

The importance of ν oscillations.

They measure fundamental parameters of the standard model. Mixing angles, neutrino masses and the CP phase δ_{CP} are fundamental constants of the standard model.

They are a probe of the GUT scales . The smallness of neutrino masses is connected to the GUT scale through the see-saw mechanism.

They are directly linked to many fields in astrophysics and cosmology : baryogenesis, leptogenesis, galaxies formation, dynamic of supernovae explosion, power spectrum of energy anisotropies, etc.

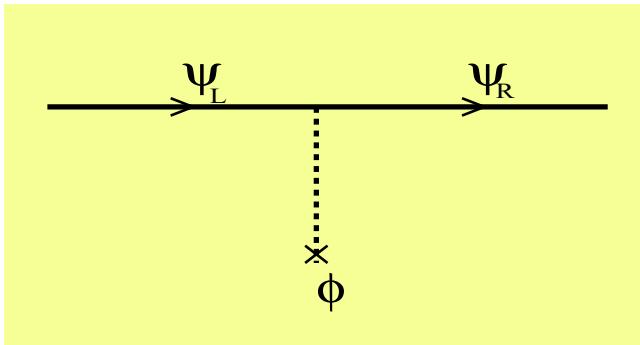
They open the perspective of the measure of **leptonic CP violation.**

Leptons are VERY different from quarks. (I)

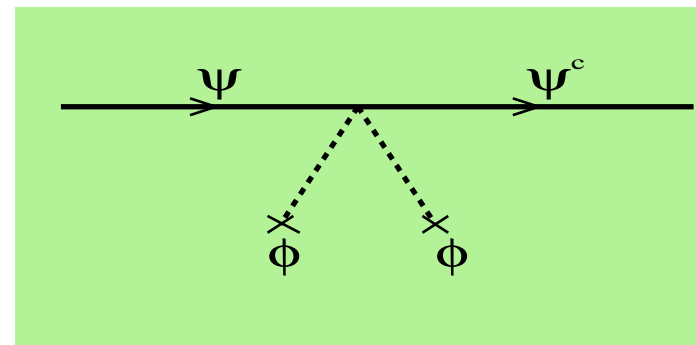
$$\begin{array}{lll}
 u \sim 5 \text{ MeV} & c \sim 1 \text{ GeV} & t \sim 175 \text{ GeV} \\
 d \sim 8 \text{ MeV} & s \sim 0.1 \text{ GeV} & b \sim 5 \text{ GeV}
 \end{array}$$

$$\begin{array}{lll}
 e \sim 0.5 \text{ MeV} & \mu \sim 0.1 \text{ GeV} & \tau \sim 2 \text{ GeV} \\
 \nu_e \leq \mathcal{O}(1 \text{ eV}) & \nu_\mu \leq \mathcal{O}(1 \text{ eV}) & \nu_\tau \leq \mathcal{O}(1 \text{ eV})
 \end{array}$$

How can the same model generate mass ratio so different?



$$\begin{aligned}
 & \lambda_\nu \bar{\Psi}_R \Phi \Psi_L + h.c. \\
 & m_f = \lambda_f v \\
 & \quad L
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 & \frac{\alpha_\nu}{M} \nu_L^T C \tilde{\Phi}^T \tilde{\Phi} \nu_L + h.c. \\
 & m_f = \alpha_\nu \frac{v^2}{M} \\
 & \quad \cancel{L}
 \end{aligned}$$

A new physics scale, M , can explain the new hierarchy (if at the GUT scale) and is associated to the breaking of a global symmetry of the SM: total lepton number L :

Leptons are VERY different from quarks. (II)

$$\text{Neutrinos } U_{MNSP} \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & ? \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$$\text{Quarks } V_{CKM} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.005 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.005 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

Solar+Atmospherics indicate a quasi bi-maximal mixing matrix, **VERY DIFFERENT** from CKM matrix (almost diagonal)!

$$U_{MNSP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$\theta_{13} \rightarrow 0 \Rightarrow$ The 3x3 mixing matrix becomes a trivial product of two 2x2 matrixes.

