

# Lezione Fermi 7

*Luciano Maiani, AA 14-15*

## Neutrini: in laboratorio e dal Sole

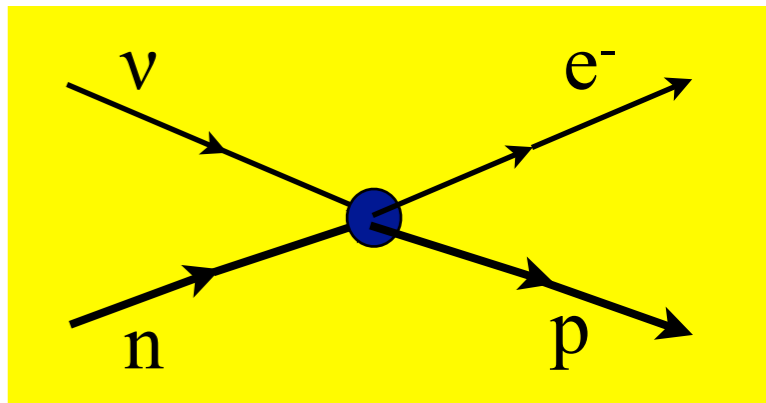
### Sommario

1. Pontecorvo (1947) trova un modo per vedere i neutrini
2. Reines e Cowan osservano i neutrini dal reattore di Savannah River
3. Inizia l'era moderna: fasci di neutrini di alta energia
4. Due neutrini...anzi tre
5. Oscillazioni di neutrini
6. Conclusioni: neutrini come sonda

# 1. Pontecorvo, Fermi e Don Quixote



- Nel 1934, Hans Bethe e Rudolph Peierls calcolano la probabilità che un neutrino sia rivelato da un urto con la materia, secondo il processo inverso del decadimento beta
- Il processo è regolato dalla costante di Fermi  $G$
- Probabilità di interazione su un nucleo  $\approx G^2 E_\nu^2 (E_\nu \ll M)$



- Un risultato deprimente: il percorso medio (distanza per avere probabilità di interazione  $\approx 1$ ) di un neutrino di energia  $\approx 1$  MeV nel ferro (densità  $\approx 5$  gr/cm<sup>3</sup>) è:

$$L \approx 10 \text{ anni luce} \cdot \frac{1}{[E_\nu(\text{MeV})]^2} \approx 10^{19} \text{ cm} \cdot \frac{1}{[E_\nu(\text{MeV})]^2}$$

- ovvero, la probabilità di vedere una interazione in 1m di ferro è:

$$P \approx 10^{-17} \cdot [E_\nu(\text{MeV})]^2$$

Il “neutrino” è una particella ... o un fantasma???

# entra Pontecorvo....

- Nel 1947, Pontecorvo (allora in Canada) realizza che:
  - se la probabilita' di un neutrino di interagire in 1 metro di materia e' astronomicamente piccola...
  - un reattore nucleare produce una quantita' parimenti astronomica di neutrini (dal decadimento in volo dei neutroni che sono il motore delle reazioni nucleari), dell'ordine di  $10^{20-23}$  neutrini al secondo
  - si avrebbe:  $N(\text{eventi/sec in 1 metro di ferro}) \approx 10^{20} \cdot 10^{-17} = 10^3 \text{ eventi/sec !!!}$
- Pontecorvo inventa un metodo per rivelare i neutrini da un reattore (ne parleremo piu' avanti) basato su un procedimento radiochimico.
- Durante un viaggio in Europa ne parla con Pauli che si mostra molto interessato;
- ne parla con Fermi che approva ma *non* si dimostra interessato, pensando che ci vorranno decenni per sviluppare il metodo di Pontecorvo.
- Ognuno ha i suoi eroi. Emilio Segre', a questo proposito, scrive: *Don Quixote non era un eroe di Fermi...*

## 2. F. Reines e C. Cowan osservano il neutrino

*Detecting the Poltergeist*, Los Alamos Science n. 25, Nov. 1995 (Lecture consigliate\_3)

- Nel 1953, F. Reines e C. Cowan propongono un rivelatore per osservare gli antineutrini prodotti dal reattore di Savannah River, usando la reazione beta inversa:  $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$

Rivelatore usato in un primo esperimento non conclusivo, chiamato "El Monstro" per le sue dimensioni

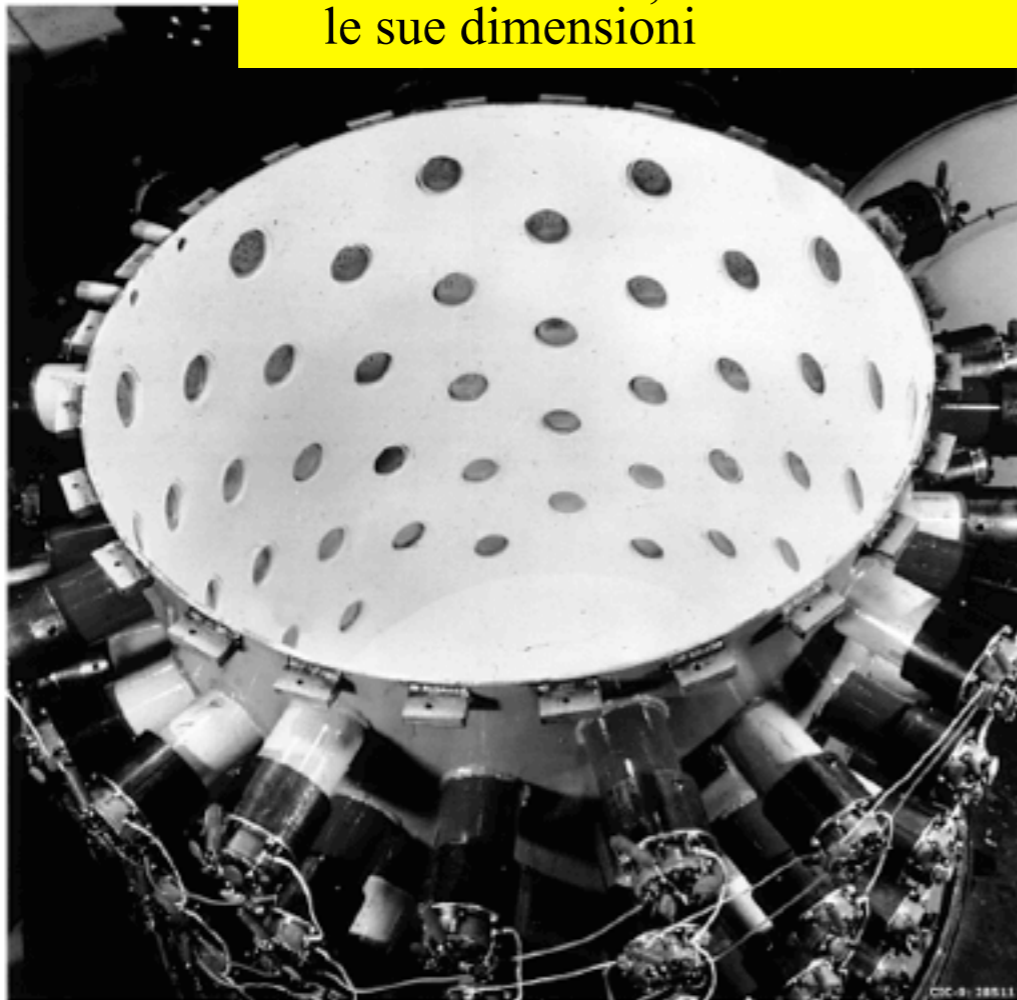


Fig. 3. The scintillation detector for the 1953 neutrino detection experiment at Hanford. Courtesy of the Regents of the University of California, operators of Los Alamos National Laboratory.

