

Fisica dei neutrini e l'eredità scientifica di Bruno Pontecorvo

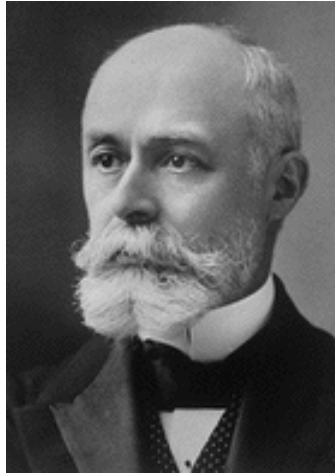
Luigi Di Lella

Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

9 settembre 2013

- Introduzione alla fisica dei neutrini
- Rivelazione dei neutrini
- Universalità elettrone – muone
- Il secondo neutrino
- Oscillazioni di neutrini

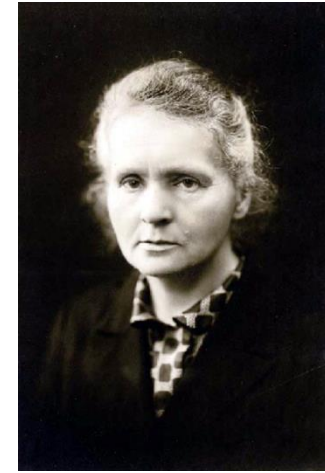
1896 - Becquerel e i coniugi Curie scoprono la radioattività naturale (Uranio, Torio, Radio, Polonio)



Henri Becquerel



Pierre Curie



Maria Skłodowska - Curie



Ernest Rutherford

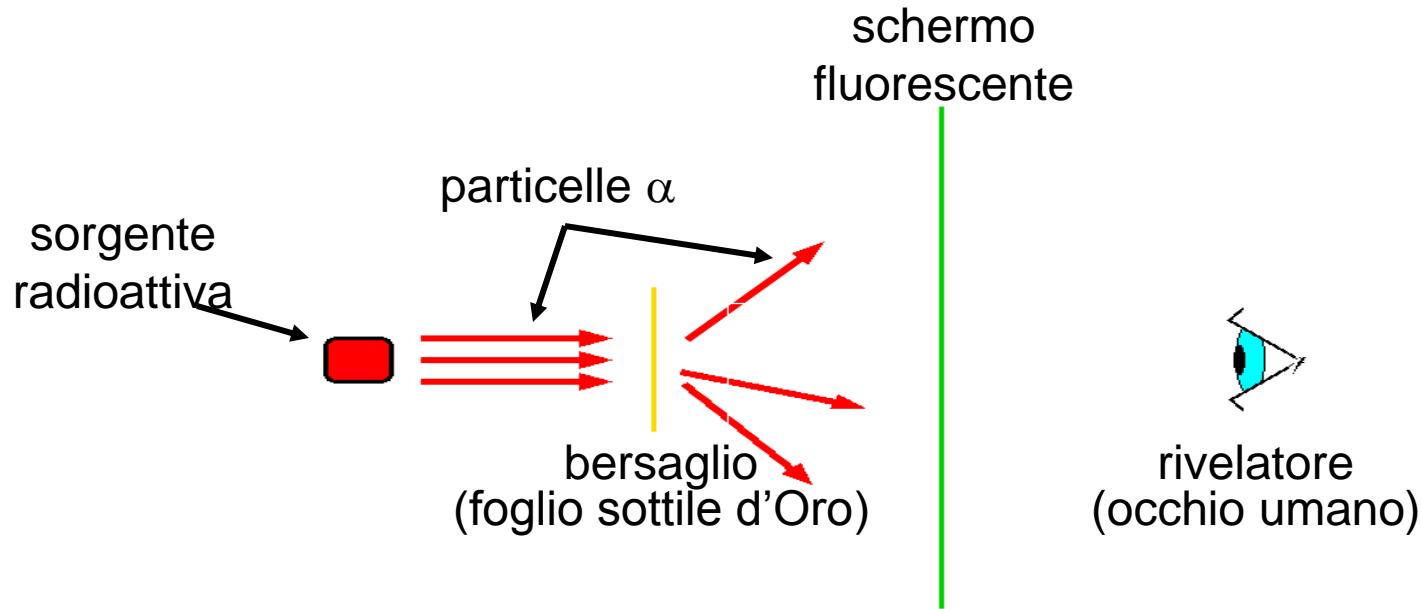
1899 - Rutherford classifica la radiazione emessa dagli atomi radioattivi in due tipi:

- raggi α (arrestati da un sottile foglio di carta);
- raggi β (che attraversano qualche millimetro di Alluminio)

1900 - Becquerel misura il rapporto (carica elettrica) / massa dei raggi β e li identifica con elettroni

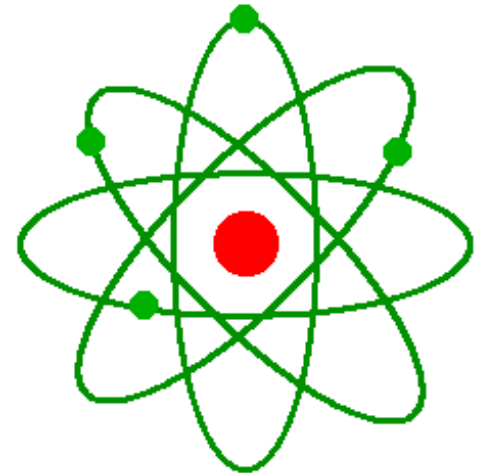
1901 - Rutherford e Soddy scoprono che la radioattività α e β è associata con la trasmutazione degli atomi in atomi di elementi diversi

1909 - 13: Rutherford scopre il nucleo atomico



Gli atomi consistono di un nucleo pesante con carica elettrica positiva circondato da una nuvola di elettroni

$$\frac{\text{Massa totale elettroni}}{\text{Massa nucleo}} \leq \frac{1}{1800}$$



Decadimento β

Se il decadimento β consiste nell'emissione di un elettrone dal nucleo

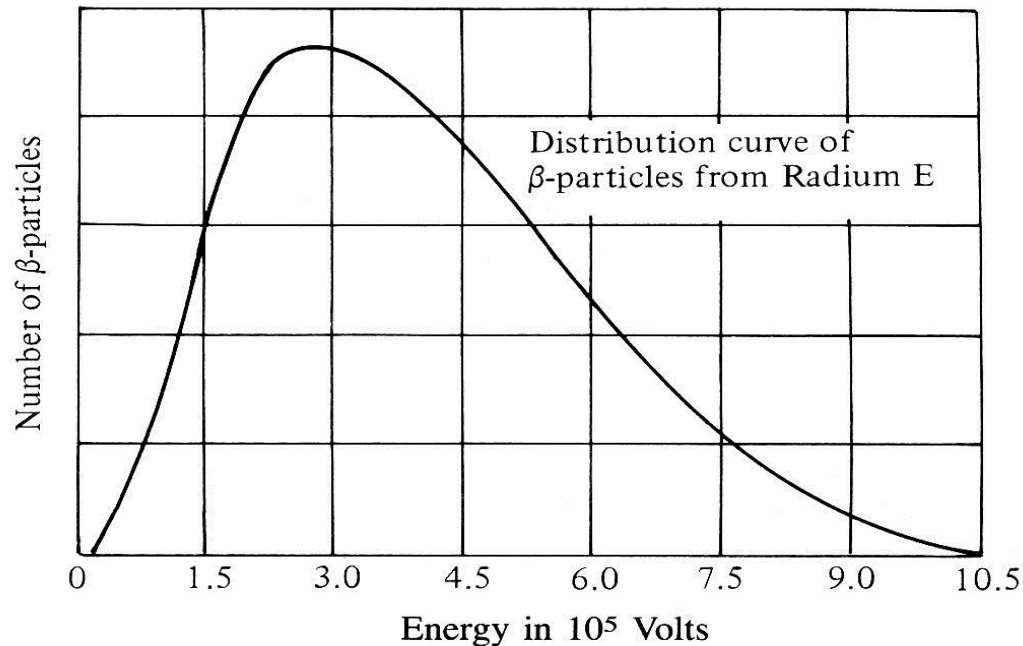


ne segue che l'elettrone ha sempre la stessa energia :

$$\text{Energia totale dell'elettrone } E = [M(A, Z) - M(A, Z+1)]c^2$$

(trascurando l'energia cinetica del nucleo finale $\frac{1}{2}p^2/M(A, Z+1) \ll E$)

Prima misura conclusiva dell'energia dell'elettrone (Chadwick, 1914)



Radium E: $^{210}\text{Bi}_{83}$
(isotopo radioattivo
prodotto nel decadimento
del ^{238}U)

Gli elettroni emessi nel decadimento β non sono "mono-energetici" ma hanno una distribuzione continua di energie

1914 – 1930: Varie proposte (tutte sbagliate) per risolvere l'enigma della distribuzione continua dell'energia dei raggi β .

Un altro enigma degli anni 1920:

il momento angolare dei nuclei ${}^6\text{Li}_3$ e ${}^{14}\text{N}_7$

Durante gli anni 1920 veniva generalmente accettata l'idea (sbagliata) che il nucleo atomico consistesse di protoni ed elettroni :

${}^6\text{Li}_3$: 6 protoni, 3 elettroni ; ${}^{14}\text{N}_7$: 14 protoni, 7 elettroni

In entrambi i casi, un numero dispari di particelle con spin = $\frac{1}{2} (h/2\pi)$

➔ Il momento angolare dei nuclei ${}^6\text{Li}_3$ e ${}^{14}\text{N}_7$ deve essere un multiplo dispari di $\frac{1}{2} (h/2\pi)$

Sperimentalmente, si misura un momento angolare totale $J = h/2\pi$ per entrambi i nuclei

Dicembre 1930: W. Pauli spedisce una lettera aperta ai partecipanti ad un congresso di fisica a Tubinga (Germania)



Wolfgang Pauli

Zurigo, 4 dicembre 1930

Cari colleghi radioattivi,

..... a causa del momento angolare “sbagliato” dei nuclei ${}^6\text{Li}$ e ${}^{14}\text{N}$, e dello spettro continuo di energia dei raggi β , ho trovato un rimedio disperato per salvare la legge di conservazione dell’energia. Cioé, la possibilità che nei nuclei esistano particelle elettricamente neutre, che desidero chiamare “neutroni”, dotate di spin $\frac{1}{2}(\hbar/2\pi)$. La massa di questi “neutroni” deve essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell’elettrone, e in ogni caso non superiore a 1% della massa del protone. Lo spettro continuo dei raggi β sarebbe quindi spiegato assumendo che nel decadimento β un “neutrone” viene emesso insieme all’elettrone, in modo da mantenere costante la somma delle energie dell’elettrone e del “neutrone”.

..... Per il momento, non oso pubblicare nulla su questa idea.... Quindi, cari colleghi radioattivi, esaminatela e giudicatela. Sfortunatamente non posso essere con voi a Tubinga perché sono indispensabile per una festa da ballo qui a Zurigo durante la notte dal 6 al 7 dicembre.

W. Pauli

Due commenti alla lettera di Pauli:

- Il “neutrone” di Pauli è una particella leggera;
- Nel 1930, i fisici erano convinti che le particelle emesse nel decadimento dei nuclei radioattivi esistessero all'interno del nucleo prima dell'emissione.

1932 - Chadwick scopre il neutrone (quello vero, non quello di Pauli)

Neutrone: particella elettricamente neutra, con massa molto simile alla massa del protone

$$M_p c^2 = 938.27 \text{ MeV} ; M_n c^2 = 939.57 \text{ MeV}$$

Questa scoperta risolve il problema della struttura dei nuclei: il nucleo di un atomo con numero atomico Z e numero di massa A è un sistema legato di Z protoni e $(A - Z)$ neutroni (in totale, A “nucleoni”).

Il nucleo ${}^6\text{Li}_3$ è costituito da 3 protoni e 3 neutroni

Il nucleo ${}^{14}\text{N}_7$ è costituito da 7 protoni e 7 neutroni



James Chadwick

In entrambi i casi,
un numero pari di
particelle con spin
 $\frac{1}{2} (h / 2\pi)$

Soluzione dell'enigma
del momento angolare totale

1932 – Enrico Fermi propone una teoria del decadimento β

Il decadimento β di un nucleo consiste nella trasmutazione di un neutrone in un protone attraverso la reazione



dove ν è la particella leggera, elettricamente neutra proposta da Pauli (chiamata “neutrino” da Fermi)



Enrico Fermi

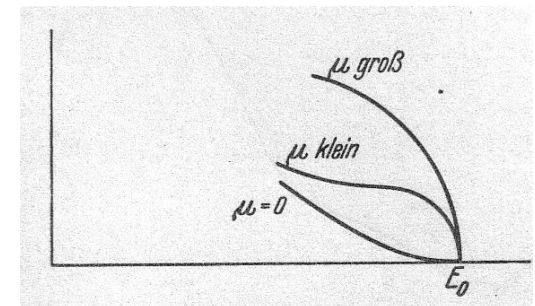
La teoria di Fermi: un’interazione “locale” tra quattro particelle di spin $\frac{1}{2}$ che usa il formalismo matematico degli operatori di “creazione” e “distruzione” inventati da Jordan

Le particelle emesse nel decadimento β non esistono prima del decadimento, ma sono “create” all’istante del decadimento

La teoria di Fermi predice i valori dei tempi di decadimento (“vite medie”) e le distribuzioni d’energia degli elettroni in funzione di un parametro: la “costante di Fermi” G_F (misurata dagli esperimenti)

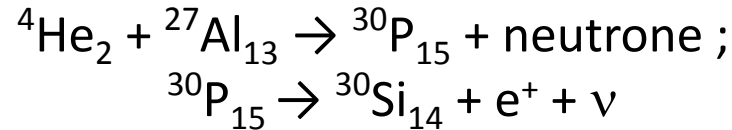
Dipendenza dello spettro di energia degli elettroni dalla massa del neutrino μ

(Figura estratta dall’articolo originale di Fermi, pubblicato in tedesco nel 1933 sulla rivista Zeitschrift für Physik, in seguito al rigetto dell’articolo dalla prestigiosa rivista britannica Nature)



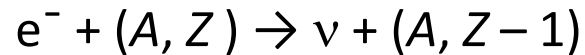
Altri tipi di reazioni previste dalla teoria di Fermi

- Nel 1934 Frédéric e Irène Joliot-Curie producono artificialmente un isotopo radioattivo che decade emettendo un positrone e^+ (antiparticella dell'elettrone):

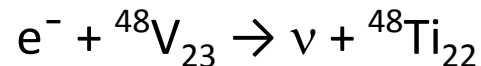


(la trasmutazione di un protone in un neutrone $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ è energeticamente proibita per protoni liberi)

- Cattura di un elettrone atomico da un protone del nucleo:



calcolata da Gian Carlo Wick (1934) e osservata per la prima volta nel 1936 da Luis Alvarez nella reazione



Questo tipo di reazione si rivela misurando il fotone (raggio X) emesso nella transizione di un elettrone atomico da un'orbita esterna all'orbita non più occupata dall'elettrone catturato dal nucleo.

Nel 1934 Bethe e Peierls utilizzano la teoria di Fermi per calcolare la “sezione d’urto” di reazioni nelle quali un neutrino colpisce un nucleo atomico e un elettrone o un positrone viene creato nella collisione, con scomparsa del neutrino incidente e modifica della carica elettrica del nucleo di ± 1 .

Il risultato del calcolo, $\sigma \approx 10^{-44} \text{ cm}^2$, corrisponde ad un percorso libero medio di 10^{16} km nella materia condensata. Gli autori concludono:

“L’osservazione sperimentale di reazioni di questo tipo è perciò totalmente impossibile con neutrini prodotti in trasmutazioni nucleari. Aumentando l’energia dei neutrini, la sezione d’urto cresce rapidamente, ma sembra molto improbabile che, anche alle energie dei raggi cosmici, la sezione d’urto sia sufficientemente grande da permettere l’osservazione di queste reazioni. Si può concludere che non esiste in pratica alcun metodo per osservare direttamente il neutrino.”

Probabilità d’interazione di una particella in uno spessore T di materia:

$$P = 1 - \exp(-T / \lambda)$$

Percorso libero medio in cm $\lambda = \frac{A}{N_A \rho \sigma}$

A : massa molare (g)

N_A : numero di Avogadro

ρ : densità (g / cm^3)

σ : sezione d’urto (cm^2)

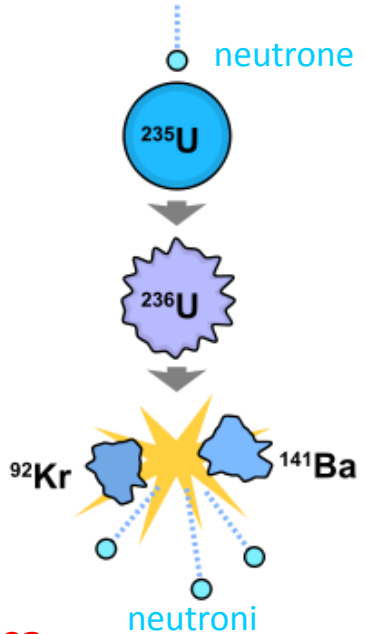
1938 : Scoperta della fissione dell'Uranio

(L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, O.R. Frisch)

Reazione esotermica (energia media emessa ~ 200 MeV / fissione)

1942 – 1946: Applicazioni (principalmente militari) della fissione

I neutroni emessi permettono lo sviluppo di una reazione a catena:
Reazione divergente (in massa critica di $^{235}\text{U}_{92}$ puro a > 95%) → **Bomba atomica**
Reazione controllata → reattori nucleari → produzione di energia



Reattori nucleari: sorgenti intense, isotrope di neutrini da decadimento β dei frammenti di fissione (più ricchi in neutroni degli elementi stabili)

In media, 6 decadimenti β → 6 neutroni emessi / fissione

Spettro di energia dei neutrini: $E \leq 10 \text{ MeV}$, $\langle E \rangle \approx 3 \text{ MeV}$

Frequenza di produzione (isotropa) dei neutrini = $1.9 \times 10^{20} P_{th} / \text{secondo}$

$\left(P_{th}: \text{potenza termica del reattore in GW} \right)$

Bruno Pontecorvo

Marina di Pisa, 22.08.1913 - Dubna, Russia, 24.09.1993



Бруно Понтекорво

- Nasce da una famiglia benestante di fede ebraica, non praticante (il 4° di 8 figli). Il padre, Massimo, è proprietario di una fiorente industria tessile (espropriata nel 1938 dalle leggi razziali fasciste).
- All'età di 18 anni è ammesso al 3° anno di fisica presso l'Università di Roma, e lavora con Fermi agli esperimenti sulla radioattività indotta dai neutroni lenti.
- Nel 1936 si trasferisce a Parigi nel laboratorio dei coniugi Joliot-Curie. Simpatizza con l'ideologia comunista. Conosce una studentessa svedese, Marianne Nordblom, dalla quale avrà tre figli.
- Nel 1940, in seguito all'invasione della Francia da parte delle truppe tedesche, fugge negli Stati Uniti attraverso la Spagna. Impiegato da una compagnia petrolifera in Oklahoma, brevetta un metodo di introspezione di pozzi petroliferi basato sull'uso di neutroni lenti.
- Nel 1943 si trasferisce al Laboratorio di Chalk River (Canada), dove lavora allo sviluppo di reattori nucleari, ed anche allo studio dei raggi cosmici e dei neutrini.
- 1948: riceve la cittadinanza britannica e viene chiamato al Centro di Ricerche Nucleari di Harwell (Gran Bretagna).
- 1950: viene nominato Professore all'Università di Liverpool. Tuttavia, prima di cominciare il primo anno accademico (1950 – 51), durante una vacanza in Italia scompare con la famiglia senza lasciar traccia.
- 1955: riappare ufficialmente in pubblico nel centro di ricerche JINR di Dubna (URSS) (l'equivalente del CERN per i paesi del blocco comunista).