θ_{13} drives $\nu_{\mu} - \nu_e$ subleading transitions \Rightarrow
**the necessary milestone for any subsequent search:
 neutrino mass hierarchy and leptonic CP searches.**

Most of the parameters are waiting to be measured

δm_{12}^2

SOLARS+KAMLAND
 $\delta m_{12}^2 = (7.9 \pm 0.7) 10^{-5} \text{ eV}^2$

θ_{12}

SOLARS+KAMLAND
 $\sin^2 (2\theta_{12}) = 0.82 \pm 0.055$

Addressed by a SuperBeam/Nufact experiment

δm_{23}^2

ATMOSPHERICS

 $\delta m^2 = (2.4 \pm 0.4) 10^{-3} \text{ eV}^2$

θ_{23}

ATMOSPHERICS

 $\sin^2 (2\theta_{23}) > 0.95$

θ_{13}

CHOOZ LIMIT
 $\sin^2 2\theta_{13} < 14^0$

LSND/Steriles

 ?

δ_{CP}

Mass hierarchy

Σm_ν

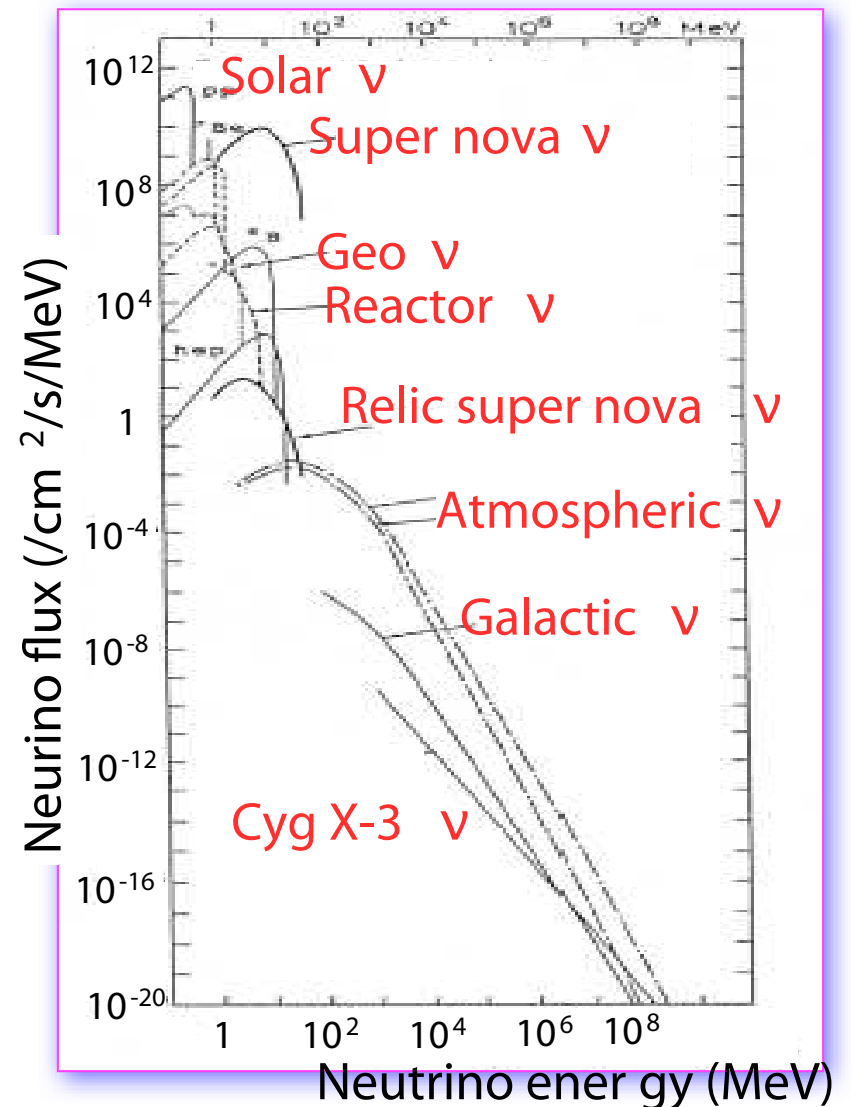
BETA DECAY END POINT
 $\Sigma m_\nu < 6.6 \text{ eV}$

Dirac/Majorana

Noi siamo pervasi da un flusso di neutrini

- $\sim 10^7 \nu$ relici dal Big Bang
- $\sim 10^{14} \nu/s$ dal sole
- $\sim 5 \cdot 10^{10} \nu/s$ dalla radioattività naturale
- $\sim 10^{10} \nu/s$ dai reattori nucleari
- $\sim 10^3 \nu/s$ dai interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera
- $\sim 4 \cdot 10^3 \nu/s$ dai decadimenti del Potassio 40 presente nel nostro corpo ($\sim 20 \text{ mg}$).

