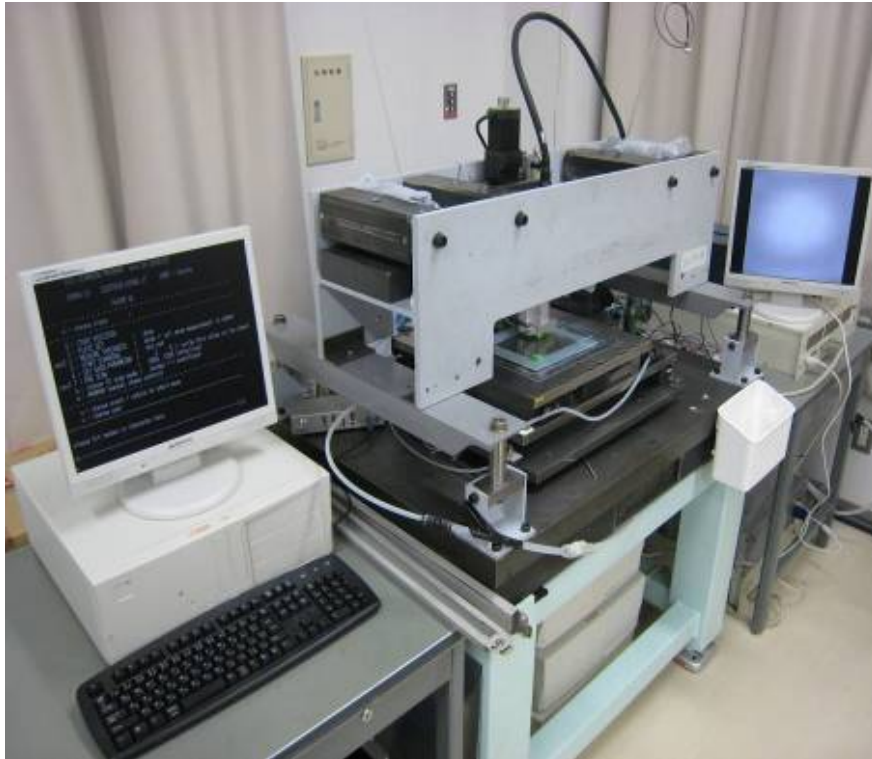
$\approx 30 \text{ bricks} / \text{day} = 10^3 \text{ bricks} / \text{year}$



Una volta prelevato il mattone, il primo e l'ultimo foglio costituiscono l'esame del tracking elettronico (changable sheets)



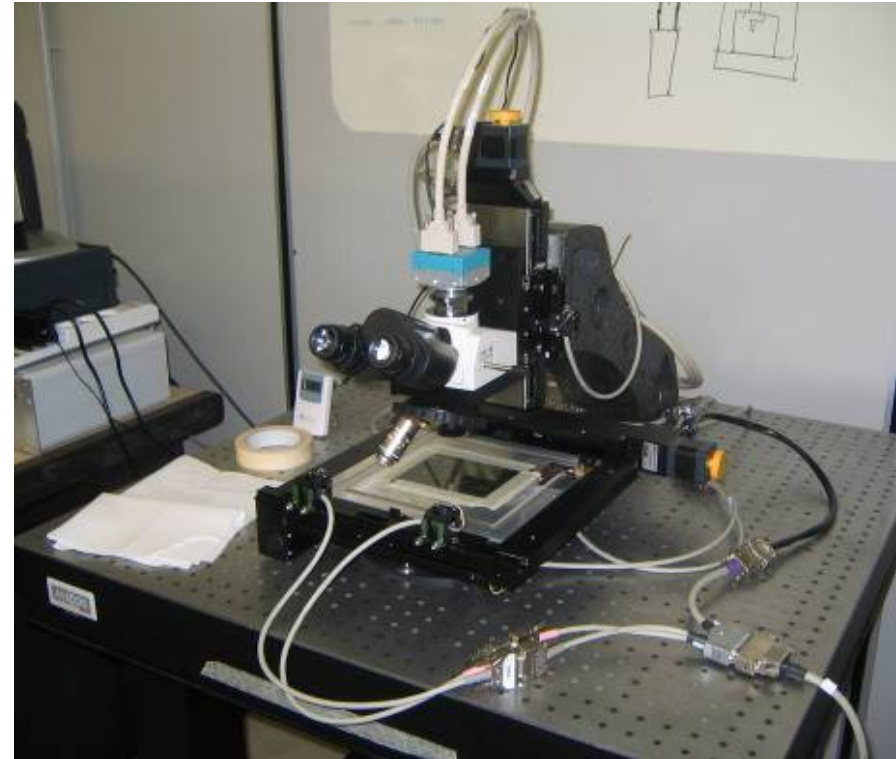
# Analisi elettronica delle emulsioni



## Japanese Scanning System (S-UTS)

Utilizza una videocamera ad alta velocità CCD, lenti ad alta precisione e un complesso algoritmo dedicato