1946: Pontecorvo propone di rivelare i neutrini prodotti dai reattori nucleari osservando la reazione



(Il rapporto interno del Laboratorio di Chalk River PD – 205 che descrive la proposta viene dichiarato “documento segreto” dalla Commissione per l’Energia Atomica degli U.S.A. perchè si teme che possa servire a potenze straniere ostili per misurare la potenza dei reattori nucleari in funzionamento negli Stati Uniti)

Metodo proposto:

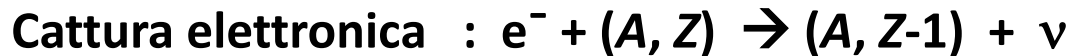
- Installazione di un recipiente di grande volume (qualche m³) riempito di C₂Cl₄ (un liquido generalmente usato come smacchiatore) presso un reattore nucleare;
- Ogni 3 – 4 settimane, far bollire il liquido, raccogliere il vapore (che dovrebbe contenere atomi di ³⁷Ar₁₈) in contatori proporzionali;
- Misurare la cattura elettronica $e^{-} + {}^{37}\text{Ar}_{18} \rightarrow {}^{37}\text{Cl}_{17} + \text{neutrino}$ (vita media 49 giorni) mediante la rivelazione dei raggi X / elettroni emessi dall’atomo eccitato di ³⁷Cl₁₇ nel ritornare allo stato fondamentale.

1954: Il fisico americano Raymond Davis installa un recipiente contenente 3 800 litri di C_2Cl_4 a prossimità di uno dei reattori del Centro Nucleare di Savannah River, ma non rivela alcun segnale della presenza di atomi di $^{37}A_{18}$ dopo un'esposizione di qualche settimana.

1958: Risultato negativo confermato da un secondo esperimento con 11 400 litri di C_2Cl_4 .

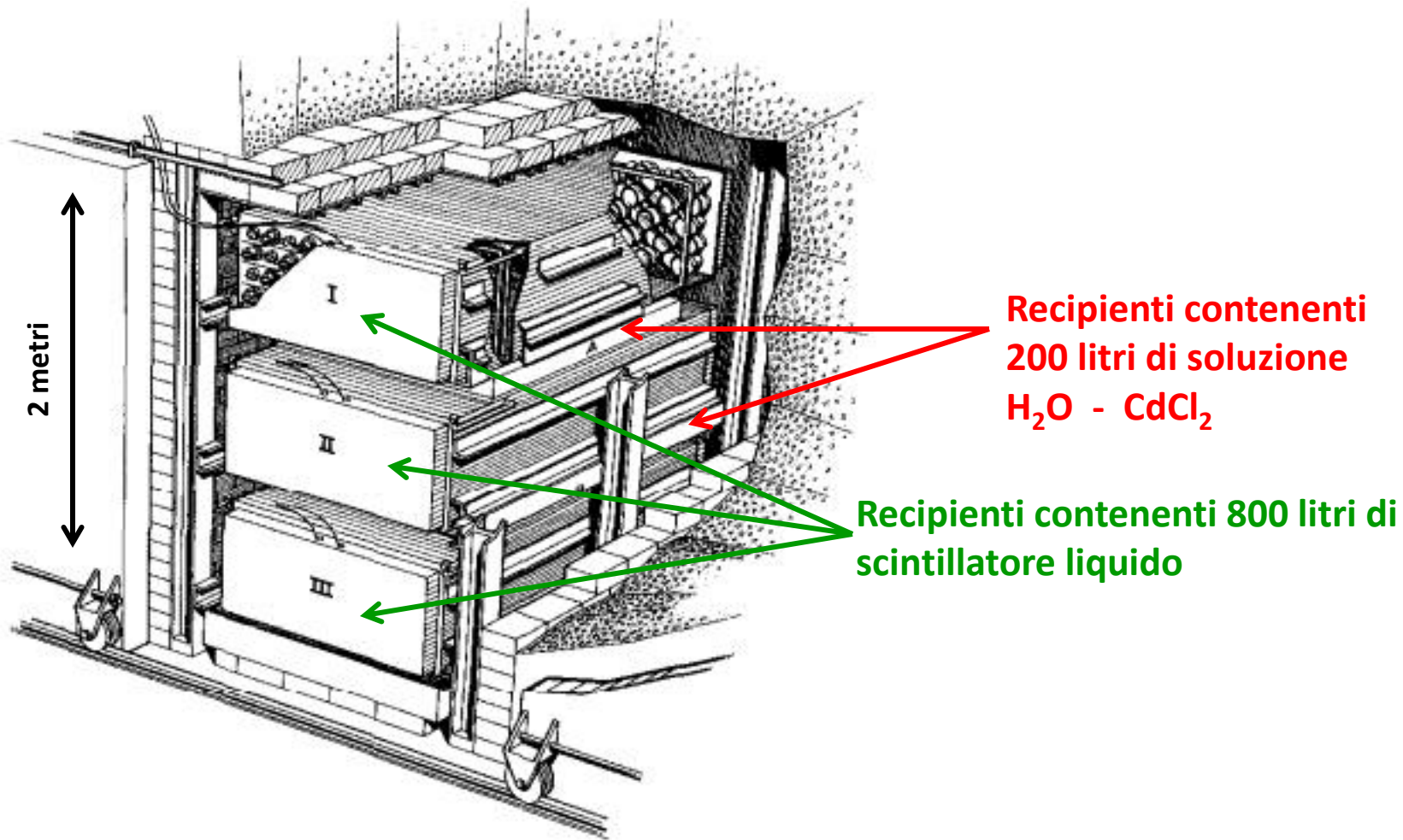
Questo risultato negativo suggerisce che i neutrini prodotti dai reattori (da decadimenti β^- dei prodotti di fissione) non producono elettroni nelle collisioni con i nuclei di $^{37}Cl_{17}$.

L'interpretazione più plausibile: i reattori non producono neutrini, ma antineutrini (particelle distinte dai neutrini)



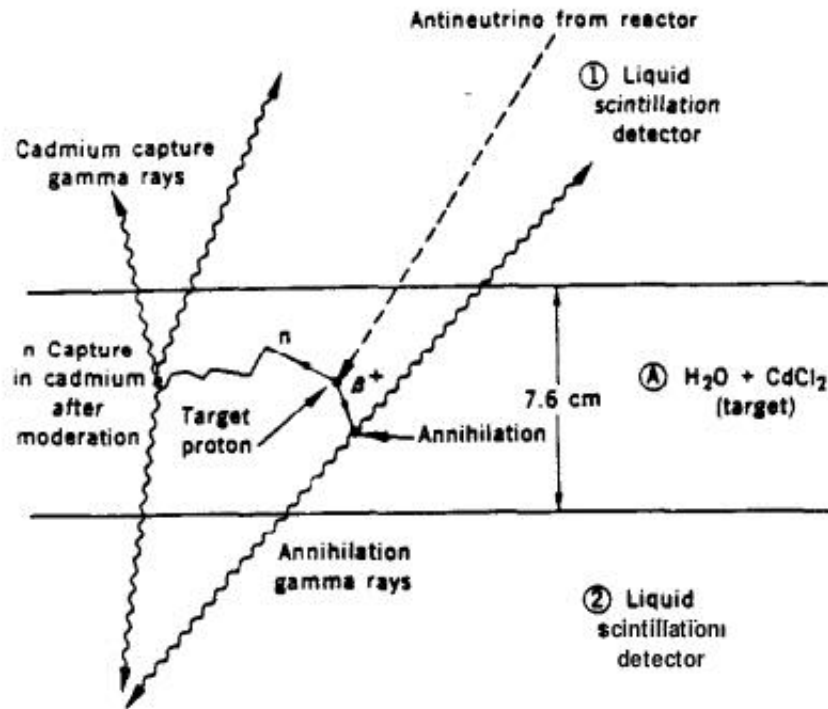
IL RIVELATORE DI ANTINEUTRINI AL REATTORE DEL CENTRO NUCLEARE DI SAVANNAH RIVER

progettato e costruito da Frederic Reines e Clyde Cowan nel 1955



METODO PER RIVELARE ANTINEUTRINI

$\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ sui protoni liberi dell'acqua



- Rivelazione dei due raggi γ prodotti dall'annichilazione dei positroni: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
- Rivelazione dei raggi γ ritardati ($\sim 10 \mu\text{s}$) prodotti dalla cattura del neutrone nel Cadmio

Primi risultati pubblicati nel luglio 1956; risultati finali nel 1960

Frequenza eventi con reattore in funzionamento : 2.9 ± 0.2 / ora

1937 - Formulazione di una teoria delle forze nucleari responsabili della coesione dei nuclei (H. Yukawa)



Hideki Yukawa

Le forze fra i nucleoni nel nucleo atomico sono trasmesse da particelle leggere di spin intero (“mesoni”)

Il raggio d’interazione delle forze nucleari è molto corto (dell’ordine del raggio del nucleo, $\sim 10^{-13}$ cm)

$$R_{\text{int}} = \frac{\hbar}{mc} \longrightarrow \text{Massa del mesone: } mc^2 \approx 200 \text{ MeV} \approx 400 m_e c^2$$

↑
Massa dell’elettrone

Il mesone di Yukawa è inizialmente identificato con la particella di carica elettrica ± 1 e una massa di circa $200m_e$ scoperta nel 1936 da Anderson e Neddermeyer nello studio di tracce di raggi cosmici in campo magnetico al livello del mare.

Esperimenti successivi dimostrano che questo “mesone” decade in un elettrone + particelle invisibili, con una vita media di circa 2×10^{-6} s.

Alcuni di questi esperimenti sono stati eseguiti da Hincks e Pontecorvo presso il Laboratorio di Chalk River.

1940: Predizioni teoriche del comportamento dei mesoni di Yukawa a riposo:

- **I mesoni con carica elettrica positiva vengono respinti dalla carica positiva dei nuclei e decadono;**
- **I mesoni con carica elettrica negativa, attirati dal nucleo, sostituiscono un elettrone atomico formando “atomi mesici” , e scompaiono rapidamente per cattura nucleare. L’energia associata con la massa di riposo (mc^2) ceduta al nucleo si trasforma in energia cinetica di frammenti del nucleo.**

1946: Un esperimento eseguito a Roma negli anni 1943 – 46 da Conversi, Pancini e Piccioni con selezione magnetica del segno della carica elettrica dei raggi cosmici trova che la maggior parte dei mesoni negativi, fermati in uno spessore di Carbonio, decadono invece di essere catturati

➔ I MESONI DEI RAGGI COSMICI NON SONO I MESONI DI YUKAWA

“As a personal opinion, I would suggest that modern particle physics started in the last days of World War II, when a group of young Italians, Conversi, Pancini, and Piccioni, who were hiding from the German occupying forces, initiated a remarkable experiment.”

Luis Alvarez, Nobel lecture, 1968

Articolo di Bruno Pontecorvo che discute le conseguenze fisiche dell'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni.

Nuclear Capture of Mesons and the Meson Decay

Phys. Rev 72 (1947) 246

B. PONTECORVO

*National Research Council, Chalk River Laboratory, Chalk River,
Ontario, Canada*

June 21, 1947

THE experiment of Conversi, Pancini, and Piccioni¹ indicates that the probability of capture of a meson by nuclei is much smaller than would be expected on the basis of the Yukawa theory.^{2,3} Gamow⁴ has suggested that the nuclear forces are due exclusively to the exchange of neutral mesons, the processes involving charged mesons and the β -processes having probabilities which are smaller by a factor of about 10^{12} .

We notice that the probability ($\sim 10^6 \text{ sec.}^{-1}$) of capture of a bound negative meson is of the order of the probability of ordinary K -capture processes, when allowance is made for the difference in the disintegration energy and the difference in the volumes of the K -shell and of the meson orbit. We assume that this is significant and wish to discuss the possibility of a fundamental analogy between β -processes and processes of emission or absorption of charged mesons.

Pontecorvo intuisce che la cattura nucleare del mesone e la cattura di un elettrone atomico da un nucleo sono dovute alla stessa interazione nonostante l'enorme differenza tra le probabilità delle due reazioni

**Confronto delle frequenze di cattura in nuclei leggeri
assumendo che le due reazioni sono dovute alla stessa interazione**



Nel caso di nuclei leggeri (e.g., Carbonio)

$$\frac{\text{Frequenza di cattura del "mesone"}}{\text{Frequenza di cattura dell'elettrone}} = \left(\frac{R_e}{R_\mu}\right)^3 \times \left(\frac{p_\nu^\mu}{p_\nu^e}\right)^2 = \left(\frac{m_\mu}{m_e}\right)^3 \times \left(\frac{p_\nu^\mu}{p_\nu^e}\right)^2 \approx 208^3 \times 100^2 \approx 10^{11}$$

R_e (R_μ) : raggio dell'atomo (raggio dell'atomo mesico)

m_e (m_μ): massa dell'elettrone (massa del "mesone")

p_ν : quantità di moto del neutrino emesso nella cattura

Nel 1948 la teoria del decadimento β di Fermi cambia nome e diventa la teoria delle interazioni deboli

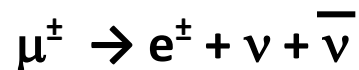
Nello stesso articolo si legge:

.... We shall consider then the hypothesis that the meson has spin $\frac{1}{2}\hbar$ and that its instability is not a β -process, in the sense that it does not involve the emission of one neutrino. The meson decay must then be described in a different way: it might consist of the emission of an electron and a photon or of an electron and 2 neutrinos⁵ or some other process.

Yukawa aveva suggerito che il mesone ha spin intero e decade in un elettrone + un neutrino

L'articolo di Pontecorvo suggerisce che il "mesone" dei raggi cosmici si comporta come un elettrone 208 volte più pesante che interagisce con i nucleoni come descritto dalla Teoria di Fermi

Esperimenti eseguiti negli anni 1950 dimostrano che questa particella, oggi denominata "muone" (μ), decade in tre particelle: un elettrone e due neutrini, secondo lo schema:



L'elettrone emesso ha una distribuzione continua di energie fino a $E_{\max} = 0.5m_{\mu}c^2$;
L'andamento della distribuzione di energia per $E \rightarrow E_{\max}$ dimostra che i due neutrini non sono particelle identiche.

1948: Scoperta del mesone π (“pione”) – il vero mesone di Yukawa

Osservazione dei decadimenti $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ in “emulsione nucleare”
esposta a raggi cosmici a quote elevate

Emulsione nucleare: rivelatore sensibile alla ionizzazione con risoluzione spaziale $\sim 1 \mu\text{m}$ (microcristalli di AgBr in gelatina)

In tutti gli eventi il muone ha un'energia cinetica di 4.1 MeV, che corrisponde a un percorso di $\sim 600 \mu\text{m}$ nell'emulsione \Rightarrow decadimento a due corpi

$m_\pi c^2 = 139.57 \text{ MeV}$; spin = 0

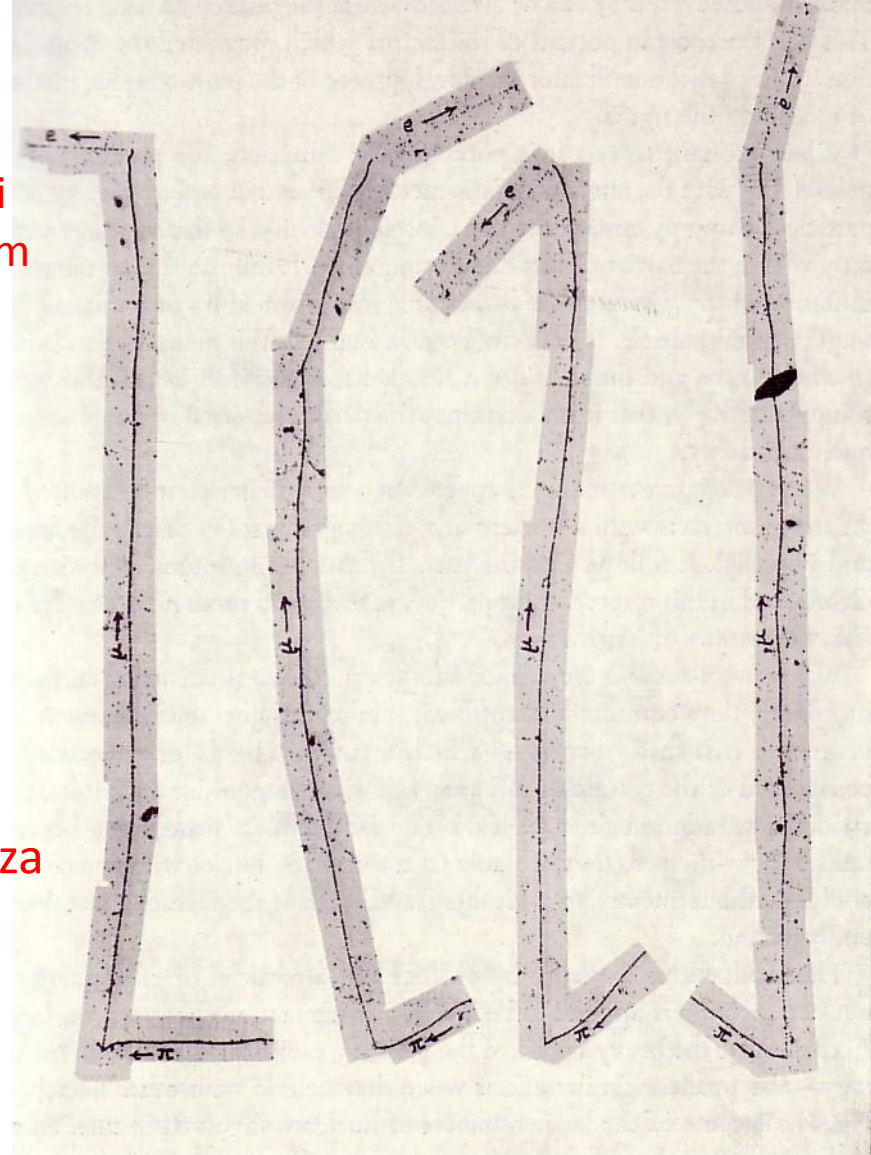
Decadimento principale: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
(e $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$)

Vita media a riposo : $\tau_\pi = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s} = 26 \text{ ns}$

I π^- a riposo sono catturati dai nuclei,
come predetto per i mesoni di Yukawa

I mesoni π^\pm sono prodotti in grande abbondanza nelle collisioni protone – protone e protone – nucleo presso gli acceleratori di alta energia

Quattro eventi che mostrano il decadimento di un mesone π^+ che si arresta nell'emulsione



Il secondo neutrino

Decadimenti del muone

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

Cattura nucleare del μ^-

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu + (A, Z-1)$$

processi osservati

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-$$

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)$$

processi “proibiti” (mai osservati)

Limiti sperimentali fine anni 1950

< 1 evento / 10^6 muoni misurati

Ipotesi per spiegare l'assenza dei processi “proibiti”:

- L'elettrone e il muone si distinguono per un nuovo “numero quantico” (oggi denominato “flavor”) che si conserva nei processi di decadimento e cattura;
- Esistono due tipi di neutrino: ν_e con lo stesso “flavor” dell'elettrone;
 ν_μ con lo stesso “flavor” del muone.

