

LA SAGA DEI NEUTRINI

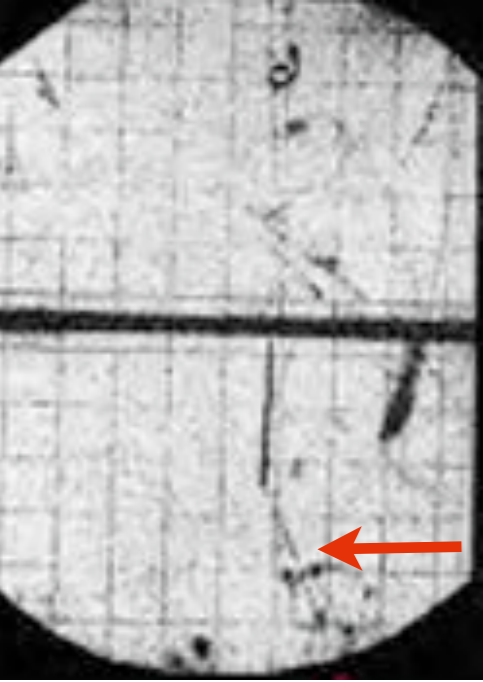
Una storia di puzzles e paradossi

Parte 2

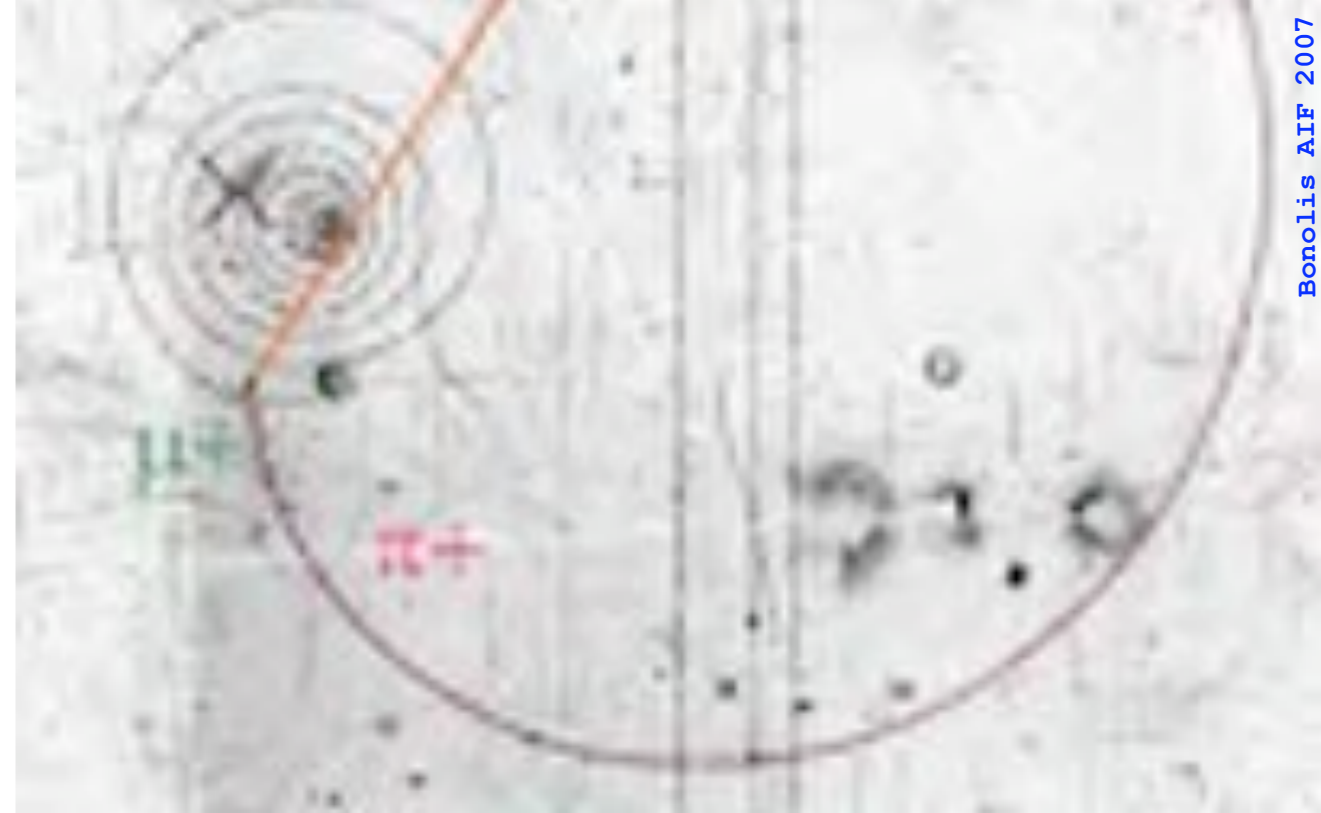
Luisa Bonolis

AIF
SCUOLA DI STORIA DELLA FISICA

Assergi
26 novembre - 1 dicembre 2007



Muoni e pioni



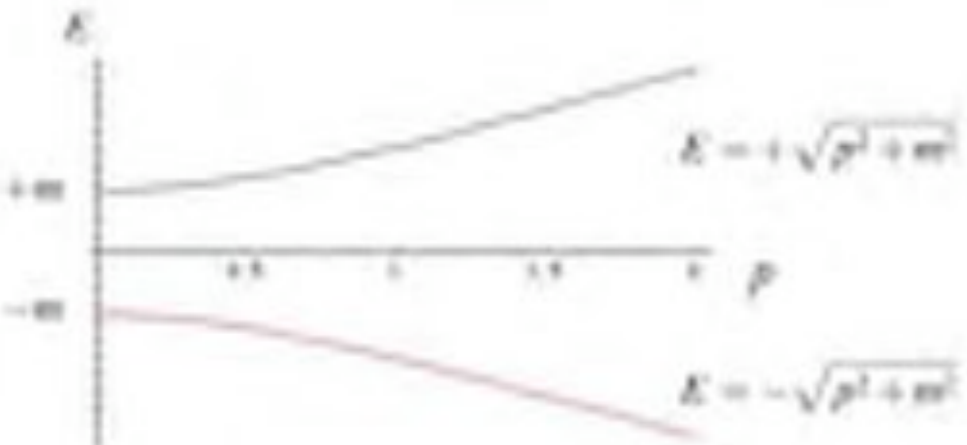
- 1934 Scoperta della radioattività β^+
- 1935 Teoria di Yukawa delle forze nucleari (mesone di Y.)
- 1935 Prime ricerche sul doppio decadimento β
- 1936-1937 Scoperta del “mesotrone” Anderson e Neddermeyer (1936) Street e Stevenson (1937)
- 1937 Il neutrino di Majorana
- 1939 Il doppio decadimento β senza emissione di neutrini (Furry)
- 1939-1942 decadimento del mesotrone (Rossi, Rasetti, Conversi e Piccioni)
- 1946 Conversi Pancini Piccioni: il mesotrone non si comporta come dovrebbe se fosse la particella di Yukawa
- 1947 Fermi, Teller e Weisskopf: Il mesotrone *non* è la particella di Yukawa
- 1947 Lattes, Muirhead, Powell, Occhialini: scoperta del mesone π . Il mesotrone, ribattezzato mesone μ , muone, è il prodotto del decadimento del pione.



Il neutrino di Majorana

Ettore Majorana, "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone, 1937

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$



Le particelle di Dirac sono in linea di principio oggetti a quattro componenti, particelle e antiparticelle ciascuna con due componenti di spin e quindi, come implicitamente previsto da Majorana, devono possedere una segnatura connessa alla proprietà di coniugazione particella-antiparticella.

Il "mare di Dirac".