Expected spectra of various ν s



Breve storia del neutrino

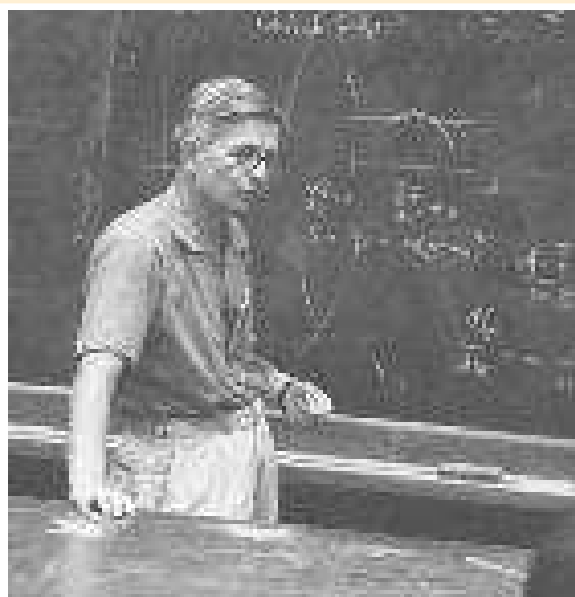
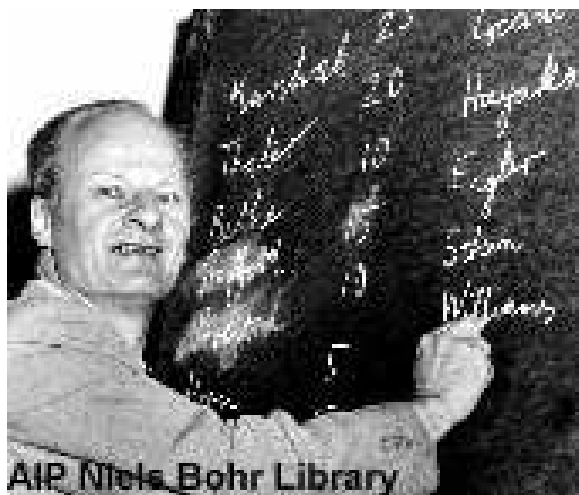
1930, W. Pauli propone l'esistenza di una particella neutra senza massa come ultima risorsa per spiegare lo spettro continuo degli elettroni emessi nello spettro beta. **E' la prima proposta di una particella che non fa parte della materia ordinaria**



1933, E. Fermi chiama questa particella neutrino e formula la teoria dei decadimenti deboli. Fermi afferma che dopo aver capito l'elettrodinamica quantistica, la teoria delle interazioni deboli conseguiva in modo naturale. **E' la prima proposta di una interazione senza analogo classico**



1934, Bethe e Peiers calcolano la sezione d'urto per i processi $\nu + n \rightarrow e^- + p$ e $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. L'articolo conclude: "... This meant that one obviously would never be able to see a neutrino." In effetti $\sigma = 4 \frac{G_F^2}{\pi} p_e E_e \simeq 2.3 \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2 \left(\frac{p_e E_e}{m_e^2} \right)$, ciò vuol dire che in acqua la lunghezza di assorbimento per un neutrino da 2.5 MeV ($\lambda = 1/n\sigma$) risulta $2.5 \cdot 10^{20} \text{ cm} \simeq$ lo spessore del disco della galassia, o un anno luce di piombo.