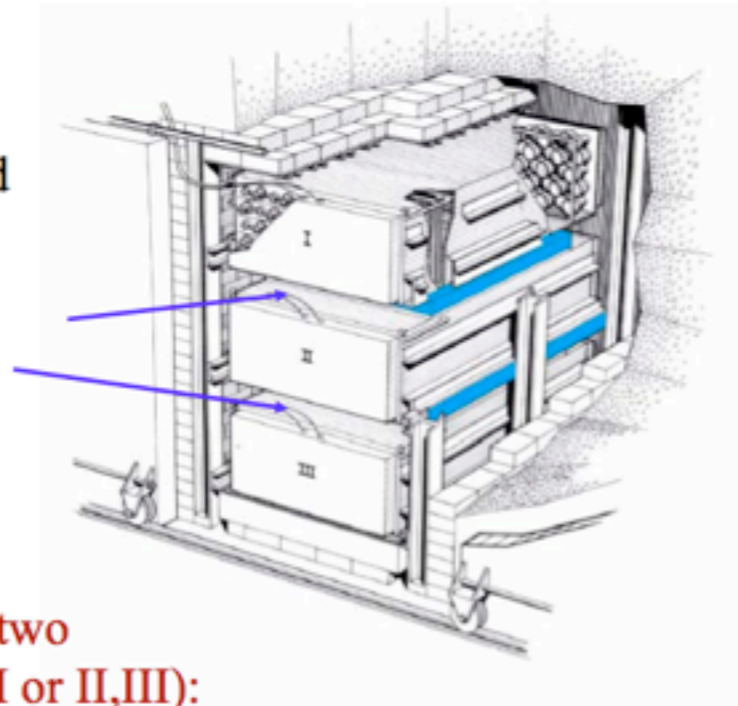
# esperimento di Reines e Cowan

13

1956: Savannah River Experiment

Tanks I, II, and III were filled with liquid scintillator and instrumented with 5" PMTs.

Target tanks (blue) were filled with water+cadmium chloride.



Inverse  $\beta$  decay would produce two signals in neighboring tanks (I,II or II,III):

- prompt signal from  $e^+$  annihilation producing two 0.511 MeV  $\gamma$ s
- delayed signal from  $n$  capture on cadmium producing 9 MeV in  $\gamma$ s

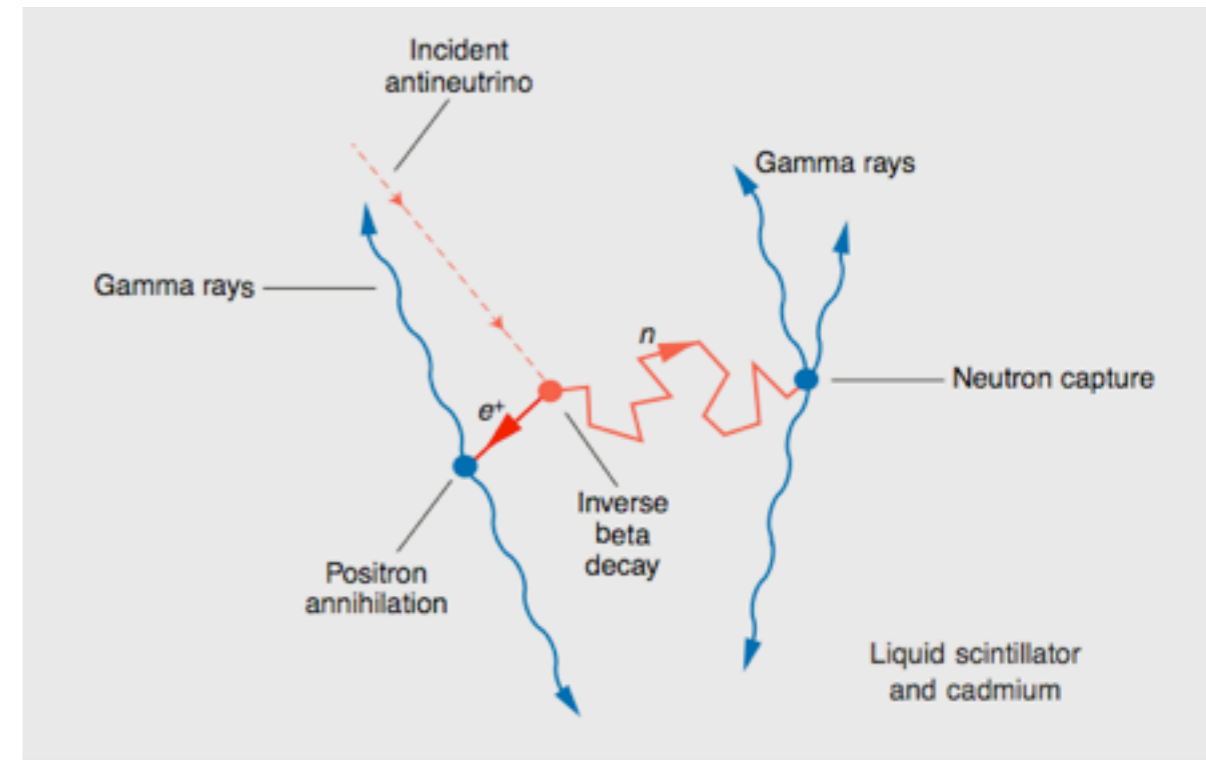
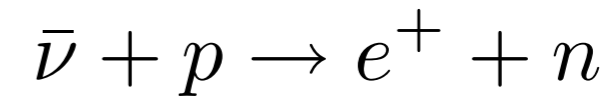


Figure 3. The Double Signature of Inverse Beta Decay

- Nel 1956, Reines e Cowan annunciano di avere osservato inequivocabilmente i segnali associati all'interazione degli antineutrini prodotti dal reattore, con una frequenza compatibile con le previsioni di Bethe e Peierls

Il "neutrino" e' una particella come le altre

# 3. Inizia l'era moderna: fasci di neutrini

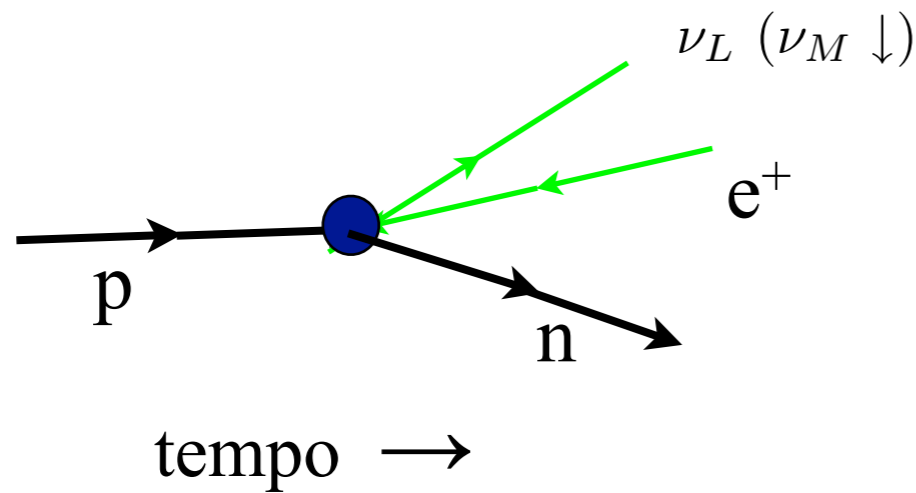
- con le macchine acceleratrici si possono realizzare fasci collimati di mesoni  $\pi$ ;
- lanciati in un tunnel sottovuoto, i pioni decadono in volo producendo un muone e un (anti)neutrino (a seconda del segno della carica del pione);
- alla fine del tunnel, un blocco di cemento ferma i pioni residui e i muoni, mentre il fascio collimato di neutrini prosegue indisturbato (senza tunnel).
- La probabilita' di interazione dei neutrini cresce rapidamente con l'energia
- $P \approx G^2 (M E_\nu) (E_\nu > M)$
- per  $E_\nu \geq \text{GeV}$ , la probabilita' di interazione di un neutrino in  $1\text{m}^3$  di materia aumenta di un fattore  $10^6$ :
$$P \approx 10^{-11} \cdot E_\nu(\text{GeV}) (E_\nu > M)$$
- con flussi di  $10^9$  neutrini/sec, si possono raccogliere anche  $10^5$  eventi di neutrino/anno;
- i primi esperimenti a Brookhaven, USA, inizio anni '60, da Leon Lederman, Jack Steinberger, Mel Schwartz e coll.