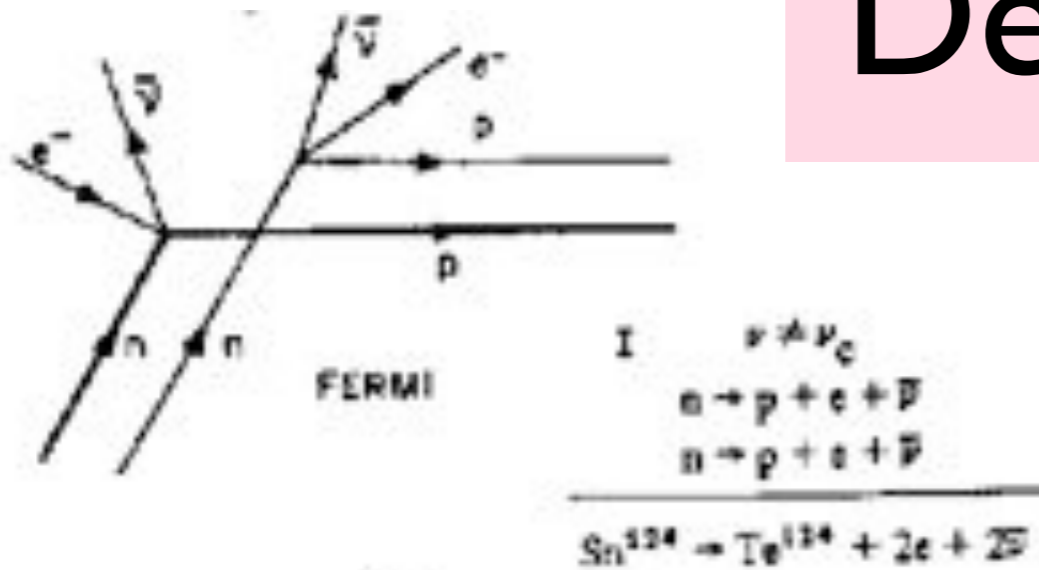
Gli elettroni occupano tutti gli stati negativi dell'energia fino a $-m$, secondo il principio di Pauli nessuna transizione a uno di questi stati può avvenire. Il *mare di Dirac* risolve il problema della stabilità dei sistemi fisici rispetto a qualsiasi perturbazione.

Tuttavia, lo stesso principio consente transizioni nel verso opposto! La lacuna nel mare si comporta come una particella di carica esattamente opposta a quella dell'elettrone. Se lo stato lasciato libero viene occupato da un elettrone proveniente dagli stati superiori si avrà emissione di radiazione elettromagnetica (annichilazione).

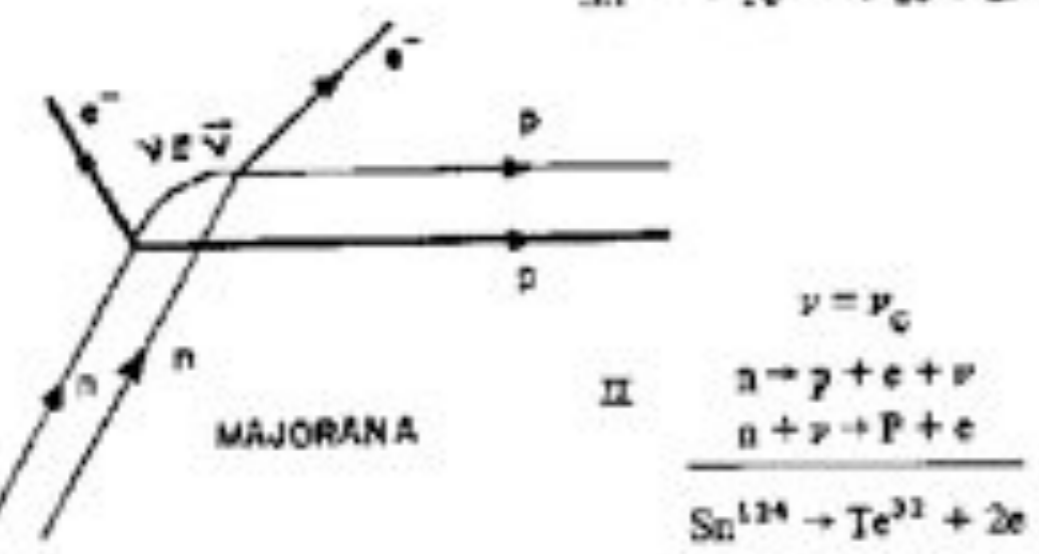
- Formulazione della teoria di Dirac senza il mare di stati negativi dell'energia.
- Contributo allo sviluppo della teoria quantistica dei campi, chiarisce come la teoria di Dirac non sia in chiara relazione con l'esistenza delle antiparticelle (seconda quantizzazione)
- Descrive una particella neutra di spin 1/2 che ha metà dei gradi di libertà richiesti dall'equazione di Dirac: particella e antiparticella coincidono.
- Contiene la prima chiara affermazione della simmetria di carica.