Con questa ipotesi, i processi di decadimento e cattura nucleare si scrivono:

$$\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$$

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z-1)$$

I “processi proibiti” sono ancora oggi oggetto di ricerche sperimentali con sensibilità molto superiori alla sensibilità degli esperimenti degli anni 1950, allo scopo di verificare la possibile esistenza di fenomeni non inclusi nel Modello Standard.

Recentemente l'esperimento MEG presso il ciclotrone a protoni di altissima intensita' del laboratorio SIN in Svizzera, al quale partecipa un gruppo del Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa, ha riportato il limite

$$R_{e\gamma} \equiv \frac{N(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma)}{N(\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu e^+ \nu_e)} < 5.7 \times 10^{-13}$$

La prima proposta sperimentale per verificare se esistono due tipi distinti di neutrini (ν_e , ν_μ)

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 37 (10), NUMBER 6

JUNE, 1960

ELECTRON AND MUON NEUTRINOS

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor July 9, 1959



J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **37**, 1751-1757 (December, 1959)

Some processes due to free neutrinos, not heretofore considered, are discussed. Particular attention is paid to those processes which, in principle, could help decide whether two neutral lepton pairs [electron pair (ν_e and $\bar{\nu}_e$) and muon pair (ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$)] exist.

To answer the fundamental question about the identity of ν_μ and ν_e a method is proposed which in essence is analogous to the method used to distinguish neutrinos from antineutrinos or K^0 mesons from \bar{K}^0 mesons. In principle the problem is solved when an experiment is carried out showing whether a beam of $\bar{\nu}_\mu$ is capable of initiating transitions which can without any doubt be initiated by $\bar{\nu}_e$ (for example the reaction $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow e^+ + n$).

Il metodo proposto da Pontecorvo

- Si bombarda un blocco di materiale pesante e di grandi dimensioni con un fascio di protoni di intensità elevata e energia cinetica intorno a 700 MeV;
- Le collisioni protone – nucleo producono mesoni π^{\pm} che perdono energia per ionizzazione e si fermano nel blocco stesso;
- I mesoni π^{-} vengono catturati dai nuclei prima di decadere;
- I mesoni π^{+} (respinti dalla carica elettrica positiva dei nuclei) decadono: $\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$. I ν_{μ} hanno un'energia di 30 MeV.
- A loro volta, i μ^{+} decadono a riposo: $\mu^{+} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} + e^{+} + \nu_e$. I due neutrini ($\bar{\nu}_{\mu}$, ν_e) sono emessi con uno spettro continuo di energie $E \leq E_{\max} = 0.5 m_{\mu} c^2 \approx 53$ MeV.
- Il blocco di materiale pesante è quindi una sorgente isotropa di $\bar{\nu}_{\mu}$ con energia sotto soglia per produzione di μ^{+} (Energia di soglia ≈ 113 MeV).
- Se $\bar{\nu}_{\mu} = \bar{\nu}_e$, è possibile rivelare i $\bar{\nu}_e$ attraverso la reazione $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^{+} + n$ con il metodo di Reines e Cowan per rivelare gli anti-neutrini prodotti dai reattori nucleari.
- Se $\bar{\nu}_{\mu} \neq \bar{\nu}_e$, la reazione $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^{+} + n$ non è possibile.

Conclusione dell'articolo di Pontecorvo: gli acceleratori di protoni in funzionamento nel 1959 non hanno intensità sufficiente a permettere l'esperimento:

To sum up one could say that an experiment to establish the identity of ν_e and ν_μ , although very difficult, should be seriously considered in the planning of new accelerators. In particular the problem of shielding of the $\bar{\nu}_\mu$ detector from radiation should be looked to in the very first stages of design.

Nella rassegna storica “The infancy and youth of Neutrino Physics: Some Recollections”, presentata al Colloquio Internazionale sulla Fisica delle Particelle (Parigi, Luglio 1982), Pontecorvo scrive:

At the Laboratory of Nuclear Problems of the JINR in 1958 a proton relativistic cyclotron was being designed with a beam energy 800 MeV and a beam current $\sim 500 \mu A$. By the way, this accelerator eventually was not built. Anyway at the beginning of 1959 I started to think about the experimental research program for such an accelerator.

Esperimenti concettualmente molto simili all'esperimento proposto da Pontecorvo nel 1959 sono stati eseguiti negli anni 1990 presso il Laboratorio Nazionale di Los Alamos (New Mexico, U.S.A.) e presso il Laboratorio Rutherford – Appleton in Gran Bretagna, utilizzando nuovi acceleratori di protoni di altissima intensità, con motivazioni fisiche diverse, più di 30 anni dopo la scoperta del secondo neutrino.

Pochi mesi dopo la pubblicazione (in Russo) dell'articolo di Pontecorvo, la rivista "The Physical Review Letters" pubblica un articolo del fisico Americano Mel Schwartz :

FEASIBILITY OF USING HIGH-ENERGY NEUTRINOS TO STUDY THE WEAK INTERACTIONS

M. Schwartz*

Columbia University, New York, New York

(Received February 23, 1960)

For many years, the question to how to investigate the behavior of the weak interactions at high energies has been one of considerable interest. It is the purpose of this note to show that experiments pointed in this direction, though not quite feasible with presently existing equipment, are within the capabilities of present technology and should be possible within the next decade.

We propose the use of high-energy neutrinos as a probe to investigate the weak interactions.

A natural source of high-energy neutrinos are high-energy pions.

La motivazione fisica principale di questa proposta è lo studio delle interazioni di neutrini di alta energia con la materia, allo scopo di elucidare il comportamento delle interazioni deboli ad alta energia.

Il problema dei due neutrini ($\nu_\mu \neq \nu_e$?) non è mai menzionato nell'articolo.

Alla fine dell'articolo di Mel Schwartz si legge:

Note added in proof. The author's attention has been called to a somewhat related paper which has just appeared: B. Pontecorvo, J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 37, 1751 (1959).

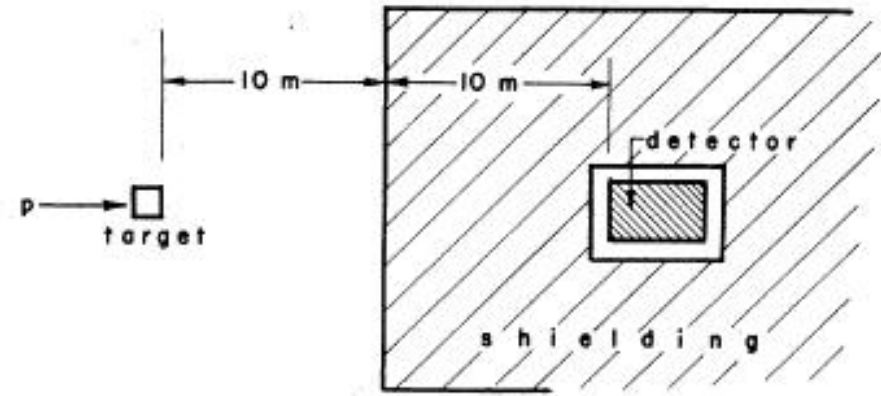


FIG. 1. Proposed experimental arrangement.

1962: Scoperta del secondo neutrino ($\nu_\mu \neq \nu_e$) mediante l'uso di un fascio di neutrini di alta energia (principalmente ν_μ) costruito secondo la proposta di Mel Schwartz

OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS*

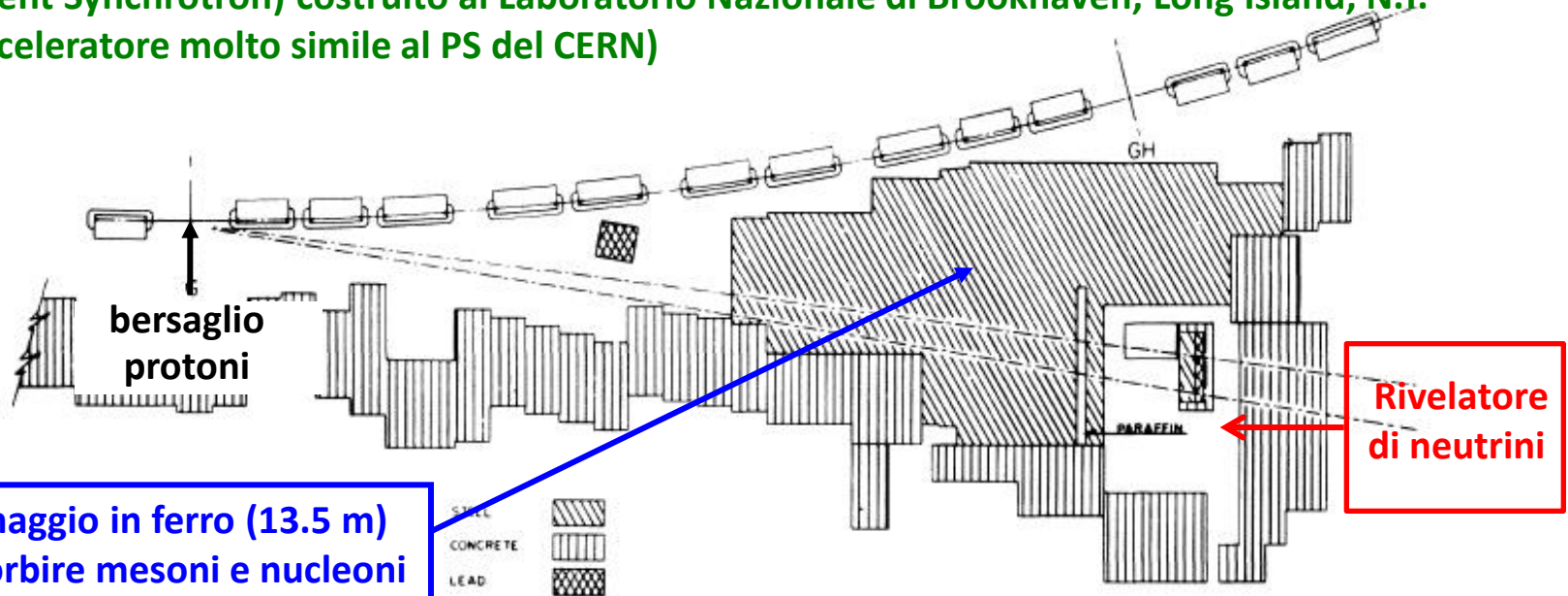
G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz,† and J. Steinberger†

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

(Received June 15, 1962)

Phys. Rev. Letters 9 (1962) 36

Esperimento eseguito presso il nuovo acceleratore di protoni da 30 GeV (AGS, Alternating (Gradient Synchrotron) costruito al Laboratorio Nazionale di Brookhaven, Long Island, N.Y. (un acceleratore molto simile al PS del CERN)



Schermaggio in ferro (13.5 m) per assorbire mesoni e nucleoni e arrestare i muoni fino ad energie di 17 GeV

In questo esperimento l'energia dei protoni circolanti è limitata a 15 GeV

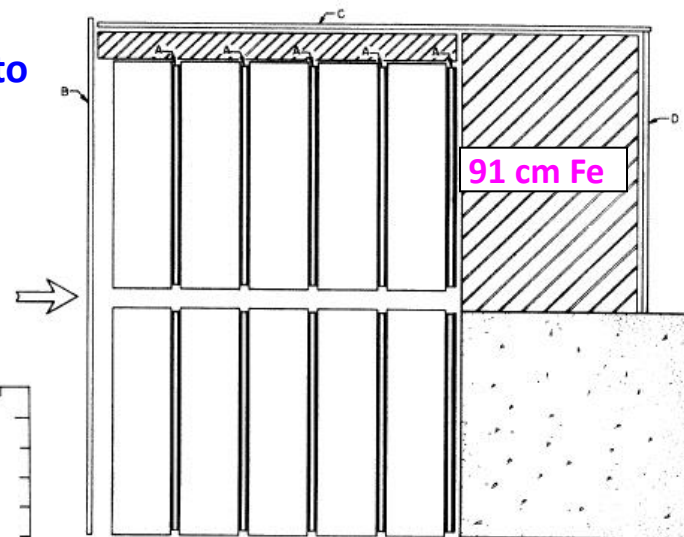
La scoperta del 2° neutrino (ν_μ) nel 1962 è resa possibile dall'uso di "camere a scintilla", un nuovo tipo di rivelatore inventato nel 1959 da Fukui e Miyamoto, che permette la visualizzazione fotografica di tracce di particelle cariche in rivelatori di grande massa, con buona identificazione del tipo di particelle:

- **muoni:** tracce penetranti lunghe, senza interazioni visibili;
- **elettroni:** sciame elettromagnetici, molte tracce corte, lunghezza totale dello sciame in Alluminio < 1 metro.
- **mesoni π :** interagiscono con i nuclei, percorso libero medio ~ 1 metro

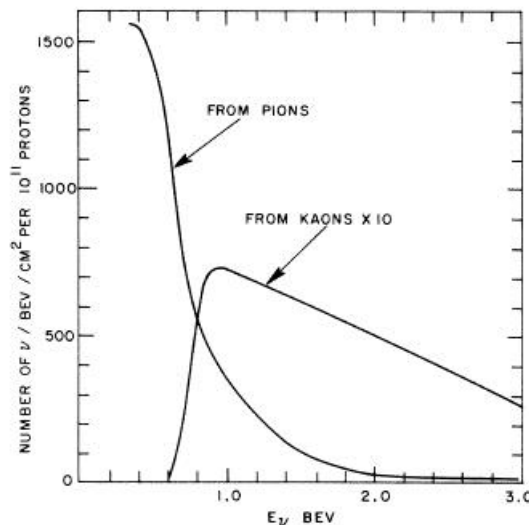
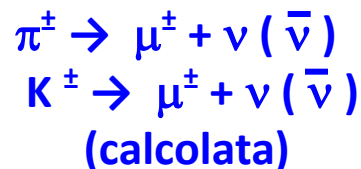
Rivelatore di neutrini nell'esperimento presso l'acceleratore AGS

10 tonnellate di Alluminio:

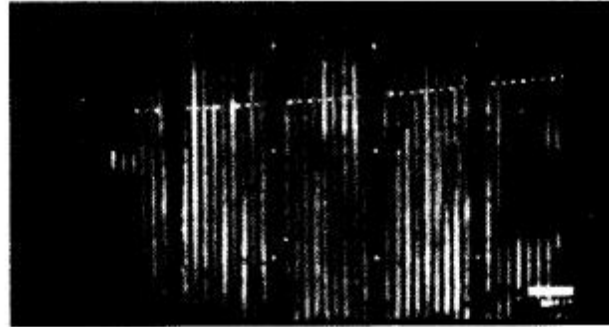
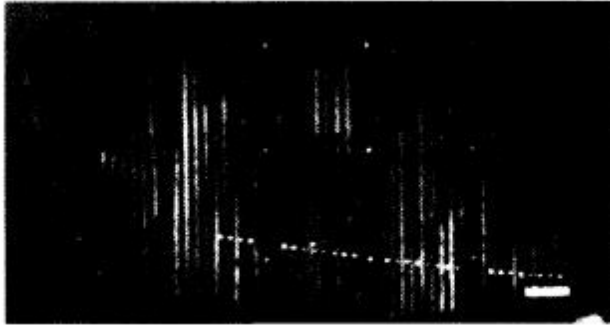
- 10 camere a scintilla
- 1 camera: 9 piastre di Alluminio, ciascuna 112 x 112 x 2.5 cm



Distribuzione di energia dei neutrini da decadimenti



Tre esempi di tracce tipiche di muoni



Risultati dell'esperimento (3.5×10^{17} protoni su bersaglio in circa 400 ore di misura):

- 34 eventi con traccia singola compatibile con un muone ;
- Nessun evento compatibile con uno sciame elettromagnetico da elettrone.

