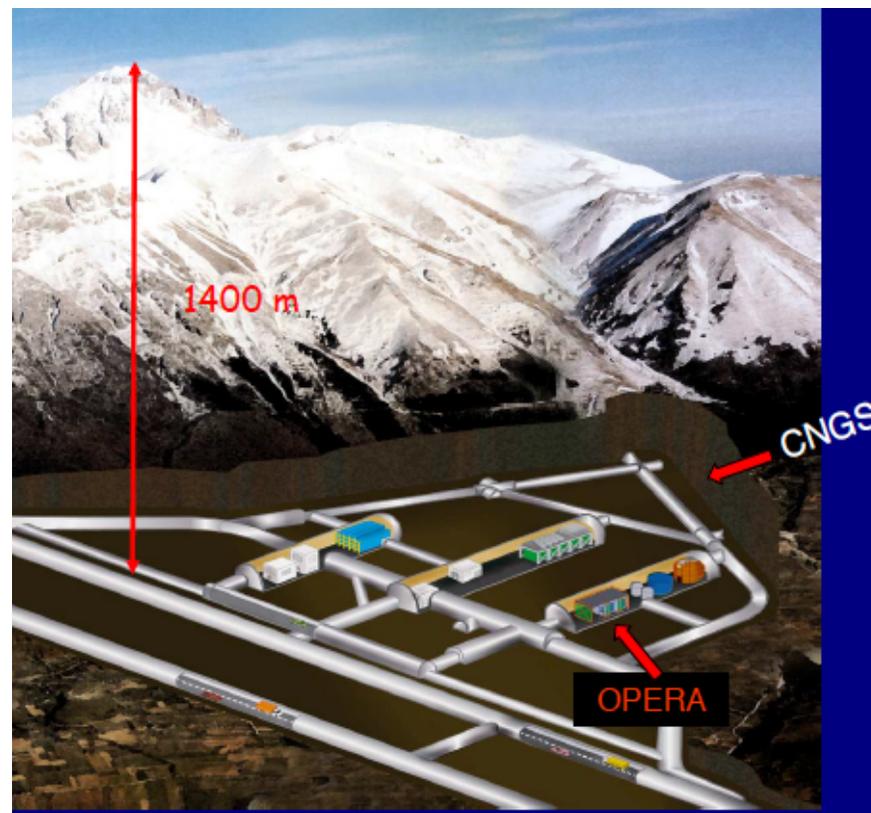


I neutrini e la loro velocità osservata in OPERA.

Incontro con gli studenti del Corso di Laurea in Fisica 11/10/2011

Enrico Iacopini
Dipartimento di Fisica e Astronomia



Il neutrino, questo sconosciuto ...

Il neutrino entra nella storia della Fisica nel 1930.

L'ipotesi sulla sua esistenza è "un disperato tentativo" di W. Pauli per spiegare l'apparente non conservazione dell'energia e del momento angolare nei decadimenti beta dei nuclei.



Secondo l'ipotesi di Pauli, la massa del neutrino (che lui chiama in realtà neutrone perché quest'ultimo verrà scoperto solo nel 1932 da Chadwick) doveva essere non superiore a circa un centesimo di quella del protone, altrimenti non avrebbe potuto rendere conto dello spettro energetico degli elettroni beta.

Il decadimento beta

La prima teoria del decadimento beta è di Fermi, che la pubblicò nel 1933.

Fu Fermi a battezzare "neutrino" la particella ipotizzata da Pauli, che non poteva essere il neutrone di Chadwick, scoperto l'anno prima, dato che esso aveva una massa confrontabile con quella del protone.



Secondo Fermi, il decadimento beta procede così: un neutrone si trasforma in un protone e vengono simultaneamente creati un elettrone ed un neutrino, che, nel linguaggio moderno, è in realtà un antineutrino.

Il neutrino come l'antineutrino sono elettricamente scarichi e interagiscono pochissimo con la materia: il cammino libero medio di un antineutrino da 1 MeV in acqua è di circa 160 anni luce !

Chi l'ha visto ?

Il primo esperimento che ha dimostrato sperimentalmente l'esistenza dell'antineutrino è del 1956 ed è l'esperimento di Cowan e Reines, realizzato al reattore nucleare di Savannah River, negli USA.

Essi osservarono la reazione



Neutrino uno e trino

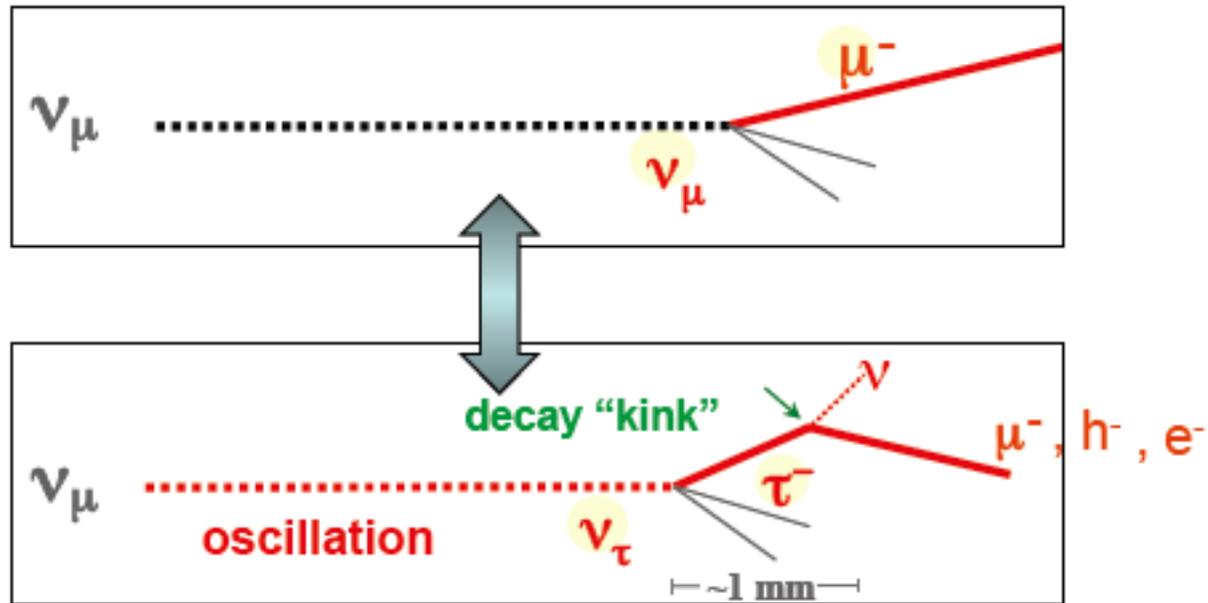
Oggi sappiamo che esistono **tre tipi diversi di neutrino**, detti "sapori", cioè il neutrino elettronico, il neutrino muonico ed il neutrino tauonico, differendo per la particella carica (leptone) a cui sono accoppiati.