Nell'interpretazione di Majorana dell'equazione di Dirac "non è necessario assumere l'esistenza di antineutrini"

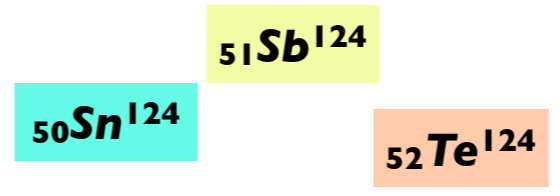
Decadimento doppio β



Dopo il lavoro di Majorana si pose la questione: i neutrini del decadimento β sono un campo di Dirac o di Majorana?



Esempio di doppio decadimento β
 il tripletto di isobari $_{50}\text{Sn}^{124}$ $_{51}\text{Sb}^{124}$ $_{52}\text{Te}^{124}$
 I livelli energetici sono tali che lo stagno non può decadere in antimonio, ma decade in tellurio



All'epoca di Fermi la distinzione tra neutrino e antineutrino era assai vaga. Louis De Broglie conia il termine "anti-neutrino".

Lo studio del doppio decadimento β cominciò nel 1935, quando Maria Goeppert applicò la nuovissima teoria di Fermi per valutare la stabilità dei nuclei su tempi geologici e calcolò il processo

$$(A,Z) \rightarrow (A, Z+2) + \text{due elettroni} + \text{due neutrini}$$

Nel 1939 W. H. Furry mostrò che la teoria "simmetrica" di Majorana poteva dar luogo a una modalità di decadimento del tipo

$$(A,Z) \rightarrow (A, Z+2) + \text{due elettroni} \quad (\text{neutrinoless double } \beta\text{-decay})$$

Maria Goeppert Mayer
(1906-1972)

1945

L'esperimento di Marcello Conversi Ettore Pancini Oreste Piccioni

Selezionati i raggi cosmici nelle componenti positive e negative: $B = 1.5$ Tesla;
Utilizzano diversi materiali assorbitori;
Misurano se le particelle decadono o no: (AB) in coincidenza ritardata con C ($1 \div 4.5 \mu\text{s}$).

1947

Louis Alvarez: *"La moderna fisica delle particelle ebbe inizio durante gli ultimi giorni della seconda guerra mondiale, quando un gruppo di giovani italiani, Conversi, Pancini e Piccioni, iniziarono un notevole esperimento..."* (Nobel Lecture, 1968).

Soluzione del puzzle $\pi \leftrightarrow \mu$
Fermi, Teller, Weisskopf: il "mesotrone" non si comporta come una "particella di Yukawa"

Il π è la vera particella di Yukawa

Risultati dell'esperimento CPP

- ◆ **Risultati col ferro** : solo le particelle positive danno un segnale. La componente dura negativa **NON DECADE** ?
- ◆ Risultati col carbonio: anche i negativi decadono !
- ◆ Le particelle penetranti dei raggi cosmici **NON** si possono identificare con il mesone di Yukawa.