**Velocità di scanning: 75cm/h**



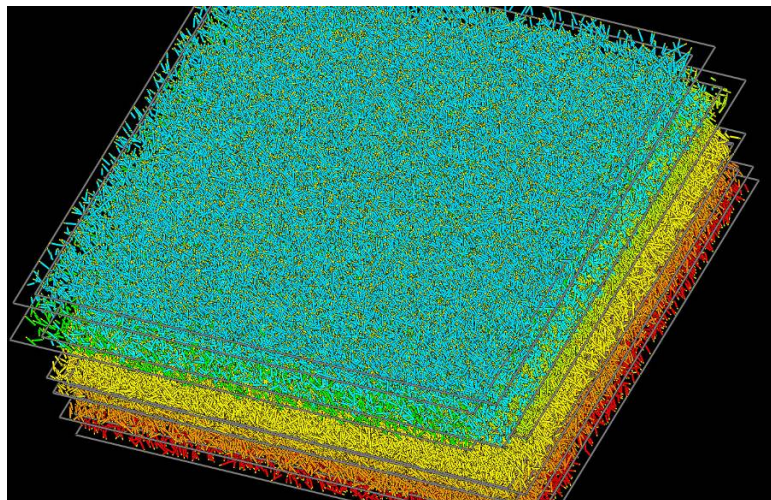
## European Scanning System (ESS)

Utilizza apparecchiature commerciali e software DAQ

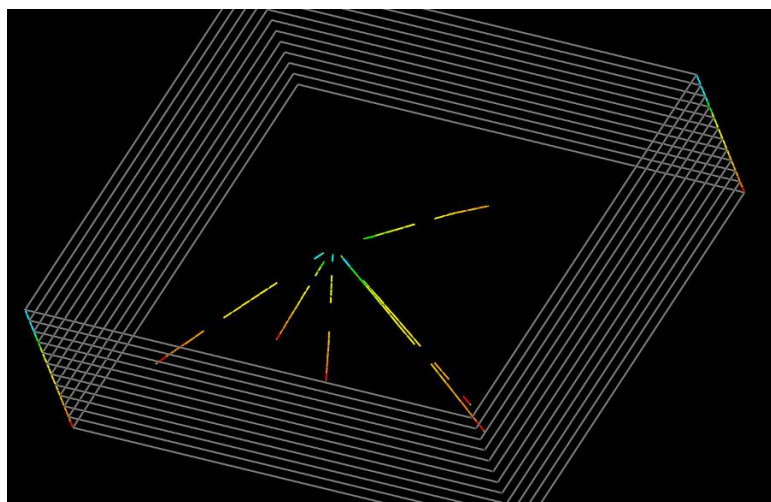
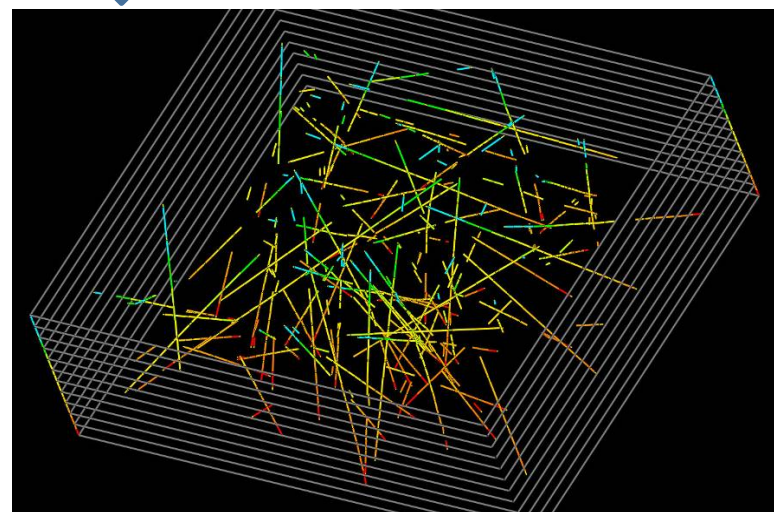
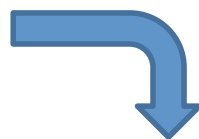
**Velocità di scanning: 20cm/h**