- Dubna 1958. Si progetta di costruire un fascio di protoni da 800 MeV, che potrebbe produrre anche un fascio di pioni
- Pontecorvo pensa di usare i neutrini dal decadimento dei pioni per controllare se il neutrino emesso in associazione con il muone è uguale o diverso dal neutrino associato all'elettrone
- nel secondo caso, interagendo con la materia non dovrebbe produrre elettroni, ma solo muoni.
- Il fascio di Dubna non si realizzò
- Lederman, Schwarz e Steinberger, a Brookhaven, vogliono studiare le reazioni dei neutrini emessi nel decadimento in volo dei pioni con un nuovo strumento: *le camere a scintilla*.
- È l'inizio degli esperimenti su grande scala

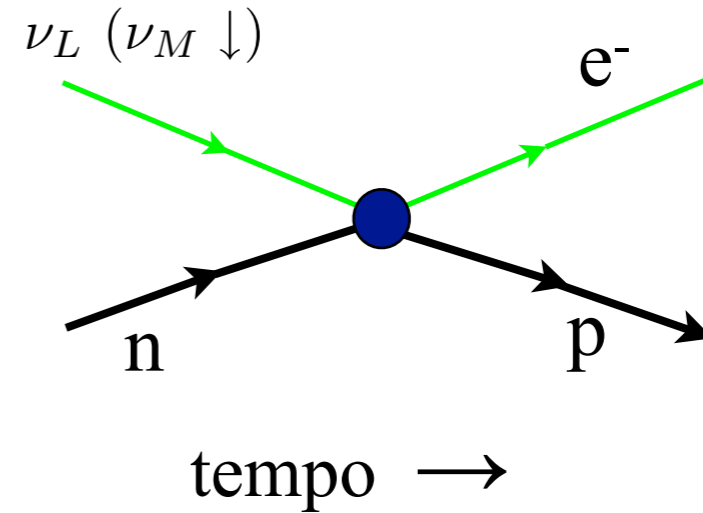
# 4. Due neutrini...anzi tre

Produzione e rivelazione di (anti)neutrini associati all'elettrone e al  $\mu$

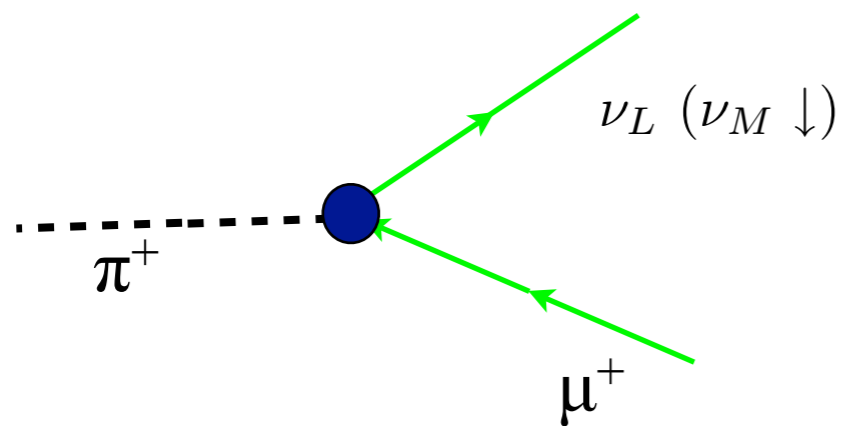
decadimento  $\beta^+$



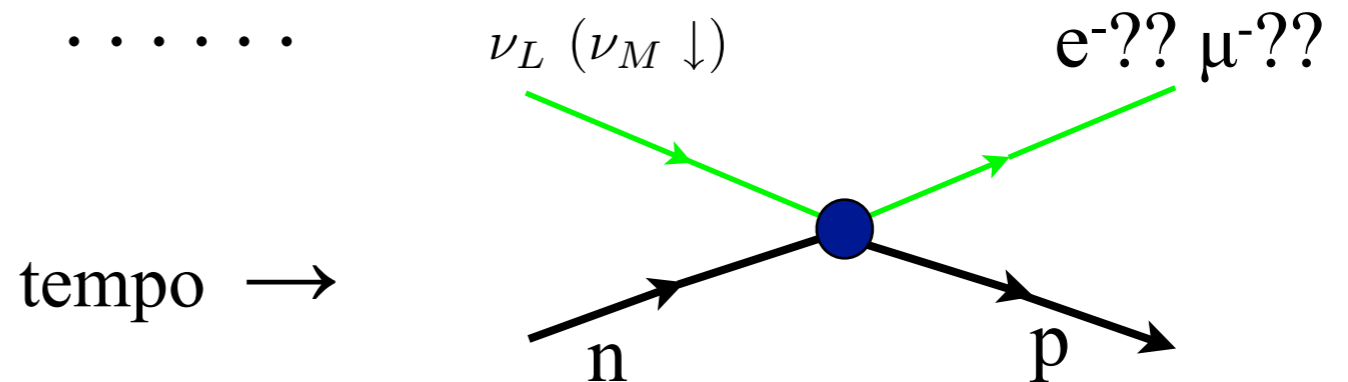
interazione di un neutrino



decadimento del  $\pi^+$



interazione del neutrino associato al  $\mu$



Ovvero:  
 ???  $v_\mu = v_e$  oppure  $v_\mu \neq v_e$  ???



# molto piu' tardi...

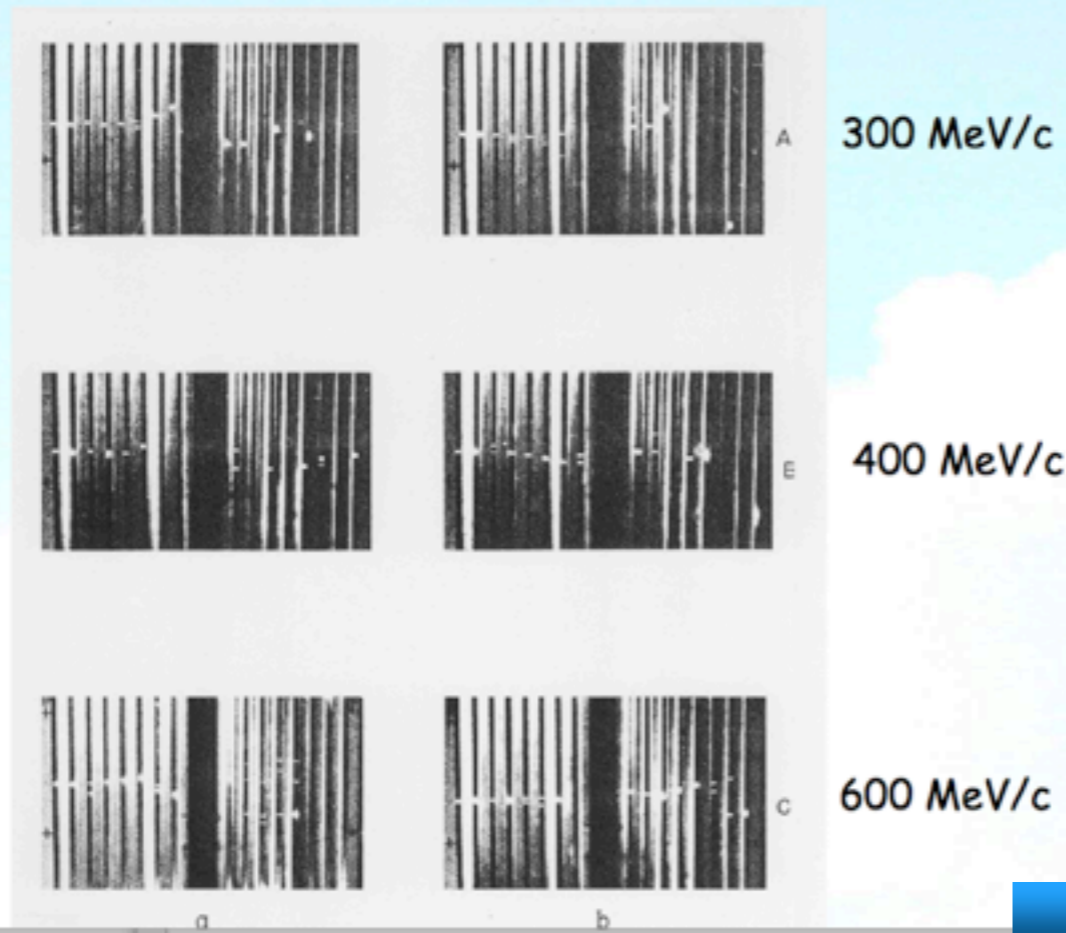
- Pontecorvo scrive per una conferenza sulla storia della fisica delle particelle (Parigi, 1982):