Conclusione: le collisioni di neutrini prodotti nei decadimenti dei mesoni π^\pm , K^\pm producono principalmente muoni $\rightarrow \nu_\mu \neq \nu_e$

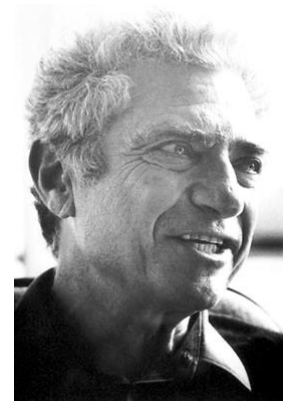
Premio Nobel 1988:



Leon M. Lederman



Mel Schwartz



Jack Steinberger

Oscillazioni di neutrini

Richiami di meccanica quantistica

▪ Dualismo onda – corpuscolo

Una particella con quantità di moto definita (\vec{p}) è descritta da un'onda piana di ampiezza complessa

$$\psi(\vec{r}, t) = e^{2\pi i(\vec{p}\cdot\vec{r} - Et)/h}$$

dove $\vec{r} \equiv (x, y, z)$, $E \equiv$ energia della particella, $t \equiv$ tempo, $h \equiv$ costante di Planck. $|\psi|^2$ rappresenta la densità di probabilità che la particella sia in \vec{r} al tempo t .

▪ Sovrapposizione di stati

Ipotesi : i due neutrini (ν_e, ν_μ) non hanno una massa definita ma sono descritti da combinazioni lineari, ortogonali di due stati di neutrino (ν_1, ν_2) con masse definite (m_1, m_2) (“autostati di massa”):

$$\nu_e = \cos(\theta)\nu_1 + \sin(\theta)\nu_2$$

$$\nu_\mu = -\sin(\theta)\nu_1 + \cos(\theta)\nu_2$$

θ : angolo di “mixing”

Esempio: evoluzione temporale di un neutrino ν_μ prodotto con quantità di moto \vec{p} al tempo $t = 0$

$$\nu(t) = e^{2\pi i\vec{p}\cdot\vec{r}/h} \left(-\sin(\theta)\nu_1 e^{-2\pi iE_1 t/h} + \cos(\theta)\nu_2 e^{-2\pi iE_2 t/h} \right)$$

dove $E_k = \sqrt{(pc)^2 + (m_k c^2)^2}$ ($k = 1, 2$). Per $m_1 \neq m_2$, $E_1 \neq E_2 \rightarrow$ la miscela di stati ν_1, ν_2 cambia in funzione del tempo e neutrini di tipo ν_e appaiono ad istanti $t > 0$.

1957 (prima della scoperta del secondo neutrino): Pontecorvo pubblica un articolo (in Russo, versione tradotta in Inglese nel 1958), in cui suggerisce la possibile esistenza di oscillazioni neutrino – antineutrino, in analogia con le oscillazioni dei mesoni neutri $K^0 - \bar{K}^0$ proposte nel 1956 da Gell – Mann e Pais e verificate sperimentalmente con mesoni K^0 prodotti da acceleratori: un mesone K^0 prodotto nelle collisioni di un protone con un nucleo viene rivelato come \bar{K}^0 ad una certa distanza dalla sorgente.

**1957: scoperta della violazione della simmetria di “parità” nelle interazioni deboli :
i neutrini emessi nel decadimento β^+ e nel decadimento $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
hanno sempre lo spin anti-parallelo alla direzione del moto (elicità -1);
gli antineutrini emessi nel decadimento β^- e nel decadimento $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$
hanno sempre lo spin parallelo alla direzione del moto (elicità $+1$); .**

Questa scoperta richiede una revisione della teoria di Fermi: neutrini con elicità $+1$ e antineutrini con elicità -1 sono esclusi dalla teoria – se esistono, non interagiscono con la materia (neutrini “sterili”).

Le oscillazioni neutrino – antineutrino suggerite da Pontecorvo sono quindi oscillazioni tra un neutrino attivo e un neutrino sterile.

Nel 1967 (dopo la scoperta del secondo neutrino), Pontecorvo pubblica un secondo articolo, in cui suggerisce la possibile esistenza di oscillazioni $\nu_e - \nu_\mu$.

Un articolo del 1969, in collaborazione con il fisico teorico V.N. Gribov presenta in dettaglio il formalismo matematico della teoria delle oscillazioni tra due neutrini.

Probabilità di rivelare ν_e all'istante t se $\nu(0) = \nu_\mu$:

$$\mathcal{P}_{\mu e}(L) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.267 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

$L = ct$ distanza tra sorgente di neutrini e rivelatore

Unità: Δm^2 [eV²]; L [km]; E [GeV] (oppure L [m]; E [MeV])

NOTA: $\mathcal{P}_{\mu e}$ dipende da Δm^2 (non da m !).

Lunghezza d'oscillazione λ :

$$\lambda = 2.48 \frac{E}{\Delta m^2}$$

Unità: λ [km]; E [GeV]; Δm^2 [eV²]
(oppure λ [m]; E [MeV])



$$\mathcal{P}_{\mu e}(L) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\pi \frac{L}{\lambda}\right)$$

Il terzo neutrino (ν_τ)

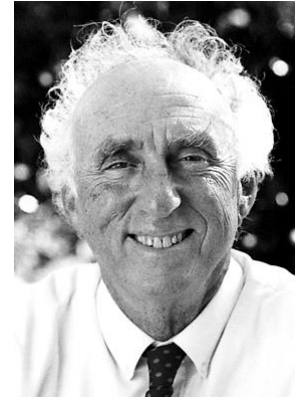
1975: Scoperta di una nuova particella pesante (τ^\pm , $m_\tau c^2 = 1777$ MeV) prodotta nelle collisioni $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ al “collider” SPEAR presso il Laboratorio SLAC (Stanford, California) (Martin Perl e collaboratori)

La nuova particella ha le proprietà di un muone pesante:

- disintegrazioni $\tau^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$, $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu + \bar{\nu}$
- assenza di disintegrazioni $\tau^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$, $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma$
- in tutti i modi di disintegrazione viene sempre emesso almeno un neutrino

Tre famiglie di “leptoni”:

particelle che hanno due interazioni: interazione debole (tutte);
interazione elettromagnetica (se dotate di carica elettrica o momento magnetico)



Martin L. Perl
Premio Nobel 1995

	1 ^a famiglia	2 ^a famiglia	3 ^a famiglia	Carica elettrica
LEPTONI Interazione debole e elettromagnetica (se carica elettrica $\neq 0$)	neutrino ν_e elettrone e^-	neutrino ν_μ muone μ^-	neutrino ν_τ tau τ^-	0 -1

+ le anti-particelle corrispondenti

“Adroni” : particelle con interazione forte (nucleoni, mesoni)

Oscillazioni tra tre neutrini descritte da una matrice 3 x 3

definita da tre angoli di mixing ($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$)

ed una fase complessa (δ) responsabile della violazione della simmetria CP
+ due valori di Δm^2

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - c_{23}s_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$c_{ik} \equiv \cos\theta_{ik};$
 $s_{ik} \equiv \sin\theta_{ik}$

Matrice PMNS (Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata)

Tre fisici teorici Giapponesi
(autori di una teoria delle
oscillazioni di neutrini nel 1962)

Condizione di unitarietà:

$$\sum_i U_{\alpha i} V_{i\beta} = \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* = \delta_{\alpha\beta}$$

matrice inversa $\mathbf{V} = \mathbf{U}^{-1}$

Rivelazione dei neutrini solari

1949: Luis Alvarez propone che il metodo suggerito da Pontecorvo per rivelare i neutrini, basato sulla rivelazione di atomi di $^{37}\text{Ar}_{18}$ in una grande quantità di liquido contenente $^{37}\text{Cl}_{17}$, venga usato per la rivelazione dei neutrini provenienti dal Sole.

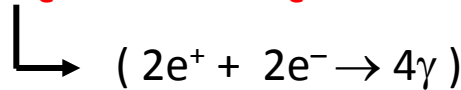
I neutrini sono prodotti nel nucleo del Sole (e di altre stelle) a causa dell'alta densità (nel Sole, $> 100 \text{ g / cm}^3$) e dell'alta temperatura (nel Sole, dell'ordine di $15 \times 10^6 \text{ K}$), condizioni che permettono la fusione nucleare dell'idrogeno.

Risultato finale di una catena di reazioni di fusione:



Energia media prodotta sotto forma di radiazione elettromagnetica:

$$Q = (4M_p - M_{\text{He}^4} + 2m_e)c^2 - \langle E(2\nu_e) \rangle \approx 26.1 \text{ MeV}$$



$$(\langle E(2\nu_e) \rangle \approx 0.59 \text{ MeV})$$

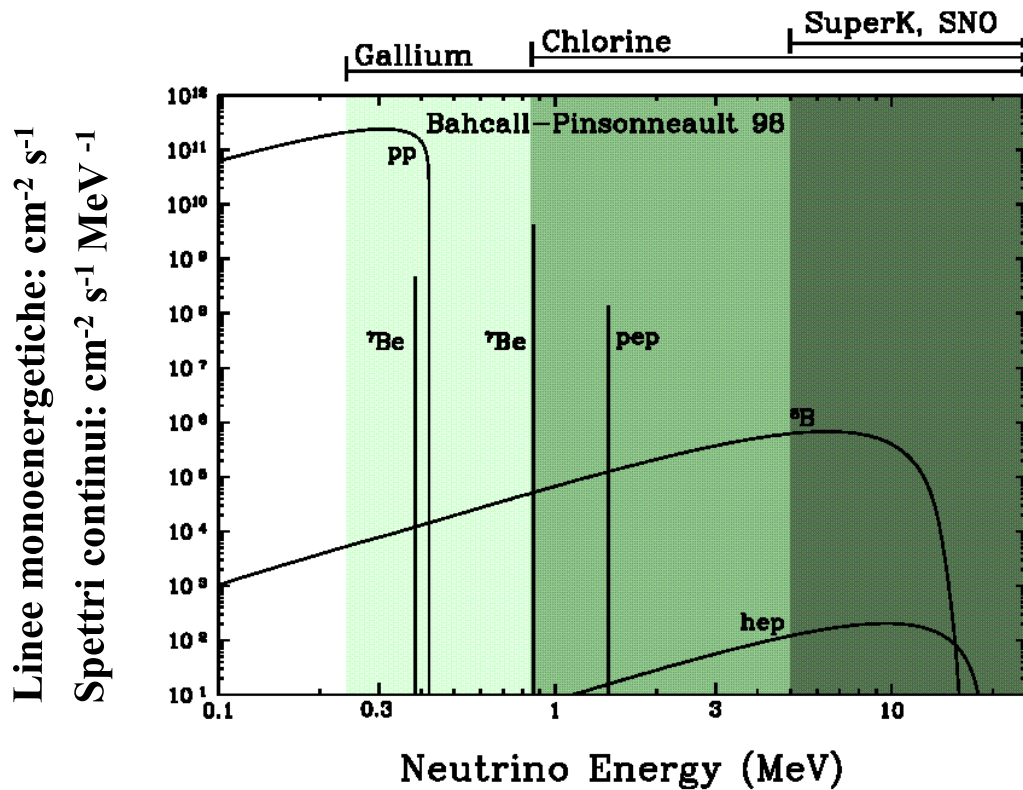
Luminosità solare: $L_{\odot} = 3.846 \times 10^{26} \text{ W} = 2.401 \times 10^{39} \text{ MeV/s}$

Frequenza di emissione di neutrini: $dN(\nu)/dt = 2 L_{\odot}/Q \approx 1.84 \times 10^{38} \text{ s}^{-1}$

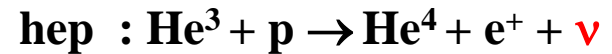
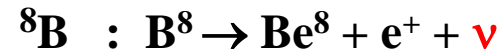
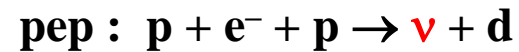
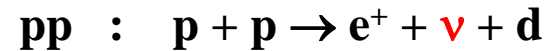
Flusso di neutrini sulla Terra: $\Phi(\nu_e) \approx 6.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

(distanza media Sole - Terra = $1.496 \times 10^8 \text{ km}$)

Flusso e distribuzione in energia dei neutrini solari sulla Terra predetti dal Modello Solare Standard (MSS) sviluppato nel 1960 e frequentemente aggiornato da J. N. Bahcall e collaboratori



Notazioni



Inizio anni 1960: il fisico Raymond Davis inizia la preparazione di un esperimento per rivelare i neutrini solari, da installare nella miniera d'oro di Homestake, South Dakota, (profondità equivalente a 4100 metri di acqua), utilizzando la reazione suggerita da Pontecorvo:



Energia alla soglia: $E(\nu_e) > 0.814 \text{ MeV}$

Rivelatore: recipiente contenente $390 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{Cl}_4$

Frequenza di produzione di atomi di ${}^{37}\text{Ar}_{18}$ prevista $\approx 1.5 / \text{giorno}$

Metodo sperimentale: ogni 2 – 3 mesi estrazione di ${}^{37}\text{Ar}$ mediante flusso di N_2 attraverso il recipiente. Purificazione, miscelazione con Argon naturale, riempimento di contatori proporzionali e rivelazione della cattura elettronica



Misura dell'efficienza mediante iniezione di quantità note di ${}^{37}\text{Ar}_{18}$ nel serbatoio.

Risultati da più di 20 anni di presa - dati

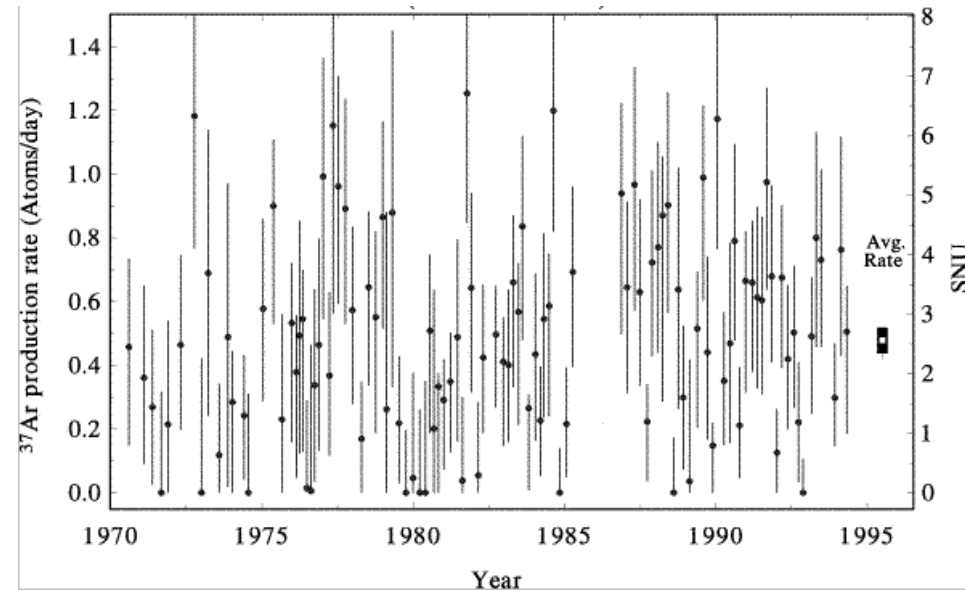
SNU (Solar Neutrino Units): unità di misura della frequenza di eventi in esperimenti radiochimici:

$1 \text{ SNU} = 1 \text{ evento s}^{-1} \text{ per } 10^{36} \text{ atomi}$

Media di tutte le misure:

$R({}^{37}\text{Cl}_{17}) = 2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$

Predizione SSM : $7.6^{+1.3}_{-1.1} \text{ SNU}$

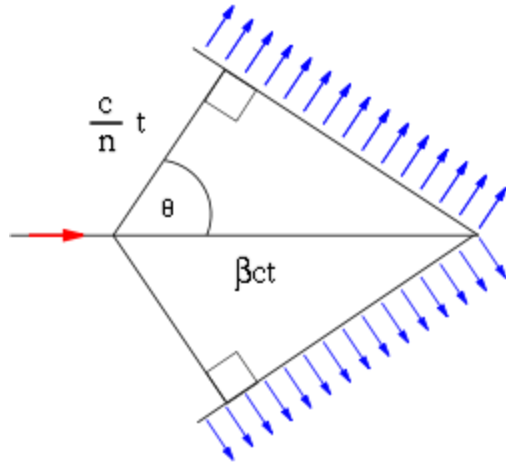


Esperimenti in “tempo reale” con contatori Čerenkov ad acqua per la rivelazione dei neutrini solari

Diffusione elastica neutrino – elettrone: $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

Rivelazione della luce Čerenkov emessa dagli elettroni in acqua

Effetto Čerenkov: luce emessa in un mezzo trasparente (indice di rifrazione n) da una particella carica dotata di velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo: $v > c/n$



Luce emessa ad un angolo θ rispetto alla direzione della particella:

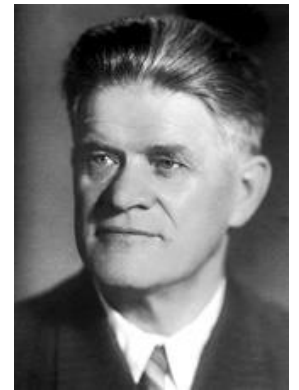
$$\cos(\theta) = \frac{c}{nv}$$

Effetto scoperto da Pavel Čerenkov nel 1934

Luce utile alla rivelazione emessa principalmente nel blu e violetto;

Numero di fotoni emessi da un elettrone ($v = c$)

≈ 170 per cm di percorso in acqua



Pavel A. Čerenkov
Premio Nobel 1958

Esperimento Super-Kamiokande (nella miniera di Kamioka, Giappone)

