Luciano Maiani:
Lezione Fermi 20
Fantastici Neutrini! 1

1. Forze e scala dei tempi caratteristici
2. Pontecorvo, Fermi e Don Quixote
3. Reines a Cowan scoprono il neutrino
4. Neutrini dal Sole
5. Inizia l'era moderna: fasci di neutrini
6. Due Neutrini!

Tempi caratteristici: Interazioni forti

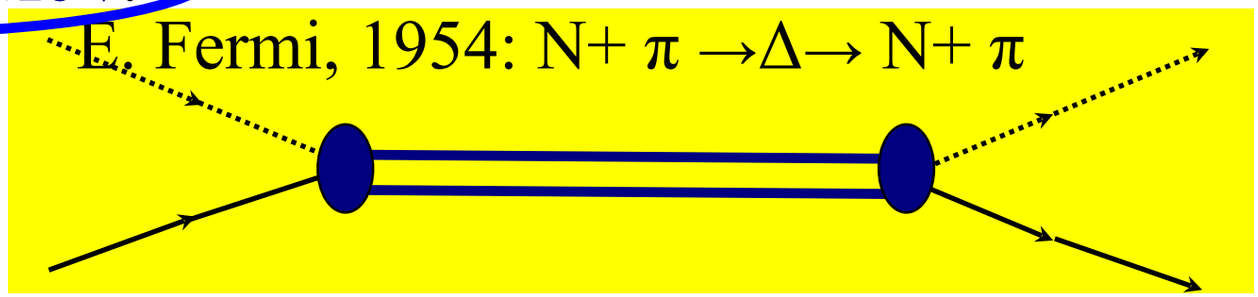
- Yukawa al contrario:
  - massa del mesone π: 140 MeV
  - N→N+ π: viola la conservazione dell'energia di $\Delta E \approx m_\pi$
  - Meccanica Quantistica: la fluttuazione puo' durare un tempo Δt, purche':
  - Una grandezza cruciale, da ricordare

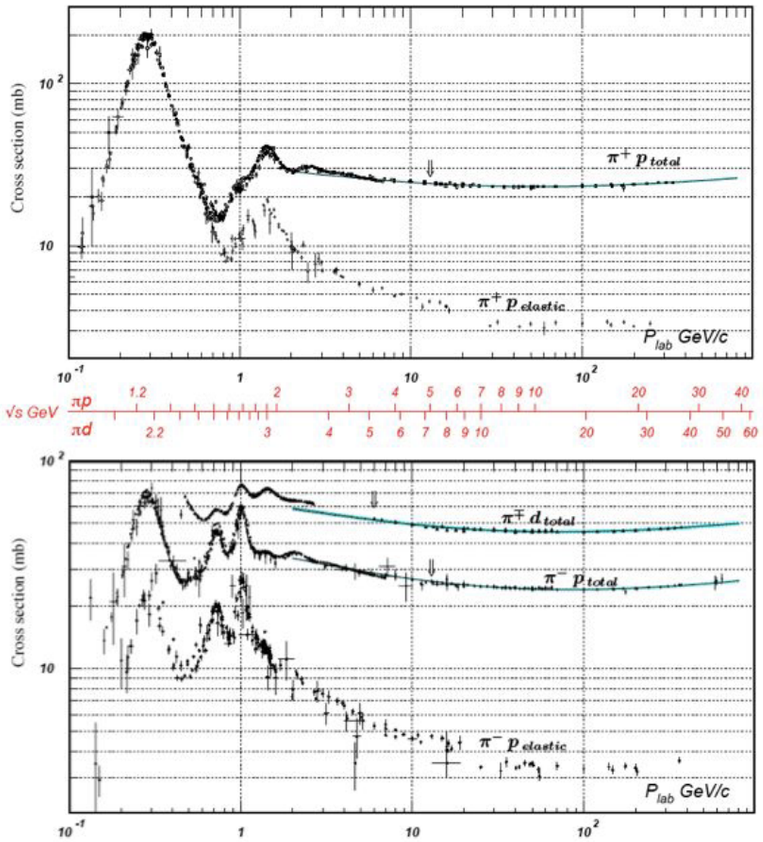
$$\Delta E \Delta t \leq \hbar$$

$$\hbar \cdot c = 197\ \mathrm{MeV} \cdot \mathrm{fermi} \approx 0.2 \cdot 10^{-13} \mathrm{GeV} \cdot \mathrm{cm}$$

- quindi il pione puo' allontanarsi di:
  - R= Δt c=hbar c/ΔE≈ 1 fermi=10^{-13} cm
- questa e' una stima della portata delle forze nucleari (un altro nucleone puo' sentire N solo se e' a distanza <R)
- il tempo caratteristico dei processi nucleari e'
  $\Delta t = R/c \approx 10^{-23}$ sec
- lo stesso per risonanze che si formano e decadono a causa delle interazioni forti: in questo caso si misura
  $\Delta E = \Gamma \approx 100$ MeV.

E. Fermi, 1954: N+ π →Δ→ N+ π





Tempi caratteristici: Interazioni deboli

- Tempi determinati dalla costante di Fermi: $G=1{,}17 \cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}
- Vita media: $\tau=1/\Gamma$, dimensioni di Γ=energia
- $\Gamma \approx G^2 \Delta m^5$, ovvero:

$$\tau_{\text{approx}} = \frac{1}{(G\Delta m^2)^2}\frac{1}{c}\left(\frac{\hbar c}{\Delta m}\right) \approx \frac{10 \text{ sec}}{[\Delta m(\text{MeV})]^5}$$

- solo un ordine di grandezza, ma ci dice che le vite medie sono >> 10^{-23} sec, per almeno 10 ordini di grandezza
- alcuni esempi:
  - neutrone, $\Delta m \approx 1$ MeV, $\tau_{\text{approx}}=10^{1}$ sec (τ_{vero}=760 sec $=10^{2.9}$ sec)
  - pione, $\Delta m \approx 100$ MeV, $\tau_{\text{approx}}=10^{-9}$ sec ($\tau_{\text{vero}}=2.6\ 10^{-8}$ sec $=10^{-7.6}$sec)
  - Λ, $\Delta m \approx 140$ MeV, $\tau_{\text{approx}}=10^{-10}$ sec ($\tau_{\text{vero}}=2.6\ 10^{-10}$ sec $=10^{-9.6}$sec)
  - D^0(c-u bar), $\Delta m \approx 10^3$ MeV, $\tau_{\text{approx}}=10^{-14}$ sec ($\tau_{\text{vero}}=4{,}1\ 10^{-13}$ sec $=10^{-12{,}4}$sec)

Tempi caratteristici: Interazioni elettromagnetiche

- con emissione di 0 ovvero 2 fotoni:

$$\tau_{\text{e.m.}} \approx \frac{10^{-23}\ \text{sec}}{(\alpha/\pi)^2} \approx 10^{-18}\ \text{sec}$$