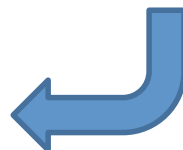
# Ricostruzione della traccia



La richiesta di coincidenza tra i fogli elimina le tracce di bassa energia e il rumore (da  $10^7$  tracce a poche unità)



Eliminando le tracce che passano da parte a parte il mattone si ricompongono infine il vertice



# Presa dati: eventi $\mu$

Anno	Flusso del fascio CNGS	Interazioni
2008	$1.78 \times 10^{19}$ pot	1689 int.
2009	$3.52 \times 10^{19}$ pot	2318 int.

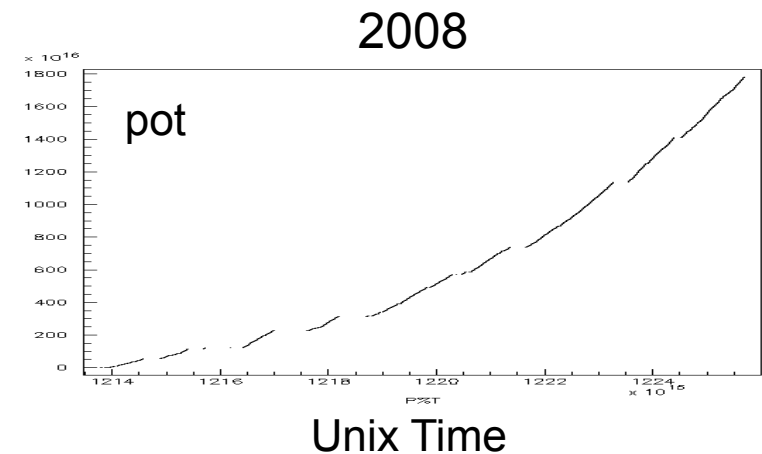
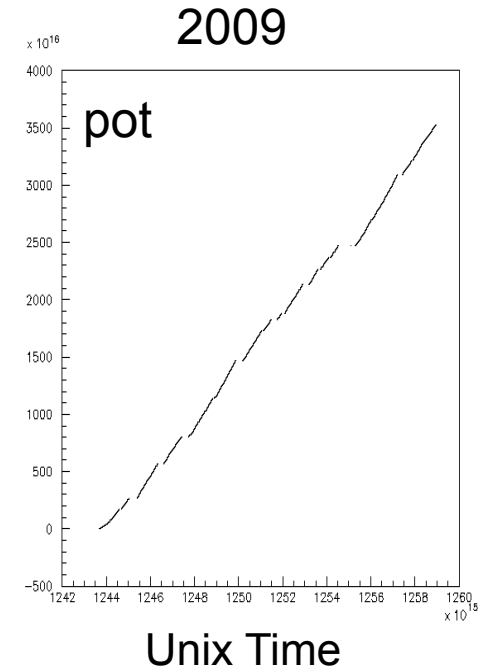
Analisi teorica  $\longrightarrow \nu_{\mu CC} / \text{pot} \cdot \text{kton} = 5,44 \cdot 10^{-17}$