*I have to come back a long way (1947-1950). Several groups, among which J. Steinberger, E. Hincks and I, and others were investigating the (cosmic) muon decay. The result of the investigations was that the decaying muon emits three particles: one electron...and two neutral particles, which were called by various people in different ways: two neutrinos, neutrino and neutretto,  $\nu$  and  $\nu'$ , etc. I am saying this to make clear that for people working with muons in the old times, the question about different types of neutrinos has always been present... for people like Bernardini, Steinberger, Hincks and me ... the two neutrino question was never forgotten.*

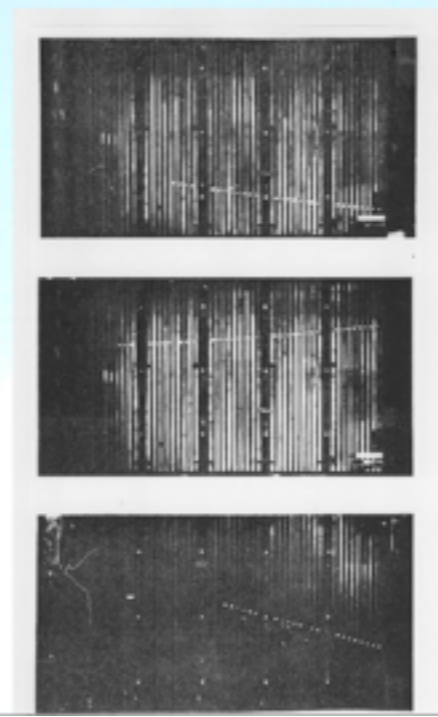
# e - SHOWERS FROM COSMOTRON TEST

## TWO NEUTRINO EXPERIMENT

Konstantin Goulianos  
The Rockefeller University



## SINGLE MUON EVENTS



# Big Science a Brookhaven negli anni '60

## SL.7: Chamber transportation

Mel's car  
Leon's car  
Jack's car

Nari, Jean-Marc, Gordon  
& Dino  
on foot!



BNL 90/50/10 Celebration, 10-11 June 2010

TWO NEUTRINO EXPERIMENT

K. GOULIANOS

36

# Dino Goulianos al suo mentore Mel Schwarz

## VERSE 1

Once upon a time  
in the distant past  
Mel told me  
that neutrinos are fast.

"To be my student - he said -  
remember Dino:  
you must be really good  
to catch a fast neutrino"

"Oh! Let me be your student  
- I said -  
don't leave me in grief  
I promise, I'll catch the  
first neutrino  
with my bare teeth!"

## SL.4: Dino catching a neutrino

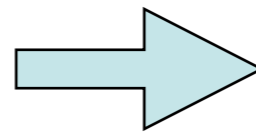
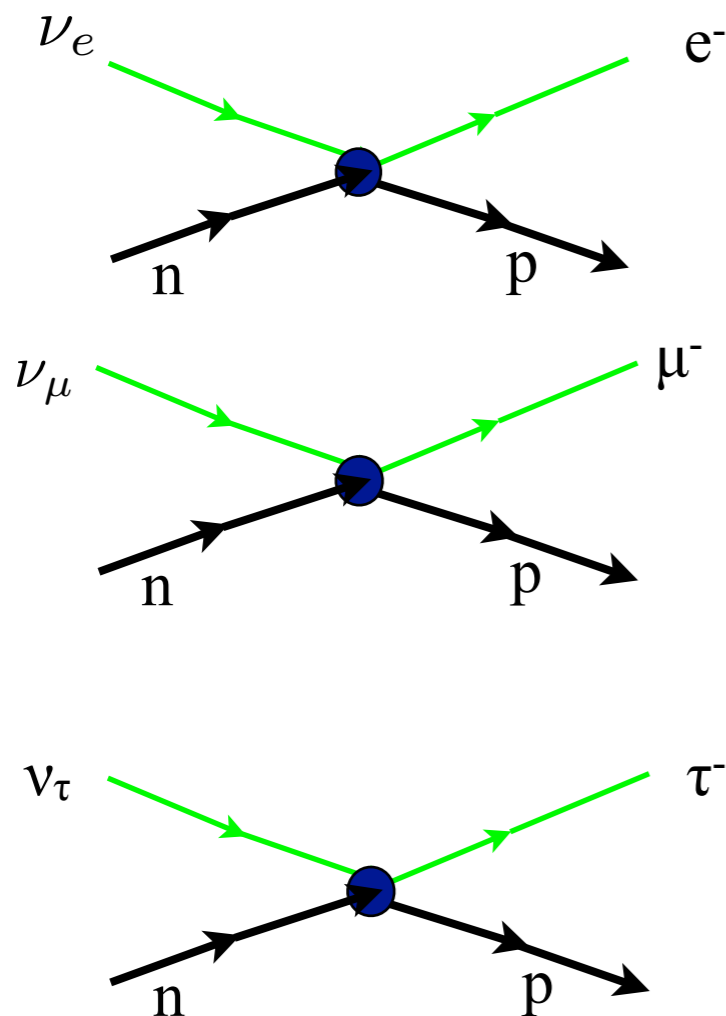


# Due neutrini e due doppietti

G. Danby, J.M. Gaillard, K. Goulianos,  
L.M. Lederman, M. Mistry, M. Schwartz, and J. Steinberger,  
Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the  
Existence of Two Kinds of Neutrinos,  
Phys. Rev. Letters **9** (1962) 36

I neutrini emessi insieme al muone producono SOLO muoni !

