

L'Insostenibile Velocità del Neutrino

Roberto Ferrari

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Liceo Scientifico Marconi - Parma, 19 novembre 2011

Sommario

1: i neutrini

2: la produzione

3: la rivelazione

1. i neutrini

i Neutrini



neutrino elettronico



neutrino muonico



neutrino tau



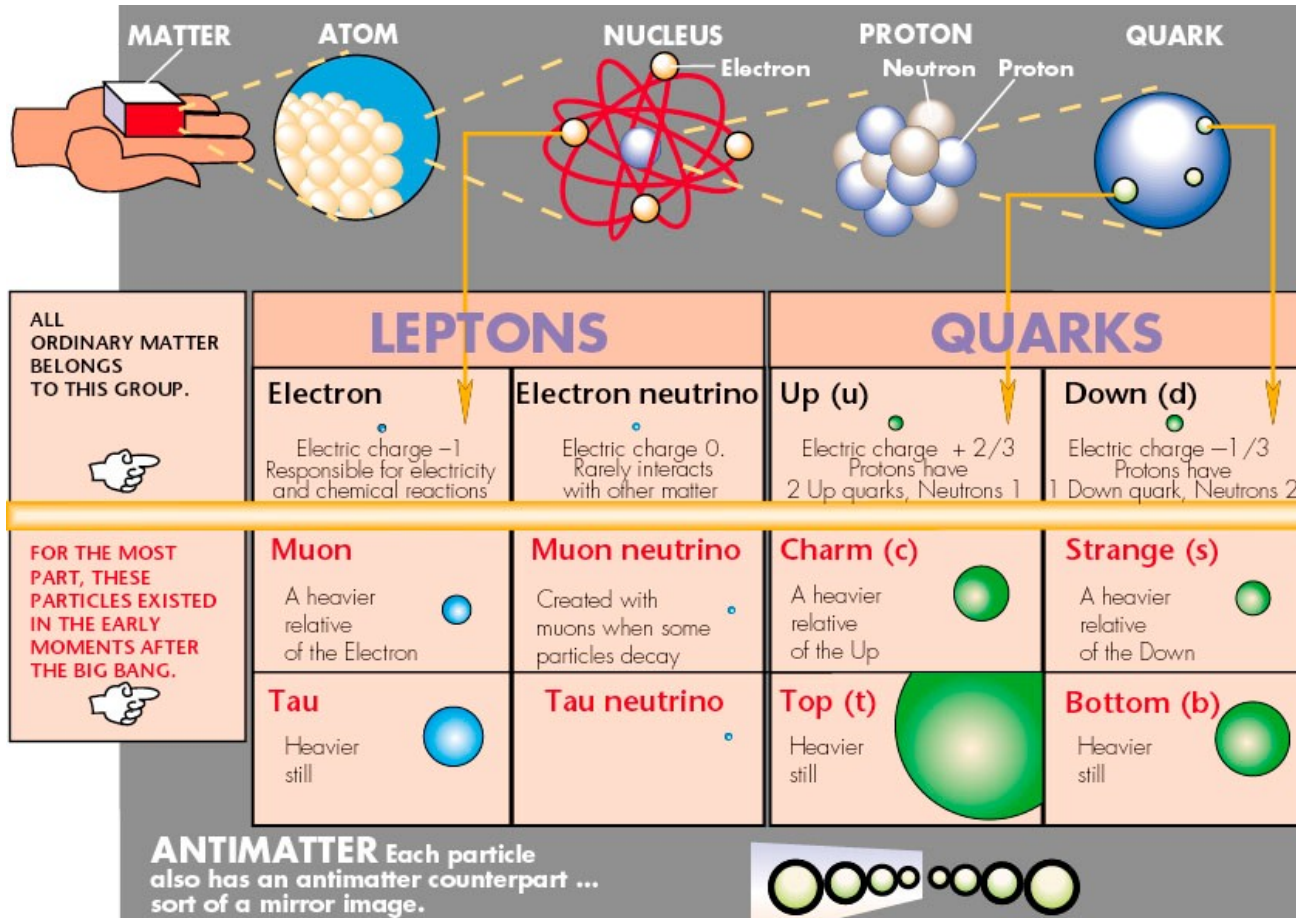
antineutrino elettronico



antineutrino muonico



antineutrino tau



Neutrini

3 particelle [ν_e, ν_μ, ν_τ], neutre, spin $\frac{1}{2}$

massa [m_1, m_2, m_3] $\ll m_e$



ipotizzati da Pauli e "descritti" da Fermi

si mescolano (Pontecorvo) in modo "strano"

forse sono ancora più strani (Maiorana)

in ogni angolo dell'universo (fondo cosmico):

$\sim 400/\text{cm}^3$ ($T \sim 1.9$ K)

- 1896 Scoperta della radioattività**
- 1926 Problema del decadimento beta**
- 1930 Ipotesi di Pauli: nasce il neutrino (chiamato allora neutrone)**
- 1933 Fermi lo chiama neutrino; teoria dell'interazione debole**
- 1956 Scoperta sperimentale del neutrino (neutrino elettronico)**
- 1962 Scoperta di un altro tipo di neutrino (neutrino muonico)**
- 1962 Pontecorvo: ipotesi delle oscillazioni di neutrino**
- 1973 Scoperta delle correnti neutre indotte da neutrini**
- 1991 Acceleratore LEP: prova indiretta di soli 3 tipi di neutrino**
- 1970-2000 Deficit dei neutrini solari e atmosferici**
- 1998 Soluzione del problema dei neutrini solari e atm. (oscillazioni)**
- 2000 Scoperto il terzo neutrino (neutrino tauonico)**

Neutrini Solari

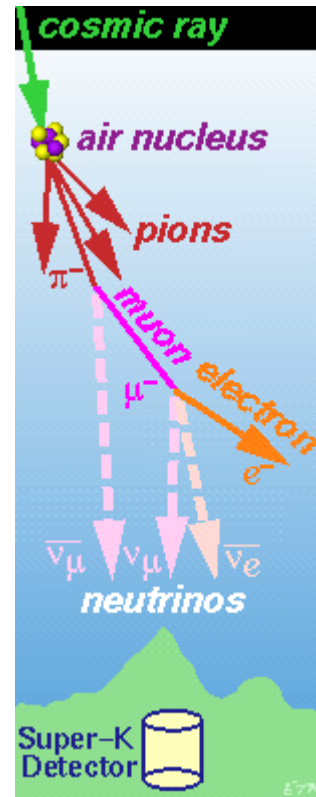
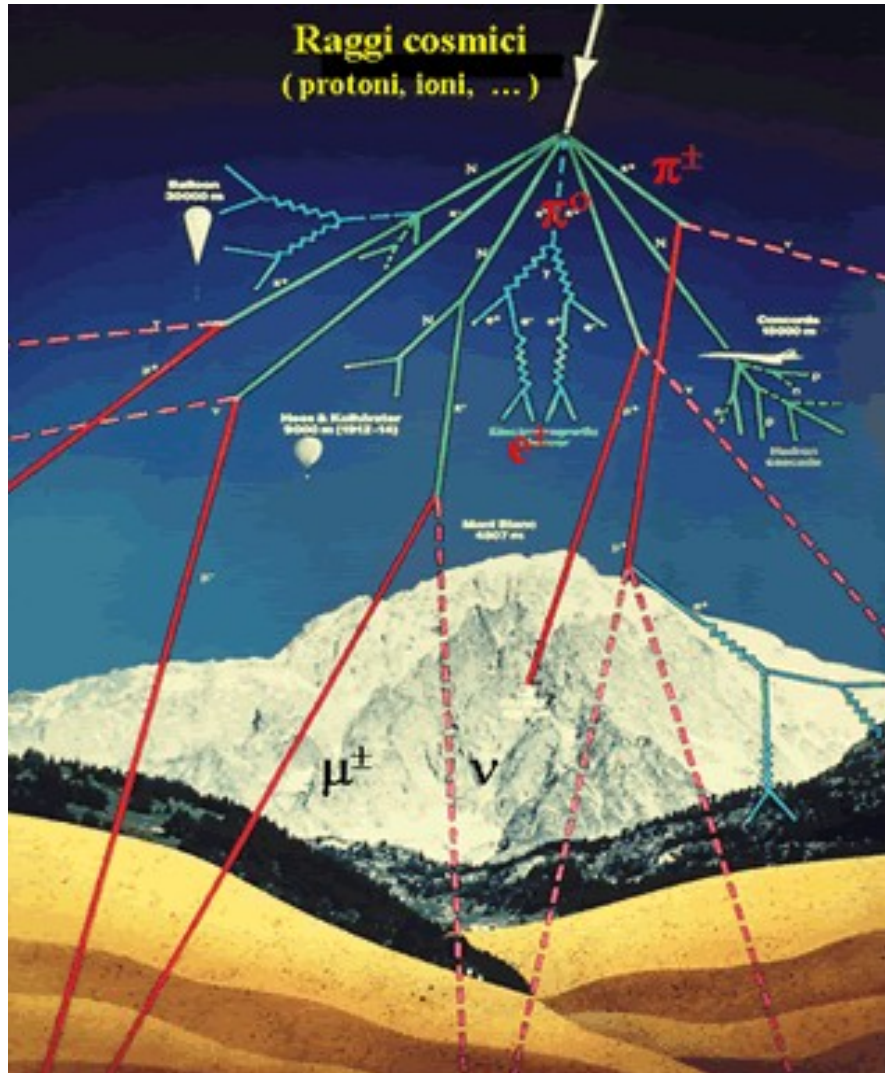