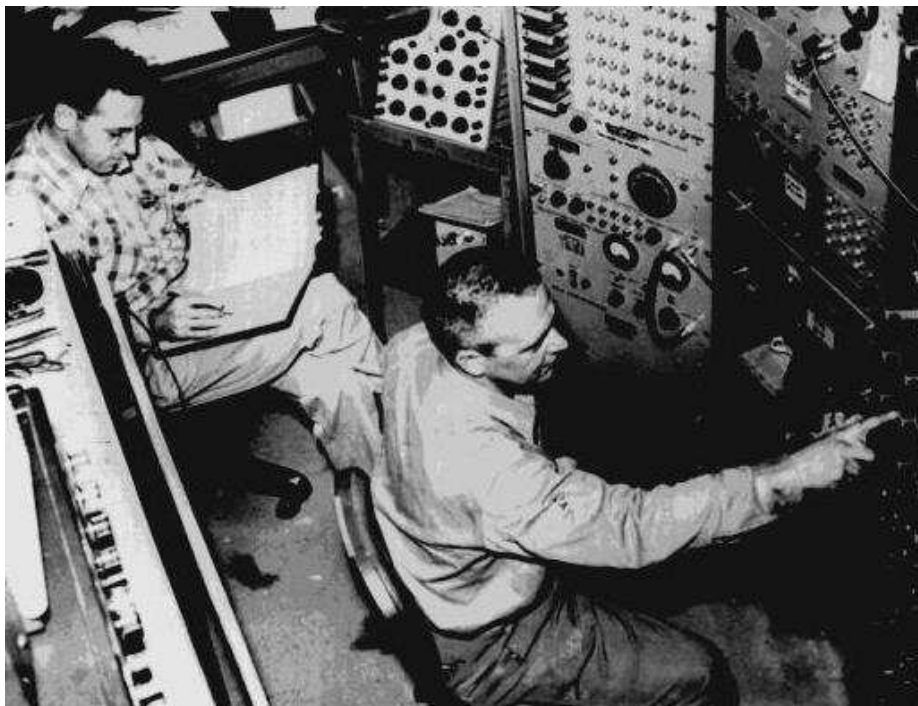


Reines e Cowan a Los Alamos, dopo la fine della II guerra mondiale, cominciano comunque a studiare la possibilità di rivelare i neutrini emessi dai reattori nucleari. Un reattore nucleare emette un flusso di neutrini, fra 1 e 10 MeV:

$$\frac{d\Phi}{d\Omega} \simeq \frac{2 \cdot 10^{20}}{4\pi} \left(\frac{\text{Potenza}}{\text{GWatt}} \right) \frac{\bar{\nu}_\mu}{\text{srad}}.$$

Installando un rivelatore di qualche centinaio di chili d'acqua a circa 10 m dal nocciolo di un reattore é cosí possibile rivelare qualche decina di eventi all'anno. (L'idea originale é di Pontecorvo, 1946.)

Evidenza di rivelazione di neutrini nell'esperimento decisivo al reattore di Savannah River nel South Carolina, 1956. Il premio Nobel verrá attribuito 40 anni dopo (!)



1958, Goldhaber, Grodzins e Sunyar conducono il famoso esperimento che dimostra che i neutrini sono left-handed. Un passo fondamentale verso la dimostrazione che le interazioni deboli sono (V-A).

B. Pontecorvo 1958 Propone di definire se esistono due tipi di neutrino (ν_e e ν_μ), costruendo un fascio di neutrini da decadimento di π e controllando se $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + \nu$ (si sapeva già che $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + \nu$)



Mel Schwartz 1959 Propone di costruire un fascio di neutrini da decadimenti di π ad alta energia per misurare la sezione d'urto $\sigma(\nu p)$ per esplorare il problema dell'unitarietà delle interazioni deboli.

1958, B.Pontecorvo postula per primo la possibilità di oscillazioni di neutrini ($\nu\bar{\nu}$).

1962, Steinberger, Lederman e Schwartz conducono a Brookhaven l'esperimento che porta alla scoperta del secondo neutrino (Nobel nel 1988)

1962, Maki, Nakagawa e Sakata propongono per primi l'ipotesi di oscillazione di sapori di neutrini. L'articolo passa completamente inosservato finché viene riscoperto dai giapponesi di SuperKamiokande. (N.B. Questo molto prima dell'angolo di Cabibbo e della matrice di Kobayashi Maskawa)

1973, esperimento Gargamelle scopre l'esistenza delle correnti deboli neutre.

Anni '70 Misure di sezioni d'urto di interazioni di neutrino, scattering su particelle point-like (partoni, quarks) e più tardi studi di funzioni di struttura. Nel 1968 R.Davis comincia l'esperimento sui neutrini solari.