## Evoluzione della teoria



$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$   $\updownarrow$  Simmetria  
Elettrodebole  
naturale

$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$   $\updownarrow$

Nel 1976, Perl e coll. trovano evidenza per un nuovo “leptone pesante” con il suo neutrino

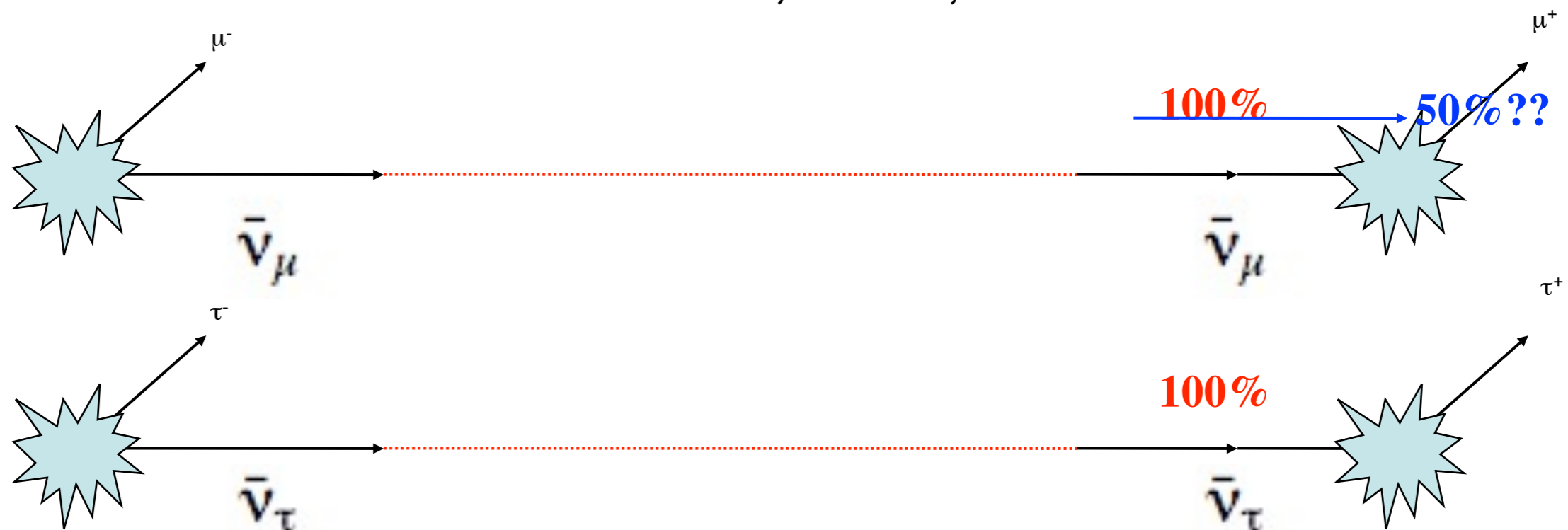
$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$   $\updownarrow$

# 5. Oscillazioni di neutrini

- In Natura ci sono tre tipi di neutrino, associati a elettrone, muone, leptone tau



Per distanze da "laboratorio",  $\leq 1$  km, l'identita' si mantiene

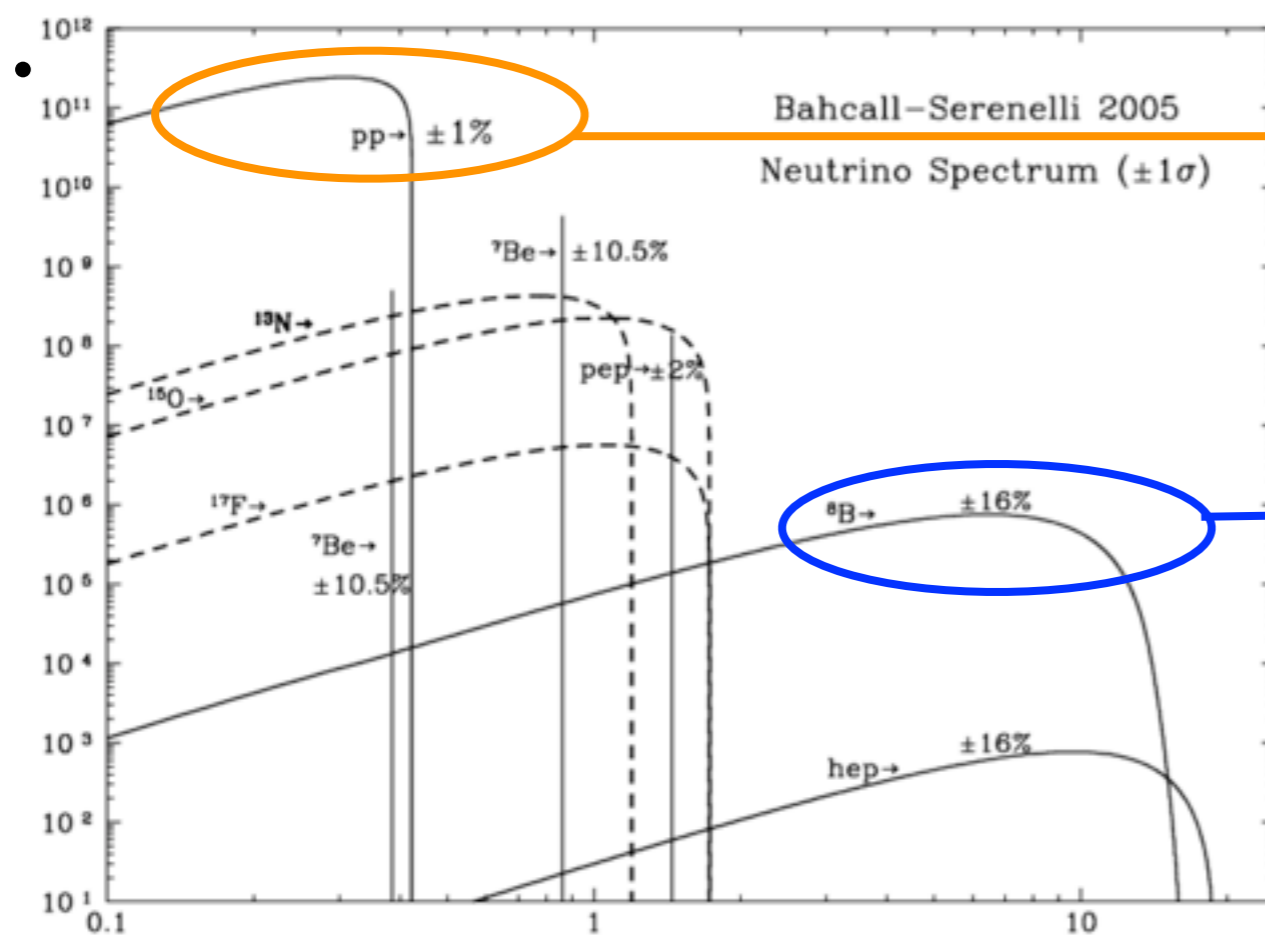


Bruno Pontecorvo e coll. e, in Giappone, Z. Maki e coll.:

su distanze piu' grandi (in relazione alle differenze tra le masse dei neutrini) un neutrino di un tipo si potrebbe trasformare (oscillare) in uno di tipo diverso (oscillazioni di neutrino), ad es. solo il 50% dei  $\nu_\mu$  darebbe luogo ad un  $\mu^+$ .

# Energia e scale di lunghezza

- Esperimenti con neutrini di energia  $E_\nu$  su una distanza  $L$  sono sensibili a valori di  $\Delta m^2$  tali che
 
$$\Delta m^2 \approx \frac{2E_\nu \hbar}{L} = 0.4 \frac{E(\text{GeV})}{L(\text{km})} \text{ eV}^2$$
- col tempo, sono state esplorate regioni di molto diverse tra loro e oscillazioni tra sapori diversi
- i limiti sulle masse dei neutrini sono ad energie molto piccole, sulla scala nucleare, e per questo ci vogliono lunghe distanze, terrestri o astronomiche.



→ Bassa energia  
 GALLEX, Gran Sasso, Italia  
 SAGE, Baksan, Russia

→ Alta energia  
 HOMESTAKE, USA  
 Kamiokande, Japan  
 Sudbury SNO, Canada

Deficit osservato negli esperimenti sui neutrini solari. Per SNO, vedi figura.