- con emissione di 1 fotone:

$$\tau_{\text{e.m.}} \approx \frac{10^{-23}\ \text{sec}}{(\alpha/\pi)} \approx 10^{-20}\ \text{sec}$$

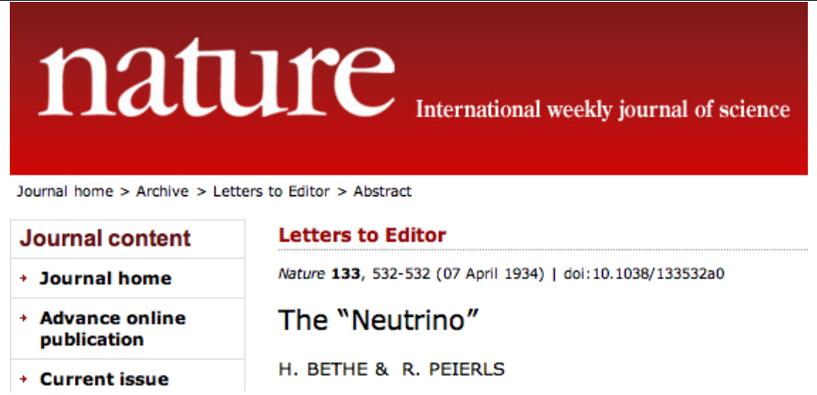
Table 1: Decadimenti dei mesoni pseudoscalari leggeri. Notare la differenza di vita media tra decadimenti elettromagnetici e deboli.

	S	Decad. dom.	τ(s)	Int.
$\pi^{\pm}$	0	$\mu\ \nu_\mu$	$2.6 \cdot 10^{-8}$	debole
π^0	0	$\gamma\ \gamma$	$8.4 \cdot 10^{-17}$	e.m.
$K^{\pm}$	± 1	$\pi^{\pm}\ \pi^0$ $\mu\ \nu_\mu$ $\pi\ l\ \nu_l$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	debole
K_L	± 1	3π $\pi\ l\ \nu_l$	$5.2 \cdot 10^{-8}$	debole
K_S	± 1	2π	$0.89 \cdot 10^{-10}$	debole
η	0	3π $\gamma\ \gamma$	$0.55 \cdot 10^{-18}$	e.m.

Table 1: Decadimenti dei barioni stabili per le Interazioni Forti.

	S	Decad. dom.	τ(s)	Int.
p	0	non conosciuto	$\geq 10^{31-33}$ anni	??
n	0	$p\ e^-\ \bar{\nu}_e$	885.7 ± 0.8	debole
Σ^+	-1	$p\ \pi^0$ (0.52) $n\ \pi^+$(0.48) $\Lambda\ e^+\nu_e$ ($2.0 \pm 0.5\ 10^{-5}$)	$0.802 \pm 0.003 \cdot 10^{-10}$	debole
Σ^-	-1	$n\ \pi^-$ (0.998) $n\ e^+\bar{\nu}_e$ ($1.017 \pm 0.034 \cdot 10^{-3}$) $\Lambda\ e^-\bar{\nu}_e$ ($5.73 \pm 0.27 \cdot 10^{-3}$)	$1.479 \pm 0.011 \cdot 10^{-10}$	debole
Σ^0	-1	$\Lambda\ \gamma$ (1.00)	$7.4 \pm 0.7 \cdot 10^{-20}$	e.m.
Λ	-1	$p\ \pi^-$ (0.639 ± 0.5) $n\ \pi^0$ (0.358 ± 0.5) $p\ e^-\bar{\nu}_e$ ($8.32 \pm 0.14 \cdot 10^{-4}$)	$2.632 \pm 0.020 \cdot 10^{-10}$	debole
Ξ^0	-1	$\Lambda\ \pi^0$ (0.99522 ± 0.00032) $\Sigma^+e^-\bar{\nu}_e$ ($2.7 \pm 0.4 \cdot 10^{-4}$)	$2.90 \pm 0.009 \cdot 10^{-10}$	debole
Ξ^-	-1	$\Lambda\ \pi^-$ (0.998777 ± 0.00035) $\Sigma^0e^-\bar{\nu}_e$ ($8.7 \pm 1.7 \cdot 10^{-5}$) $\Lambda\ e^-\bar{n}u_e$ ($5.63 \pm 0.3 \cdot 10^{-4}$)	$1.639 \pm 0.015 \cdot 10^{-10}$	debole

2. Pontecorvo, Fermi e Don Quixote


nature International weekly journal of science

Journal home > Archive > Letters to Editor > Abstract

Journal content
- Journal home
- Advance online publication
- Current issue

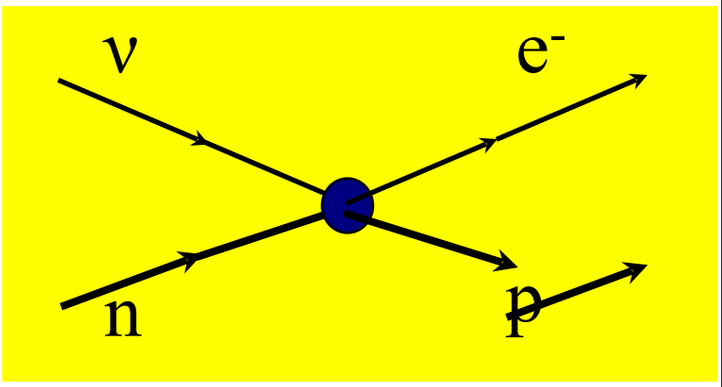
Letters to Editor

Nature **133**, 532-532 (07 April 1934) | doi:10.1038/133532a0

The "Neutrino"

H. BETHE & R. PEIERLS

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



- Un risultato deprimente: il percorso medio (distanza per avere probabilita' di interazione ≈ 1) di un neutrino di energia ≈ 1 MeV nel ferro (densita' ≈ 5 gr/cm^3) e':

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

- ovvero, la probabilita' di vedere una interazione in 1m di ferro e':

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

Il "neutrino" e' una particella ... o un fantasma???

entra Pontecorvo....