Quello di Pauli e di Fermi è il neutrino elettronico, quello di cui oggi si parla è quello muonico.

 ν_e ν_μ ν_τ 

Il sapore dei neutrini non appare come una costante del moto: **essi oscillano** l'uno nell'altro e OPERA è stato costruito proprio per osservare l'oscillazione del neutrino muonico in quello tauonico.

Come distinguere un neutrino muonico da uno tauonico

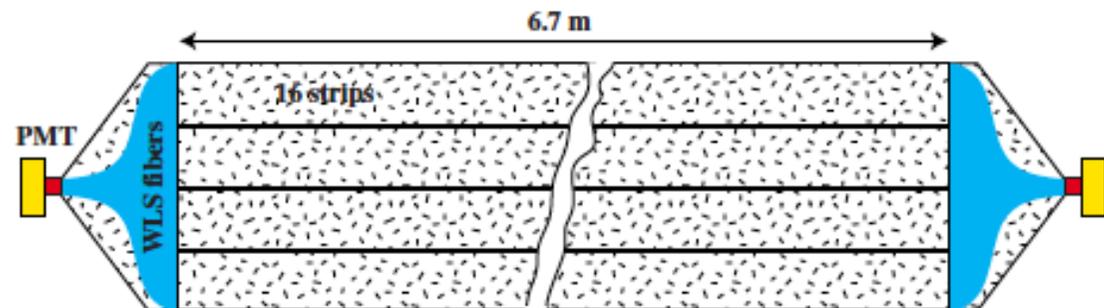
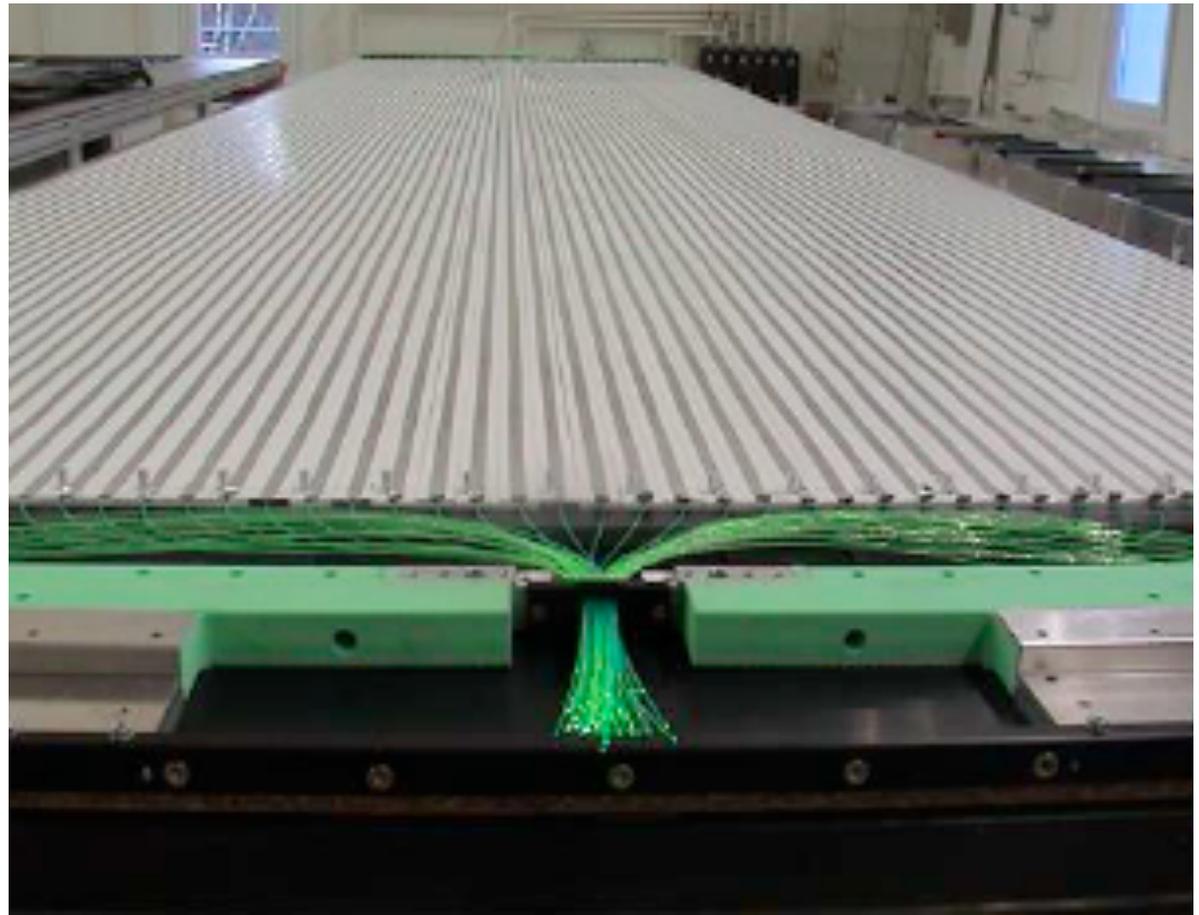


Il rivelatore di OPERA è fatto da $\approx 150\,000$ mattoncini di piombo ed emulsione fotografica per vedere il vertice di decadimento del tau (vita media: 290 fs).