Energia \sim MeV

$\sim 10^{38}$ neutrini al secondo

→ 60 miliardi attraversano ogni cm^2 della superficie terrestre ogni secondo

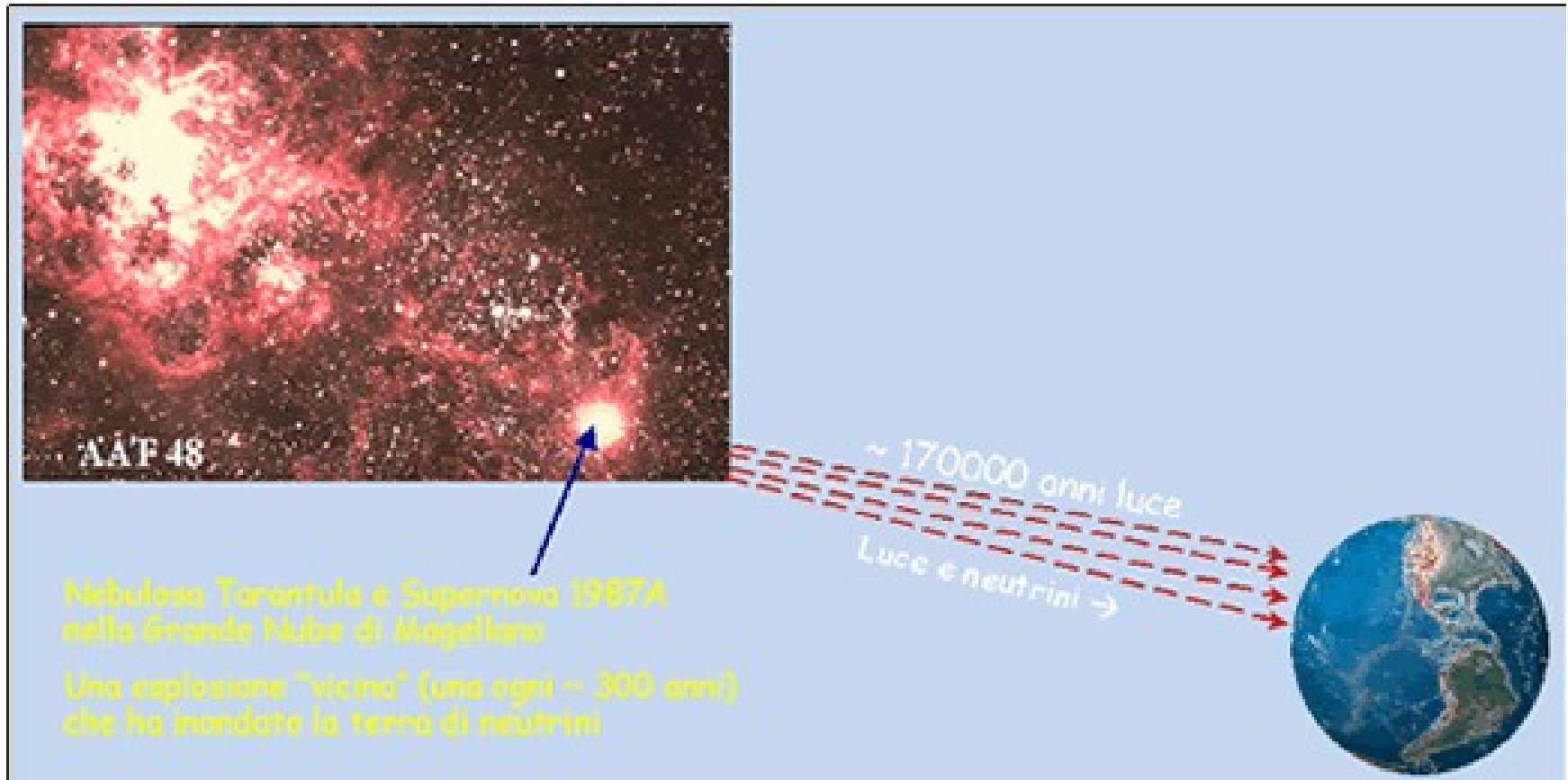
Neutrini atmosferici



$$pp \rightarrow k/\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$$

$$\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$$

SuperNovae



Il nucleo della stella collassa in pochi secondi

SN1987A: 24 neutrini osservati in 3 esperimenti diversi

sono dentro di noi ...

Il corpo umano contiene $\sim 20 \text{ mg } ^{40}\text{K}$

→ ogni giorno danno origine a:

~ 450 milioni di decadimenti

ovvero ~ 450 milioni di neutrini

.. ma non si fanno notare

Ogni secondo, un uomo è attraversato da:

~400000 miliardi di neutrini dal solari

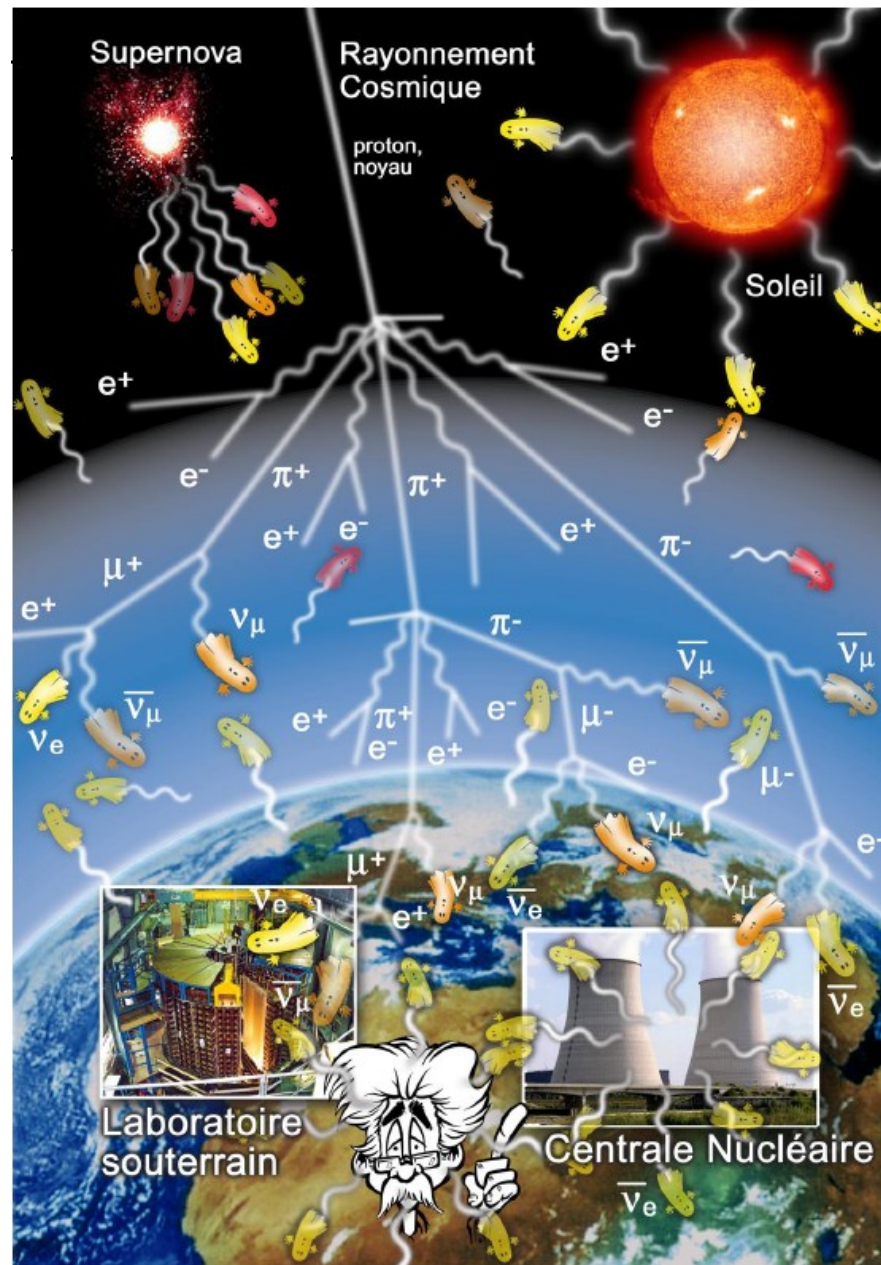
~50 miliardi di neutrini dalla radioattività delle rocce terrestri

~10-100 miliardi di neutrini da tutte le centrali nucleari mondiali

ma in ~100 anni solo 1 interagisce con il nostro corpo

Servirebbe un blocco di ferro lungo 10000 miliardi di km per

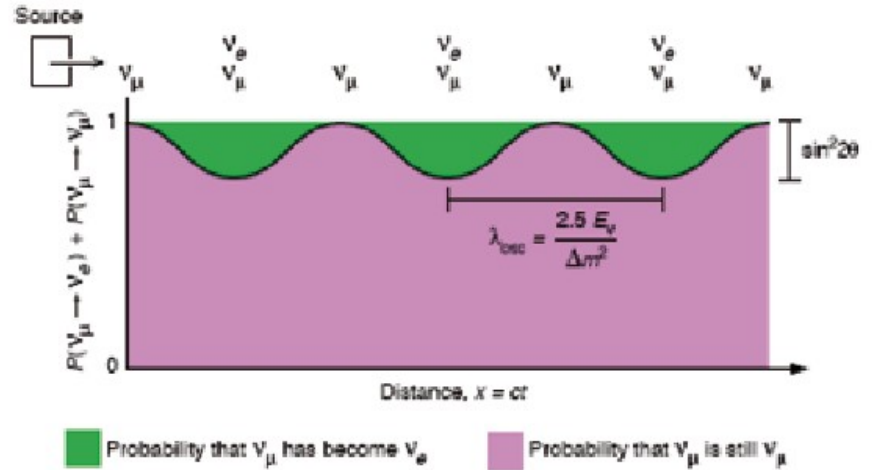
fermarne ~ 50%

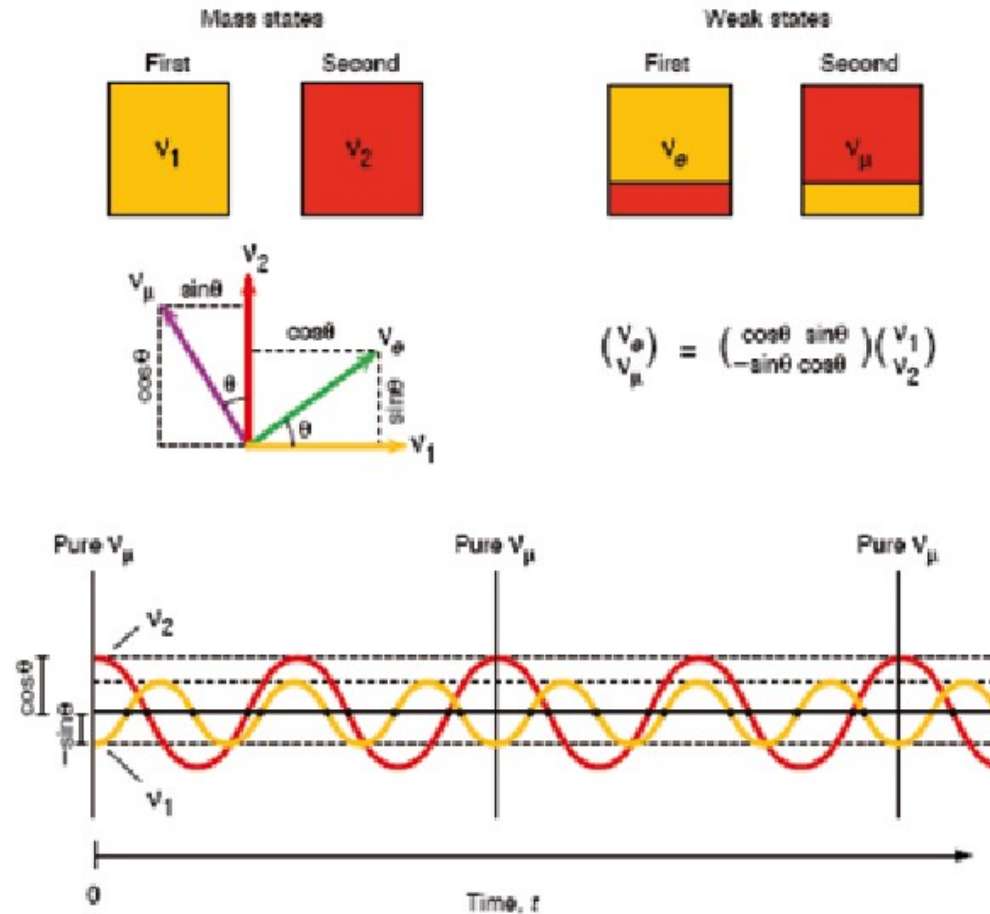


Oscillazioni



Бруно Понтекорво





Oscillazione massima se: Θ (angolo di "mixing") $\sim 45^\circ$.