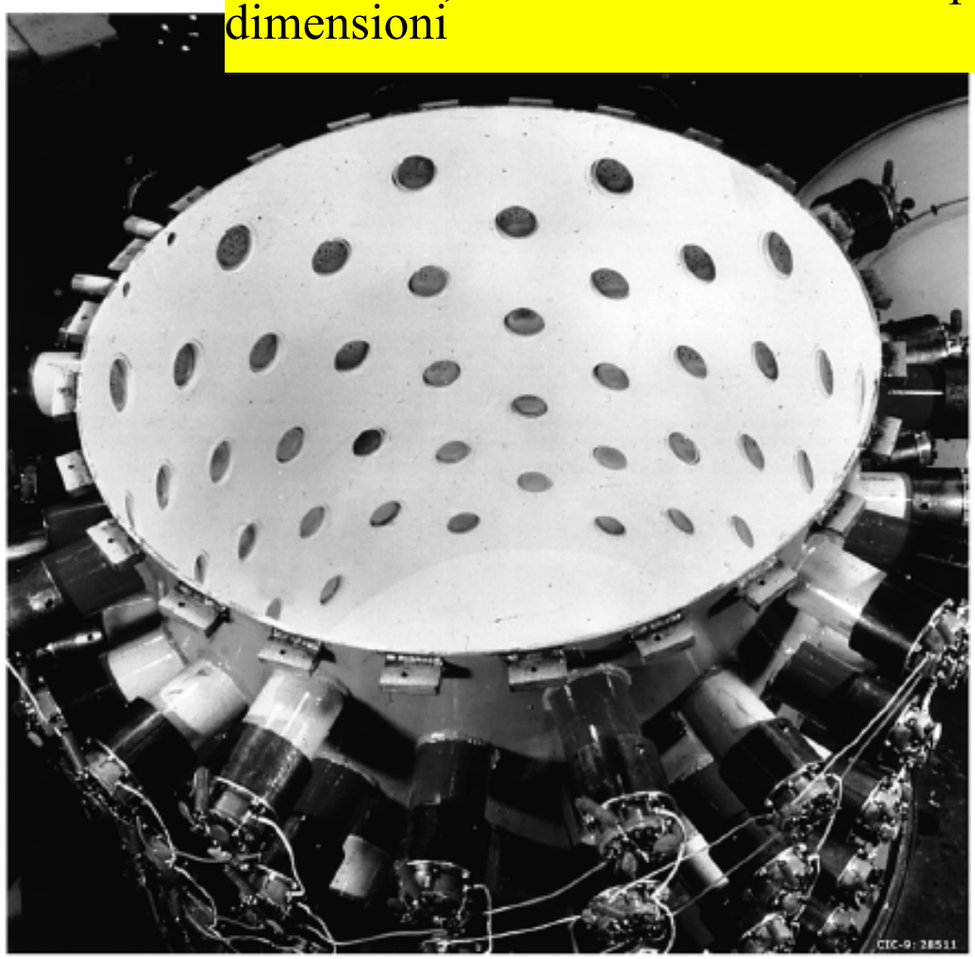
- Nel 1947, Pontecorvo (allora in Canada) realizza che:
  - se la probabilita' di un neutrino di interagire in 1 metro di materia e' astronomicamente piccola...
  - un reattore nucleare produce una quantita' parimenti astronomica di neutrini (dal decadimento in volo dei neutroni che sono il motore delle reazioni nucleari), dell'ordine do $10^{20\text{-}23}$ neutrini al secondo
  - si avrebbe: N(eventi/sec in 1 metro di ferro) $\approx 10^{20}\ 10^{-17} = 10^{3}$ 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...*

3. F. Reines e C. Cowan scoprono il neutrino

Detecting the Poltergeist, Los Alamos Science n. 25, Nov. 1995 (Letture 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



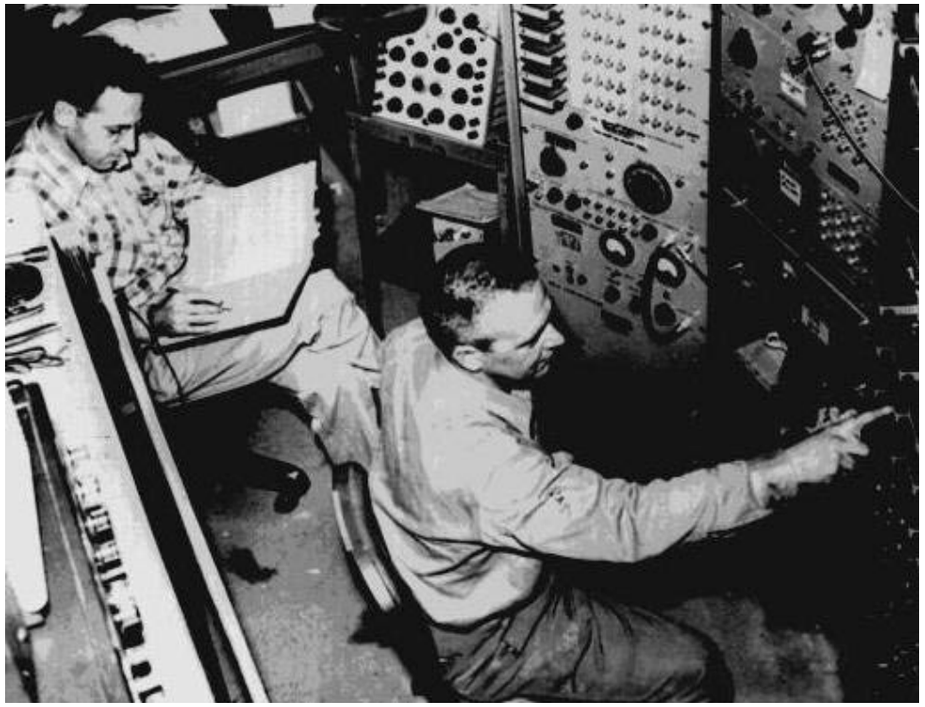


Fig. 3. The scintillation detector for the 1953 neutrino detection experiment at Hanford. Courtesy of the Regents of the University of California, operators of Los Alamos National Laboratory.

esperimento di Reines e Cowan

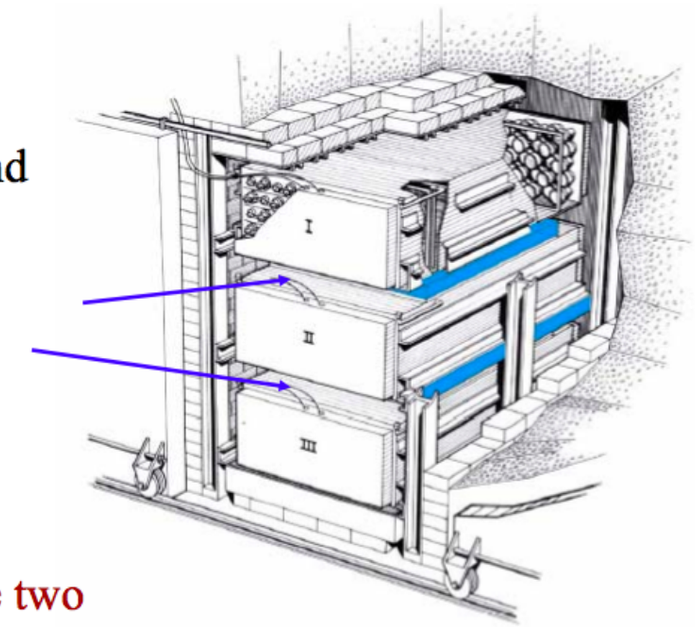
13

$$\bar{\nu} + p \rightarrow e^{+} + n$$

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 β decay would produce two signals in neighboring tanks (I,II or II,III):