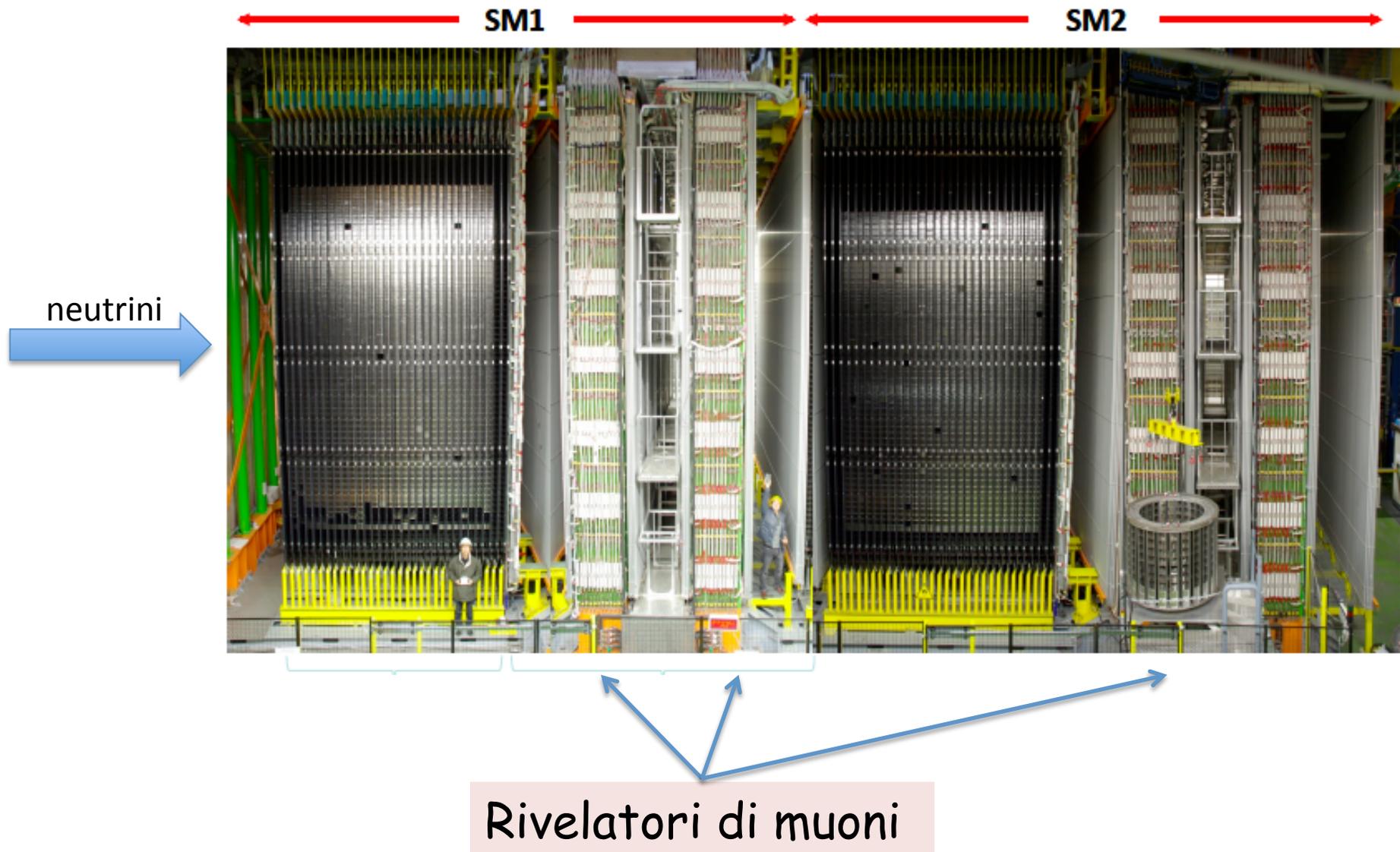
Come avviene la rivelazione del muone

Lo strumento utilizzato per rivelare il muone originato dalla interazione di neutrino è fatto da piani **di strips di scintillatore**, ciascuna letta attraverso una fibra vista da un PM.

Si tratta di un rivelatore molto veloce, capace di assicurare risoluzioni temporali dell'ordine del nanosecondo



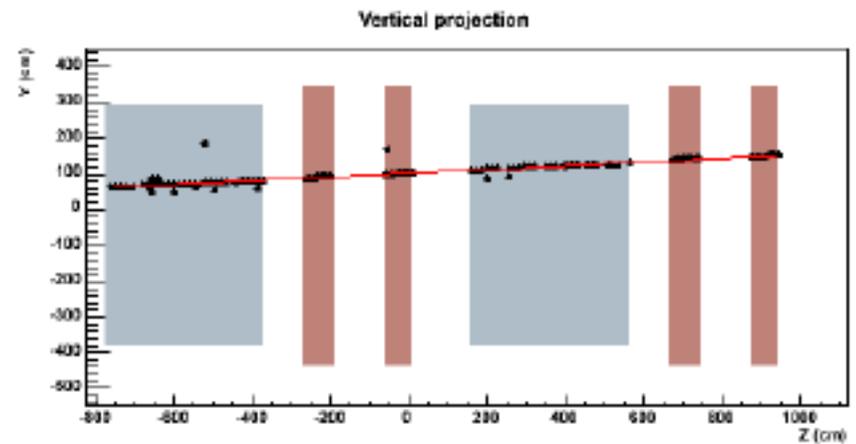
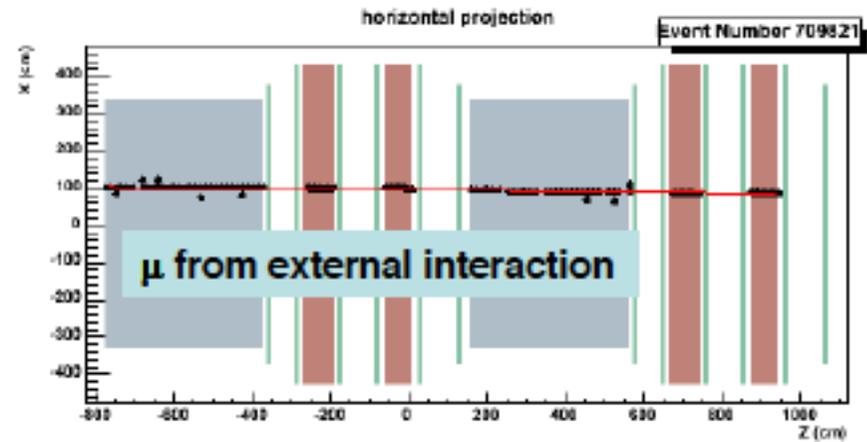
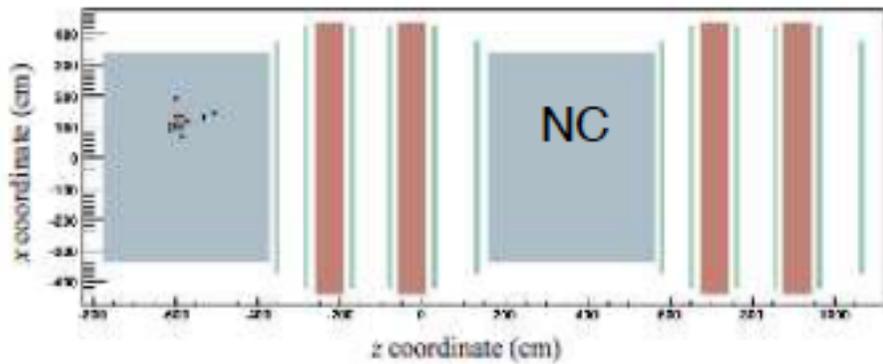
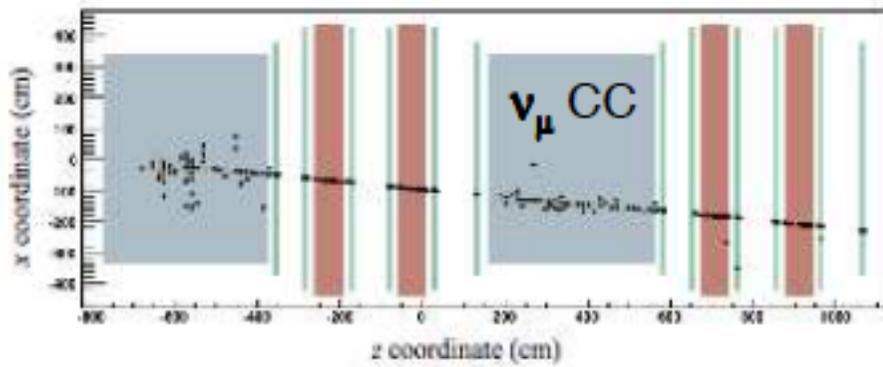
L'esperimento OPERA