Profondità equivalente a 2670 m di acqua

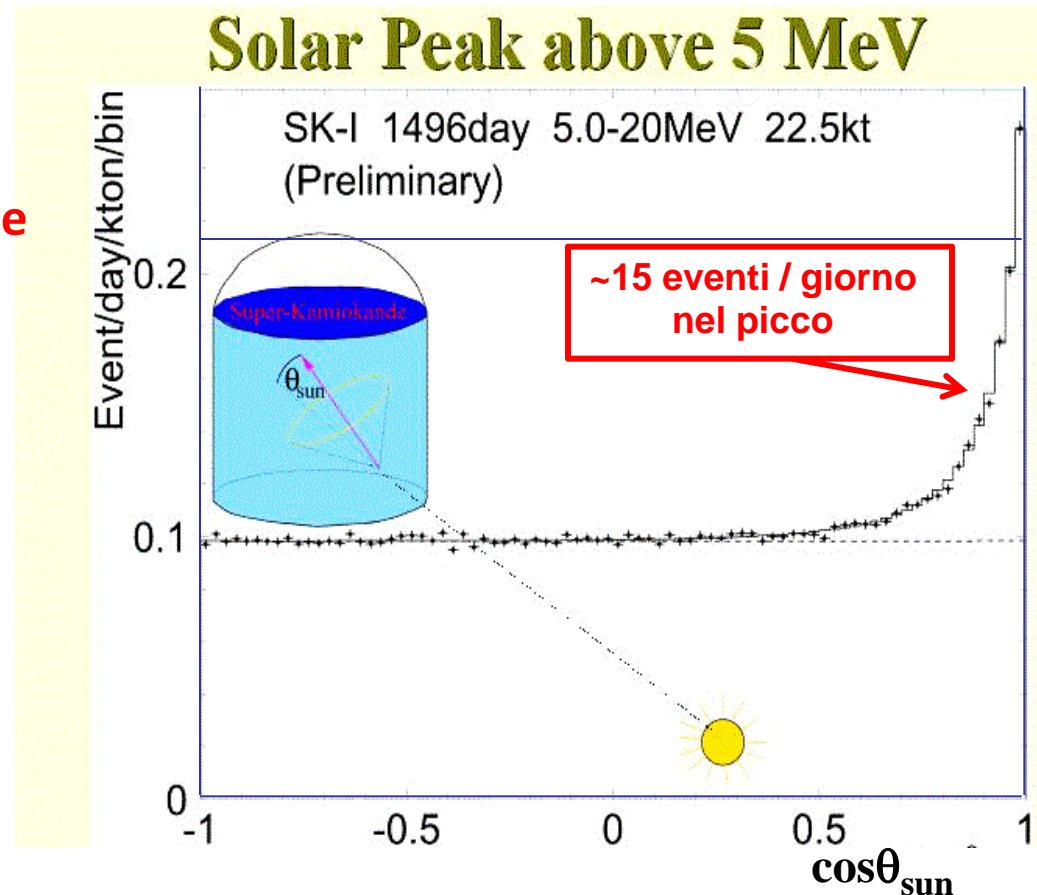
Volume utile del rivelatore: 22500 m³ H₂O

Soglia di rivelazione degli elettroni ~5 MeV

(percorso residuo di elettroni da 5 MeV in H₂O ≈ 2 cm)

Sezioni d'urto: $\sigma(\nu_e) \approx 6 \sigma(\nu_\mu) \approx 6 \sigma(\nu_\tau)$

**Verifica dell'origine solare del segnale
dalla correlazione angolare tra le
direzioni dell'elettrone rivelato
e del neutrino incidente**



Rivelatore Super-Kamiokande

50,000 ton Water Cherenkov Detector

11,200 20" PMTs

electronics hut

crane

20" PMTs

anti-layer

PMT support

concrete

rock

Serbatoio cilindrico

$h = 41.4$ m, diam. = 39.3 m

50 000 tonn. di H_2O pura

Volume esterno (anticoincidenza):

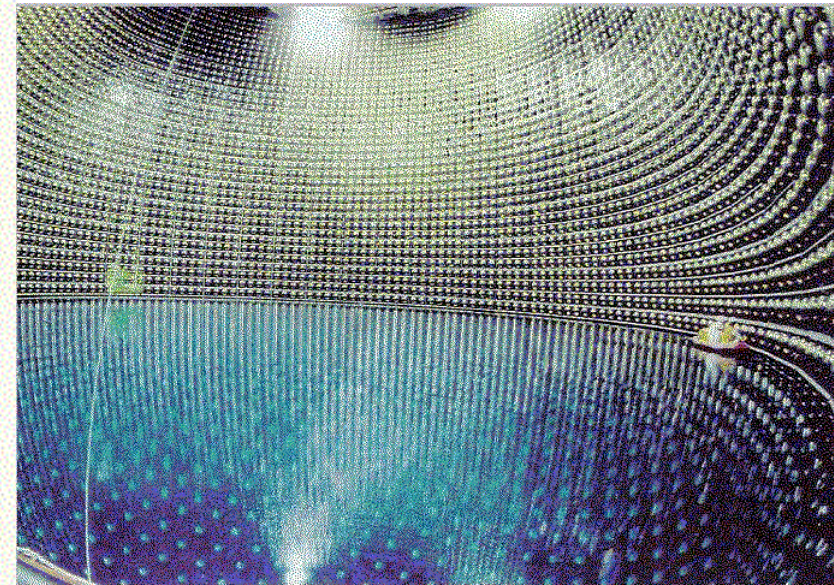
spessore ~ 2.7 m

Volume interno: ~ 32000 m³

(massa fiduciale 22500 tonn.)

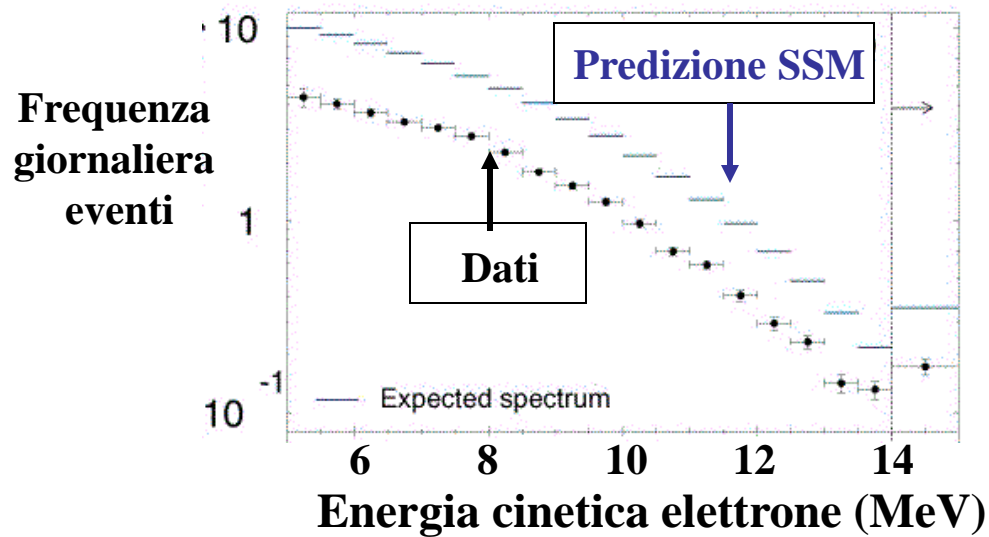
11200 fotomoltiplicatori, diam. = 50 cm

Efficienza di raccolta della luce $\sim 40\%$



Volume interno durante
il riempimento con acqua

Risultati da 1496 giorni di presa – dati (22400 eventi)



Flusso misurato (assumendo totalità di ν_e): $\Phi(\nu_e) = (2.35 \pm 0.08) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Predizione SSM : $\Phi(\nu_e) = (5.05^{+1.01}_{-0.81}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Dati/SSM = $0.465^{+0.098}_{-0.079}$



**CONFERMA DEL DEFICIT
DI NEUTRINI SOLARI**

Esperimenti con Gallio: rivelazione radio-chimica della reazione



Soglia energetica $E(\nu_e) > 0.233 \text{ MeV} \Rightarrow$ reazione sensibile ai neutrini solari da $p + p \rightarrow e^+ + \nu_e + d$ (componente dominante)

Tre esperimenti:

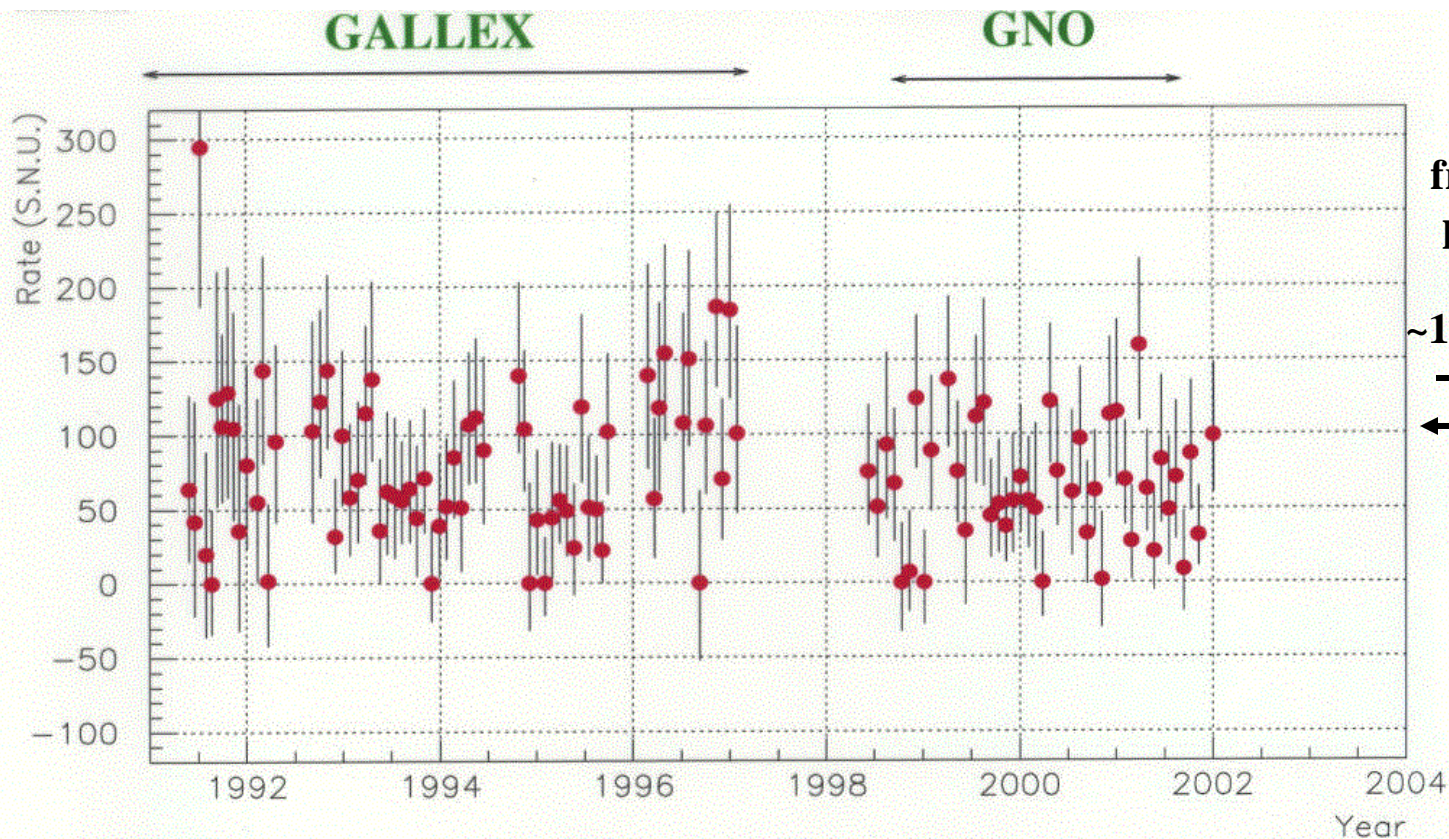
- **GALLEX (Gallium Experiment, 1991 – 1997)**
 - **GNO (Gallium Neutrino Observatory, 1998 –)**
- Nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso.
Profondità 3740 m H₂O eq.
- **SAGE (Soviet – American Gallium Experiment)**
- Nel Laboratorio Sotterraneo di Baksan (Caucaso, Russia)
Profondità 4640 m H₂O eq.

Rivelatore: 30.3 tonn. Gallio in soluzione di HCl (GALLEX, GNO)

50 tonn. Gallio metallico (liquido a 40°C) (SAGE)

Metodo sperimentale: ogni ~3 settimane estrazione di ${}^{71}\text{Ge}$ sotto forma di GeCl_4 (sostanza altamente volatile). Conversione chimica in gas GeH_4 , iniezione del gas in un contatore proporzionale \Rightarrow rivelazione della cattura elettronica $e^- + {}^{71}\text{Ge} \rightarrow \nu_e + {}^{71}\text{Ga}$ (tempo di dimezzamento $\tau_{1/2} = 11.43$ giorni)

(Rivelazione delle transizioni atomiche K, L nello stato finale eccitato dell'atomo ${}^{71}\text{Ga}$)



GALLEX

77.5 ± 6.2 (stat) ± 4.5 (sys) SNU

GNO

65.2 ± 6.4 (stat) ± 3.0 (sys) SNU

GNO+GALLEX

70.8 ± 4.5 (stat) ± 3.8 (sys) SNU

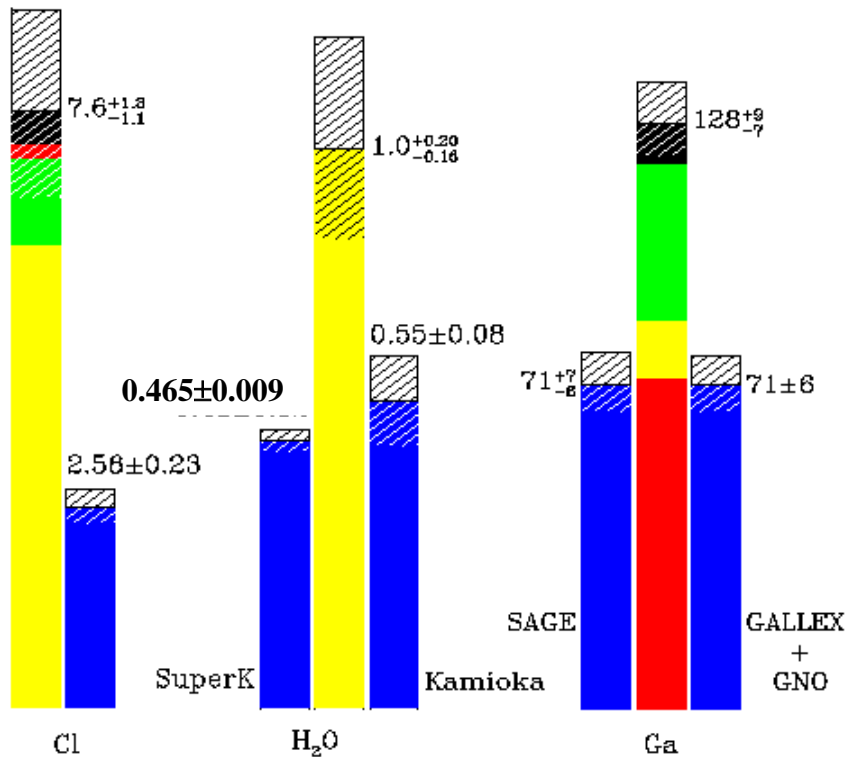
SAGE (1990 – 2001)

$70.8^{+6.5}_{-6.1}$ SNU

PREDIZIONE SSM :

128^{+9}_{-7} SNU

Dati/SSM = 0.56 ± 0.05



Theory

- ${}^7\text{Be}$
- ${}^8\text{B}$
- P-P, pep
- CNO

Experiments ■

Uncertainties

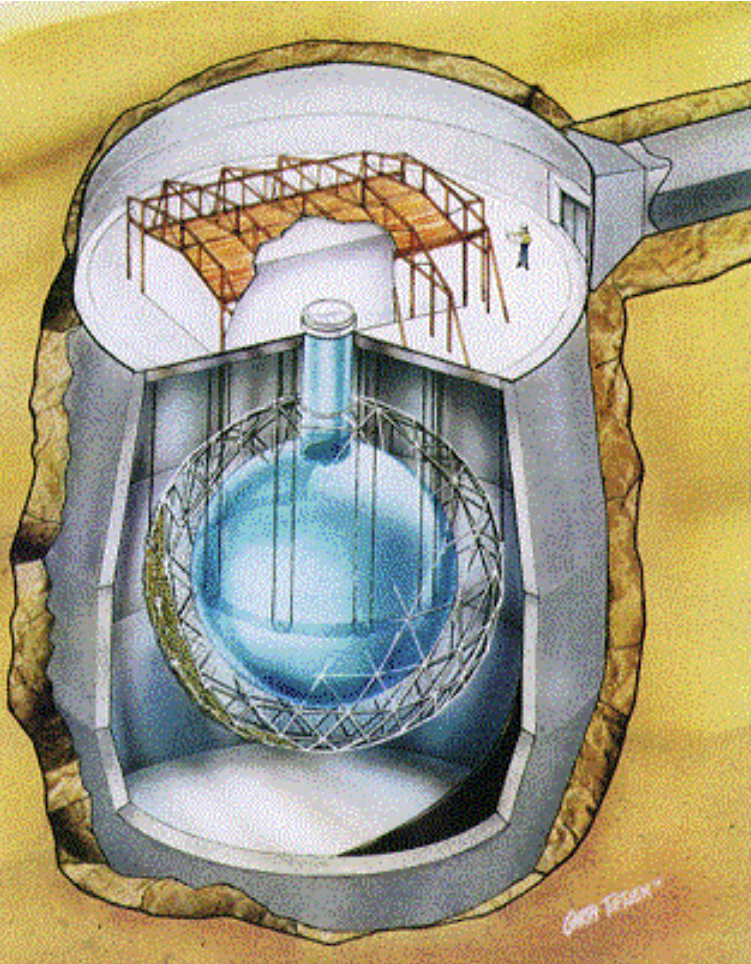
L'ENIGMA DEI NEUTRINI SOLARI

Soluzioni possibili dell'enigma:

- Il Modello Solare Standard è completamente falso
- **OSCILLAZIONI DEI $\nu_e \Rightarrow$ una parte del flusso di neutrini solari sulla Terra è costituita di ν_μ e/o ν_τ invisibili (sotto soglia per produzione di μ, τ)**

SNO

Evidenza definitiva di oscillazione dei neutrini solari (Sudbury Neutrino Observatory, Sudbury, Ontario, Canada)



SNO: rivelatore di luce Čerenkov emessa in 1000 tonn. di acqua pesante D_2O ultra-pura contenuta in una sfera acrilica (diam. 12 m), circondata da 7800 tonn. di acqua H_2O ultra-pura.