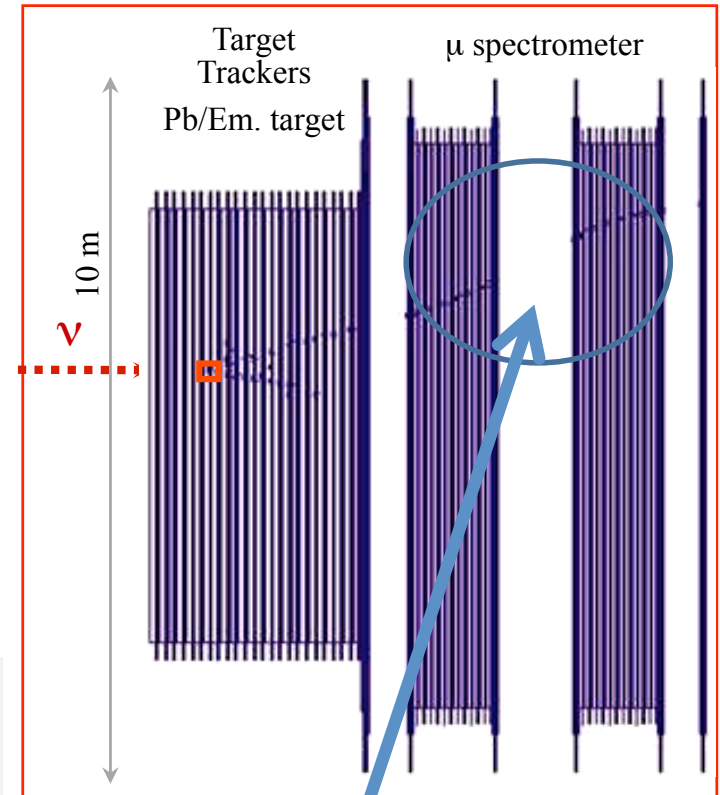
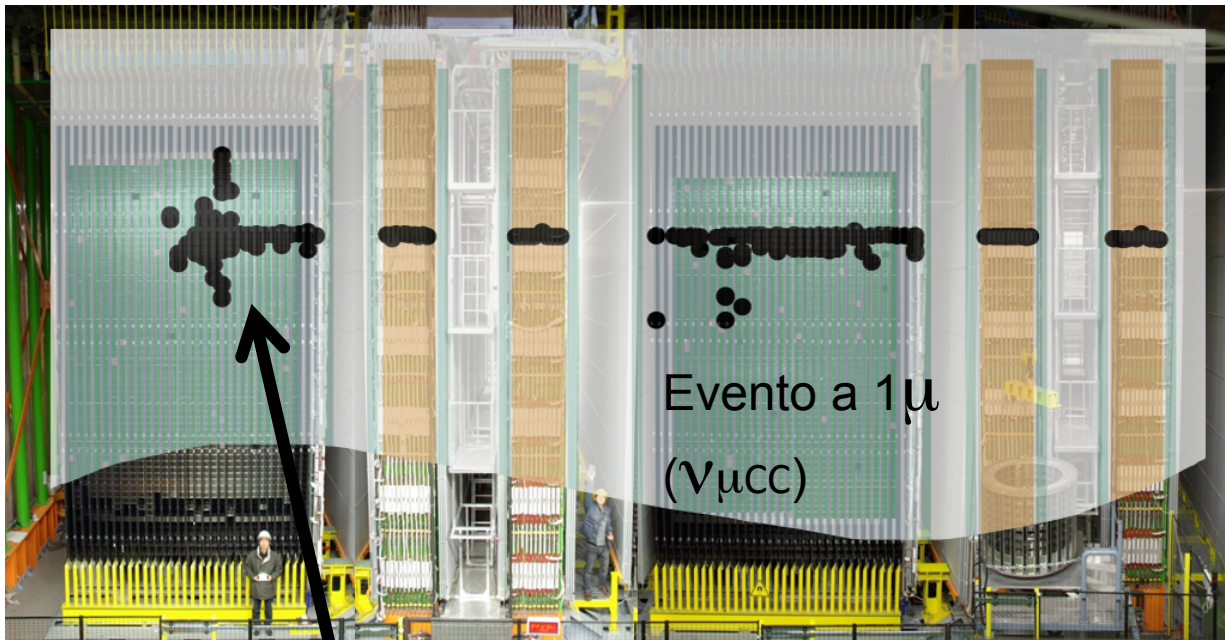
Per un fascio di  $3.52 \times 10^{19}$  pot e un confidence volume di 1,25kton