Sono in 3 ...
Il gioco delle tre carte ...

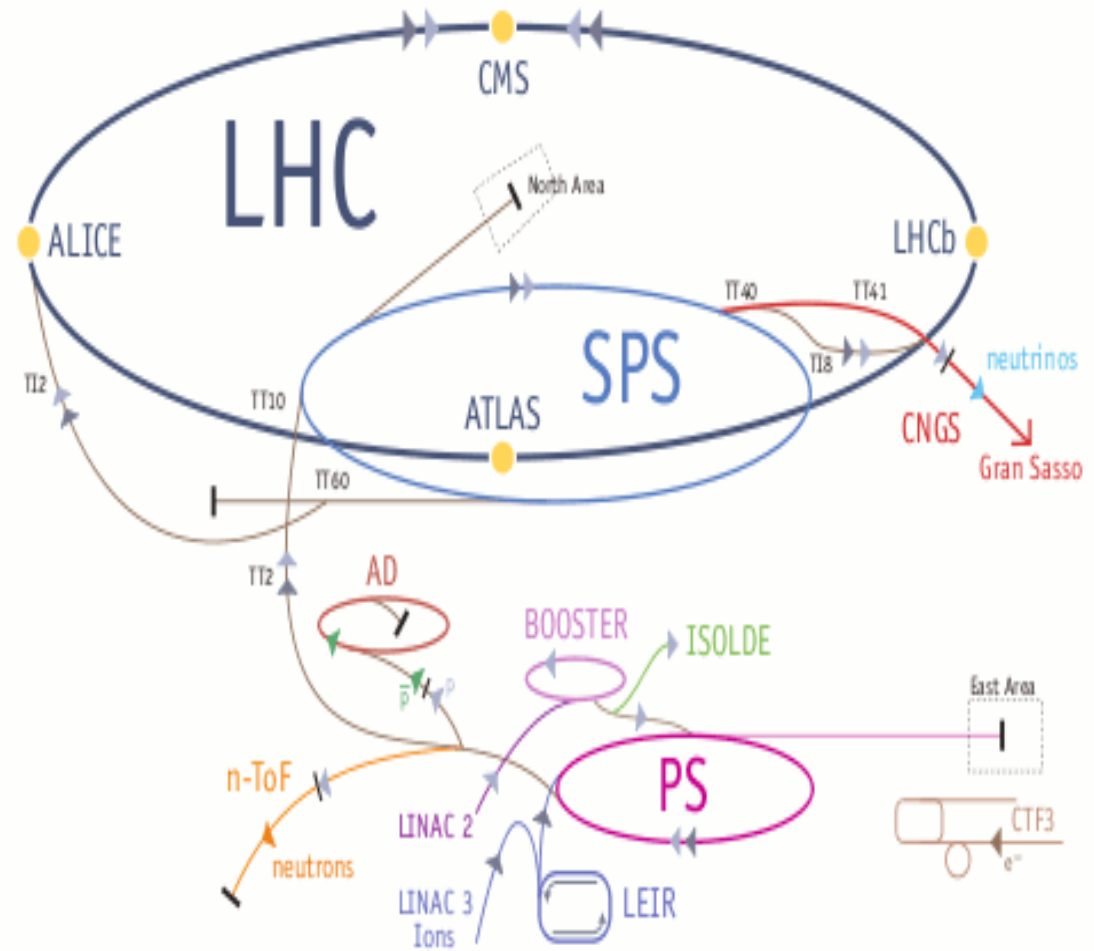


2. la produzione

CERN

Tanti diversi acceleratori: PS, SPS, ..., LHC

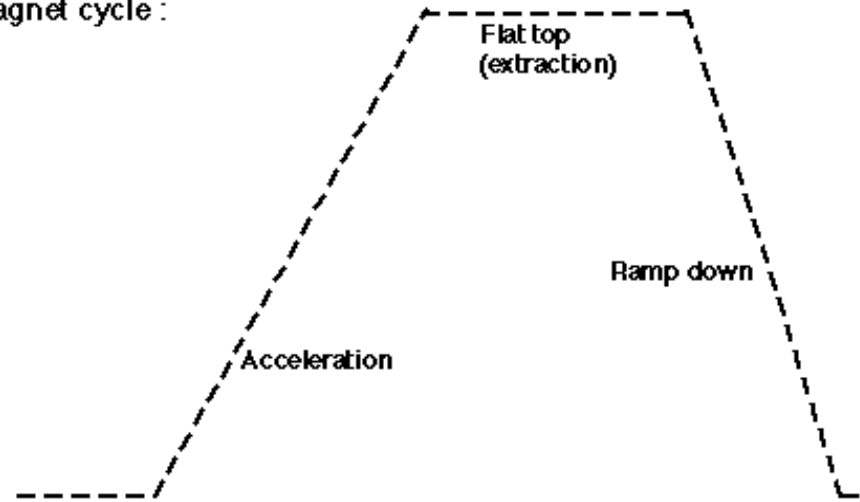
Programma di ricerca mirato (ma non esclusivo) alla fisica delle particelle.



il SuperProtoSincrotrone

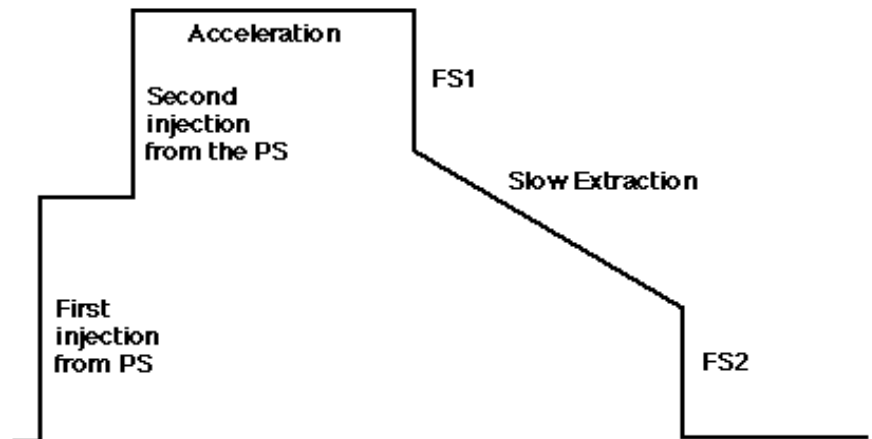
Corrente nei magneti
(energia) →

Magnet cycle :

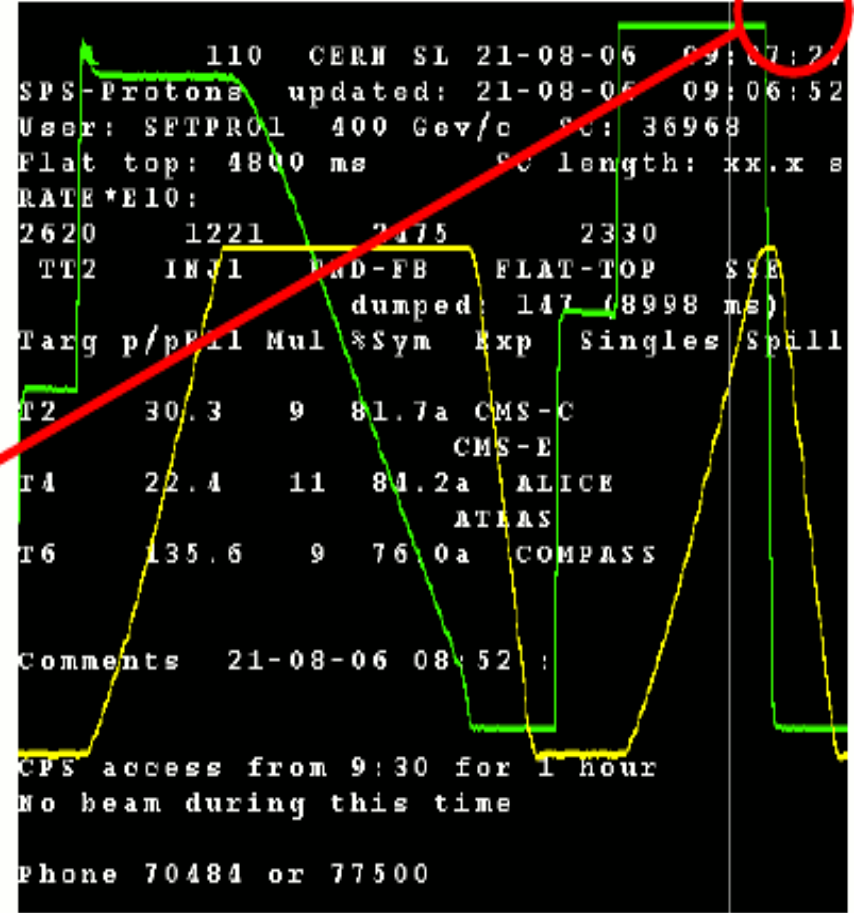
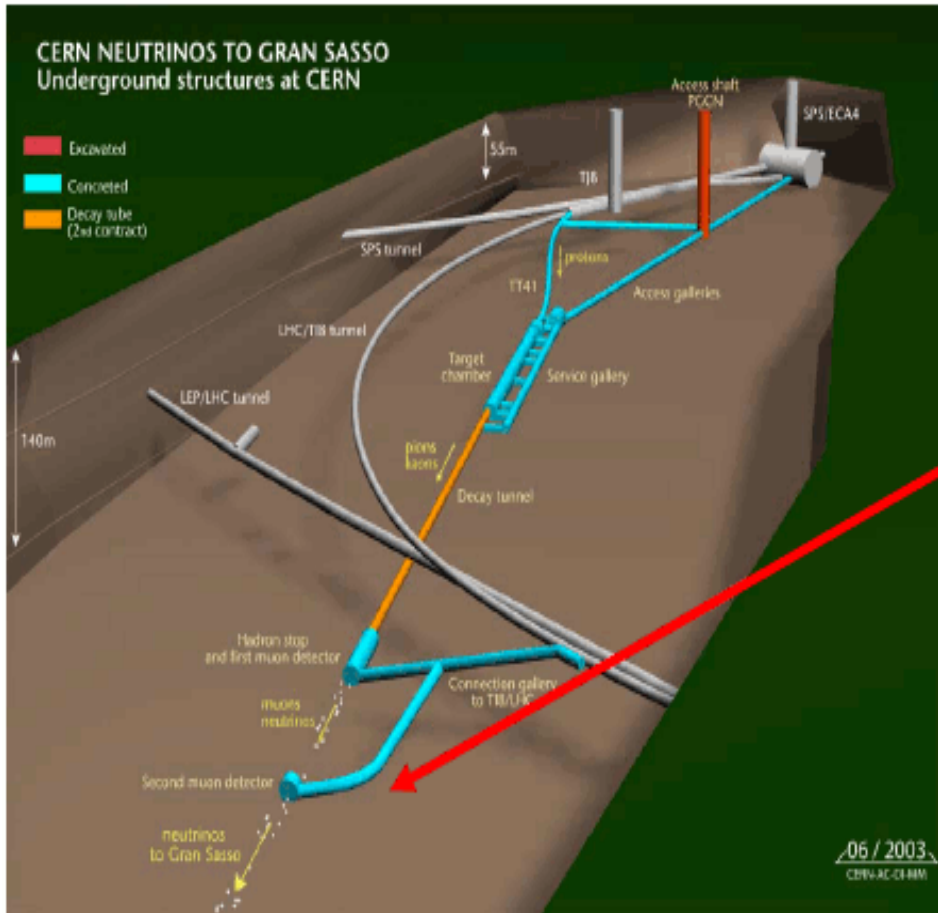