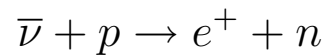
Anni '80, Struttura degli accoppiamenti delle correnti deboli, inizio delle ricerche di oscillazione

1987 Kamiokande e IMB riportano evidenza di segnale di neutrini da supernova

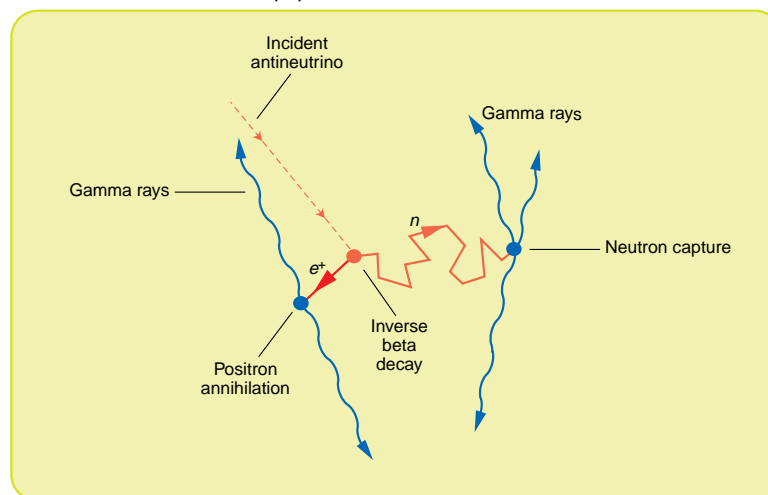
1989 LEP riporta che la larghezza della Z^0 dimostra che i neutrini sono 3.

Rivelazione diretta dei neutrini, Reines, Cowan et al 1956

Il processo considerato e'



la sorgente di antineutrini é un reattore nucleare, il principio sperimentale e' di rivelare l'annichilazione del positrone in due gamma in coincidenza ritardata con l'emissione di gamma dalla cattura del neutrone ($\langle t \rangle \simeq 30\mu s$)



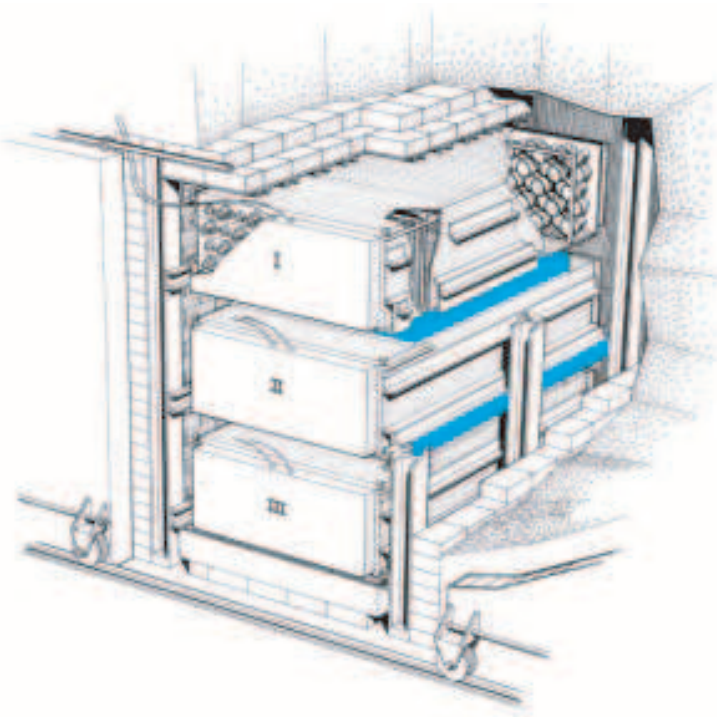
- Un primo disegno concettuale per rivelare neutrini da una esplosione nucleare nel 1952.
- Un primo esperimento per la rivelazione di neutrini al reattore di Hanford nel 1953. Il rivelatore era una tank di 300 l di scintillatore liquido (in precedenza il piu' grande rivelatore di scintillatore liquido non superava i 10 l). I fondi dal reattore erano fermati da schermi in boro-paraffina intervallati con lastre di piombo. I fondi da raggi cosmici risultarono essere piu' di un ordine di grandezza maggiori dal segnale atteso:

” The lesson of the work was clear: It is easy to shield out the noise men make, but impossible to shut out the cosmos. Neutrons and gamma rays from the reactor, which we had feared most, were stopped in our thick walls of paraffin, borax and lead, but the cosmic ray mesons penetrated gleefully, generating backgrounds in our equipment as they passed or stopped in it. We did record neutrino-like signals but the cosmic rays with their neutron secondaries generated in our shields were 10 times more abundant than were the neutrino signals. We felt we had the neutrino by the cottails, but our evidence would not stand up in court.”