Statistica basata su 16111 eventi

7586 interni

8525 esterni

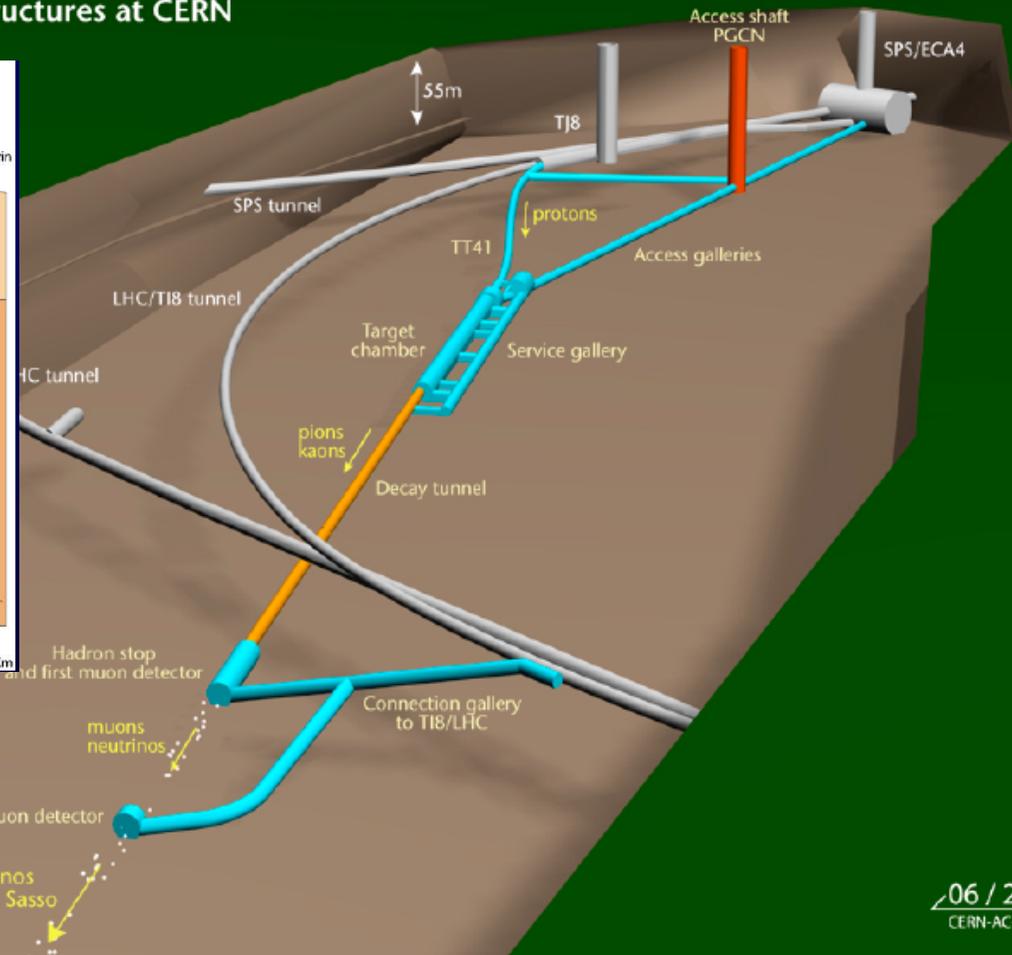
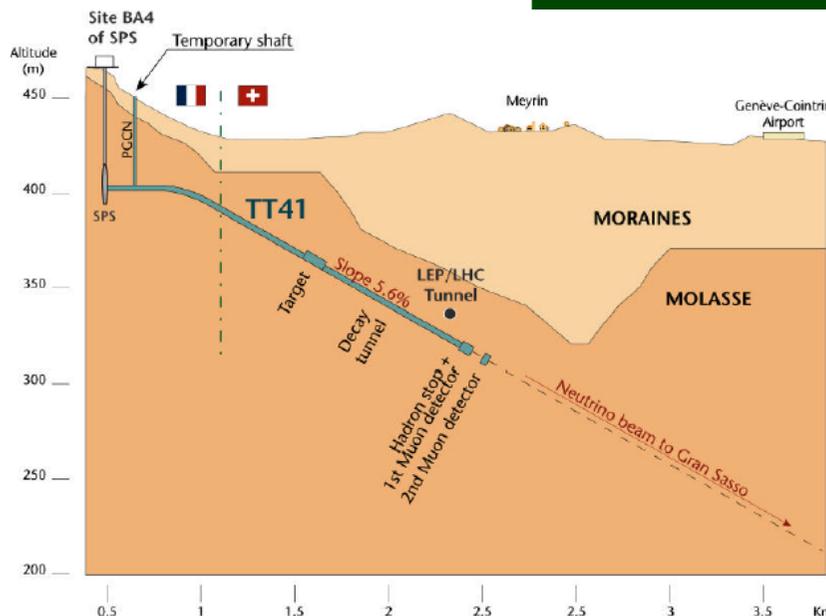