Corrente di fascio
(intensità) →

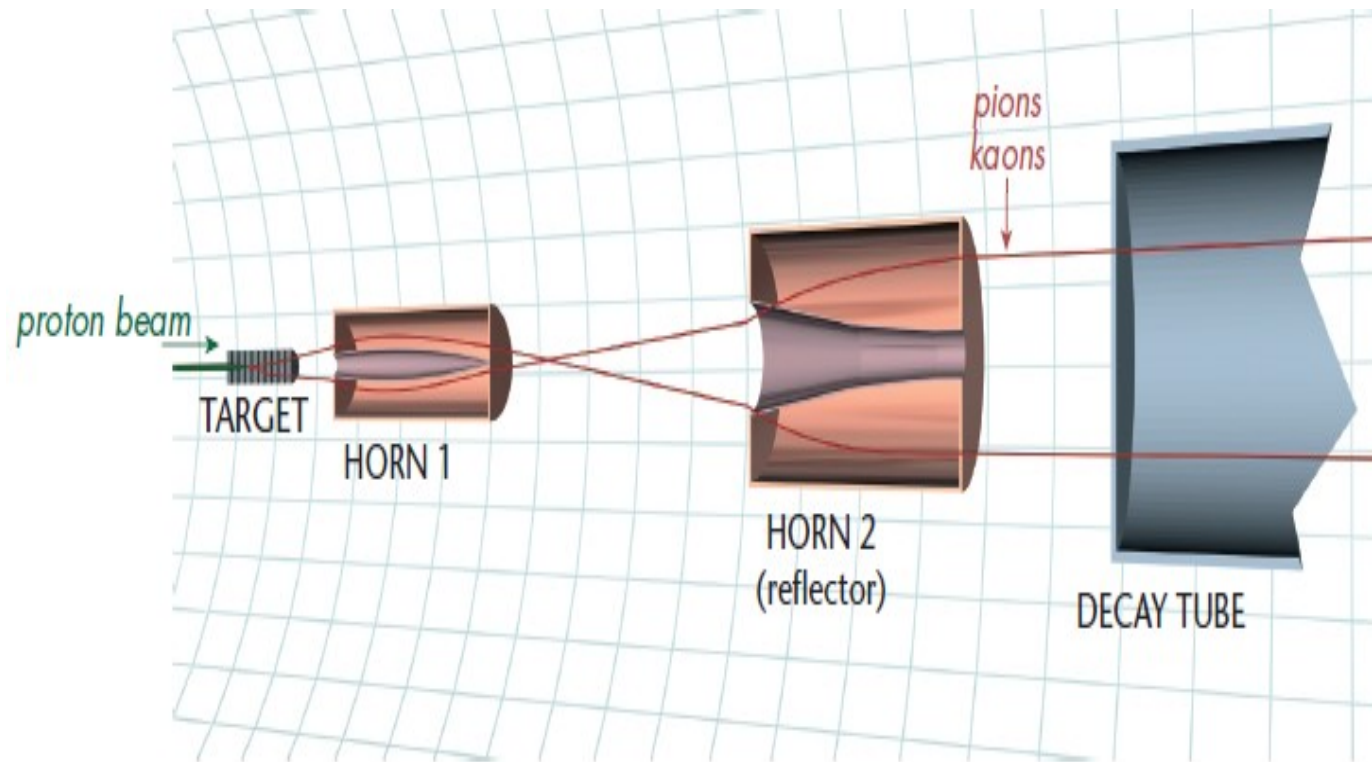
Intensity in the machine :



CNGS

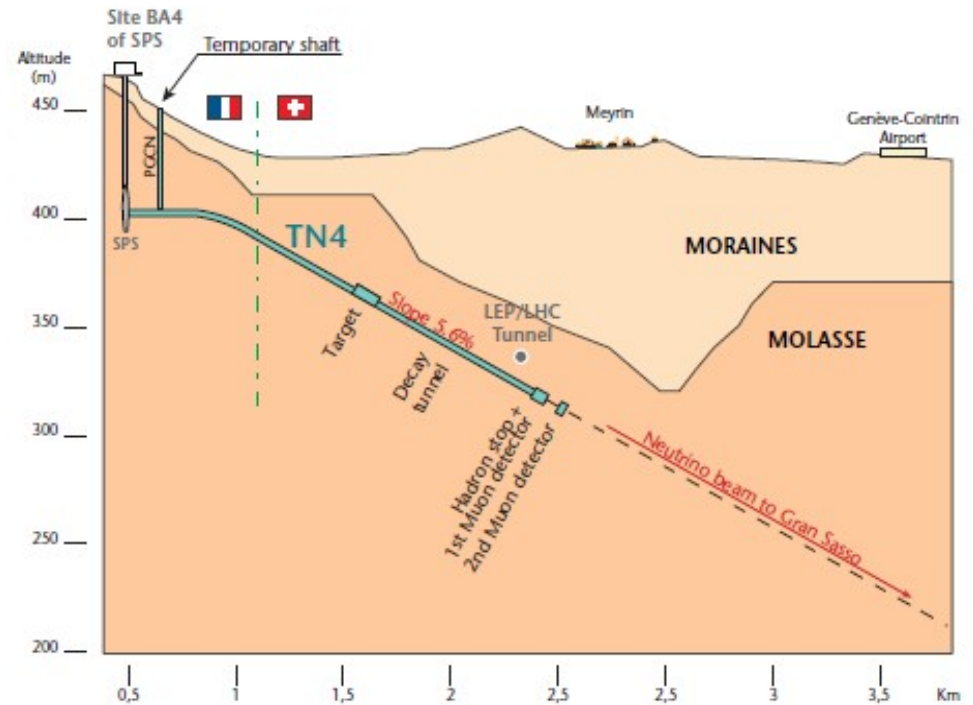


dove nascono i Neutrini

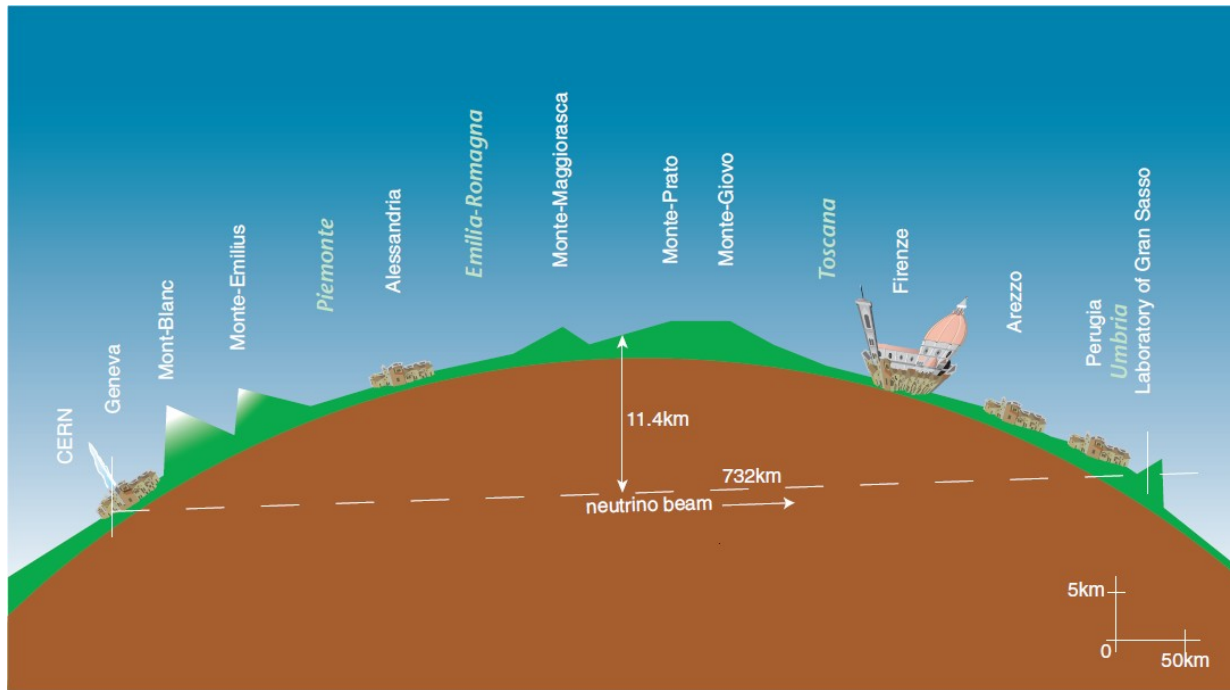




i blocchi di partenza ...