◆ I muoni sono leptoni !

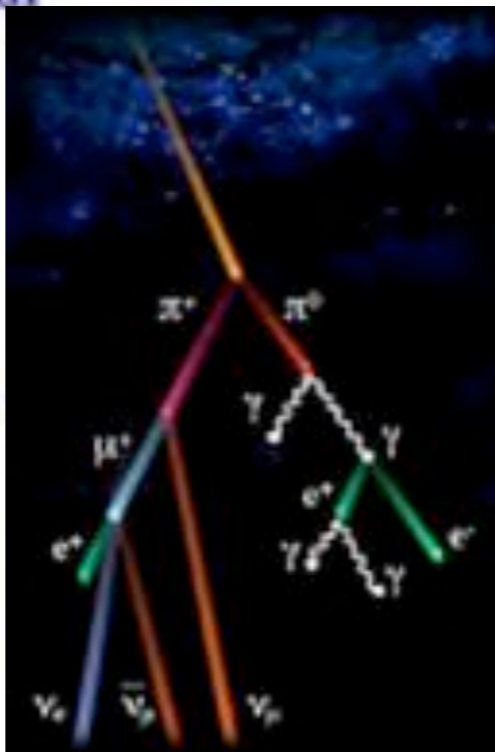
- ◆ Nel ferro la "scomparsa" delle particelle penetranti negative si spiega con una interazione debole del tipo cattura K degli elettroni:



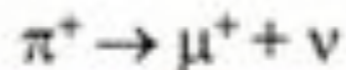
la probabilità per questa cattura nucleare K è:

$$\Lambda = 1/\tau \propto Z^4$$

Questo ci spiega come in atomi pesanti il muone negativo può essere assorbito



- ◆ In emulsioni nucleari, esposte ad alta quota, si osservano eventi $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$. In **tutti** gli eventi il muone ha **una energia cinetica fissa** (4.1 MeV, che corrisponde ad un range di $\sim 600 \mu\text{m}$ nelle emulsioni nucleari) : **e^+ un decadimento a due corpi !** Il modo di decadimento dominante e^+ :



Il π a riposo viene catturato dal nucleo come ci si aspetta per la particella di Yukawa !

$$m_\pi = 139.57 \text{ MeV}/c^2; \text{ spin} = 0; \tau = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

- ◆ Esiste anche il π^0 , scoperto nel 1956 da J. Steinberger et al.,

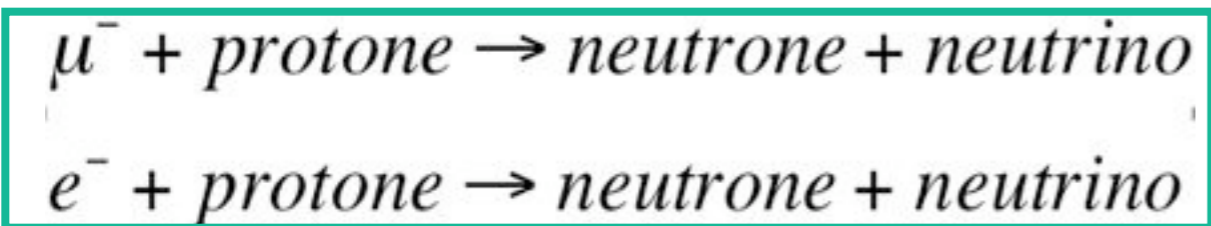
$$m_{\pi^0} = 134.98 \text{ MeV}/c^2; \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma; \tau = 8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$$