Raccolta di luce: 9456 fotomoltiplicatori, diam. 20 cm, su una superficie sferica di raggio 9.5 m

Profondità: 2070 m (6010 m H_2O eq.) in una miniera di nikel

Soglia di rivelazione energia elettroni: 5.5 MeV

Rivelazione dei neutrini solari nell'esperimento SNO:

(ES) Diffusione elastica neutrino – elettrone : $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$

Direzionale, $\sigma(\nu_e) \approx 6 \sigma(\nu_\mu) \approx 6 \sigma(\nu_\tau)$ (come in Super-K)

(CC) $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$

Direzionalità debole: distribuzione angolare elettroni $\propto 1 - (1/3) \cos(\theta_{\text{sun}})$

Misura dell'energia del ν_e (perchè la maggior parte dell'energia del ν_e è trasferita all'elettrone)

(NC) $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

Sezione d'urto identica per i tre tipi di neutrino

Misura del flusso solare totale in presenza di oscillazioni

RIVELAZIONE DELLA REAZIONE $\nu + d \rightarrow \nu + p + n$

Rivelazione della cattura nucleare del neutrone dopo rallentamento da urti sui nuclei di deuterio

- **Luglio 2001 – Settembre 2003: soluzione di 2 tonn. di *NaCl* ultra-puro in D_2O**

$n + Cl^{35} \rightarrow Cl^{36} + \text{alcuni } \gamma$ ($\langle N_\gamma \rangle \approx 2.5, \Sigma E_\gamma \approx 8.6 \text{ MeV}$)

$\gamma \rightarrow$ elettrone Compton, coppia e^+e^-

La separazione delle tre reazioni nell'analisi dei dati si basa sulla differenza delle distribuzioni di 4 variabili misurate: energia, isotropia dell'evento, direzionalità rispetto alla posizione del Sole, distribuzione spaziale

Estrazione delle tre componenti mediante metodo di massima verosimiglianza confrontando le distribuzioni delle 4 variabili misurate nei dati con la somma ponderata delle distribuzioni previste separatamente per le tre reazioni

Numero di eventi:

CC: 2176 ± 78

ES: 279 ± 26

NC: 2010 ± 85

Fondo (neutroni esterni): 128 ± 42

Flussi di neutrini solari, misurati separatamente dalle tre reazioni:

$$\Phi_{CC} = (1.72 \pm 0.05 \pm 0.11) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Nota: $\Phi_{CC} \equiv \Phi(\nu_e)$

$$\Phi_{ES} = (2.34 \pm 0.23 \begin{smallmatrix} +0.15 \\ -0.14 \end{smallmatrix}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

← Calcolato nell'ipotesi che tutti i neutrini incidenti sono ν_e

$$\Phi_{NC} = (4.81 \pm 0.19 \begin{smallmatrix} +0.28 \\ -0.27 \end{smallmatrix}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

↔ $\Phi_{SSM}(\nu) = 5.05 \begin{smallmatrix} +1.01 \\ -0.81 \end{smallmatrix} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

(stat) (sist)

→ $\frac{\Phi_{CC}}{\Phi_{NC}} = 0.358 \pm 0.021 \begin{smallmatrix} +0.028 \\ -0.029 \end{smallmatrix}$

(differisce da 1 per 10 deviazioni standard)

- **Flusso totale di neutrini solari in accordo con predizioni SSM**
(misura della temperatura del nucleo solare con precisione $\sim 0.5\%$)
- **Composizione neutrini solari all'arrivo sulla Terra:**
 $\sim 36\% \nu_e$; $\sim 64\% \nu_\mu + \nu_\tau$ (rapporto ν_μ / ν_τ ignoto)

L'interpretazione dei risultati sperimentali sui neutrini solari richiede l'esistenza di un'oscillazione $\nu_e - \nu_\mu$ (ν_τ) con

$$\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = (5.9 \pm 2.1) \times 10^{-5} \text{ (eV}/c^2)^2$$

$$\theta_{12} = 32.8^\circ \pm 1.1^\circ$$

Verifica dell'oscillazione dei neutrini solari con antineutrini da reattori e rivelatore a 100 – 200 km dai reattori

Esperimento KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti Neutrino Detector)

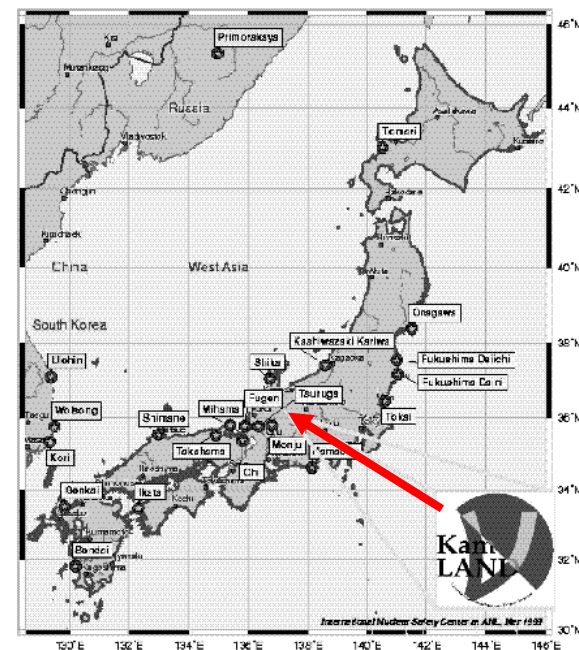
Potenza termica totale 70 GW : >79% del flusso $\bar{\nu}_e$ prodotto da 26 reattori, $138 < L < 214$ km.

Media pesata delle distanze: $\langle L \rangle$: 180 km

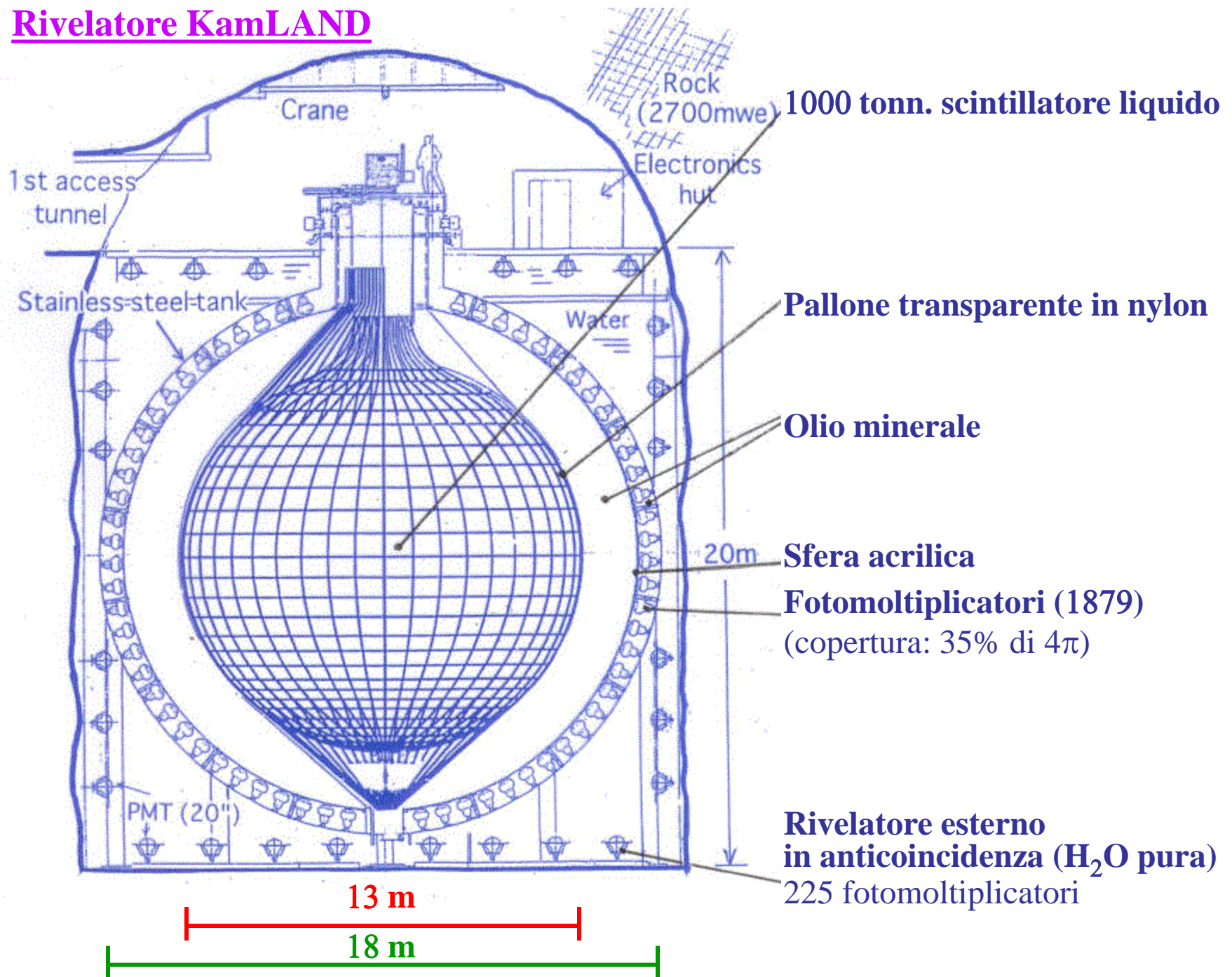
Flusso $\bar{\nu}_e$ predetto $\approx 1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(tutti i reattori a potenza massima, assenza di oscillazioni)

Lunghezza d'oscillazione media per $\Delta m^2 = 6 \times 10^{-5} (\text{eV}/c^2)^2$:

$\langle \lambda_{\text{osc}} \rangle \approx 120 \text{ km}$



Rivelatore KamLAND

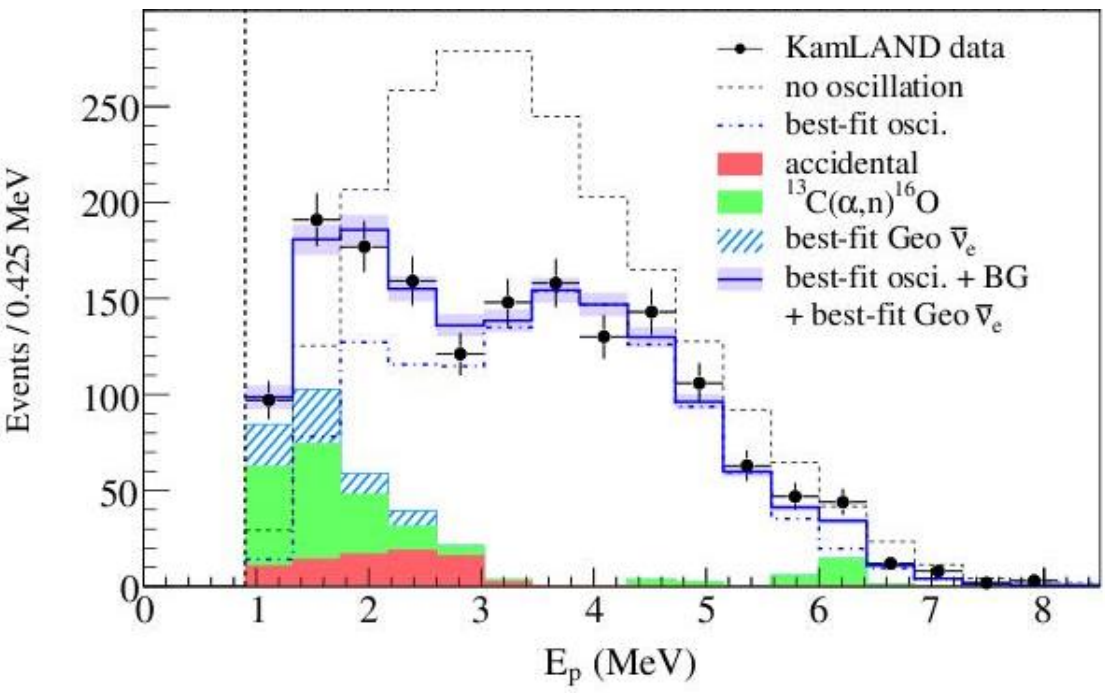


Rivelazione degli antineutrini nell'esperimento KamLAND:

$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (sui protoni liberi di scintillatore liquido contenente idrogeno)

$e^+ e^- \rightarrow 2\gamma$
segnale iniziale
 $E_p = E(e^+) + 2m_e c^2$
 $E_\nu = E_p + 0.782 \text{ MeV}$

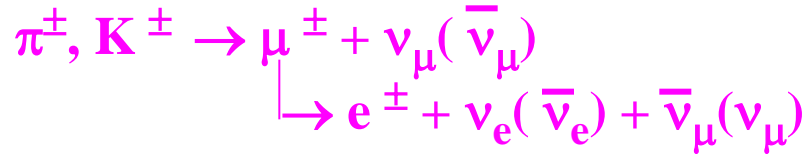
“termalizzazione” da collisioni multiple
($\langle t \rangle \approx 180 \mu\text{s}$), seguita da cattura
 $n + p \rightarrow d + \gamma$ ($E_\gamma = 2.2 \text{ MeV}$)
segnale ritardato



Eventi previsti in assenza di oscillazione: 2179 ± 89
Eventi di fondo: 276.1 ± 23.5
Eventi osservati: 1609

Neutrini atmosferici

Sorgenti principali di neutrini atmosferici:



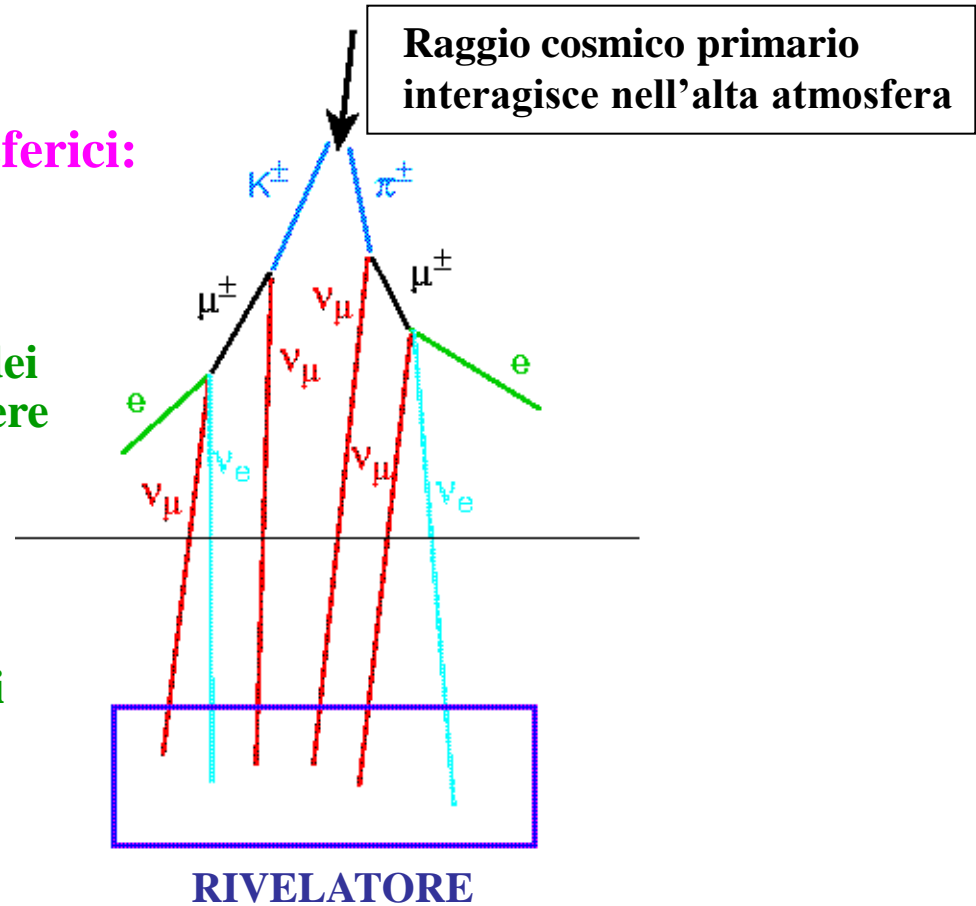
Ad energie $E < 2 \text{ GeV}$ la maggior parte dei pioni e muoni decade prima di raggiungere la Terra:

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2$$

Ad energie più alte, la maggior parte dei muoni raggiunge la Terra prima di decadere:

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} > 2$$

(funzione crescente di E)



Intervallo di energie dei neutrini atmosferici: 0.1 — 100 GeV

Frequenza di eventi molto bassa: ~100 /anno per un rivelatore di 1000 tonn.