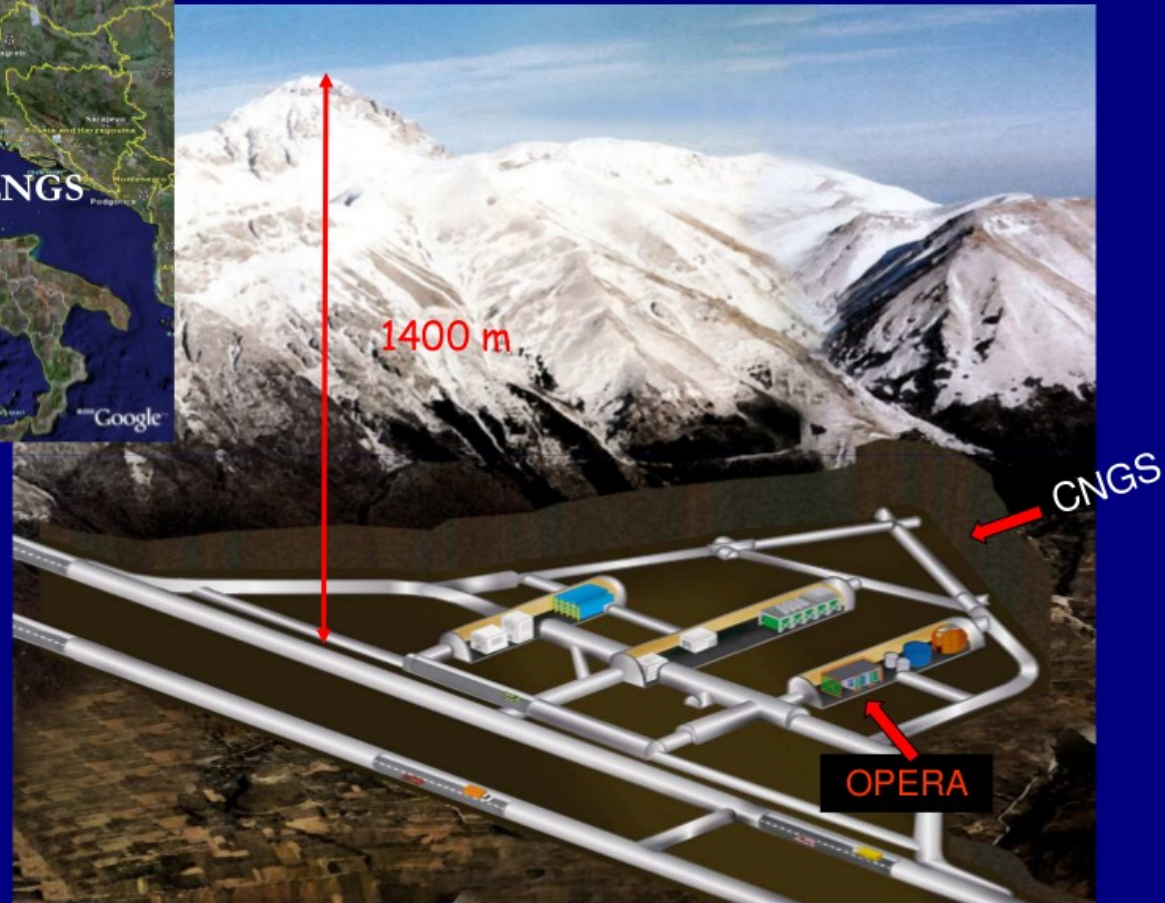
... la strada per il Gran Sasso



Il fascio di neutrini per il Gran Sasso passa sotto il Monte Maggioreasca (confine Parma-Piacenza-Genova)

3. la rivelazione

The LNGS underground physics laboratory



OPERA





SM1

SM2

Target
SM1

Magneti

The OPERA Collaboration

160 physicists, 30 institutions, 11 countries



Belgium

IIHE-ULB Brussels



Italy

LNGS Assergi

Bari

Bologna

LNF Frascati

L'Aquila

Naples

Padova

Rome

Salerno



Korea

Jinju



Croatia

IRB Zagreb



Russia

INR RAS Moscow

LPI RAS Moscow

ITEP Moscow

SINP MSU Moscow

JINR Dubna



France

LAPP Annecy

IPNL Lyon

IPHC Strasbourg



Japan

Aichi

Toho

Kobe

Nagoya

Utsunomiya



Switzerland

Bern

ETH Zurich



Germany

Hamburg



Israel

Technion Haifa



Turkey

METU Ankara



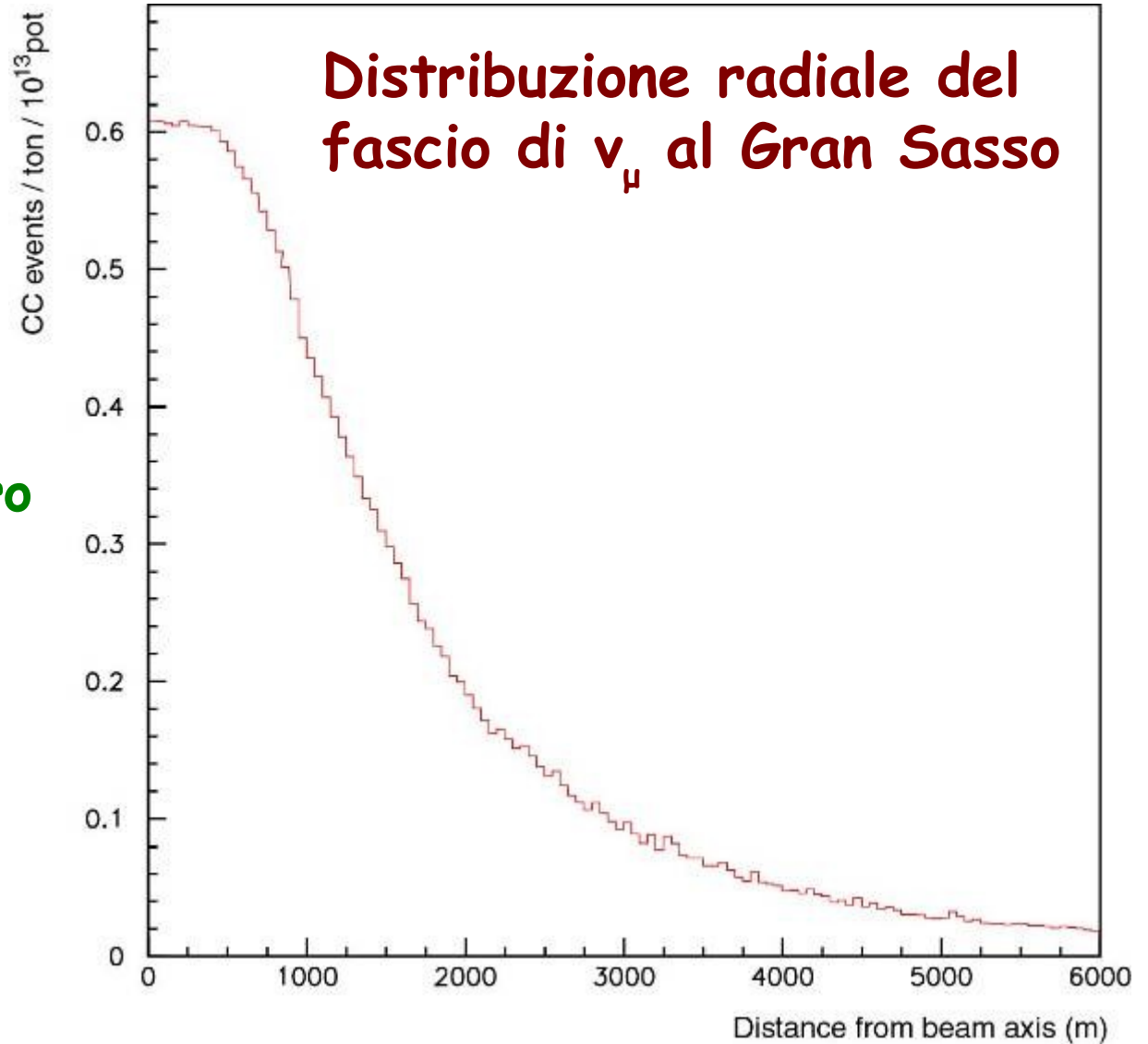
<http://operaweb.lngs.infn.it/scientists/?lang=en>

Protoni su Bersaglio (PoT)



Fascio ν_μ quasi puro

$\langle E \rangle \sim 17 \text{ GeV}$



C.N.G.S. → OPERA

Al giorno:

$\sim 0.2 \times 10^{18}$ P.o.T. → $\sim 0.3 \times 10^{18}$ π/k

→ $\sim 0.1 \times 10^{18}$ neutrini in direzione G.S.

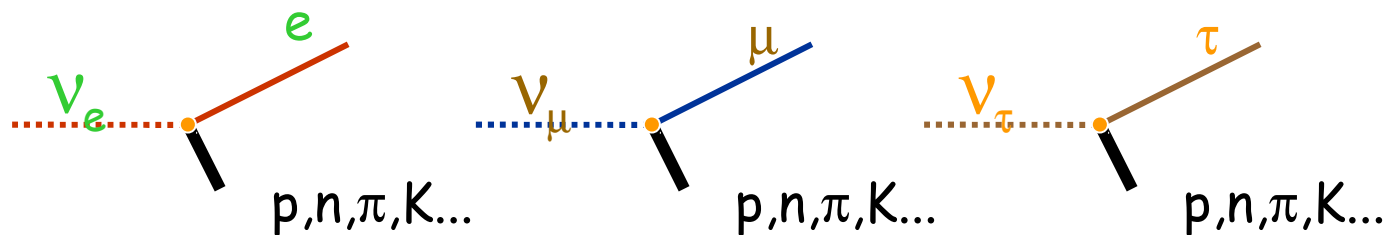
→ $\sim 0.1 \times 10^{12}$ neutrini in OPERA

→ ~ 25 interazioni

~ 600 interazioni/ 10^{19} pot/1000 ton

Come si rivelano ?

Interagiscono raramente, ma quando lo fanno spesso producono il "leptone" fratello



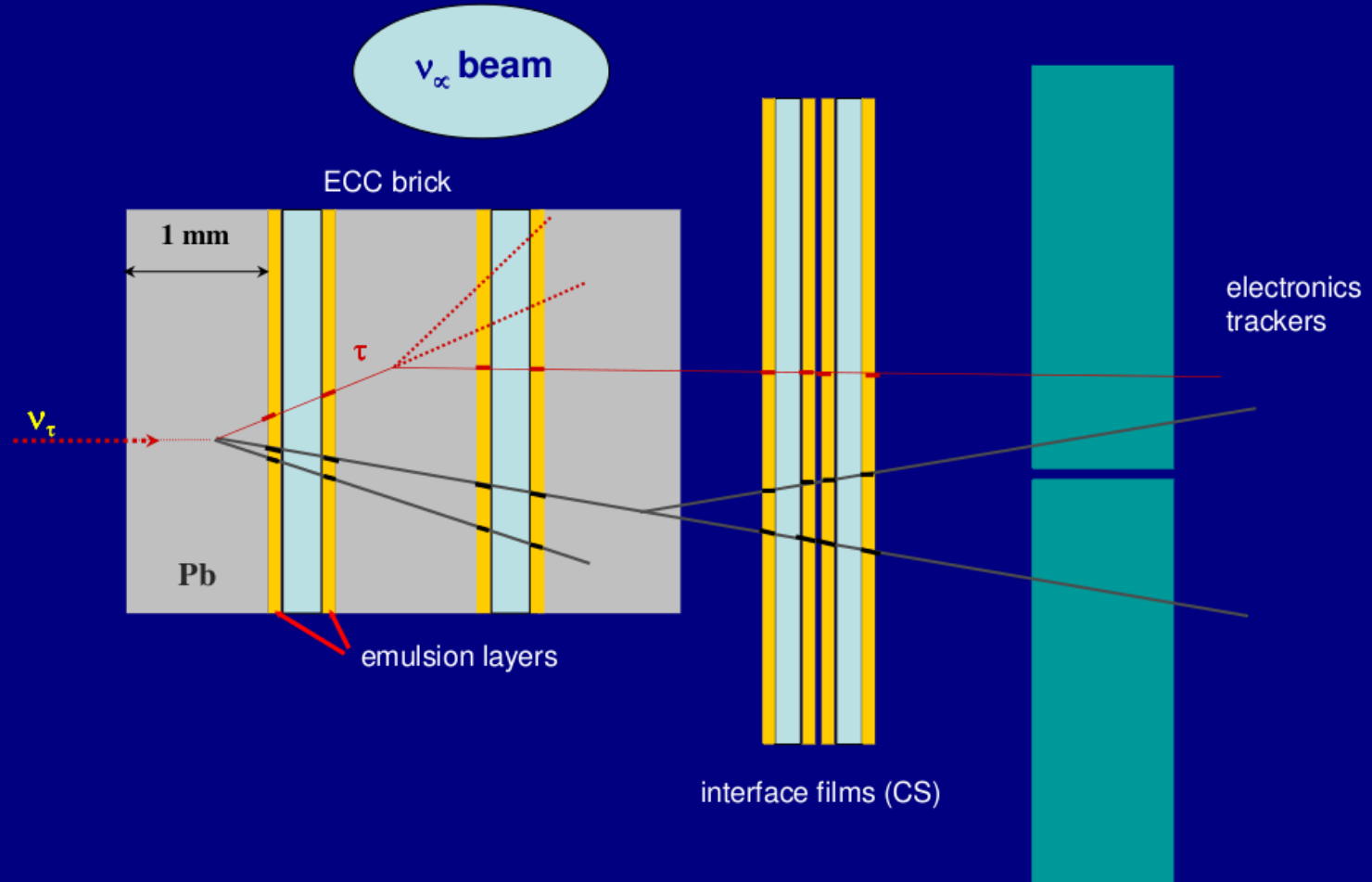
C'è una energia minima necessaria per creare la particella associata:

$$m_e = 0.5 \text{ MeV} \quad m_\mu = 106 \text{ MeV} \quad m_\tau = 1770 \text{ MeV}$$

più alta è l'energia del neutrino, più probabile è l'interazione

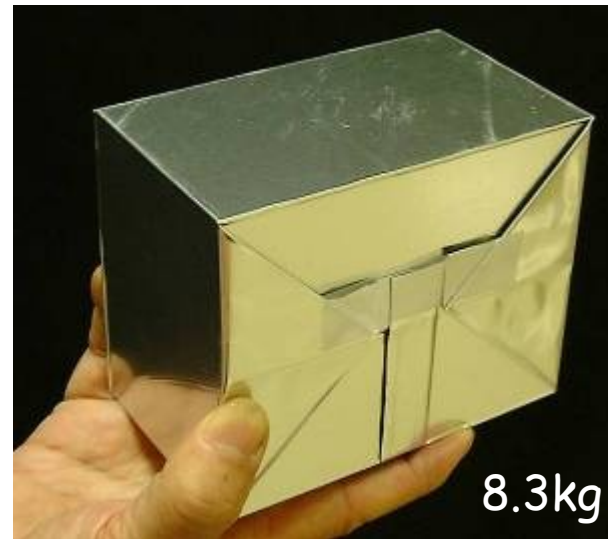
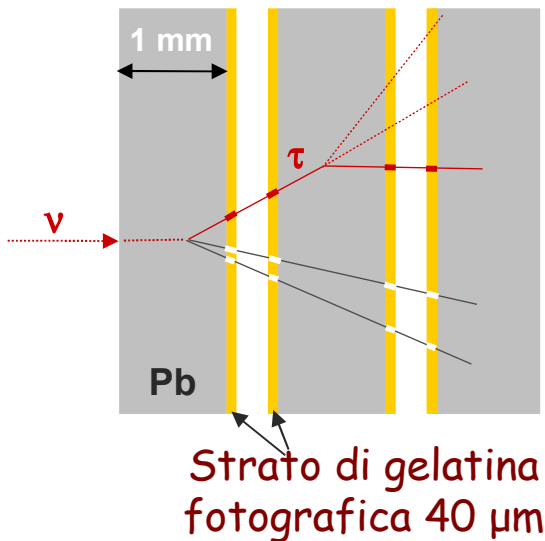
THE DESIGN OF THE OPERA EXPERIMENT

ECC BRICKS + ELECTRONIC DETECTORS FOR $\nu_{\infty} \rightarrow \nu_{\tau}$ OSCILLATION STUDIES



OPERA

1250 ton piombo/emulsioni fotografiche



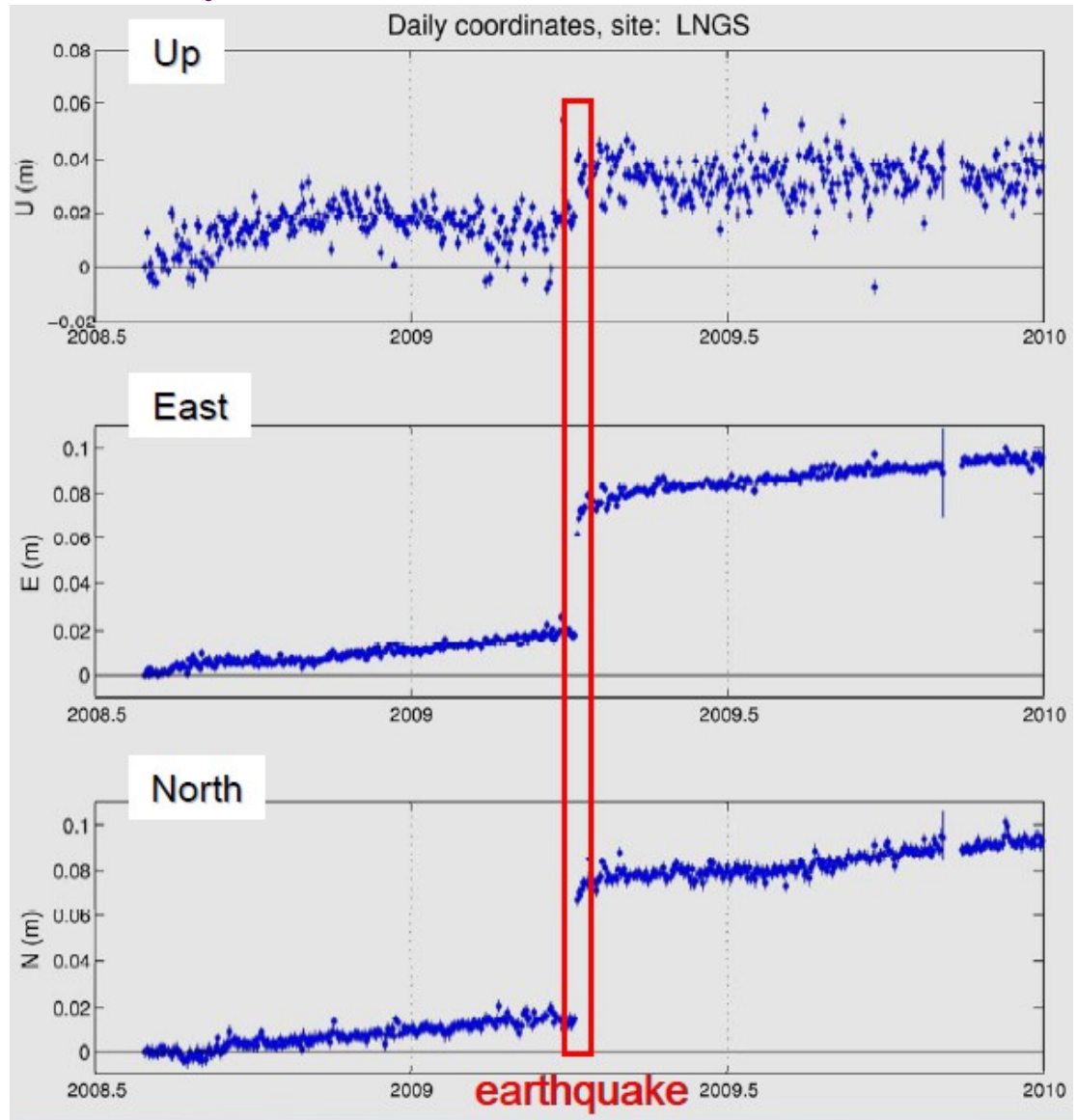
10.2 x 12.7 x 7.5 cm

« bersaglio » massivo : lastre di piombo
precisione micrometrica : emulsioni fotografiche

Lo Spazio

Spostamenti registrati in seguito al terremoto (~7cm)

Errore sulla misura della distanza (730 km): ~20 cm



Il Tempo

Problema più difficile

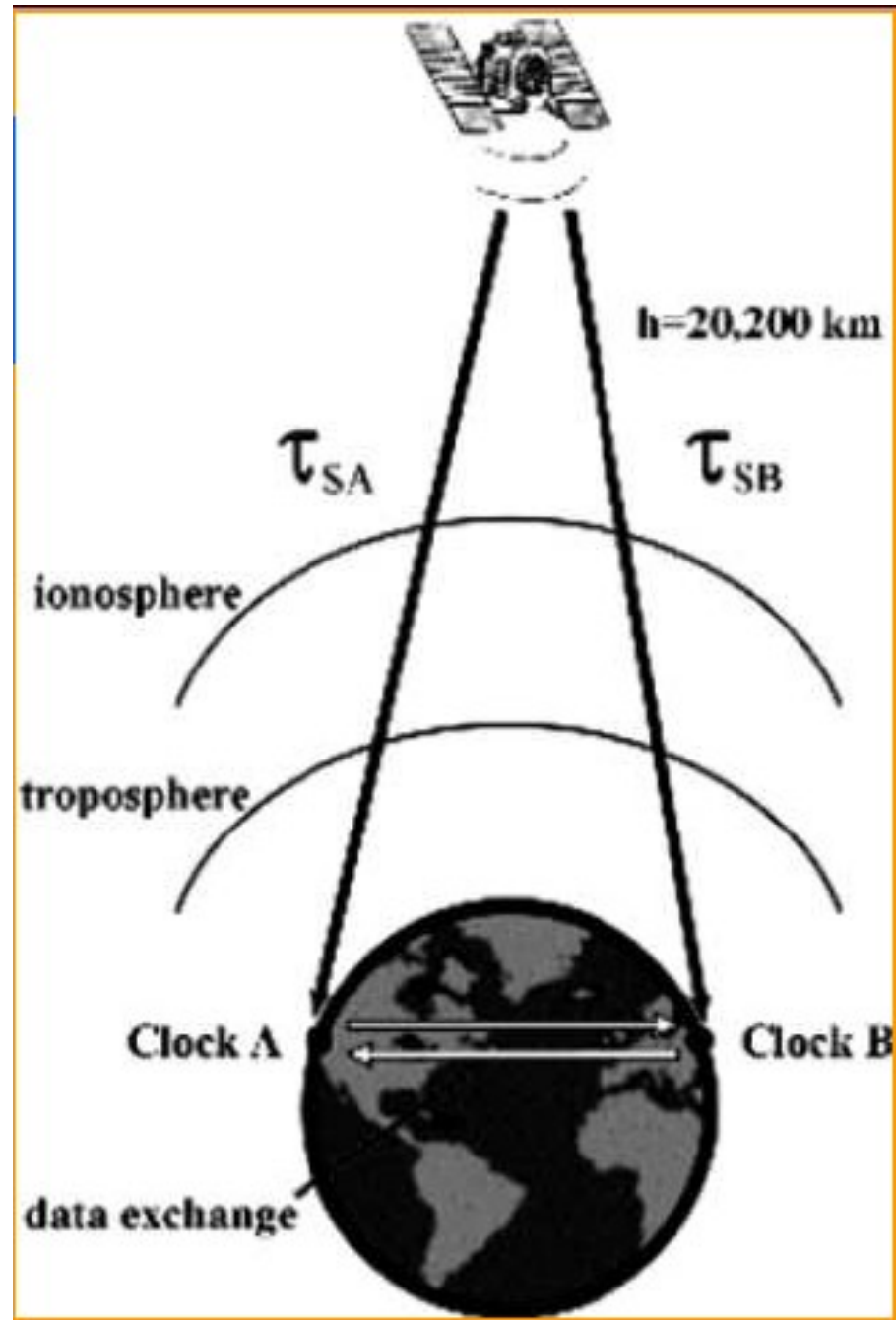
Ritardo totale: somma di tanti diversi pezzi ognuno con problemi specifici