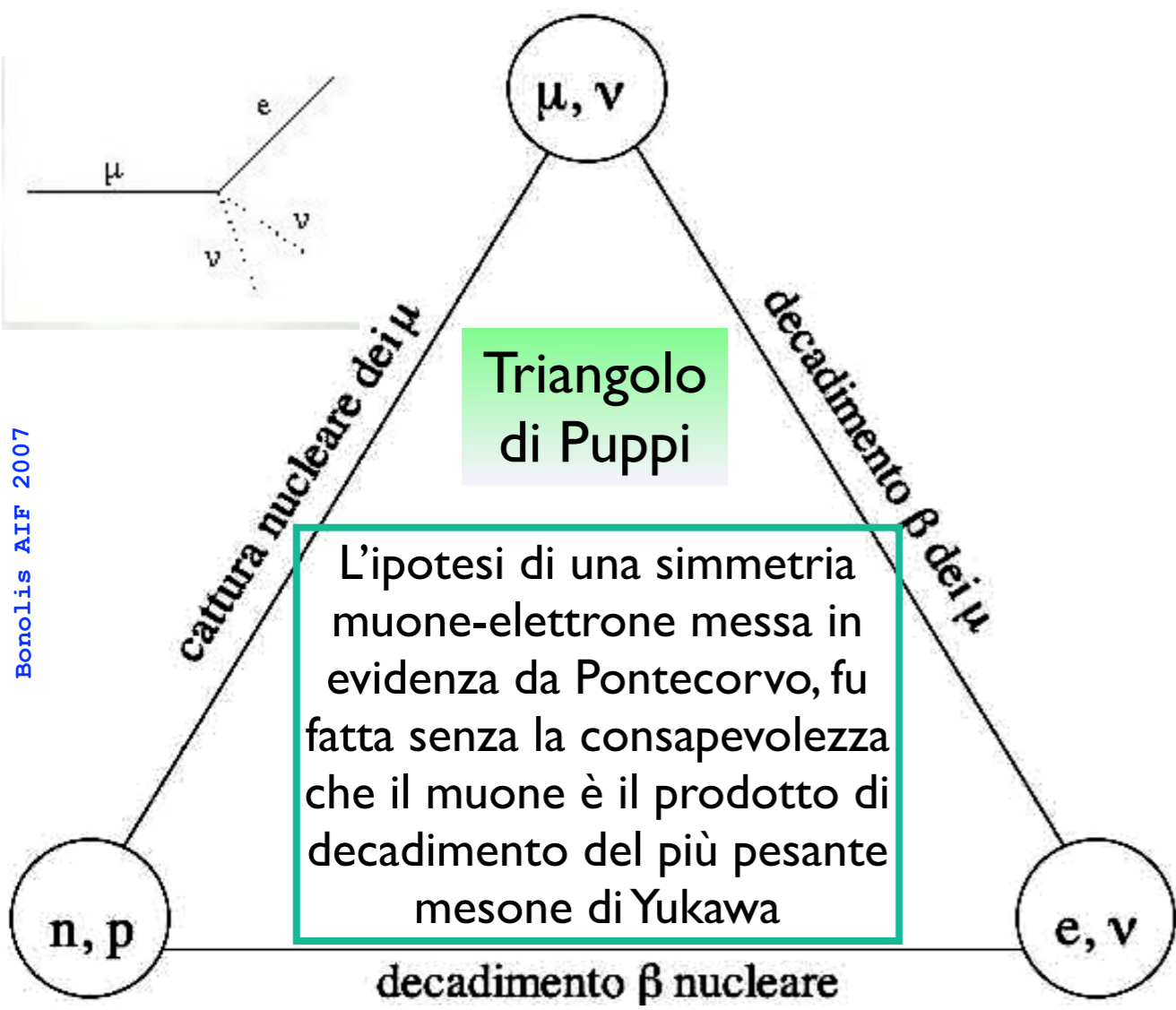
Primi indizi dell'universalità dell'interazione debole

Bruno Pontecorvo, Nuclear capture of mesons and the meson decay, 1947



“...vogliamo discutere la possibilità di una fondamentale analogia tra processi β e processi di emissione o assorbimento di mesoni carichi”

Analogia tra muone ed elettrone: le probabilità di cattura nucleare di un elettrone e di un muone ($\sim 10^6 \text{ s}^{-1}$) sono praticamente identiche (se si tiene conto delle differenze nei volumi delle rispettive orbite e delle energie di disintegrazione dei due processi).