Come nascono i neutrini

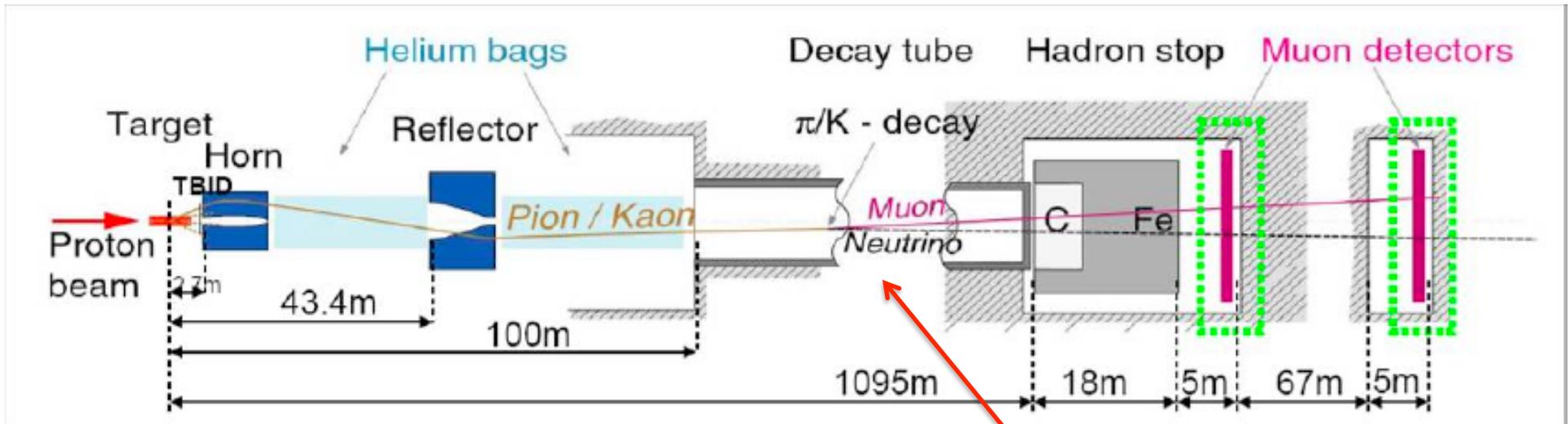
I protoni di 400 GeV dell'SPS (SuperProtoSincrotrone) urtano un bersaglio di grafite, producendo particelle secondarie come i mesoni π^+ e K^+ , i quali decadono tipicamente in neutrino muonico e muone positivo.



CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO Underground structures at CERN



Come nascono i neutrini



Il famoso tunnel del Ministro Gelmini ...

E quanti sono ?

I protoni di energia 400 GeV che ad ogni ciclo di 6s dell'SPS vengono diretti contro il bersaglio di produzione sono circa 5×10^{13} , divisi in due "bunch" di 10.5 μ s, ad una distanza temporale di 50 ms.

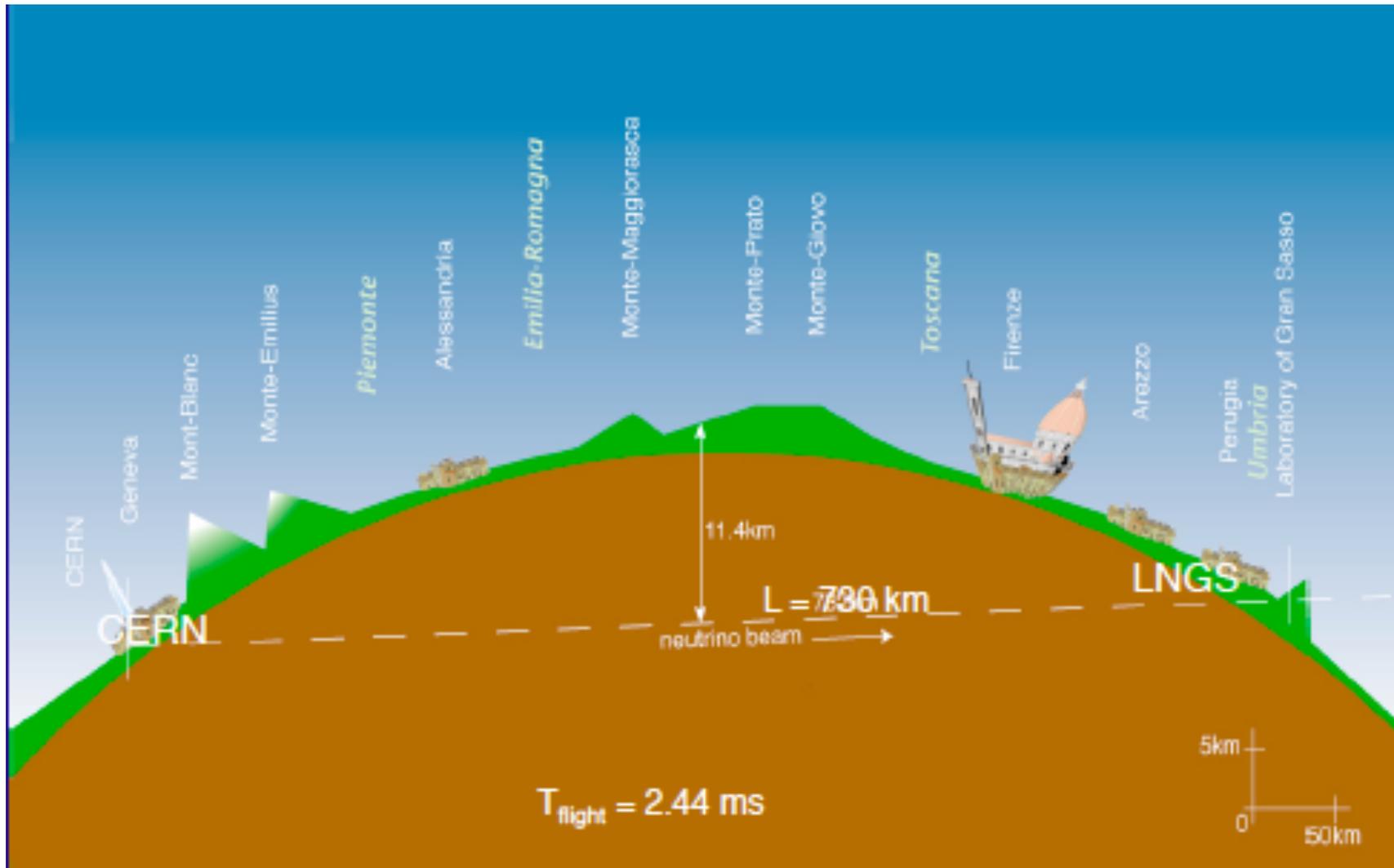
Ogni protone dà origine, mediamente, a 3 neutrini, quindi ad ogni ciclo dell'SPS se ne producono in media ben 1.5×10^{14} .