Problema più grosso: sincronizzazione dei due "orologi"

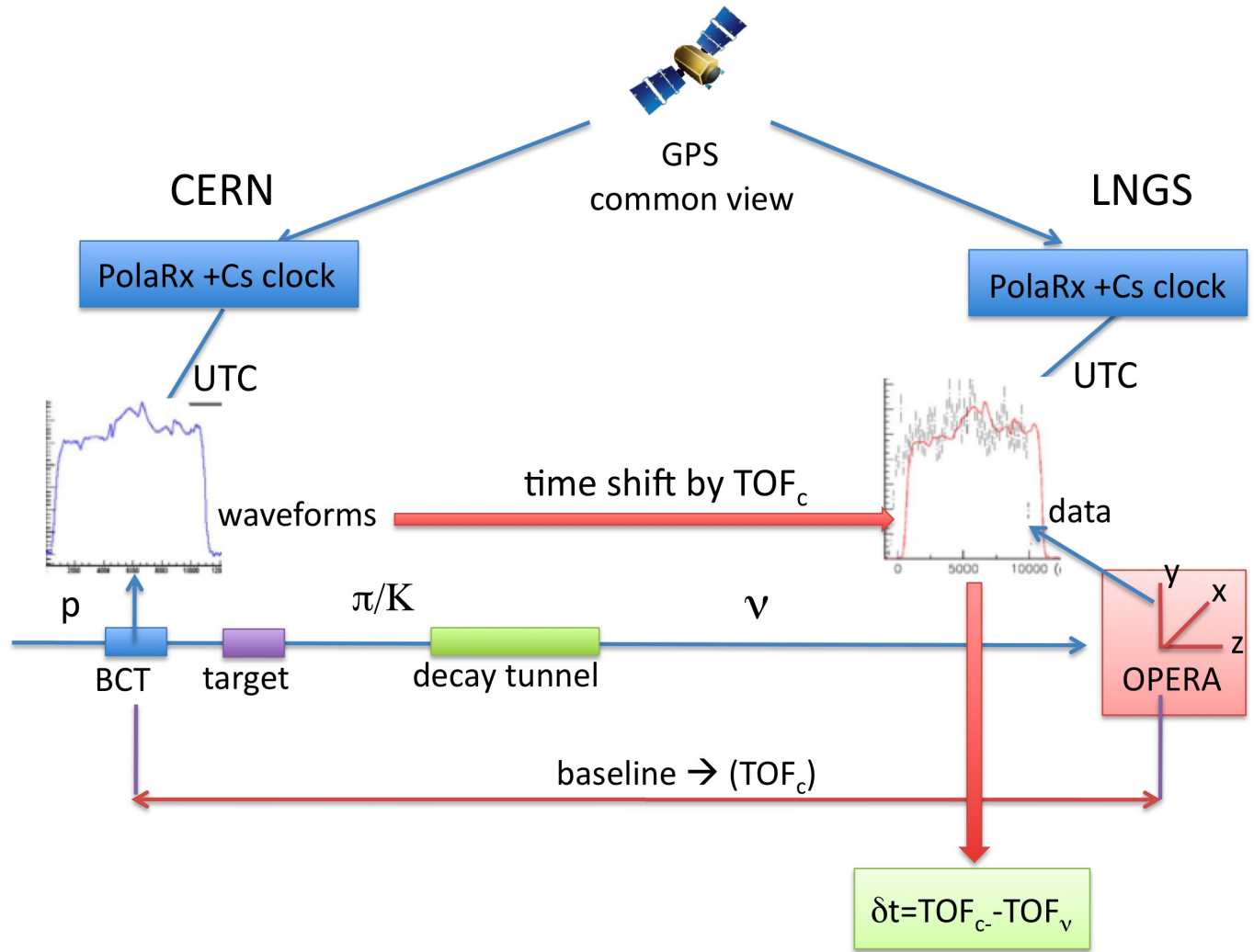
Soluzione: GPS in "common view mode" + orologi atomici

Posizioni (X,Y,Z) nota
da altre misure
indipendenti

Il satellite fornisce
solo l'ora (tempo di
riferimento comune)



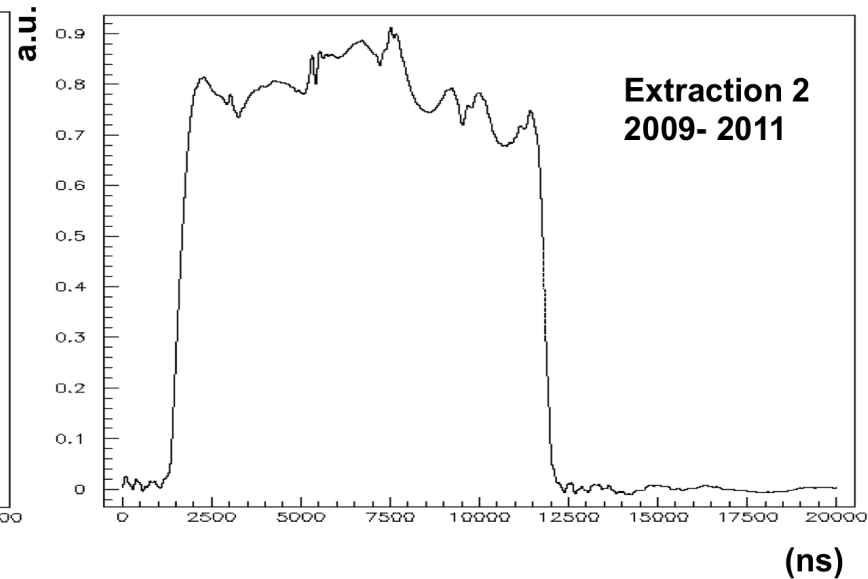
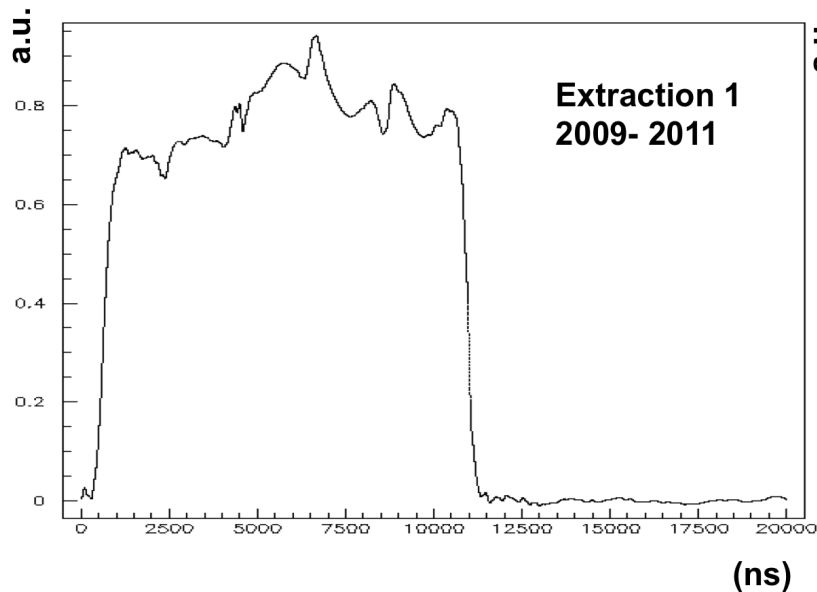
Il Tempo



Errore complessivo
~10 ns

i dati: il fascio

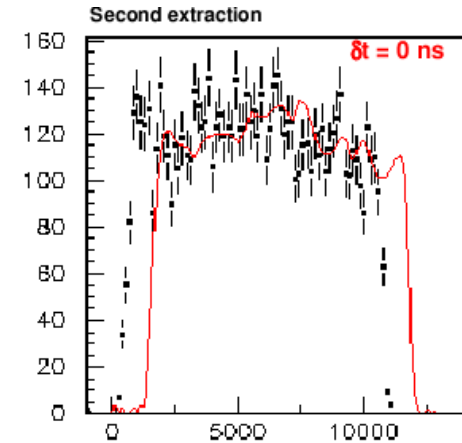
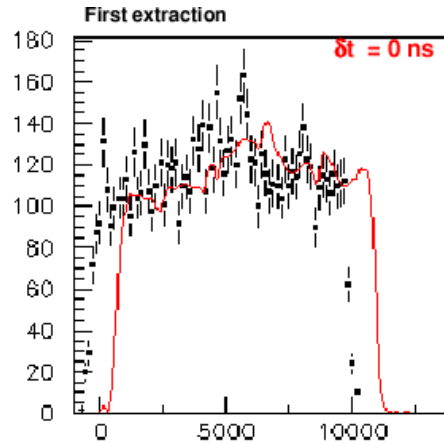
2 pacchetti di protoni di $10.5 \mu\text{s}$ a distanza di 50 ms
sottostrutture dovute a PS e SPS



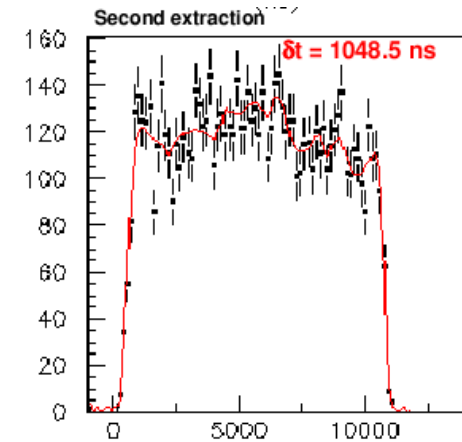
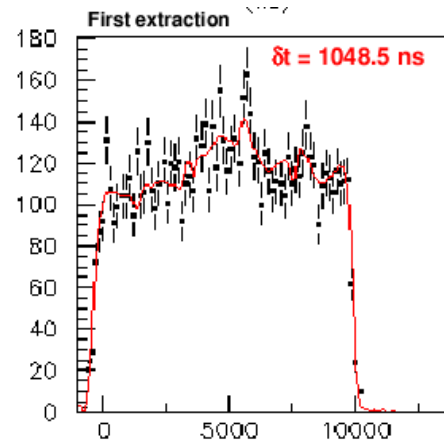
da una singola estrazione: 0 o 1 interazione !

i dati: il rivelatore

senza correzioni:



cercando la
migliore
interpolazione:



Conclusione

inserendo tutti i ritardi misurati

$$\delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_v =$$

$$(1048.5 \pm 6.9 \text{ (stat.)}) \text{ ns} - 987.8 \text{ ns} = (60.7 \pm 6.9 \text{ (stat.)} \pm 7.4 \text{ (sys.)}) \text{ ns}$$

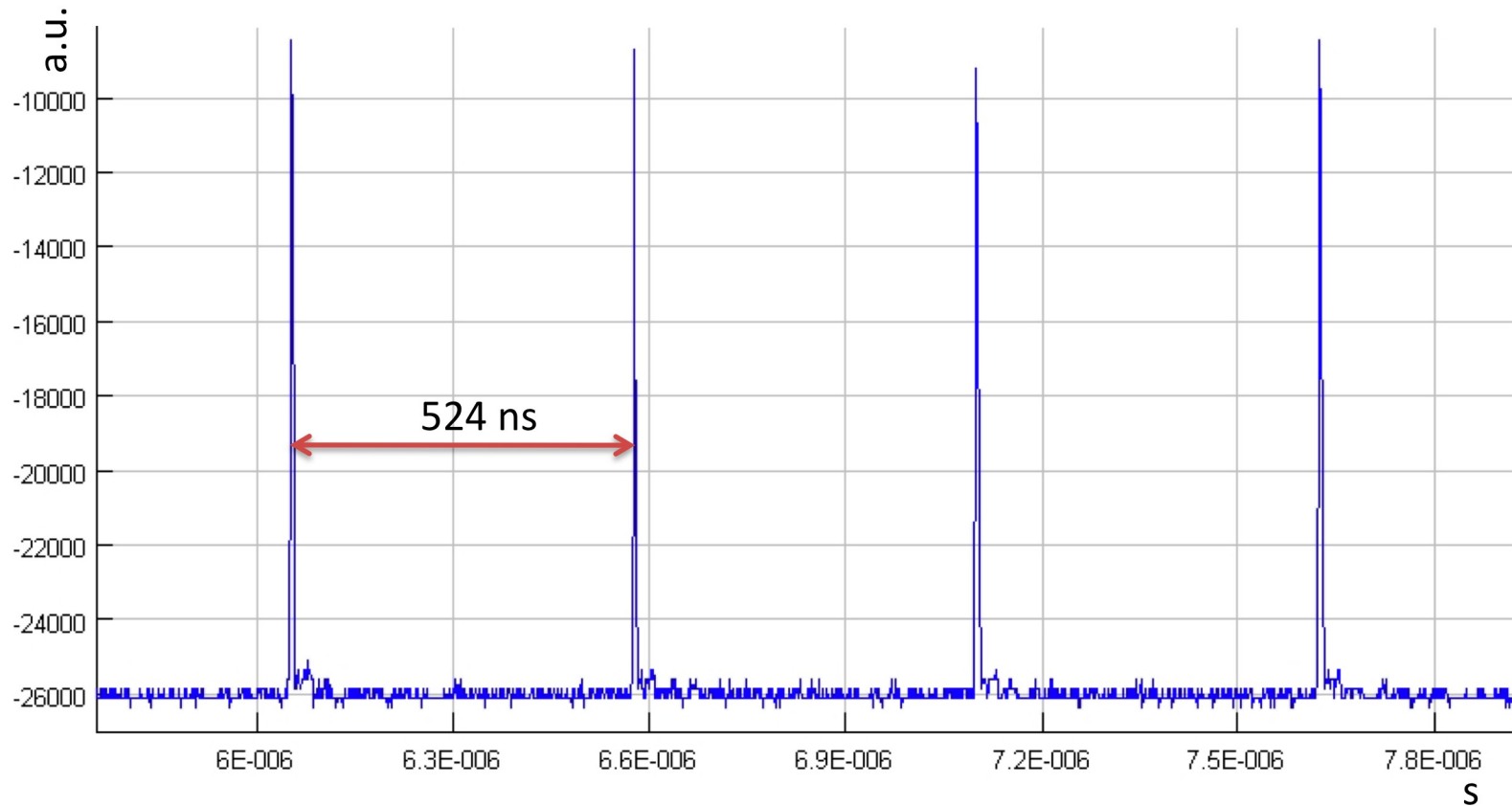
velocità

$$(v-c)/c = \delta t / (\text{TOF}_c - \delta t) = (2.49 \pm 0.28 \text{ (stat.)} \pm 0.30 \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$$

verifica

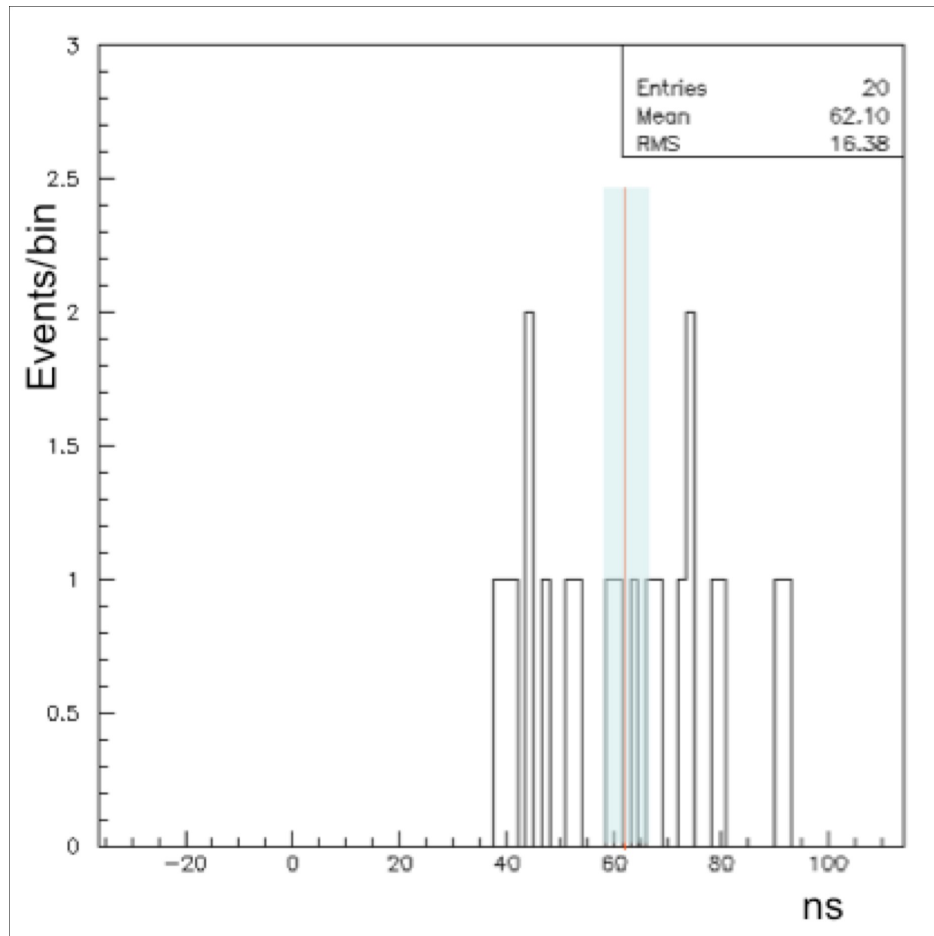
4 pacchetti di protoni lunghi 3 ns

distanziati di 524 ns



risultati (resi noti ieri)

4×10^{16} P.o.T. \rightarrow 20 neutrini osservati



Valor medio:
 (62.1 ± 3.7) ns

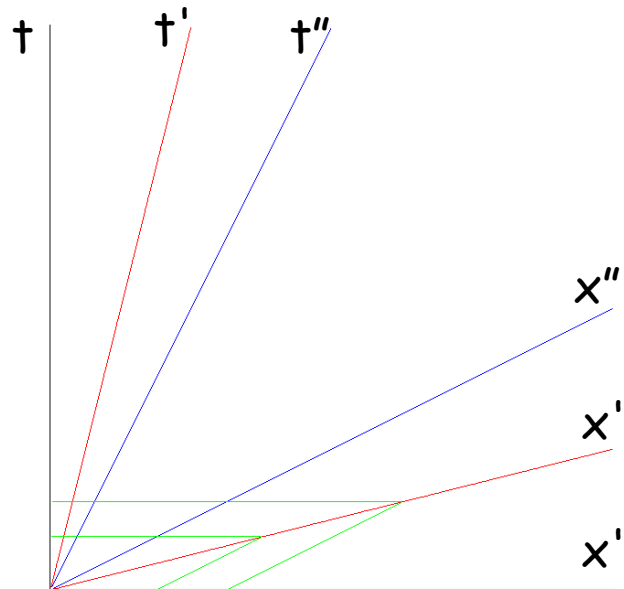
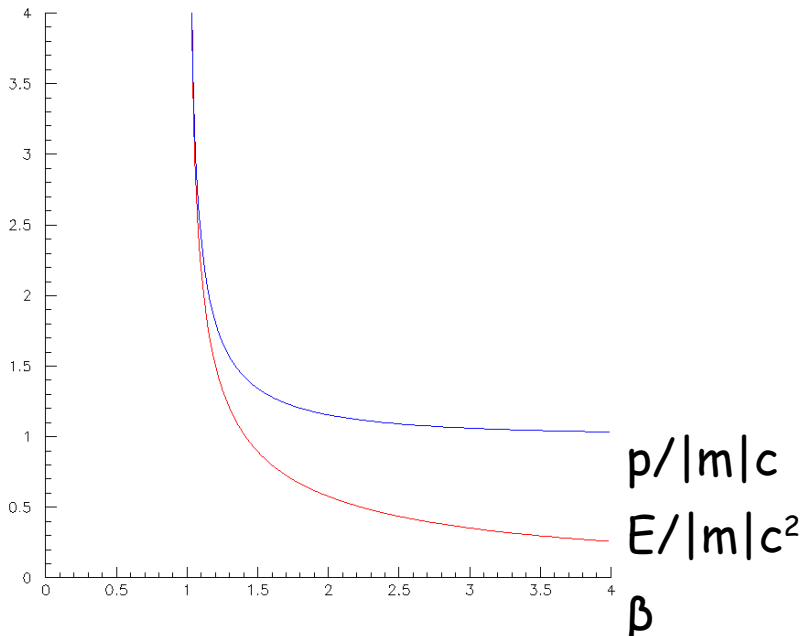
l'interpretazione ?

Relatività ristretta:

$$m^2c^4 = E^2 - p^2c^2 = E^2(1 - v^2/c^2) = -(120 \text{ MeV})^2$$

i tachioni hanno massa immaginaria (?)

violano la relazione causa-effetto (?)



altri dati ?

neutrini SN 1987A:

$\langle E \rangle \sim 10 \text{ MeV}$ $dt \sim \text{entro } 15 \text{ sec}$

limiti diretti e indiretti ?

$$m(\nu_e) < 2 \text{ eV}$$

$$m^2(\nu_e) = -1.1 \pm 2.4 \text{ (eV)}^2$$

oscillazioni ?

più di 90 articoli pubblicati su arXiv !

Domande ?
Suggerimenti ?