- prompt signal from e+ annihilation producing two 0.511 MeV γs
- delayed signal from n capture on cadmium producing 9 MeV in γs

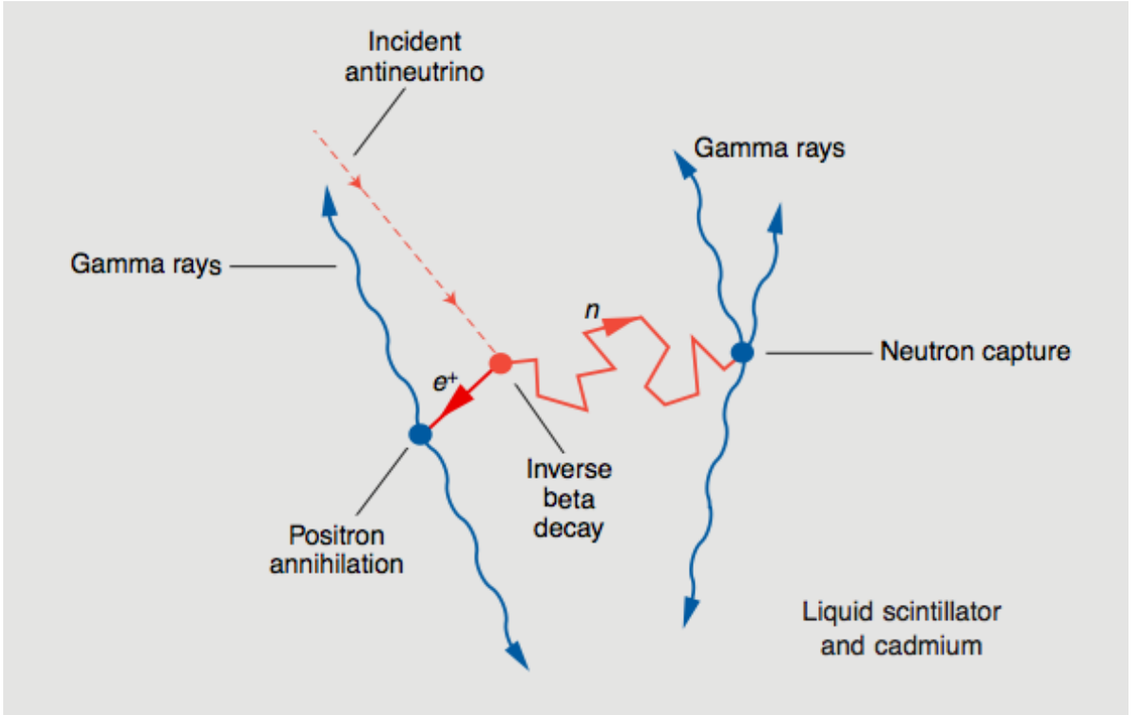


Figure 3. The Double Signature of Inverse Beta Decay

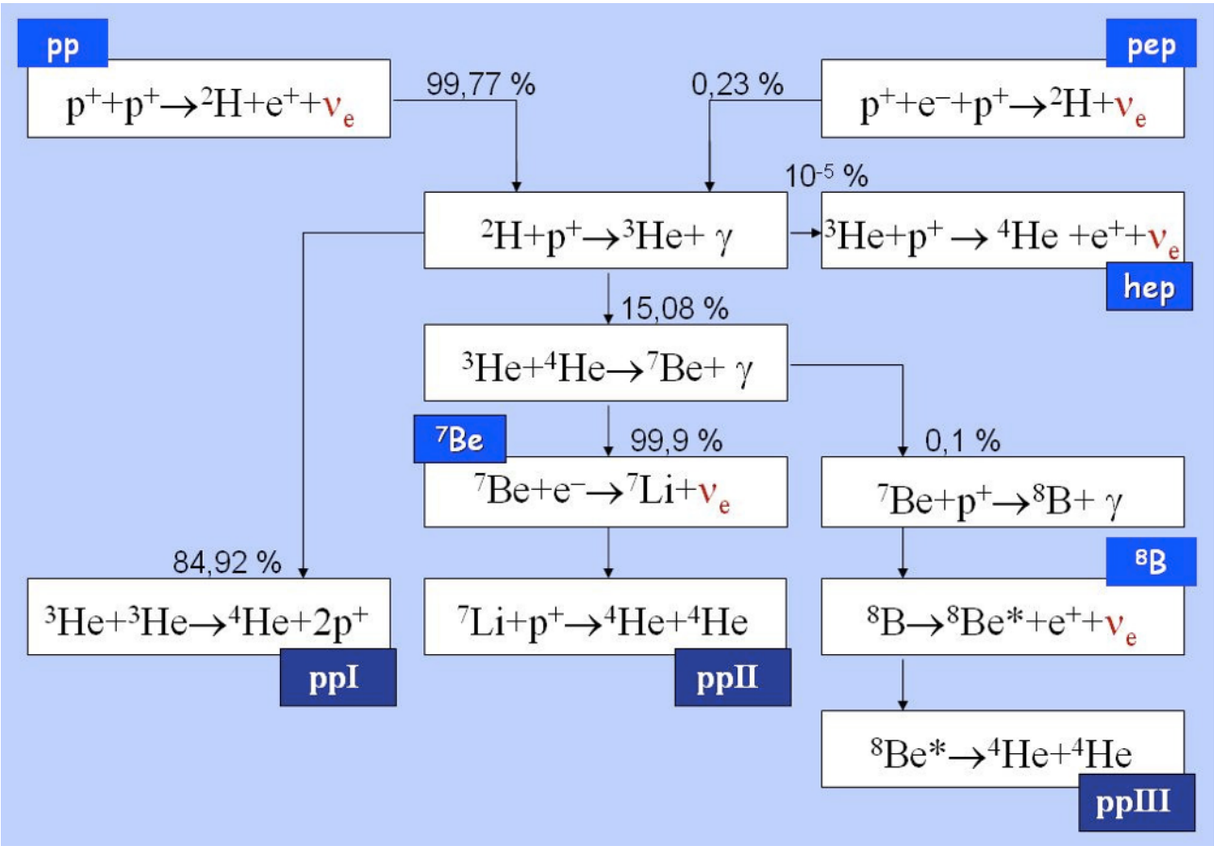
- Nel 1956, Reines e Cowan annunciano di avere osservato inequivocabilmente i segnali associati all'interazione degli antineutrini prodotti dal reattore, con una frequenza compatibile con le previsioni di Bethe e Peierls