Rivelazione dei neutrini atmosferici nel rivelatore Super-Kamiokande

$\nu_{\mu} + \text{Nucleone} \rightarrow \mu + \text{adroni}$: presenza di una traccia lunga al minimo della ionizzazione (il muone)

$\nu_e + n \rightarrow e^{-} + p, \bar{\nu}_e + p \rightarrow e^{+} + n$: presenza di uno sciame elettromagnetico

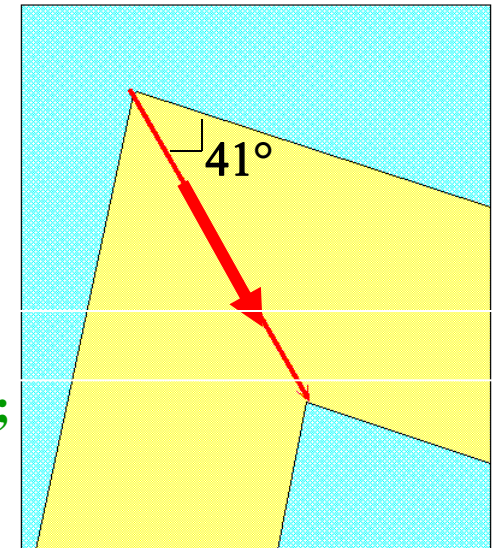
Identificazione:

Traccia muonica:

numero di fotoni prodotti costante lungo il percorso;
anello di luce Čerenkov con bordi ben definiti;

sciame elettromagnetico:

numero di fotoni per cm elevato (molti elettroni secondari);
bordi dell'anello di luce Čerenkov mal definiti
(dall'apertura angolare dello sciame)



Misura della distribuzione dell'angolo di zenith

Definizione dell'angolo di zenith θ :
Asse polare parallelo alla verticale
locale, diretto verso il basso

Verso il basso: $\theta = 0^\circ$

Orizzontale: $\theta = 90^\circ$

Atmosfera terrestre

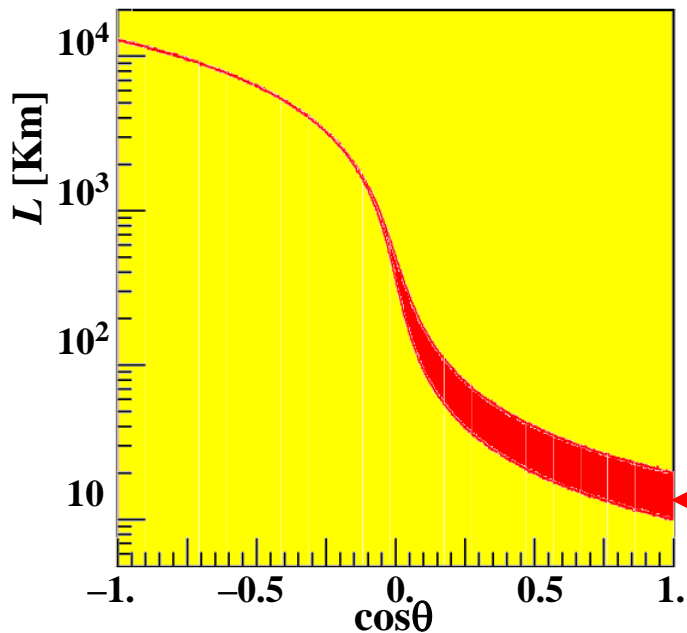
rivelatore

Verso l'alto: $\theta = 180^\circ$

Terra

Asse verticale locale

L (distanza tra il punto di produzione del neutrino e il rivelatore) dipende dall'angolo di zenith



$$\theta = 0^\circ \text{ — } 180^\circ$$

$$L = \sim 10 \text{ — } \sim 12800 \text{ km}$$

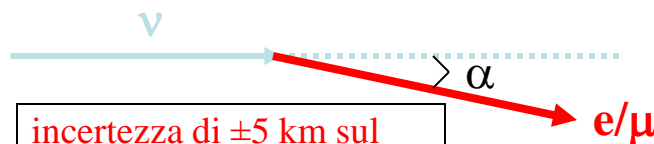


Ricerca di oscillazioni su distanza L variabile

Forte correlazione angolare tra neutrino incidente ed elettrone/muone prodotto per $E > 1$ GeV:

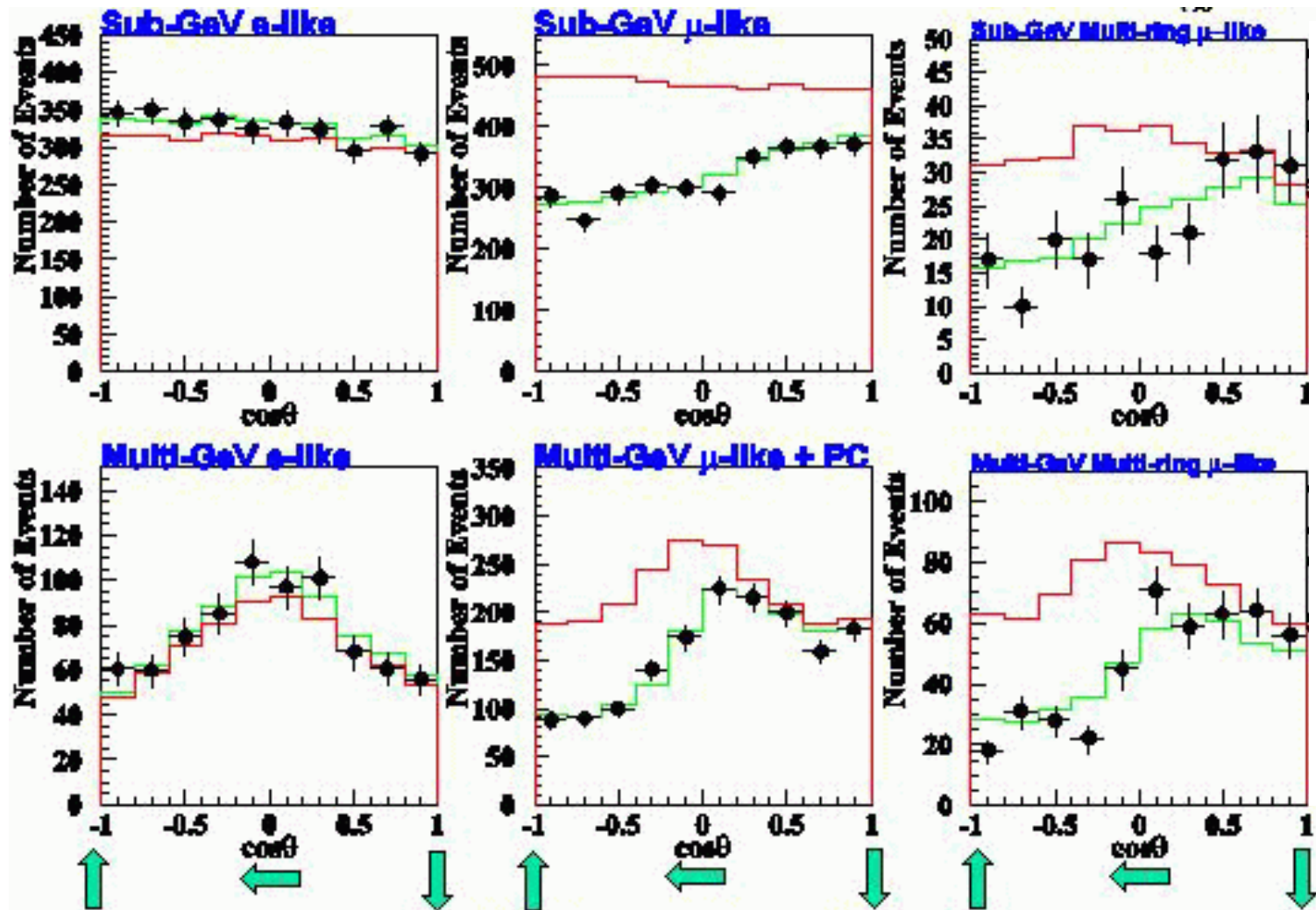
$\alpha \approx 25^\circ$ per $E = 1$ GeV;

$\alpha \rightarrow 0$ per E crescente



incertezza di ± 5 km sul punto di produzione del ν

Distribuzioni dell'angolo di zenith



— Assenza di oscillazione

— Oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$ con $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ (eV}/c^2)^2$, $\sin^2 2\theta = 1.0$

Distribuzioni dell'angolo di zenith in Super-K:

evidenza per scomparsa di ν_μ su distanze di ~ 1000 — 10000 km

L'oscillazione responsabile non è $\nu_\mu - \nu_e$:

la distribuzione dell'angolo di zenith per eventi “e – like” dovrebbe mostrare un'asimmetria di segno opposto (eccesso di eventi “e-like” verso l'alto) perchè

$\nu_\mu / \nu_e \geq 2$ alla produzione

L'ipotesi più plausibile: oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$

$\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$ richiede $E(\nu_\tau) > 3.5 \text{ GeV}$;

frazione di decadimenti $\tau \rightarrow \mu \approx 18\%$

Parametri dell'oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$ che descrivono i risultati dell'esperimento Super – K sui neutrini atmosferici:

$$\Delta m_{23}^2 = m_3^2 - m_2^2 : \quad 1.9 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.0 \times 10^{-3} \quad (\text{eV}/c^2)^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) > 0.9$$

Premio Nobel 2002 per i loro contributi originali all'astrofisica, in particolare con la rivelazione dei neutrini cosmici



Masatoshi Koshiba

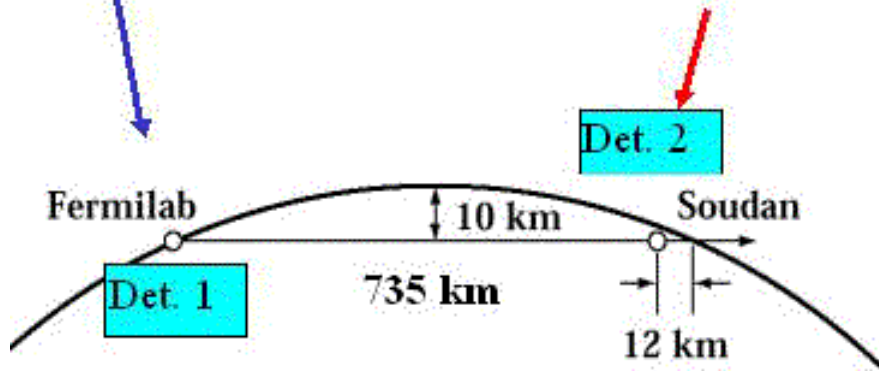


Raymond Davis

Esperimento MINOS: verifica dell'oscillazione dei neutrini atmosferici con fasci di neutrini prodotti da acceleratori

Fascio neutrini da Fermilab a Soudan
(miniera di ferro abbandonata nel Minnesota): $L = 735$ km

Near Detector: 980 tons
Far Detector: 5400 tons



Acceleratore:

Fermilab Main Injector (MI)
Sincrotrone a protoni
120 GeV

Alta intensità (0.4 MW):

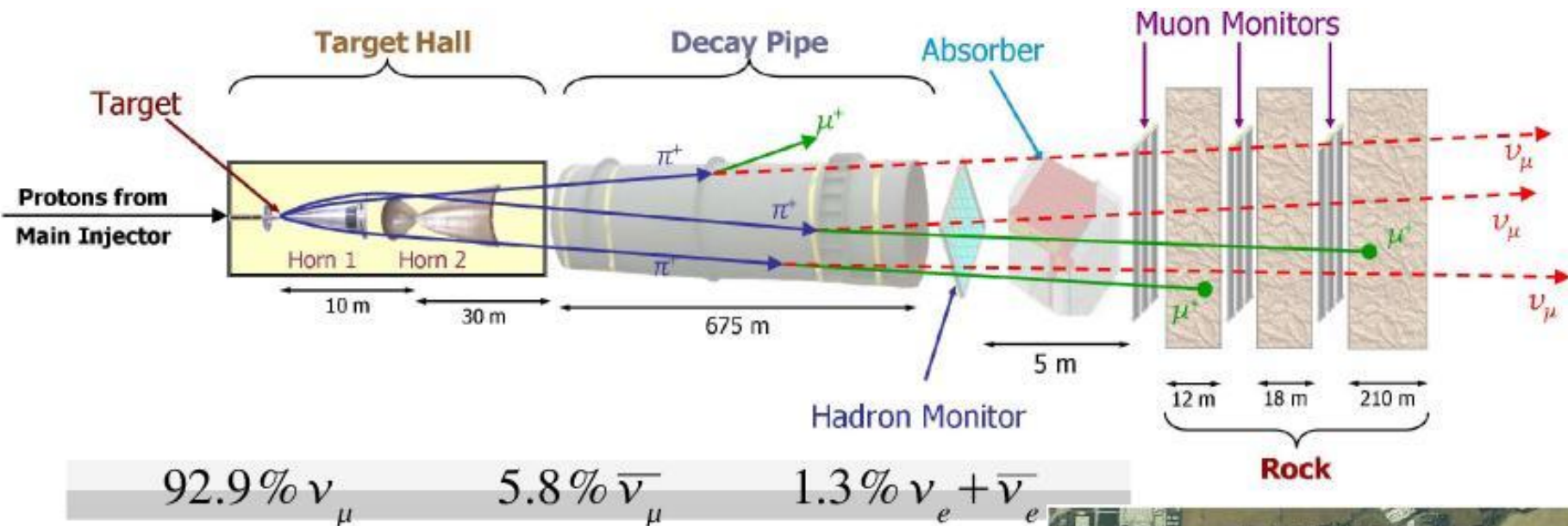
4×10^{13} protoni per ciclo

Durata del ciclo: 1.9 s

4×10^{20} protoni / anno

Tunnel di decadimento: 700 m

Fascio NUMI (“Neutrinos from Main Injector”)



Cambiando la distanza bersaglio – corni magnetici e la corrente nei corni è possibile cambiare l’energia media del fascio di neutrini

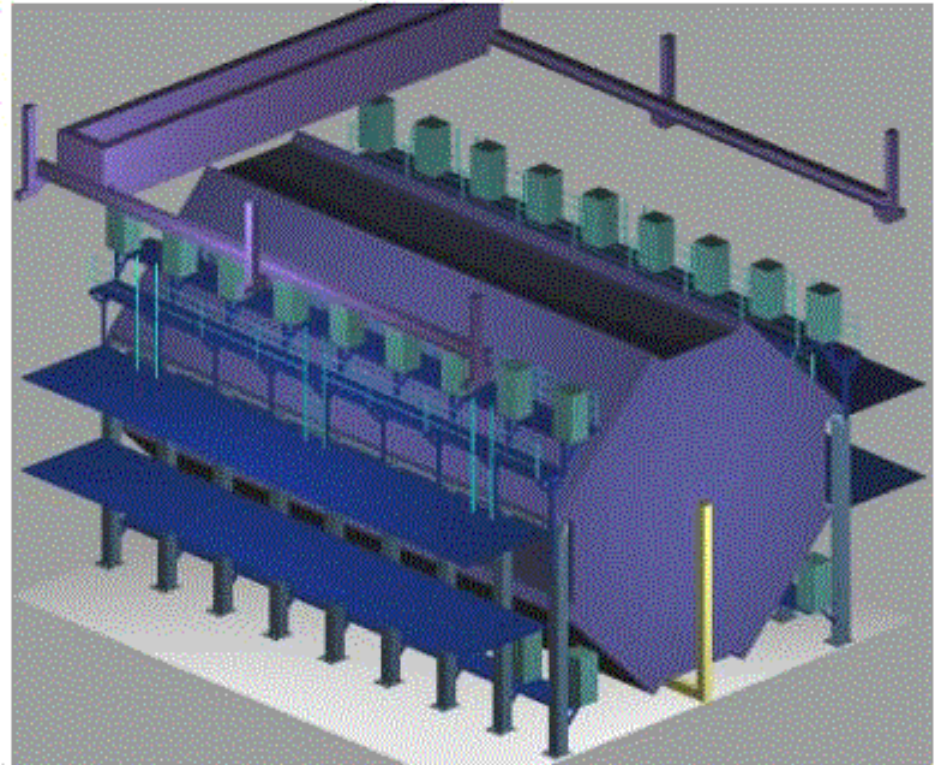
Veduta aerea degli acceleratori al Fermilab →



MINOS: Rivelatore lontano

- Sezione ottagonale, diametro 8 m
- Lastre di Ferro, spessore 2.54 cm,
- Strisce di scintillatore (larghezza 4 cm) tra le lastre
- Massa totale 5400 tonn., massa fiduciale 3300 tons.
- 484 piani di scintillatore (26000 m²)
- Le lastre di Ferro sono magnetizzate: campo toroidale, $B = 1.5 \text{ T}$

Costruzione completata nel giugno 2003

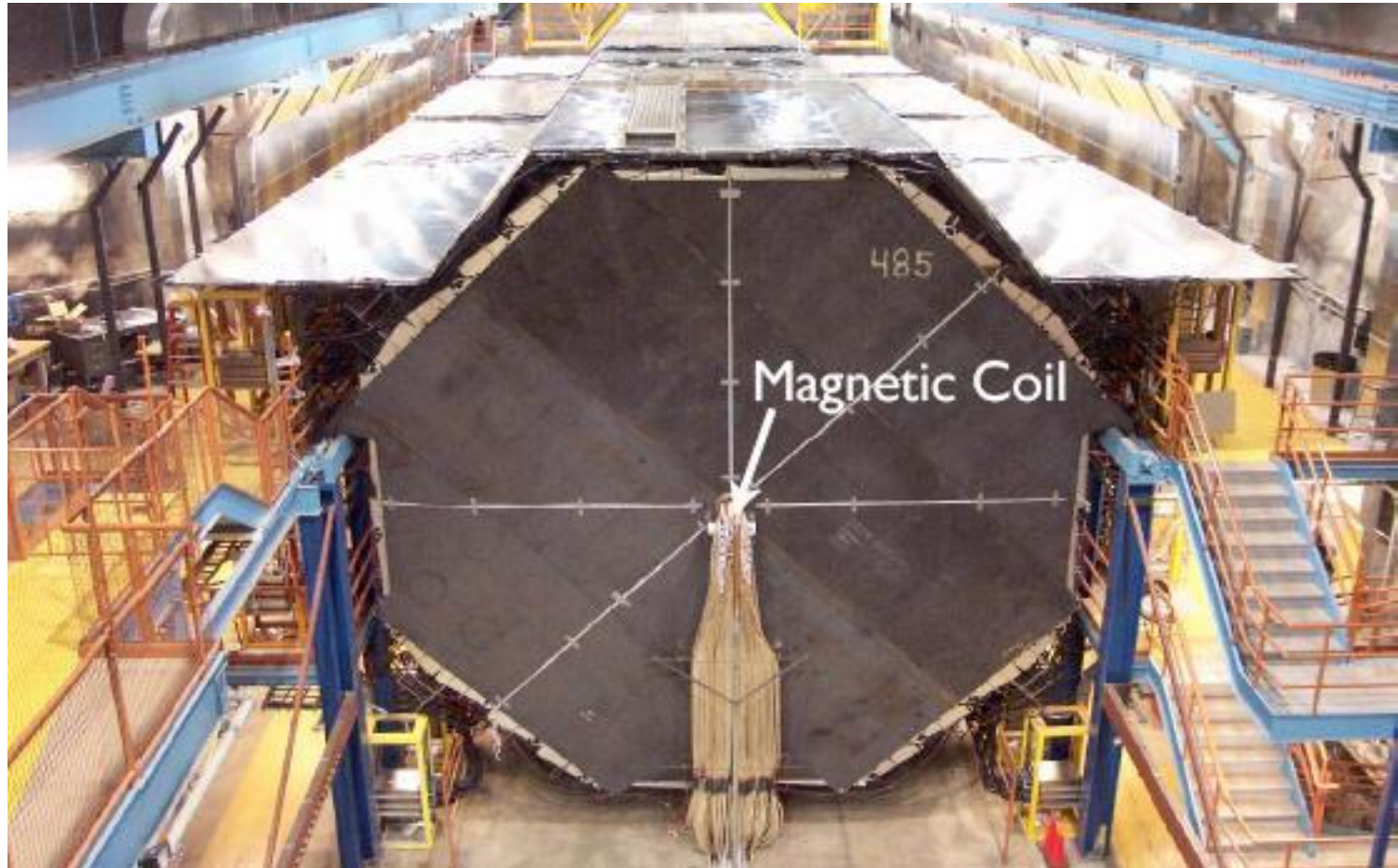


MINOS: Rivelatore vicino

- Rivelatore “ottagonale” in Ferro, 3.8x4.8 m
- Costruzione identica a quella del rivelatore lontano
- 282 lastre di Ferro magnetizzato
- Massa totale 980 tonn. (massa fiduciale 100 tonn.)
- Installato a 250 m dalla fine del tunnel di decadimento