Il fascio ha una divergenza di 1.9 mrad per cui, al Gran Sasso, ovvero dopo 732 km, esso ha un diametro efficace di 2.8 km.

In OPERA, il flusso "istantaneo" dei neutrini durante lo spill è quindi dell'ordine di $1.2 \times 10^8 \nu/\text{cm}^2 \text{ s}$

In tre anni, a fronte di circa 10^{20} pot (protons on target), e quindi di ≈ 3 volte tanti neutrini prodotti, se ne sono visti poco più di 16 000...

Il viaggio dei neutrini



La misura

Evidentemente, per poter determinare la velocità dei neutrini occorre conoscere sia la **distanza** percorsa che il **tempo** impiegato a percorrerla.

Quanto alla **distanza**, sia la posizione del bersaglio che quella del rivelatore vengono determinate a partire da due posizioni (benchmark) una al CERN e una al Gran Sasso, determinate con il GPS, dalle quali, per triangolazione, si determinano le coordinate che interessano.

Il risultato ha fornito **$D = 731\,278.0 \pm 0.2 \text{ m}$** .

L'incertezza dei 20 cm è dominata dall'incertezza nella posizione del detector, poichè il benchmark al Gran Sasso era fuori galleria, a circa 10km dal rivelatore.



Due parole sul GPS

Ad una distanza di oltre 20,000 km orbitano 24 satelliti distribuiti su 6 orbite, ciascuno provvisto di un orologio atomico. Essi inviano a Terra costantemente sia la loro posizione (effemeridi) che il tempo locale, segnato dall'orologio al momento della emissione del segnale.

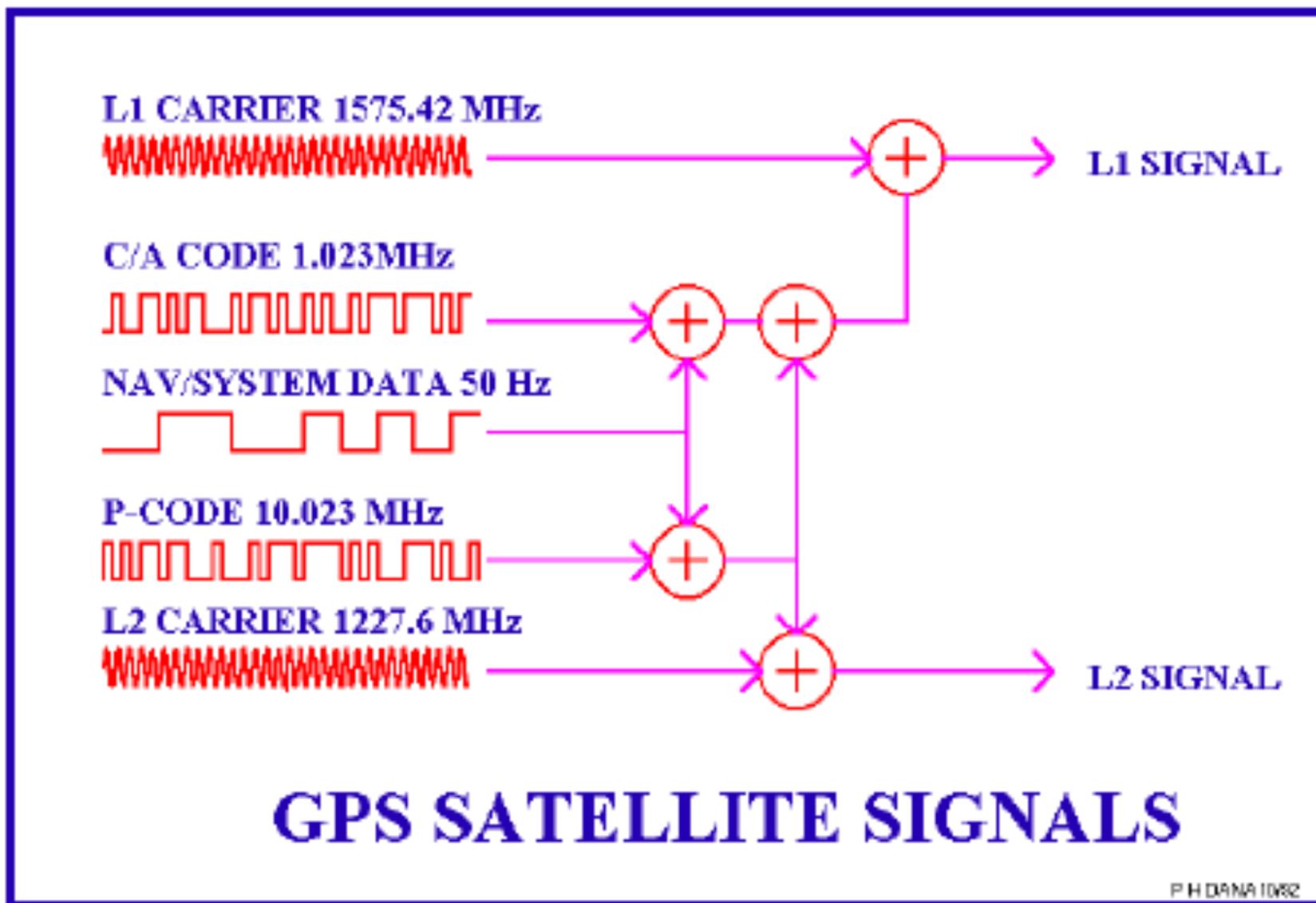


Il ricevitore GPS a terra confronta il tempo di partenza del segnale, con quello suo e stabilisce il ritardo. Moltiplicando per c definisce quindi la sua distanza dal satellite.

Trovare la posizione del ricevitore significa determinare le sue tre coordinate: usando il segnale da quattro satelliti si può determinare sia la posizione che il tempo corretto del ricevitore, sincronizzato su quello degli orologi atomici in orbita.

La precisione nella determinazione della posizione di un oggetto fermo può arrivare al centimetro.