Per upgradare il rivelatore il gruppo dovette impegnarsi ad affrontare per la prima volta enormi problemi sperimentali:

- Sviluppo di rivelatori liquidi: resa in luce, stabilita', dipendenza dalla temperatura, produzione in larga scala etc.
- Componenti a bassa radioattivit 
- Schermi anti-radiazioni.
- Disegno di un rivelatore in grado di vetare i raggi cosmici
- Sviluppo dell'elettronica per le coincidenze ritardate
- Analisi dei dati in grado di dedurre le frequenze delle coincidenze accidentali.

L'esperimento di Savannah River



- Due grandi vasche di plastica (A e B) riempite d'acqua \Rightarrow bersaglio per le interazioni degli antineutrini.
- Cloruro di Cadmio sciolto nell'acqua \Rightarrow nuclei con grande sezione d'urto per la cattura dei neutroni.
- Le vasche d'acqua erano interposte fra 3 grandi vasche di scintillatore liquido (I, II e III), con una capacita' totale di 4200 litri, ognuna con 110 fotomoltiplicatori per rivelare i gamma dell'annichilazione del positrone e la cattura del neutrone

Un evento di neutrino nella tank avrebbe prodotto:

- Un positrone la cui annichilazione avrebbe prodotto due gamma back to back \Rightarrow coincidenza veloce dei segnali nelle tank I e II.
- Cattura del neutrone \Rightarrow segnali di gamma nella tank I o II separati in tempo fra i 3 e $10 \mu s$.
- Nessun segnale dalla tank III perche' la tank II era abbastanza grande da fermare tutti i raggi gamma prodotti dalla interazione.