$$\nu_{\mu CC} = 2390$$

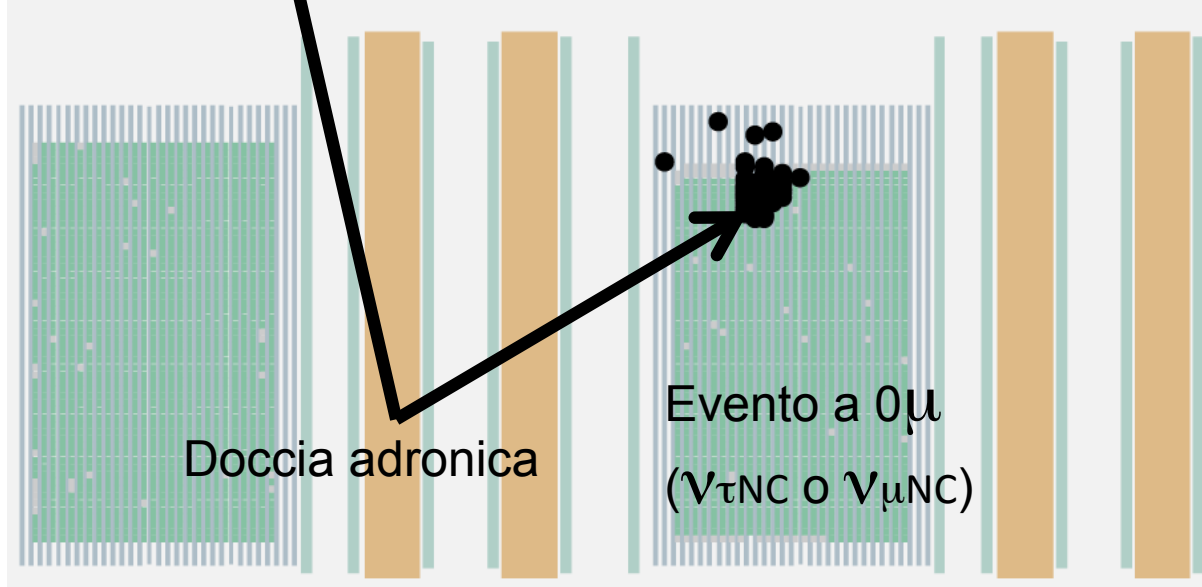
Molto simile al dato reale

Eventi di $\nu_{\mu}$ nel 2009	0mu	1mu	All
Eventi predetti dal detector	644	1674	2318
Trovati nel CS	195	666	861
Eventi nei mattoni	23	165	188
Altri	6	26	32





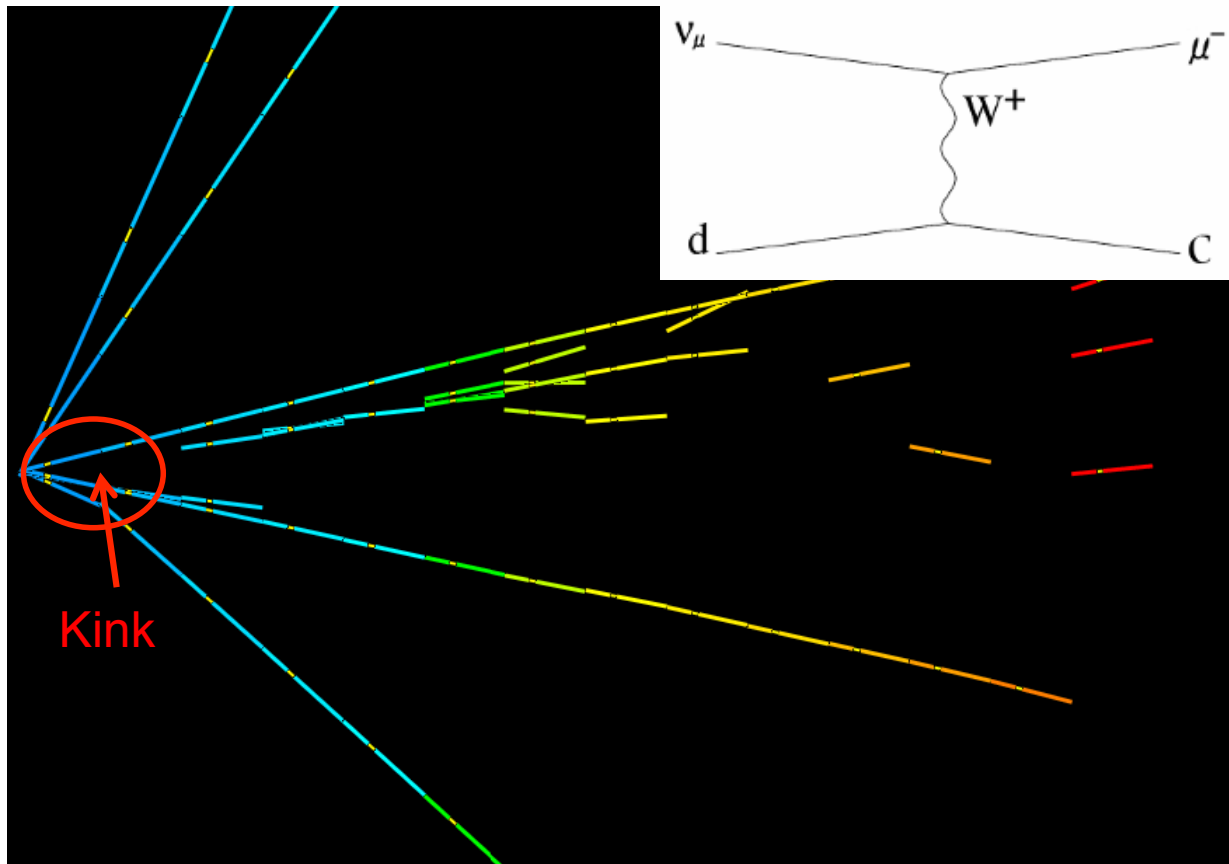
Vedere il muone serve sia ad identificare il decadimento del  $\tau$  che le interazioni del  $\nu_{\mu}$