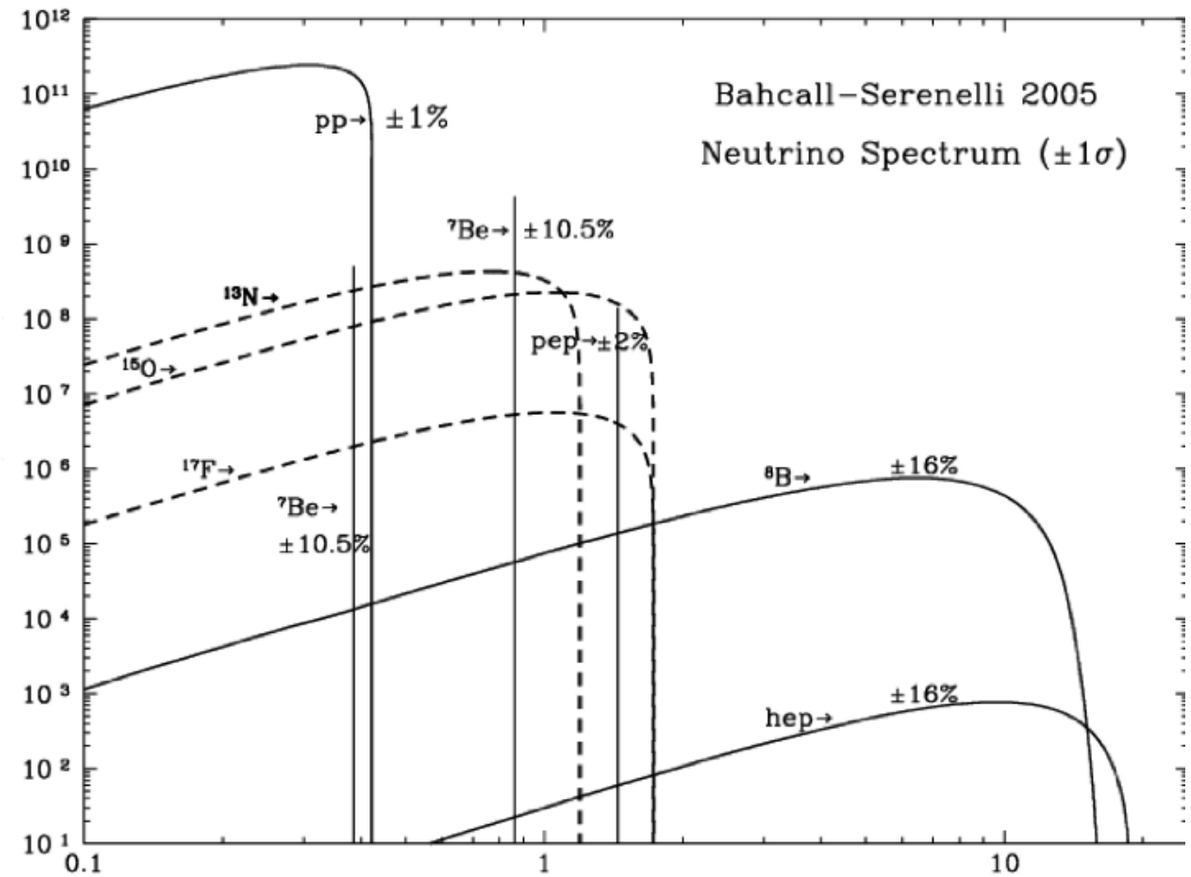
Il "neutrino" e' una particella come le altre

4. Neutrini dal Sole

- Il Sole e' una formidabile sorgente di *neutrini* di diverse energie;
- provengono da cicli di reazioni diverse, che realizzano la reazione di fusione:

$$4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu + 26.7 \text{ MeV}$$





- le energie tipiche vanno da <0.5 MeV (neutrini p-p) a 6-7 MeV (neutrini del ^8B)
- il flusso dei neutrini pp e' ben conosciuto perche' legato all'energia complessiva prodotta dal Sole
- il flusso dei neutrini di alta energia dipende invece crucialmente dalla temperatura centrale e deve essere stimato sulla base di modelli teorici del funzionamento del Sole

La reazione dei neutrini con il Cloro 37

- nel 1947, Pontecorvo suggerisce di osservare i neutrini dalla reazione:

$$\nu + {}^{37}Cl \rightarrow e^- + {}^{37}Ar$$

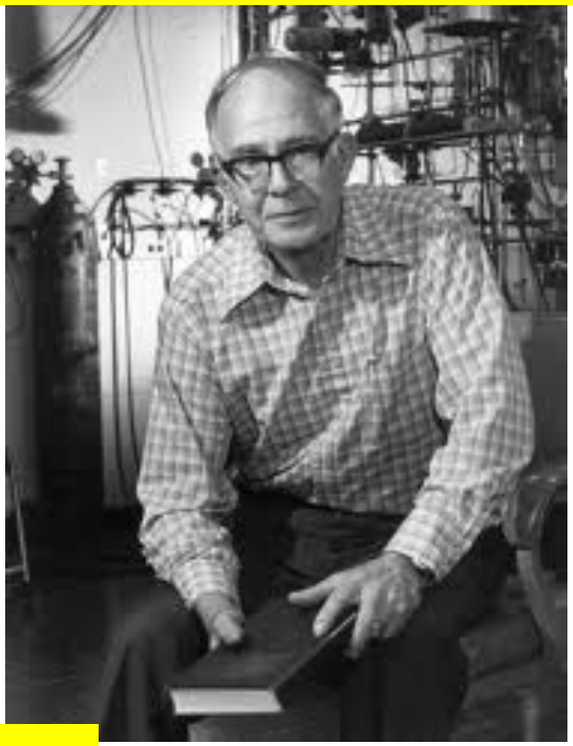
- l'isotopo 37 dell'Ar e'radioattivo, vita media 35 giorni, ritorna al ^{37}Cl catturando un elettrone del suo atomo, secondo la reazione (nota come "cattura K"):