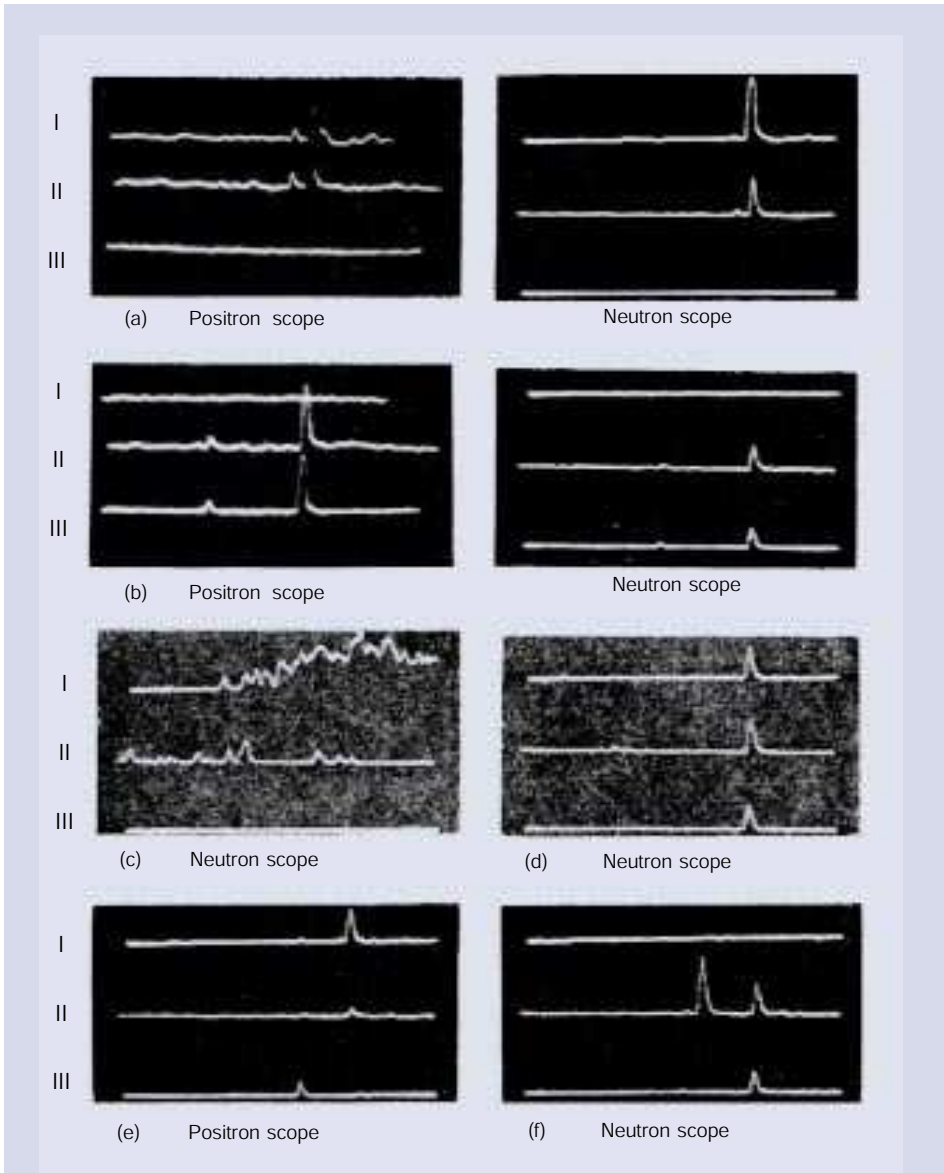


Figure 5. Oscilloscope Traces from the Savannah River Experiments

In these oscilloscope pictures, traces from detectors I, II, and III are labeled I, II, and III, respectively. The label under each frame indicates whether the signals were recorded by the scope for positron annihilation or the scope for neutron capture. Acceptable delayed-coincidence signals are shown in (a) and (b), while rejected signals are pictured in (c) through (f).

(a) The delayed-coincidence signal in these two frames has occurred in the top triad of the detector because the pulses appeared in detectors I and II. *Positron scope*: The pulse energies in detectors I and II were 0.30 MeV and 0.35 MeV, respectively. The pulses reached the positron circuit in prompt coincidence (less than 0.2 microsecond apart) and were accepted as a signal of positron annihilation. *Neutron scope*: The pulse energies in detectors I and II were 5.8 MeV and 3.3 MeV, respectively. These pulses arrived in prompt coincidence and were accepted as a signal of neutron capture. The delay between the positron and neutron signals was 2.5 microseconds. (b) The delayed-coincidence signal in these two frames has occurred in the bottom triad because the pulses appeared in detectors II and III. *Positron scope*: The pulse energies in detectors II and III were 0.25 MeV and 0.30 MeV, respectively.

Neutron scope: The pulse energies in detectors II and III were 2.0 MeV and 1.7 MeV, respectively. The delay between the positron and neutron signals was 13.5 microseconds. (c) The pulses from the neutron circuit were the result of electrical noise. (d) These three pulses from the neutron circuit were caused by a cosmic-ray event. (e) These three pulses from the positron circuit were caused by cosmic-ray event. (f) These pulses may have been caused by a cosmic-ray event. They were rejected as a signal of neutron capture because of the extra pulse from detector II. Frames like this one occurred more often than would be expected from chance coincidences. They were, however, not often enough to affect the results considerably. These data appeared in Reines, Cowan, Harrison, et al. 1960.

Risultati

14/6/1956, telegramma a Pauli:

“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected six times ten to minus forty-four square centimeters”

Numero di eventi con reattore acceso - numero di eventi con reattore spento
 $= 3 \pm 0.2/\text{ora.}$

Verifiche sperimentali:

- Verifica che il segnale prompt e' dovuto a raggi gamma da 0.5 MeV: inserzione di fogli di Piombo di spessore variabile fra bersaglio e rivelatore \Rightarrow il segnale diminuisce come previsto.
- Verifica che il segnale ritardato e' dovuto a cattura del neutrone da cadmio: sostituendo il bersaglio con acqua pura il segnale diminuiva di un fattore circa 100.

Primo articolo del 1956: sezione d'urto misurata in accordo entro il 5% rispetto alle stime teoriche. Gli errori sistematici sul flusso di neutrini dal reattore e l'efficienza di rivelazione erano almeno al 50%.

Articolo finale del 1960: la sezione d'urto misurata aumentava di un fattore 2 grazie alla miglior conoscenza delle efficienze di rivelazione. Nel frattempo anche la sezione d'urto teorica era aumentata di un fattore 2 includendo la violazione di parita'.