# Eventi charm

Una possibile fonte di contaminazione degli eventi  $\tau$  è costituita dai decadimenti dei  $D^+$ . Questo perché i  $D^+$  hanno vita media simile al  $\tau$ . E' pertanto importante identificarli

$c\gamma\tau(\tau) \approx 4c\gamma\tau(D^+)$  Il rivelatore è in grado di vedere che la traccia  $\mu$  parte dal vertice primario e di distinguere la differenza tra i cammini



L'osservazione di eventi tipo charm costituisce un test dell'efficacia del rivelatore (sono simili agli eventi  $\tau$ )

## Candidato a evento charm

Una traccia fa un kink emettendo un  $\mu^+$   $\sim 2.2\text{GeV}/c$

- Lunghezza di volo:  $1330\mu\text{m}$
- Angolo di kink:  $209\text{mrad}$

# Eventi $\tau$

$$N_\tau = N_A M_D \int \phi_{\nu_\mu}(E) P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E) \sigma_{\nu_\tau}^{CC}(E) \varepsilon(E) dE \quad p(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = 1,7\% \quad \varepsilon(\nu_{\tau CC}) \approx 10^{-1} \varepsilon(\nu_{\mu CC})$$

Canale di decadimento	Eventi attesi	Background
T – m	( $\Delta m^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} eV^2$ ) 2,9	0,17
T – e	3,5	0,17
T – h	3,1	0,24
t – 3h	0,9	0,17
Totale	10,4	0,76

Principali fonti di background:

- Decadimenti di quark Charm 0,496
- Scattering a grande angolo del  $\mu$  0,096
- Background adronico 0,172

**Il contributo del background è trascurabile !**

**Fino ad ora (1,5yr,  $5,30 \times 10^{19}$ pot) erano attesi 2,5 eventi  $\tau$  CC**

# Conclusioni

- OPERA è in fase di raccolta dati, alla ricerca di un'evidenza diretta dell'oscillazione  $\nu_\mu - \nu_\tau$  predetta dai dati sperimentali sui neutrini atmosferici
- Il fascio di neutrini del CERN è semipuro ed ha raggiunto l'intensità di progetto, compatibile con il campione di interazioni voluto
- Se i parametri di oscillazione sono  $\Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  e  $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ , nei prossimi 5 anni sono attesi 10 eventi di osservazione diretta di leptone  $\tau$  prodotto da interazione CC di neutrino corrispondente
- La messa a punto dell'esperimento con la relativa analisi dei dati raccolti è pienamente efficiente e calibrata sui dati attesi
- Il sistema di analisi delle tracce è in grado di riconoscere la segnatura dell'evento con background trascurabile
- Un evento  $\tau$  atteso in corso d'opera !



# Back-up

- RPC = Gli RPC sono dei rivelatori che sfruttano il fenomeno della ionizzazione di una miscela di gas indotta dal passaggio di una particella ionizzante. La presenza di un intenso campo elettrico applicato al gas permette di moltiplicare a "valanga" la carica primaria di ionizzazione, in modo da innescare una breve scarica elettrica e produrre un segnale misurabile. Questo segnale, opportunamente elaborato da una catena di dispositivi elettronici, permette di identificare la posizione di passaggio della particella ed il tempo di arrivo della stessa.
- Efficienza untau – fattore 0,1

$$\varepsilon_{\text{int}} \approx 100\%$$

$$\varepsilon_{\text{iscan-back}} \approx 60\%$$

$$\varepsilon_{\text{decay}} \approx 40\% \quad \text{Teta kink ha un max e un min}$$

$$\varepsilon_{BR} \approx 50\% \quad \text{Non tutti i canali del tau sono utilizzabili}$$