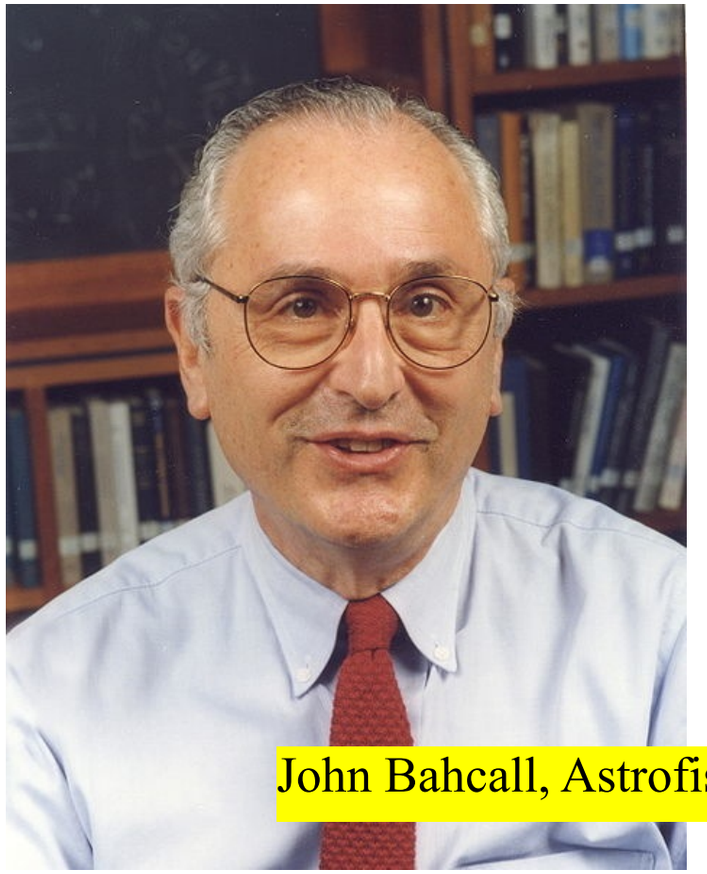
$${}^{37}Ar + e^- \rightarrow {}^{37}Cl + \nu$$

- ^{37}Ar si puo' estrarre dal Cl facendo passare aria, si raccoglie il tutto, si separa Ar dall'aria, e si misura la sua quantita' dalla radioattivita'
- conoscendo la probabilita' di reazione, dal n. di atomi prodotti/giorno si ottiene il flusso dei neutrini.

Bruno Pontecorvo, a sinistra, con Emilio Segre' e Edoardo Amaldi, Roma 1978

Raymond Davies, Premio Nobel 2002





John Bahcall, Astrofisico

L'esperimento di Ray Davies nella miniera di Homestake

cientific American, Volume 221, Number 1, July 1969, pp. 28-37,

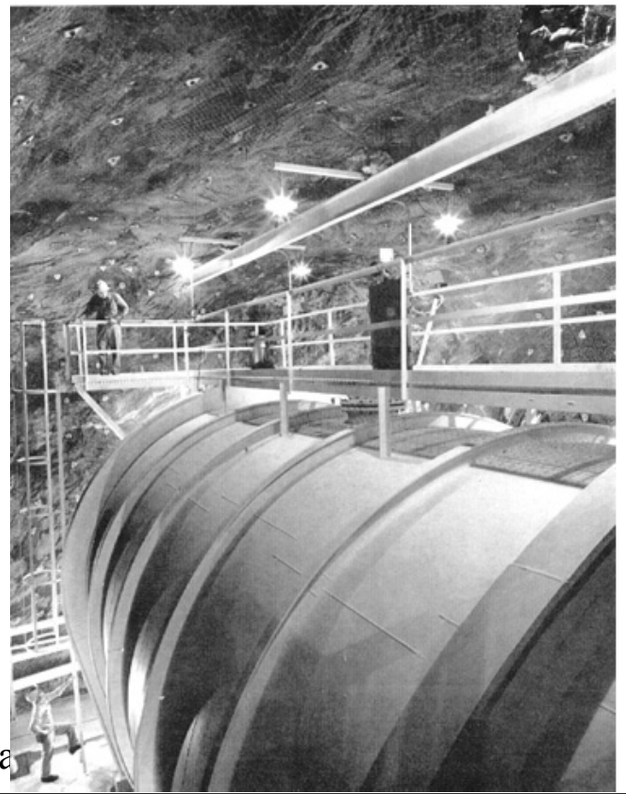
Letture consigliate_3

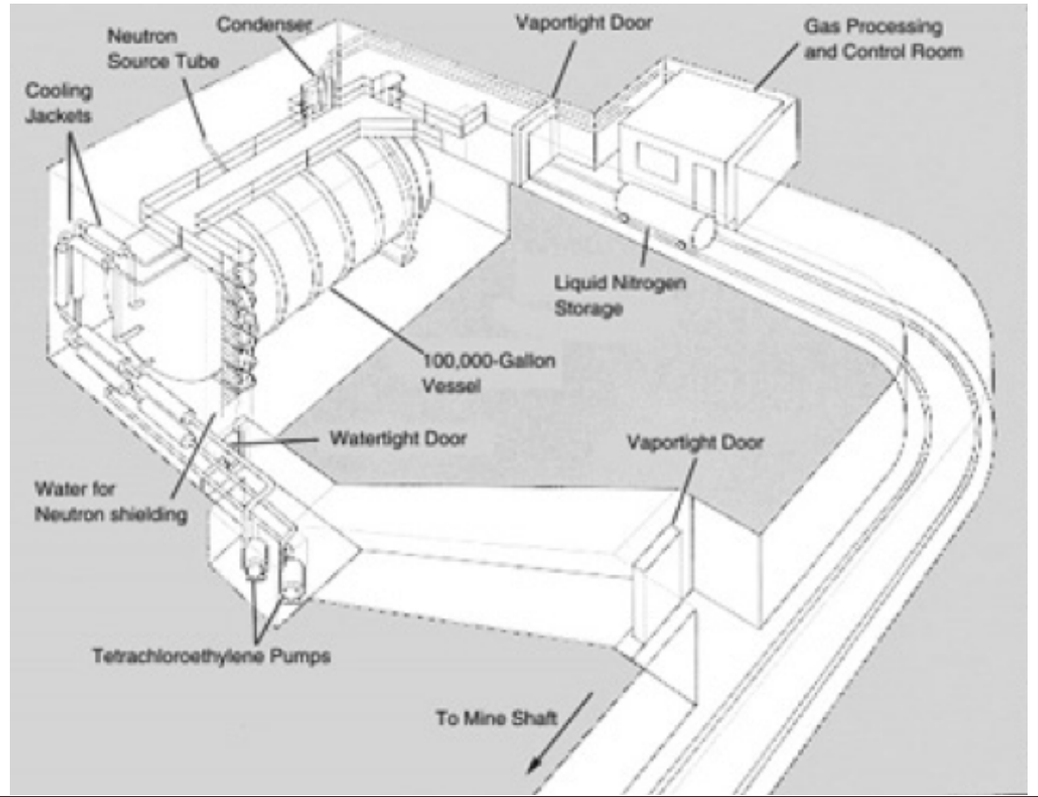
y John N. Bahcall

.. Fowler and A. G. W. Cameron suggested that the decay of ^{8}B might produce a detectable flux of olar neutrinos. I (i.e. J. Bahcall) subsequently made some calculations that showed that the capture

robability for the energetic neutrinos emitted by ^{8}B was 18 times larger than had been previously stimated. On the basis of this calculation Davis suggested in 1964 the experiment eventually ocated at the Homestake mine.