Jack Steinberger: “... il bel suggerimento di Pontecorvo rimase universalmente ignorato, anche da Fermi che era stato maestro di Pontecorvo ed era suo amico, benchè Fermi fosse naturalmente molto interessato a questo tipo di fisica e avesse certamente letto la lettera di Pontecorvo. Sono convinto che questo dimostra che le nuove idee non sono facili da essere accettate, talvolta anche dalle persone più brillanti e più aperte come Fermi”.

Rivelare il neutrino

teoria e primi tentativi

J. Chadwick e D.E. Lea (Cavendish Laboratory), studiano la ionizzazione prodotta da neutroni e neutrini: “...the neutrino cannot produce more than one pair of ions in traversing 150 km of air.” (Solvay 1933).

H. Bethe e R. Peierls, The “Neutrino”, Nature, 20 febbraio 1934

Stimano la sezione d’urto per il decadimento β inverso: “a neutrino hits a nucleus and a positive or negative electron is created while the neutrino disappears and the charge of the nucleus changes by 1” ($\sigma_{inv} < 10^{-44}$ cm² - “corresponding to a penetrating power of 10^{16} km in solid matter”), ma concludono che “it seems highly improbably that, even for cosmic ray energies, σ becomes large enough to allow the process to be observed. If, therefore, the neutrino has no interaction with other particles besides the processes of creation and annihilation mentioned - and it is not necessary to assume interaction in order to explain the function of the neutrino in nuclear transformations - one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino”.

H. Bethe e R. Peierls, The Neutrino, Nature, 1 aprile 1934:

“Although it seems very unlikely that neutrinos, after having been emitted in a nuclear process, give rise to any detectable ionisation, we would like to point out that it is not impossible in principle to decide experimentally whether they exist. One possible experiment would be to check the energy balance for the artificial beta-decay... A second way of deciding the question would be to observe the recoil of the nucleus... it may also be expected that a nucleus catches one of its orbital electrons, decreases by one in atomic number, and emits a neutrino”.

Esiste il neutrino?

M.E. Nahmias, usa due Geiger-Müller in parallelo, in modo che l'eventuale produzione di una coppia di ioni da parte del neutrino avrebbe prodotto una scarica simultanea. Scherma con piombo i contatori e colloca una sorgente radioattiva (Ra E + D + F) tra i due. Per schermarsi più possibile dai raggi cosmici e da altre fonti radioattive fa l'esperimento nei sotterranei della metropolitana: "*...we conclude that if the neutrinos are emitted... they do not produce more than one primary encounter in 9300 km of air.*" (Cavendish Laboratory, 1935).

A. Leipunski (Cavendish Laboratory, 1935) studia la distribuzione in energia dei nuclei di rinculo dopo l'emissione di particelle β . I risultati qualitativi ottenuti suggerivano che la conservazione dell'impulso e dell'energia e dello spin potevano valere soltanto se una terza particella partecipava al processo.

Il terzo metodo suggerito da Bethe e Peierls (e indipendentemente da G.C.Wick) la cattura K ($p+e \rightarrow n+ \text{neutrino}$) fu studiato da Luis Alvarez a Berkeley, nel 1937.

J. S. Allen, 1942, studia il rinculo di un nucleo successivo a una cattura K (possibile emissioni di più neutrini, lo spettro dell'energia di rinculo è definito) senza giungere a conclusioni concrete.

J.C. Jacobsen e O. Kofoed-Hansen, 1945, esperimento del tipo "rinculo": "*the result is incompatible with the assumption that there is no neutrino*".