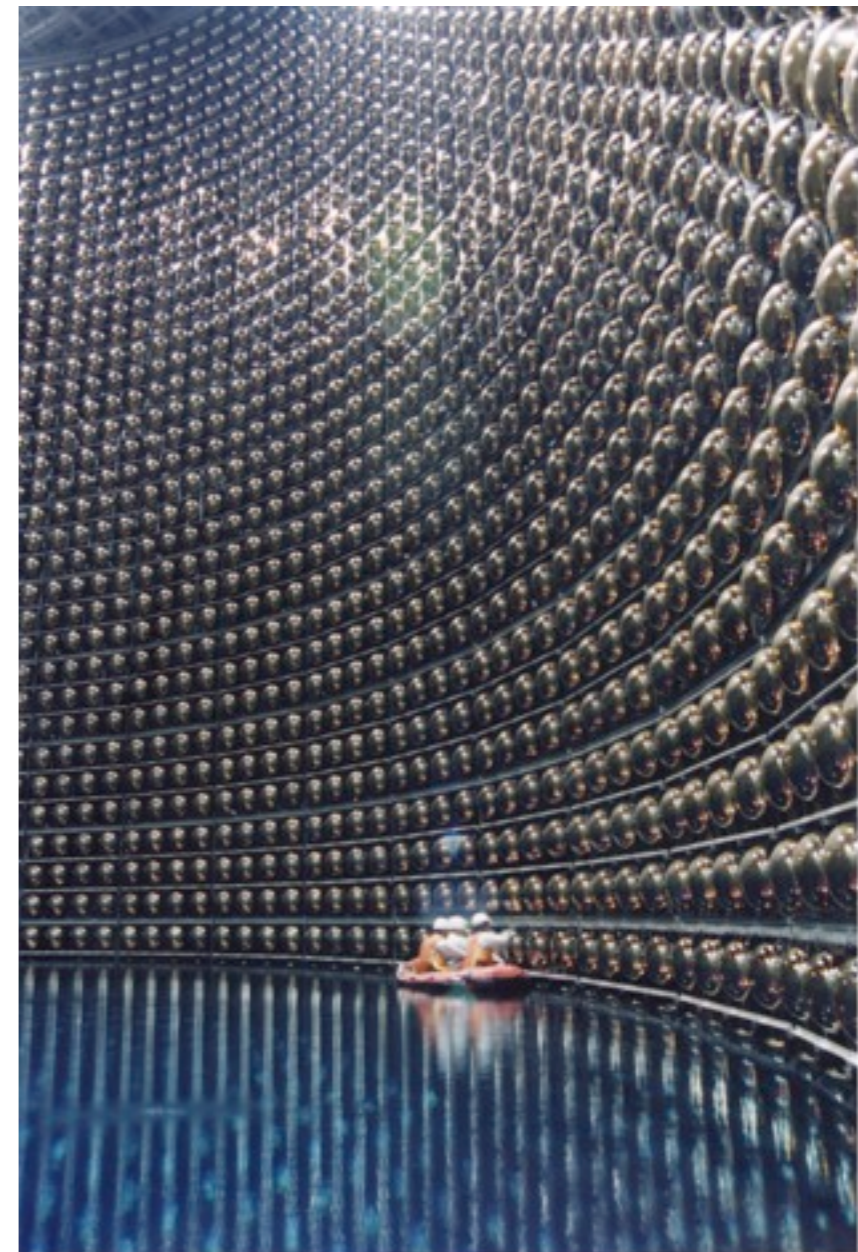
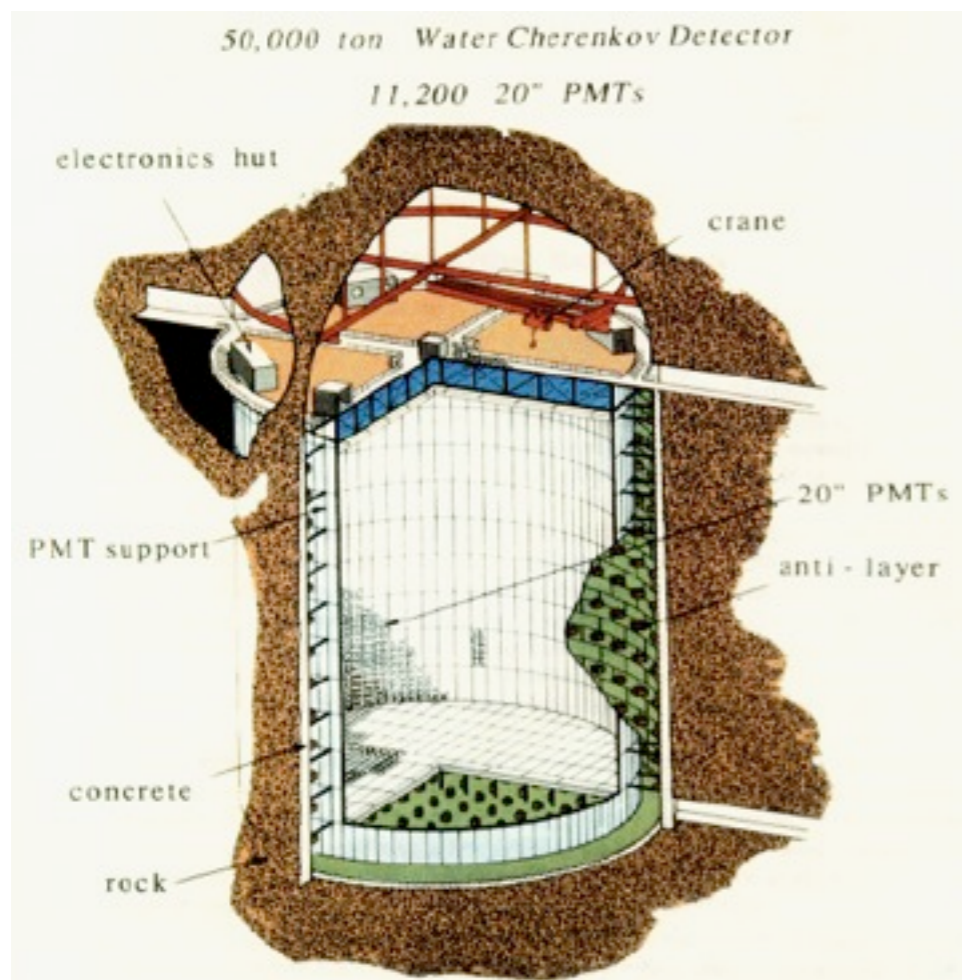
Esperimento	osservato/atteso	anni di osservazione
Homestake	$0.33 \pm 0.03 \pm 0.05$	1970 – 1995
Kamiokande	$0.54 \pm 0.08^{+0.10}_{-0.07}$	1986 – 1995
SAGE	$0.58 \pm 0.06 \pm 0.03$	1990 – 2006
GALLEX	$0.60 \pm 0.06 \pm 0.04$	1991 – 1996
Super- Kamiokande	$0.465 \pm 0.005^{+0.016}_{-0.015}$	1996–

- Pontecorvo:
  - I neutrini dal Sole partono come  $\nu_e$  ed hanno energia bassa
  - se oscillano in  $\nu_\mu$  non hanno energia sufficiente per produrre un muone nei nostri rivelatori (con reazione di corrente carica)
  - in questo caso, una frazione di neutrini ci arriva come *neutrini sterili per le reazioni di corrente carica* e il flusso che misuriamo e' ridotto rispetto alle previsioni dei modelli solari
  - questo potrebbe spiegare il deficit visto a Homestake
  - deficit confermato negli anni da analoghi esperimenti (in particolare GALLEX con i neutrini pp, che hanno un flusso iniziale molto ben determinato)
  - e ormai consistente con una oscillazione in prevalenza  $\nu_e - \nu_\mu$ .