Ve are now ready to ask: How can tetrachloroethylene serve as a detector of solar neutrinos? Some 0 years ago Bruno M. Pontecorvo, then at the Chalk River Nuclear Laboratories in Canada, ointed out that an isotope of chlorine, ^{37}Cl, could capture a neutrino and be transformed into an otope of the rare gas argon, ^{37}Ar, with the release of an electron. Subsequently the suggestion was iscussed in detail by Luis W. Alvarez of the University of California at Berkeley.





I risultati pubblicati da Davies, dal 1970 al 1995, hanno mostrato che il flusso di neutrini misurato e' circa 1/3 di quanto atteso sulla base dei modelli del Sole !!!???!!!

5. Inizia l'era moderna: fasci di neutrini

- con le macchine acceleratrici si possono realizzare fasci collimati di mesoni π;
- 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 $E_\nu \geq$ GeV, la probabilita' di interazione di un neutrino in $1 m^3$ di materia aumenta di un fattore 10^6:

$$P \approx 10^{-11} \cdot E_\nu(\mathrm{GeV}) \ (E_\nu > M)$$

- 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.

CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO
Underground structures at CERN

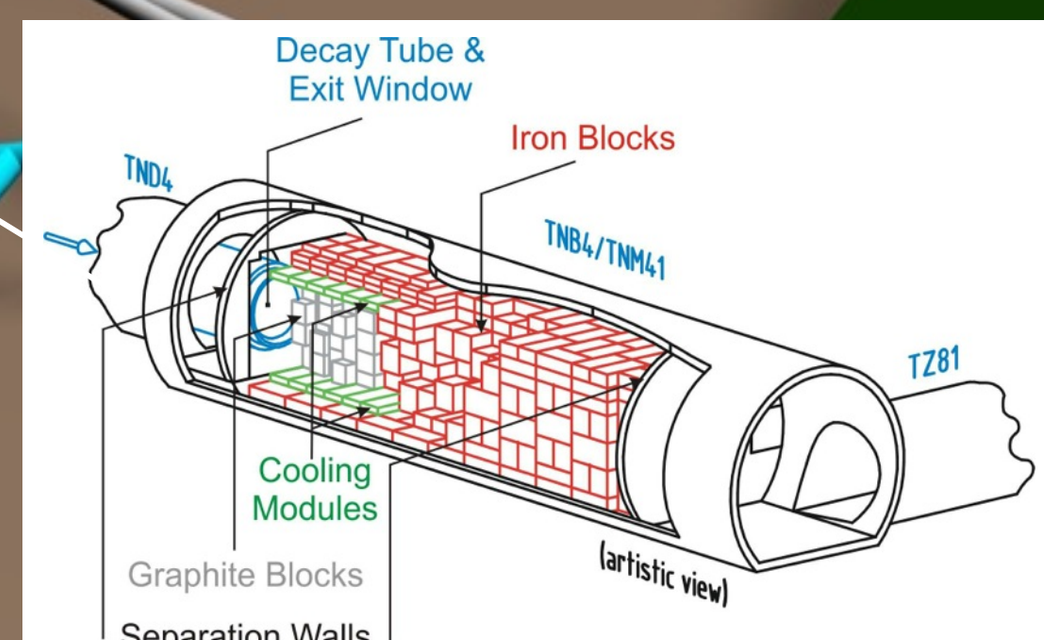
Excavated
Concreted
Decay tube (2nd contract)

55m
140m

Access shaft PGCN
SPS/ECA4
TJ8
SPS tunnel
protons
TT41
Access galleries
LHC/TI8 tunnel
Target chamber
Service gallery
pions
kaons
Decay tunnel
and first muon detector
muons
neutrinos
Second muon detector
neutrinos to Gran Sasso

2 Sept 2003 – hadron stop completed

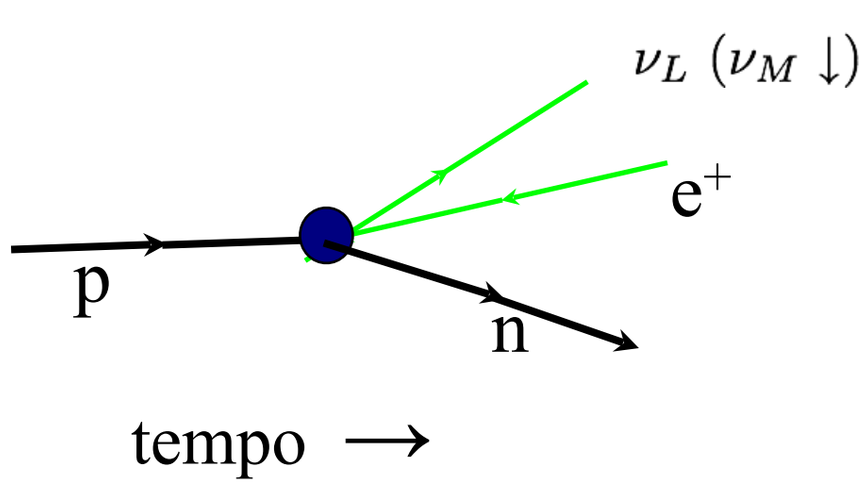
19 Nov 2003 – decay tunnel: seco
segment of tube installed