Due parole sul GPS



Il tempo di volo CERN-LNGS

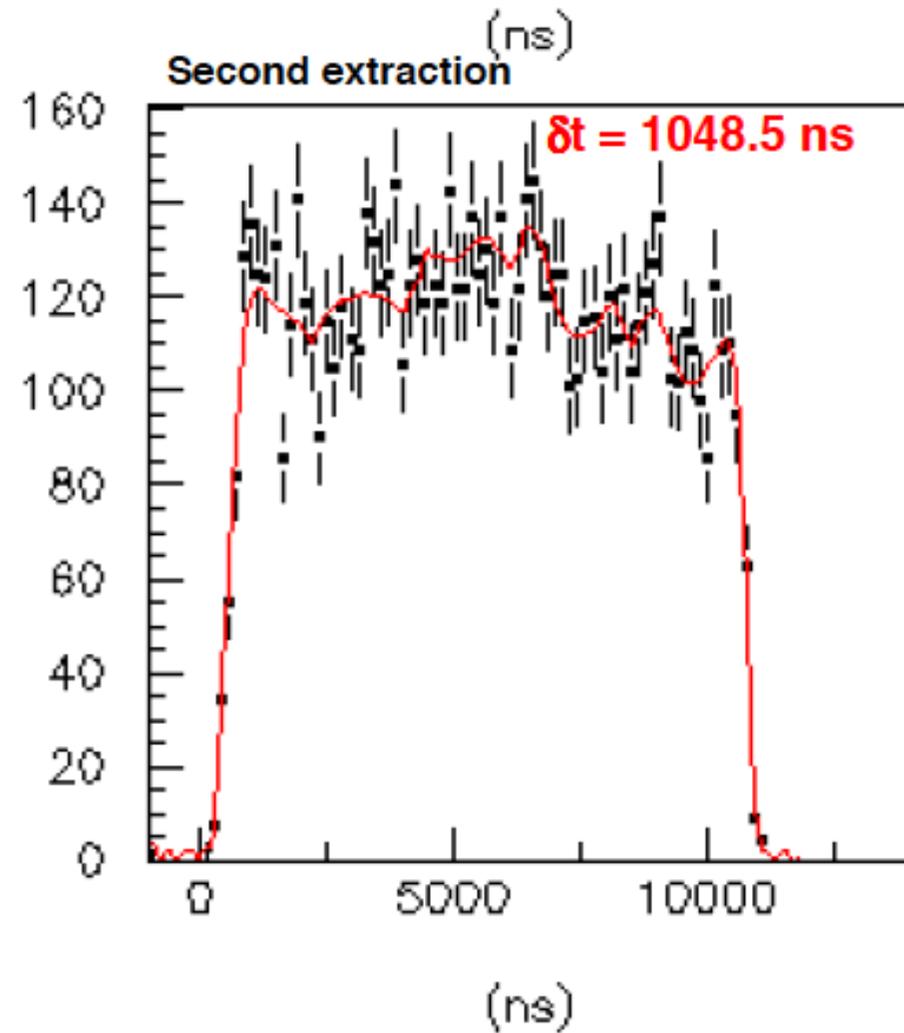
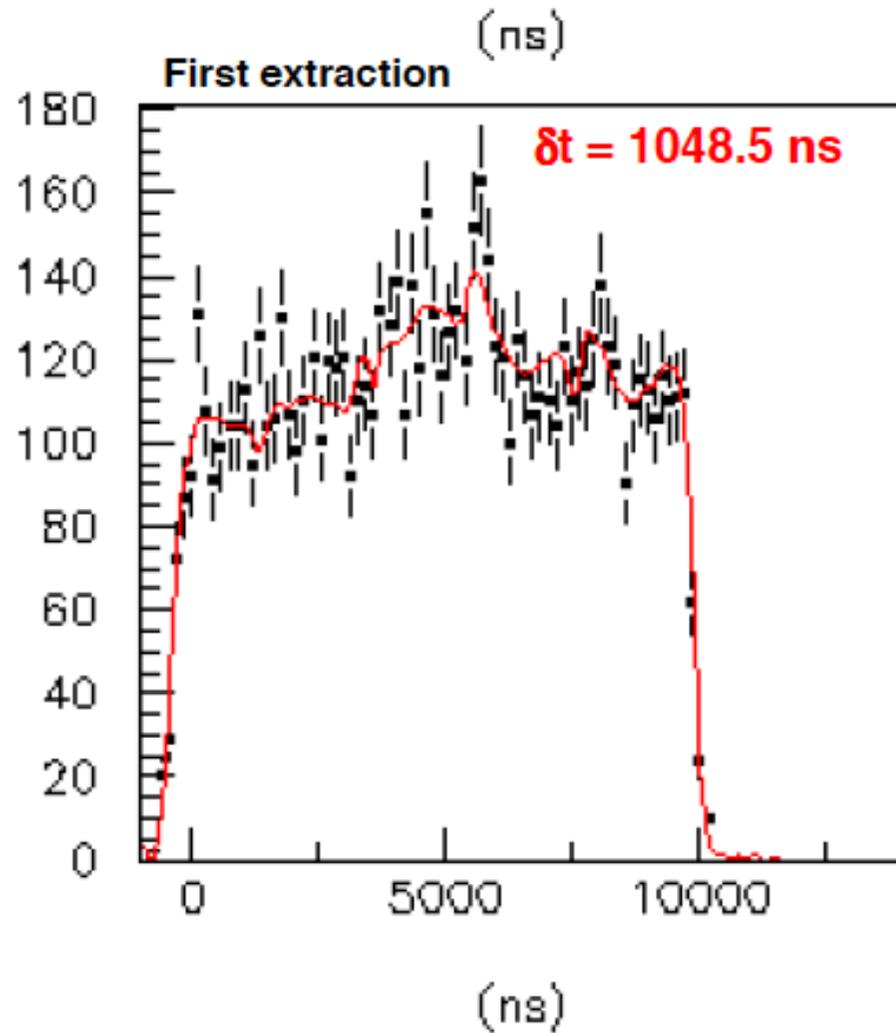
Mentre si conosce piuttosto bene il tempo di arrivo del neutrino rivelato in OPERA, non si conosce il suo tempo di partenza, in quanto può essere stato originato da uno qualsiasi dei protoni che colpiscono il bersaglio, durante i $10.5 \mu\text{s}$ di tempo di spill.



Una volta ogni 120, uno spill "vince" la lotteria ed uno dei neutrini originato da uno qualsiasi dei suoi 2.5×10^{13} protoni si "mostra" in OPERA.