# Oscillazioni a SuperKamiokande

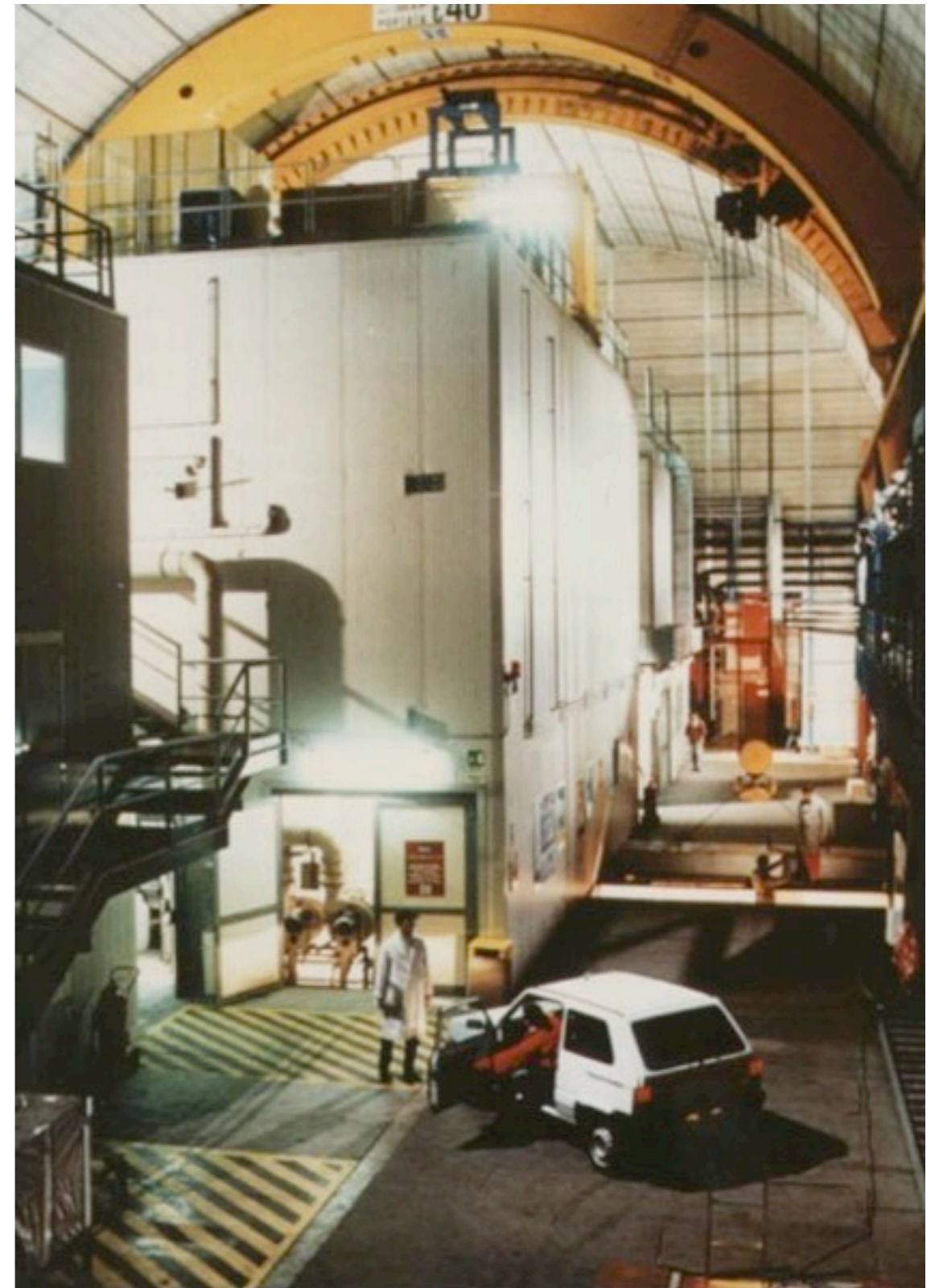
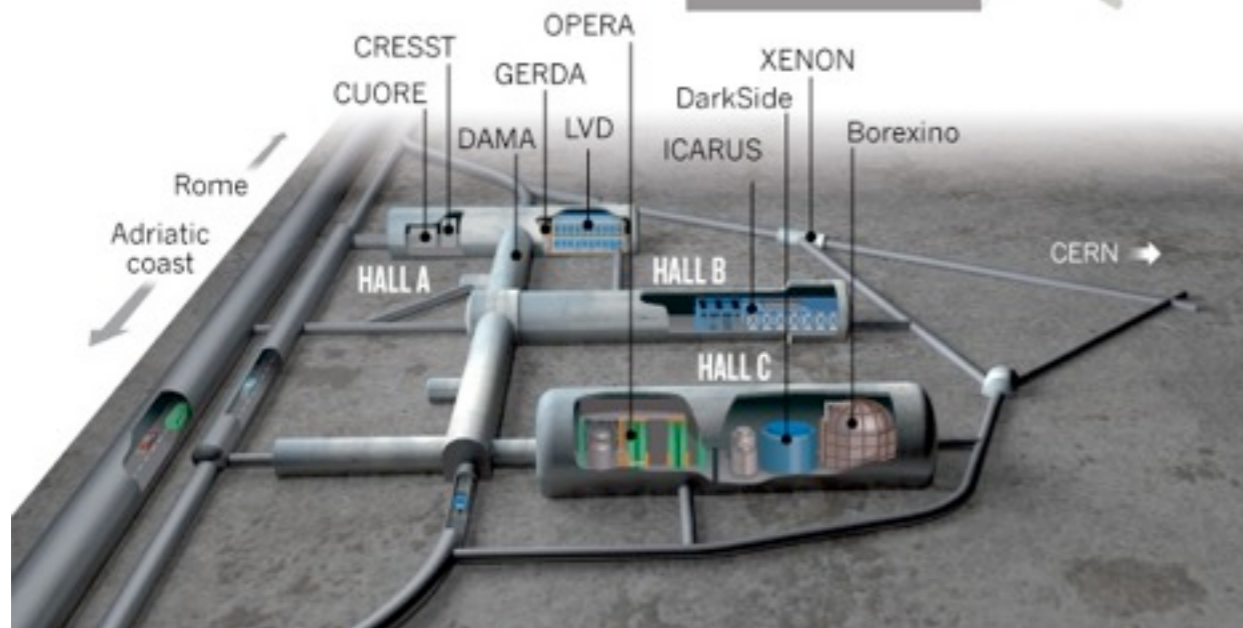
- installazione nella miniera di Kamioka (Giappone) per osservare:
  - decadimento del protone (non visto finora)
  - neutrini prodotti dai raggi cosmici nell'atmosfera (nu-atmosferici)
  - neutrini dal Sole