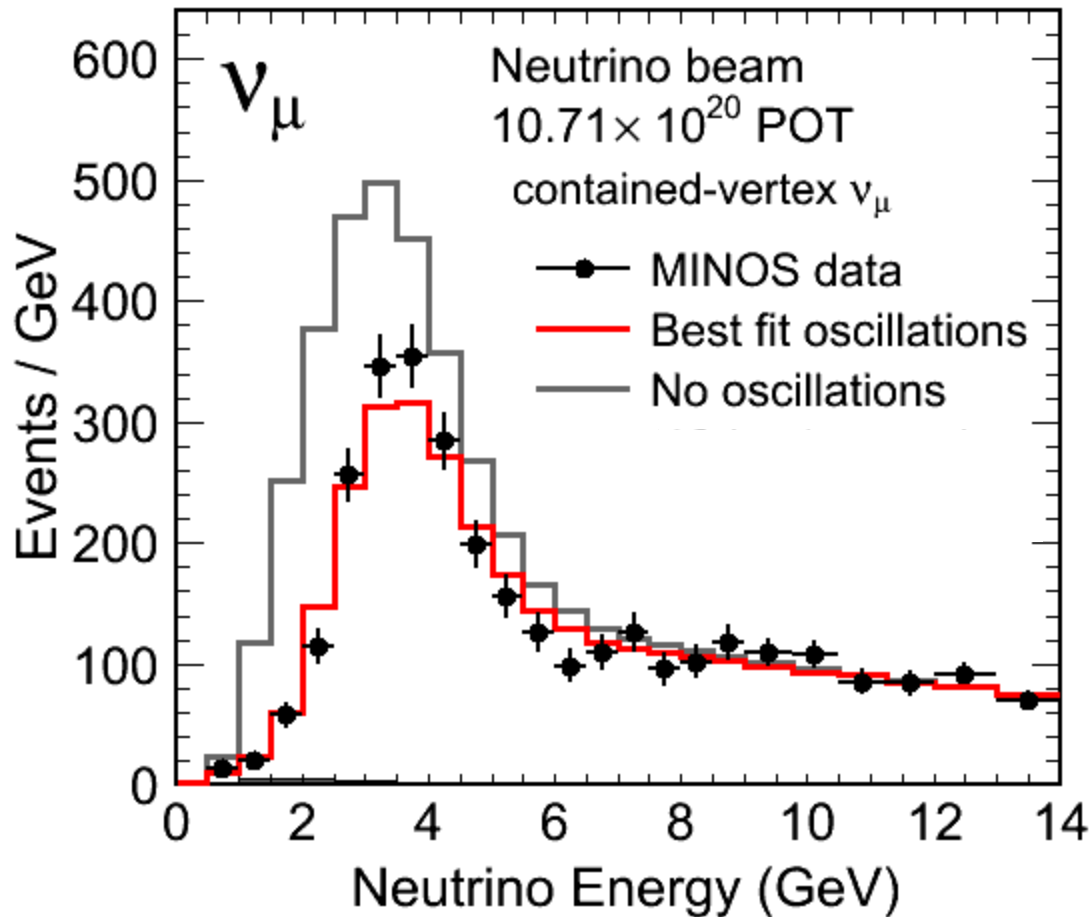
Inizio presa – dati: 2005

MINOS: rivelatore lontano



Risultati MINOS

Eventi $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$



Parametri dell'oscillazione che descrivono i dati sperimentali ("best fit"):

$$\Delta m_{23}^2 = (2.41 \pm 0.10) \times 10^{-3} \text{ (eV/c}^2\text{)}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{23}) = 0.950 \pm 0.035 \rightarrow \theta_{23} = 38.5^\circ \pm 2^\circ$$

Oscillazioni di neutrini

Riassunto dei risultati

- Analisi combinata dei dati dallo studio dei neutrini solari e dall'esperimento KamLAND (antineutrini da reattori):

$$\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ (eV/c}^2\text{)}^2$$
$$\theta_{12} = 33.4^\circ \pm 0.9^\circ$$

- Esperimento MINOS:

$$\Delta m_{23}^2 = m_3^2 - m_2^2 = (2.41 \pm 0.10) \times 10^{-3} \text{ (eV/c}^2\text{)}^2$$
$$\theta_{23} = 38.5^\circ \pm 2^\circ$$

Il terzo angolo di "mixing" (θ_{13}), se $\neq 0$, induce oscillazioni $\nu_e - \nu_\mu$, $\nu_e - \nu_\tau$ (e $\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_\tau$) con $\Delta m^2 = m_3^2 - m_1^2 = (m_3^2 - m_2^2) + (m_2^2 - m_1^2) \approx 2.3 \times 10^{-3} \text{ (eV/c}^2\text{)}^2$.

1997 – 1998: Esperimento CHOOZ con $\bar{\nu}_e$ prodotti dai reattori della Centrale Nucleare di Chooz (Francia) e un rivelatore ad una distanza media di 1056 m:

nessuna evidenza di scomparsa di $\bar{\nu}_e \rightarrow$ risultato compatibile con $\theta_{13} = 0$;

limite superiore $\theta_{13} < 12^\circ$.

2012: Evidenza di scomparsa di $\bar{\nu}_e$ con rivelatori a distanze dell'ordine del km da reattori nucleari $\rightarrow \theta_{13} \neq 0$

Due esperimenti con rivelatori vicini ai reattori per misurare direttamente il flusso di $\bar{\nu}_e$:

1. **RENO: due rivelatori sotterranei identici (15 tonn di scintillatore liquido) presso la centrale nucleare di Yonggwang (Corea del Sud); 6 reattori, distanza media del rivelatore lontano 1380 m**

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.100 \pm 0.018 \quad \rightarrow \quad \theta_{13} = 9.2^\circ \pm 0.8^\circ$$

2. **Daya Bay (Costa orientale della Cina, 55 km a Nord-Est di Hong Kong)
Due centrali nucleari a 1100 m di distanza:
Daya Bay (2 reattori); Ling Ao (4 reattori)
8 rivelatori a scintillatore liquido in 8 siti diversi (4 vicini ai reattori, 4 a ~2 km di distanza)**

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.089 \pm 0.011 \quad \rightarrow \quad \theta_{13} = 8.7^\circ \pm 0.6^\circ$$

2011 – 2013: Esperimento T2K (Tokai to Kamioka)

Evidenza di oscillazione $\nu_\mu - \nu_e$ con fascio di ν_μ prodotti dal nuovo sincrotrone a protoni da 30 GeV, alta intensità (J-PARC, Japan Proton Accelerator Research Complex)

Fascio di ν_μ quasi mono-energetico, $E_\nu = 0.6$ GeV



Per $\Delta m^2 = m_3^2 - m_1^2 = (m_3^2 - m_2^2) + (m_2^2 - m_1^2) \approx 2.3 \times 10^{-3} \text{ (eV}/c^2)^2$,
 $E_\nu = 0.6$ GeV, il massimo dell'oscillazione si trova ad una distanza dalla sorgente $L = \frac{1}{2} \lambda \approx 320$ km.

L'esperimento T2K osserva 28 eventi $\nu_e \rightarrow$ elettrone nel rivelatore Super - K da collisioni di neutrini provenienti dall'acceleratore.

In assenza di oscillazione, il numero previsto è 4.6 ± 0.5 .

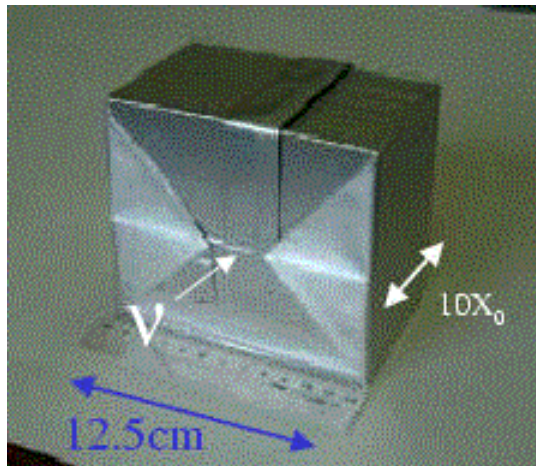
Ricerca di oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$ su grandi distanze

Esperimento OPERA ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (presa – dati 2008 – 2012)

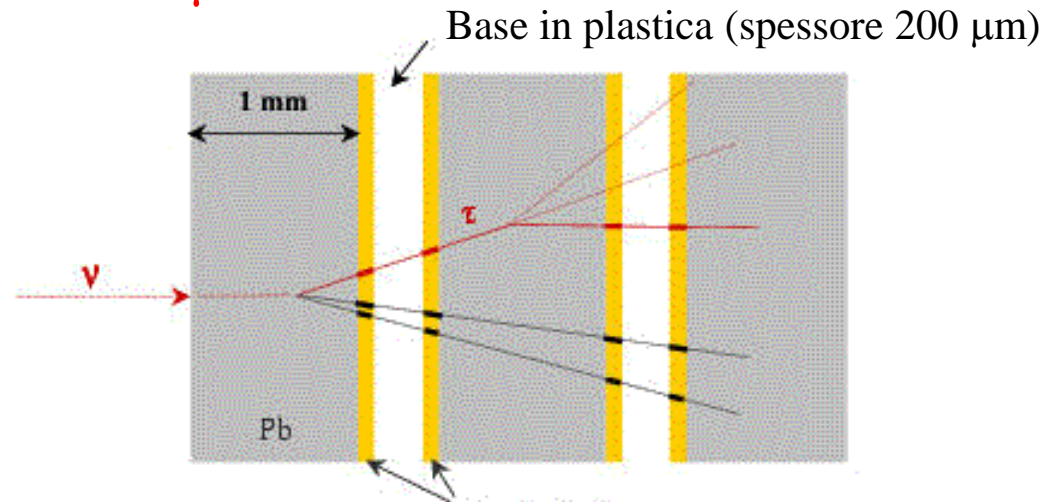
Rivelazione della produzione di τ^- da collisioni di neutrini prodotti dal sincrotrone a protoni da 400 GeV (SPS) del CERN (distanza 735 km)

Alla sorgente il fascio è costituito principalmente da ν_μ , con una contaminazione trascurabile di ν_τ

**Percorso medio di decadimento del $\tau \approx 1$ mm \Rightarrow si richiede alta risoluzione spaziale.
Emulsione fotografica: risoluzione spaziale ~ 1 μ m**



“Mattoni”: 57 lastre fotografiche separate da 56 lastre di Pb (spessore 1 mm) strettamente impacchettate



lastra fotografica: due strati di emulsione (spessore 50 μ m), separati da 200 μ m di plastica

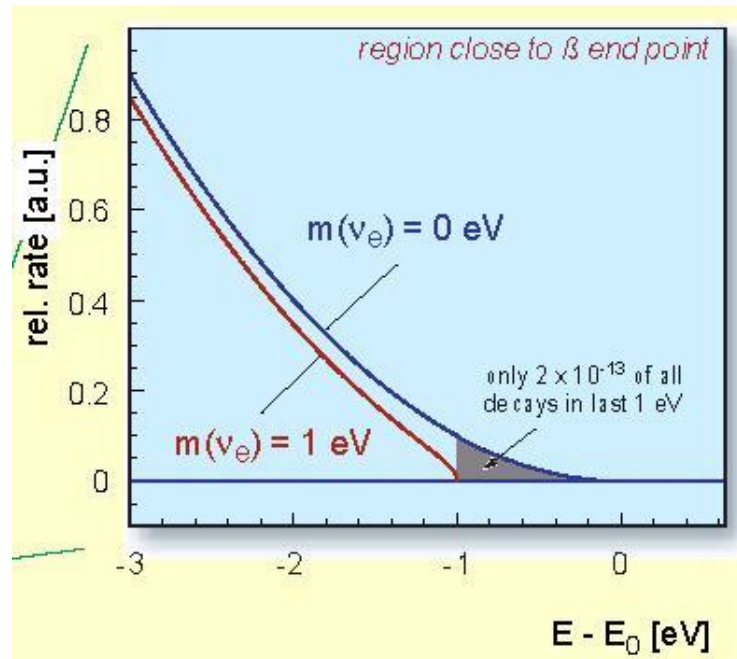
~ 150 000 mattoni : massa totale 1250 tonnellate (principalmente Piombo)

Tre eventi compatibili con la produzione di τ osservati dall'analisi di circa il 50% delle collisioni di neutrini nei mattoni, in accordo col numero previsto dalla presenza di oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$

Problemi ancora non risolti in fisica dei neutrini

- Valori assoluti delle masse (le oscillazioni di neutrini forniscono oscillazioni su differenze di masse al quadrato)

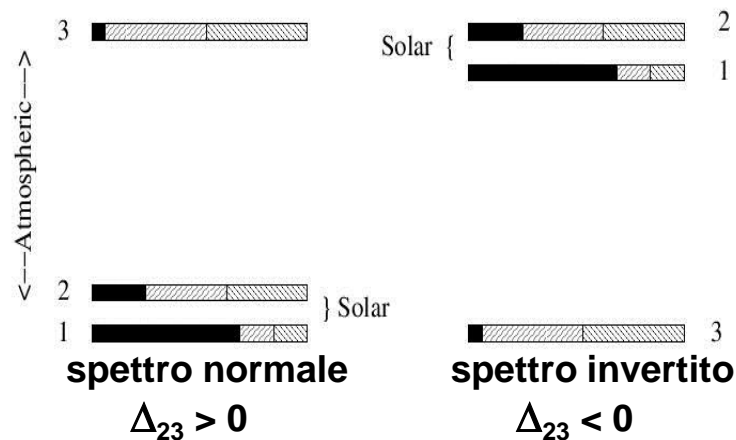
Esperimento KATRIN (presso i laboratori di Karlsruhe): misura della distribuzione di energia degli elettroni emessi con energie vicine all'energia massima nel decadimento β del Trizio ${}^3\text{H}_1 \rightarrow {}^3\text{He}_2 + e^- + \bar{\nu}_e$. $E_0 = 18.59$ keV, tempo di dimezzamento del Trizio 12.33 anni.



Limite raggiunto dal decadimento β del Trizio in esperimenti precedenti: $m(\nu_e)c^2 < 2.5$ eV;
Sensibilità prevista per l'esperimento KATRIN: $m(\nu_e)c^2 < 0.35$ eV.

Limiti cosmologici sulle masse dei neutrini: $0.05 \text{ eV} < \sum_{\nu} m_{\nu}c^2 < 0.5 \text{ eV}$

▪ **Masse dei tre neutrini: spettro normale o spettro invertito?**



Ricerche di oscillazioni $\nu_{\mu} - \nu_e$ a grande distanza con fasci di neutrini da acceleratori che attraversano la crosta terrestre (la differenza $m_3^2 - m_1^2$ dipende dalla densità di materia lungo il percorso e dall'energia del neutrino). Gli esperimenti in corso non hanno sensibilità sufficiente (l'angolo θ_{13} è piccolo !)

▪ **Ricerca di violazione della simmetria CP nelle oscillazioni $\nu_{\mu} - \nu_e$:**

Probabilità di oscillazione $\nu_{\mu} - \nu_e \neq$ probabilità di oscillazione $\bar{\nu}_{\mu} - \bar{\nu}_e$

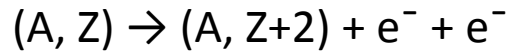
Esperimenti difficili perchè l'effetto è proporzionale a $\sin(\theta_{13})$

▪ **Altri neutrini "sterili" ?**

Ricerca di oscillazioni corrispondenti a valori di Δm^2 diversi dai valori misurati per i neutrini solari e atmosferici — risultati sperimentali finora inconcludenti

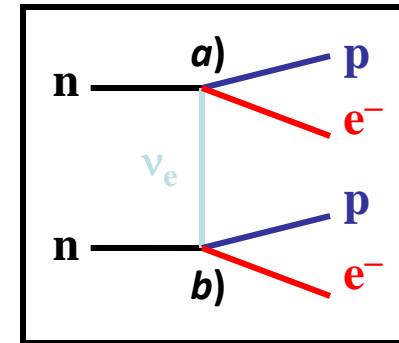
- **Neutrino e anti-neutrino : la stessa particella oppure particelle diverse?**
Neutrino “di Majorana” : $\nu \equiv \bar{\nu}$; neutrino “di Dirac” : $\nu \neq \bar{\nu}$

Ricerca del doppio decadimento β senza emissione di neutrini ($\beta\beta 0\nu$):



possibile soltanto per neutrini di Majorana.

Rappresentazione grafica del doppio decadimento β senza emissione di neutrini: *a*) emissione di un neutrino da un neutrone (che si trasforma in protone ed emette un elettrone) ; *b*) assorbimento del neutrino da un altro neutrone dello stesso nucleo, con emissione di un protone e un elettrone.



Neutrini di Dirac: emissione di un anti-neutrino in *a*); processo *b*) impossibile (richiede un neutrino);

Neutrini di Majorana: processi *a*) e *b*) possibili soltanto se il neutrino cambia elicit .

Condizione necessaria per il decadimento $\beta\beta 0\nu$: massa del neutrino $m_\nu > 0$ (cambio di elicit  impossibile se $m_\nu = 0$); — frequenza del decadimento $\beta\beta 0\nu$ proporzionale a m_ν^2 .

Per un decadimento $\beta\beta 0\nu$ la somma delle energie dei due elettroni   costante:

$$E(e_1) + E(e_2) \approx (M(A, Z) - M(A, Z + 2))c^2$$

Molti esperimenti in corso / in preparazione per ricercare il decadimento $\beta\beta 0\nu$, finora tutti con risultati negativi — l’esperimento finora pi  sensibile ha fornito il limite $m_\nu c^2 < 0.35$ eV dallo studio del decadimento ${}^{76}\text{Ge}_{32} \rightarrow {}^{76}\text{Se}_{34} + e^- + e^-$ (somma energie elettroni = 2.038 MeV)

CONCLUSIONI

Negli ultimi 20 anni la fisica dei neutrini è tornata ad essere uno dei principali assi di ricerca in fisica delle particelle elementari grazie alla scoperta delle oscillazioni di neutrini, proposte per la prima volta da Bruno Pontecorvo più di mezzo secolo fa.