Il tempo di volo CERN-LNGS



La velocità dei neutrini osservata da OPERA

$$L=731,278 \pm 0.2 \text{ m} \quad \rightarrow \quad t_{\gamma}=2,439,281 \text{ ns}$$

$$t_{\nu}=2,439,220 \pm 10 \text{ ns}$$



$$\frac{V - c}{c} = (+2.49 \pm 0.45) \times 10^{-5}$$

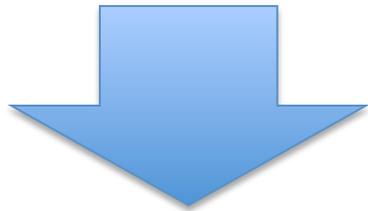
Perché questo risultato
è un problema ?



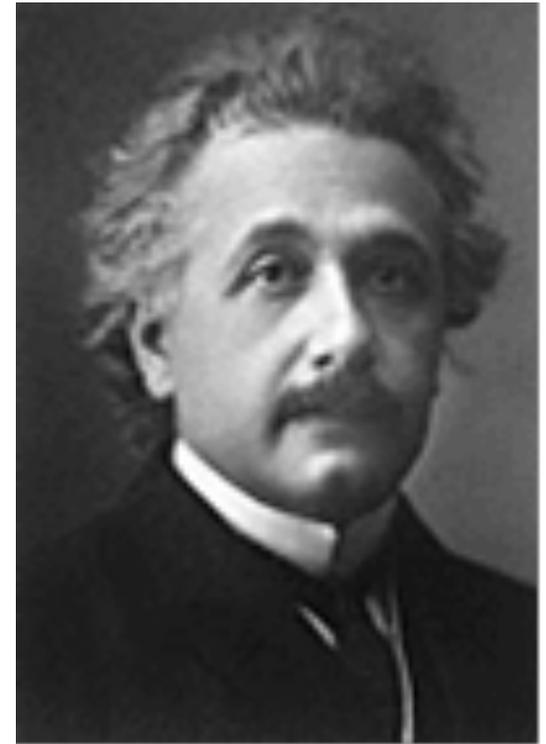
La Relatività Ristretta

Essa si basa sui due principi seguenti

- a) Le leggi fondamentali della Fisica hanno la stessa forma in tutti i riferimenti inerziali.
- a) Non esiste l'azione a distanza: le interazioni fondamentali si propagano in vuoto a velocità finita.



Poiché la velocità di propagazione in vuoto delle interazioni deve entrare, evidentemente, nella forma che descrive la legge che le riguarda, questa velocità **deve essere** la stessa in ogni sistema di riferimento.



La Relatività Ristretta

Consideriamo il caso dell'elettromagnetismo:

Le equazioni di Maxwell ci dicono che esso si propaga in vuoto alla velocità (della luce)

$$c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

Questa velocità è definita dalle proprietà dielettriche e magnetiche del vuoto ed il vuoto è evidentemente lo stesso in ogni riferimento inerziale, dunque c deve essere la stessa in ogni riferimento inerziale !

La Relatività Ristretta

Però, la conclusione di una velocità che sia indipendente dal sistema di riferimento inerziale in cui essa si osserva, confligge con l'idea del tempo "assoluto" di Newton che implica la legge di somma delle velocità "classica".

Il contributo di Einstein fu proprio la critica al concetto di tempo assoluto.

Sulla base dell'omogeneità del tempo, dell'omogeneità ed isotropia dello spazio e della richiesta che per trasformazioni di riferimento i moti rettilinei uniformi restino tali, **si conclude in modo univoco** che queste leggi di trasformazione, che devono quindi garantire, per esempio, che un raggio luminoso in un riferimento si propaghi sempre e comunque alla velocità c , sono le **trasformazioni di Lorentz**.

Sulla base delle ipotesi di cui sopra, **non ce ne sono altre possibili.**

Queste leggi di trasformazione delle coordinate spazio-temporali sono alla base della Teoria della Relatività Ristretta.

Che cosa dice la Relatività Ristretta, riguardo alle velocità possibili ?

1) nessuna massa che possa essere osservata a riposo, può mai viaggiare in un altro riferimento inerziale ad una velocità $v \geq c$.

2) La radiazione elettromagnetica (il fotone) viaggia a c in ogni sistema di riferimento inerziale.

3) E' possibile che esistano entità (tachioni) i quali viaggiano comunque **sempre** a velocità superiori a c in ogni riferimento inerziale, per i quali, quindi, non esiste il riferimento in cui sono "a riposo".

Il neutrino è tachionico ?

I tachioni presentano alcune difficoltà rilevanti:

- 1) se, in un riferimento assegnato la sorgente A emette un tachione e B lo riceve ad un tempo successivo, in un opportuno riferimento inerziale l'emissione e la ricezione possono essere simultanei pur essendo A e B in luoghi diversi e, addirittura la ricezione può precedere l'emissione ... **Non rispettano la causalità !**
- 2) Mentre per le particelle con massa si può parlare di spin, che descrive il numero finito di gradi di libertà interni della particella data, legati al sistema di riferimento in cui è osservata, nel caso dei tachioni essi o hanno spin nullo (scalari) oppure hanno un numero infinito di gradi di libertà interni, caso di pressoché impossibile armonizzazione con quella delle particelle usuali.

Il neutrino non può essere scalare (spin nullo): si ricordi che fu introdotto sia per spiegare la conservazione dell'energia nei decadimenti beta che per spiegare la conservazione del momento angolare, la quale richiede che esso abbia spin $\frac{1}{2}$!

Conclusioni

La Fisica è una scienza sperimentale: **la più bella teoria non regge ad un solo fatto sperimentale che la contraddice.**

Se il risultato di OPERA sarà confermato nel senso che il neutrino davvero può viaggiare a velocità superluminali, dovremo trovarne una spiegazione ...

Ciò che oggi possiamo dire è che questa spiegazione, se si renderà necessaria, non potrà avvenire attraverso semplici riaggiustamenti, ma solo con un ripensamento profondo di quanto abbiamo dato per acquisito.

Comunque, le prove accumulate a favore della RR sono tali e tante che l'atteggiamento più ragionevole da tenere oggi è quello di **aspettare a trarre conclusioni** ...

E' possibile infatti che OPERA abbia commesso un errore, per esempio abbia sottostimato le incertezze con cui determina il tempo di volo, oppure sia presente nella misura un errore sistematico che li ha portati fuori strada ...

Conclusioni mie ...