# I Laboratori del Gran Sasso e GALLEX

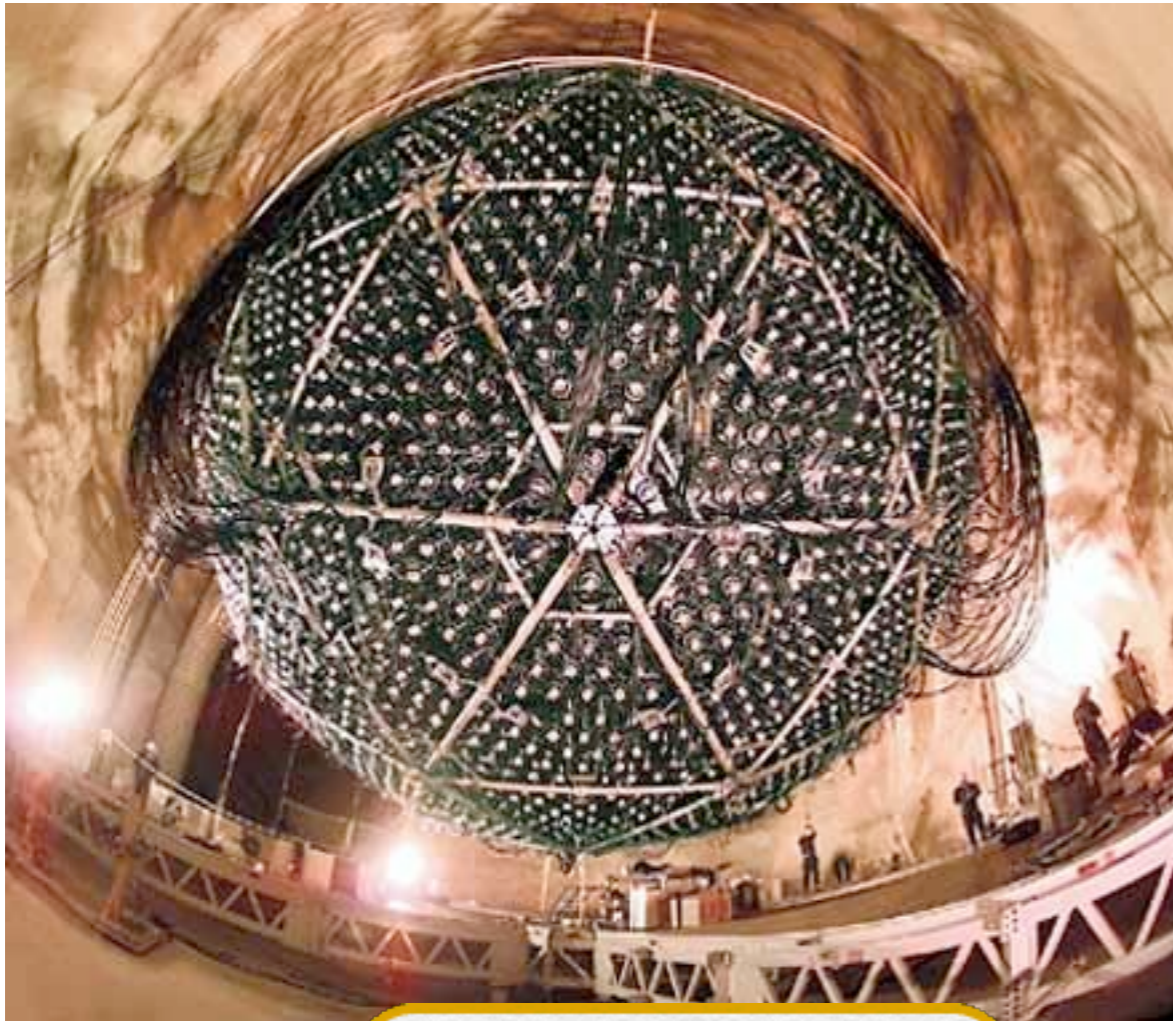
## THE A, B AND C OF GRAN SASSO

Experiments at the Gran Sasso National Laboratory are housed in and around three huge halls carved deep inside the mountain, where they are shielded from cosmic rays by 1,400 metres of rock.



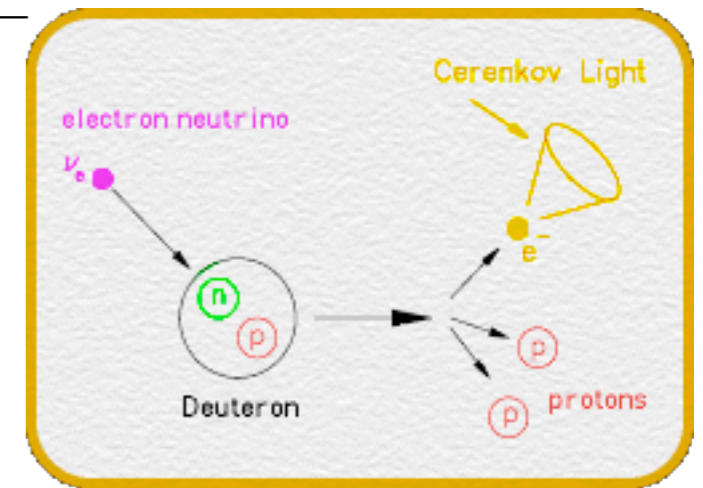
GALLEX vede i neutrini dalla reazione di fusione dell' Idrogeno  
Flusso dei neutrini dipende solo dal valore della Costante Solare ed e' insensibile al modello solare  
ma dipende dalle oscillazioni dei neutrini

# Il rivelatore di SNO-Sudbury- e le reazioni osservate su deuterio ( $H^2 = pn$ )



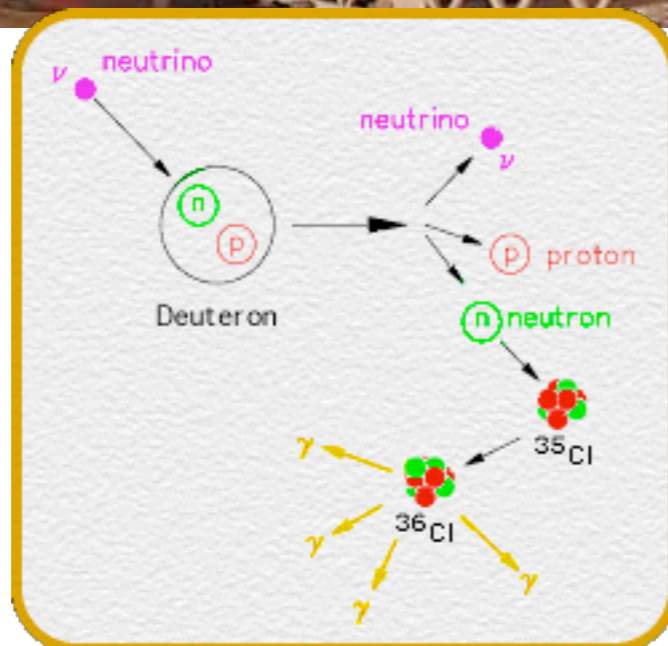
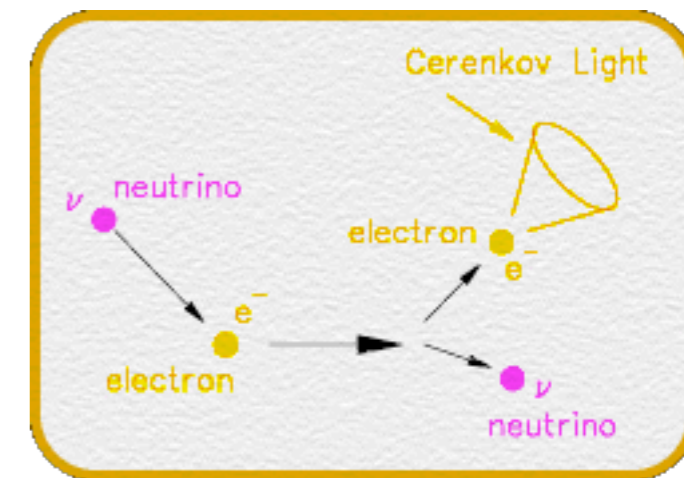
$$\nu + D \rightarrow p + p + e^{-}$$

reazione  
prodotta solo  
dal neutrino  
dell'elettrone



$$\nu + e^{-} \rightarrow \nu + e^{-}$$

contributi  
parziali da  $\nu_{\mu}$   
e  $\nu_{\tau}$



$$\nu + D \rightarrow \nu + p + n$$

$$n + Cl^{36} \rightarrow Cl^{37} + \gamma$$

tutti i neutrini contribuiscono allo stesso modo  
e' indipendente dalle oscillazioni  
controlla il modello solare

# 6. Conclusione: i neutrini e il Sole

- Il deficit e' una riduzione del rapporto:  $(\text{Flusso osservato})/(\text{Flusso previsto})$  nelle reazioni con produzione di elettrone
- Chi e' il colpevole?
  - numeratore: i neutrini che arrivano sono in parte sterili, ci sono le oscillazioni
  - denominatore: i neutrini prodotti non sono quelli previsti, il modello non e' buono
- Gallex vede una riduzione: non dipende dal modello, ci sono le oscillazioni
- SNO, correnti neutre non vede riduzione: le oscillazioni non contano, il modello solare e' buono
- Hanno vinto tutti ! c'e' la fusione, come atteso e ci sono le oscillazioni
- I neutrini solari ci danno un'immagine del centro del Sole *come e' adesso*
- sono la sonda piu' precisa di quello che avviene all' interno di una stella.