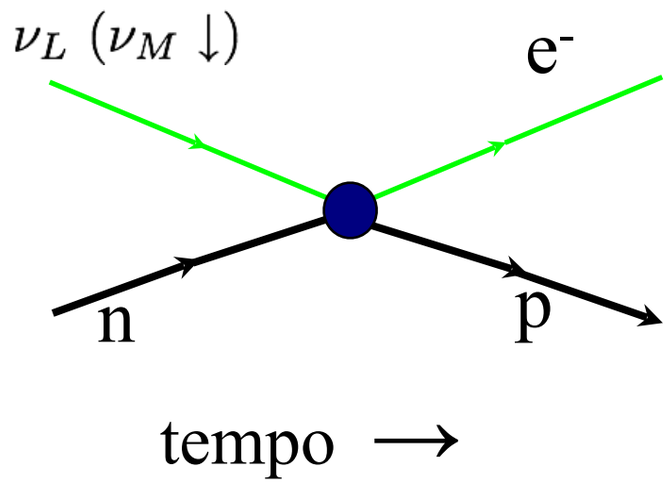
06 / 2003
CERN-AC-DI-MM

produzione e rivelazione di (anti)neutrini associati al μ

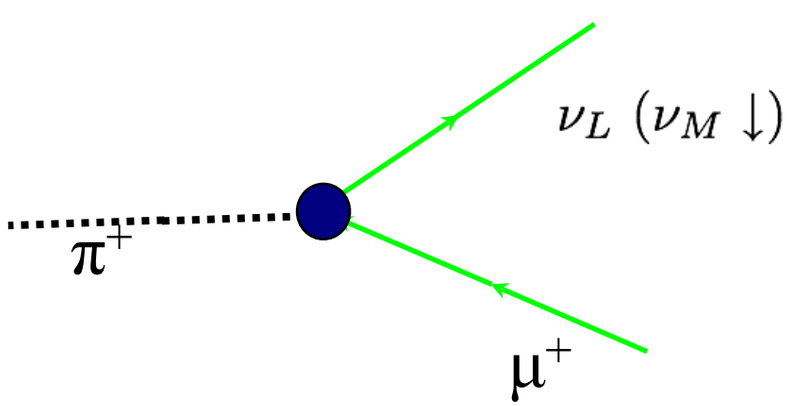
decadimento β^+



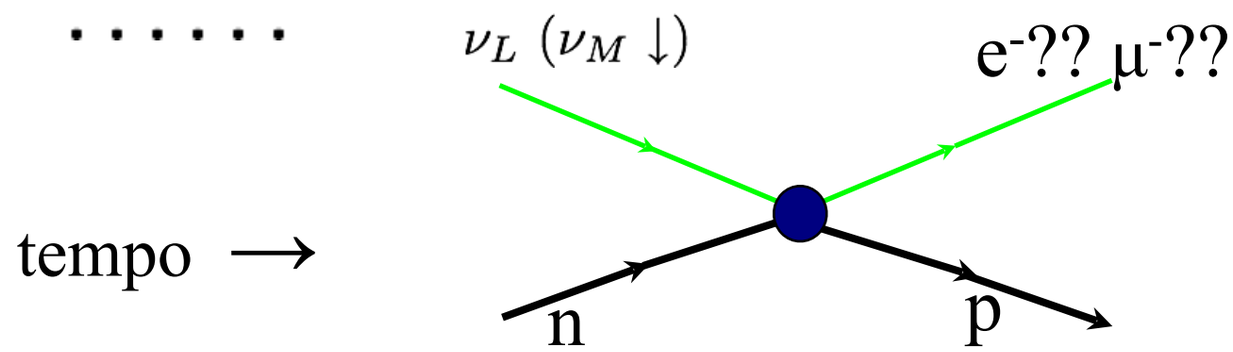
interazione di un neutrino



decadimento del π^+



interazione del neutrino associato al μ



Ovvero:

???? $\nu_\mu = \nu_e$ oppure $\nu_\mu \neq \nu_e$????

Letture consigliate_3

- **The hunt for the muon neutrino.** Nobelprize.org
- Protons were accelerated to an energy of 15 GeV in the Brookhaven accelerator AGS (Alternating Gradient Synchrotron) on Long Island, USA. The intense proton beam was directed onto a target of beryllium. In each collision a handful of particles were produced, mainly pi-mesons.
- The neutrinos, the muons and the surviving pi-mesons crashed into a 13 m thick steel shield, which stopped all particles except the neutrinos.
- **The steel shield,** which was made of armour plates from scrapped warships, was essential for the experiment. ...The steel shield, which had a weight of about 2000 tons, was dimensioned to stop the penetrating muons.
- For the neutrinos to have a fair chance to interact, i.e. collide, **the detector had to be massive.** Furthermore, the charged particles produced in the collision had to be detected. **Leon Lederman, Melvin Schwartz** and **Jack Steinberger** ...decided, in 1960, to construct a 10 ton spark chamber. The detector was divided into 90 plates of aluminium, each an inch thick. The spaces between the plates were filled with neon gas.
- **As neutrino interactions are very rare,** the background from other processes was disturbing...The background was reduced by keeping the experiment active only during the short pulses, 3 microseconds, when the accelerator delivered particles. During the 8 month
- ...they accumulated data for 25 days, but because of the short pulses, the efficient time for the detector was only 6 seconds.
- Each neutrino pulse contained 10^7 neutrinos. During the experiment a total of 10^{14} neutrinos went through the detector during the six seconds it was active. When a reaction took place, a high voltage was applied to the spark chamber and a discharge occurred where the produced charged particles had passed. The sparks were photographed and gave a picture of the particles' path through the detector. A total of 51 neutrino interactions were registered with a muon observed in the spark chamber. These results showed that the neutrinos, produced together with muons, give rise to muons, not electrons.

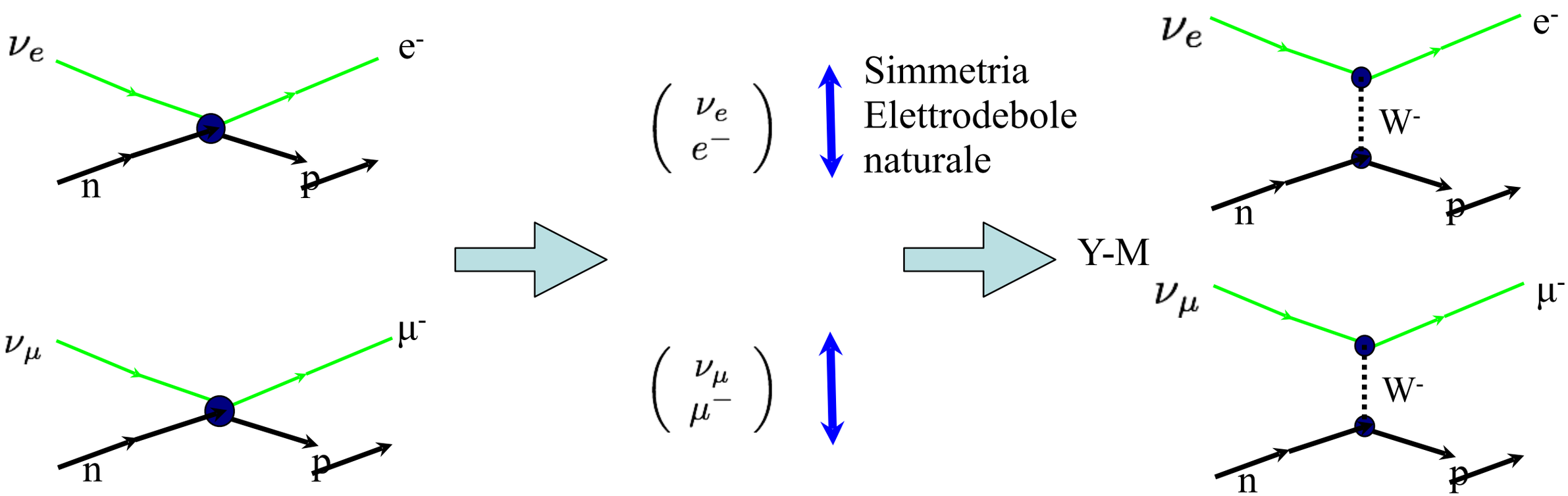
Due neutrini e due doppietti

Very clear muon identification

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

un evento da "corrente carica"

Evoluzione della teoria



Un punto di partenza per l'unificazione