C. D. Ellis, "A discussion on beta-type of nuclear transmutation", Royal Society 1937:

"It is certainly true that if the principles of the conservation of energy and of identity be accepted as universally valid the evidence, although circumstantial, for the existence of the neutrino is strong. Yet it must be remembered that it is precisely the validity of these principles which is in question. If clear experimental evidence for the existence of the neutrino could be obtained, then we should have conclusive proof of the validity of these principles; but until this happens the neutrino must remain purely hypothetical. It should be also emphasized that no amount of agreement between the resulting theory of beta disintegration and experiment can help to a decision, since the properties of the neutrino are arbitrary. However, there can be no two opinions about the practical utility of the neutrino hypothesis, since it has led to the development of a mathematical theory of the disintegration which has both served as a valuable guide in directing experiments and also shown the connection between many different nuclear phenomena".

Decadimento β inverso

Le obiezioni di Pontecorvo

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^- + \bar{\nu}$$

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

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

$$\bar{\nu} + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z-1)$$

B. Pontecorvo, Report P.D.-141, Chalk River Laboratory, 21 maggio 1945

B. Pontecorvo, **Inverse β process**, Nuclear Physics Conference, 4 settembre 1946, Montreal, pubblicato come Report P.D.-205, National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy, Chalk River, Ontario, 20 novembre 1946.

“The problem of the β disintegration has been attacked experimentally in many ways:

(a) β spectroscopy, i.e. study of the form of the β spectrum...

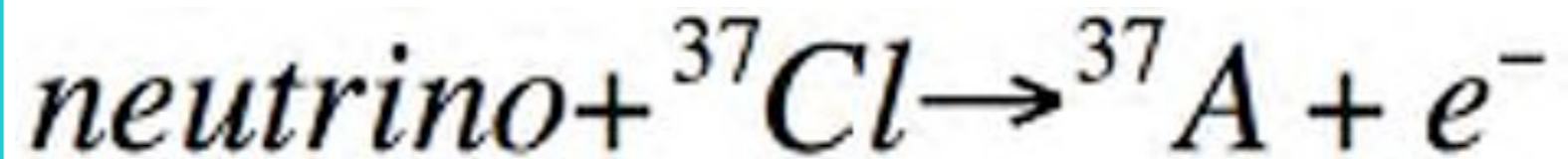
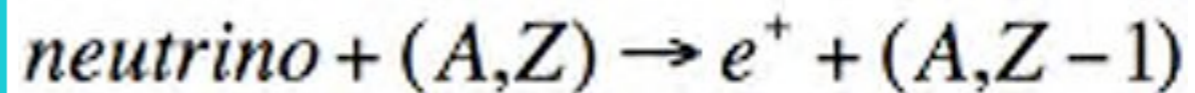
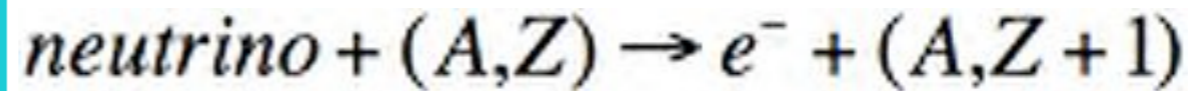
(b) Neutron decay... has not yet been detected...

*(c) Experiments on the recoils of nuclei... **The common feature of all these experiments is that the magnitude of the recoil energy of the nucleus having undergone a decay process is examined in the light of the laws of the conservation of energy and momentum...***

*It should be noted that **experiments of this type**, while of fundamental significance in the understanding of the β process, **cannot bring decisive direct evidence on the basic assumption of the existence of the neutrino**. This statement can be understood if we keep in mind that **recoil experiments are interpreted on the basis of the laws of the conservation of the energy and momentum in individual processes...** i.e. on the basis of the alternative ii [validity of the conservation laws], which, in effect, corresponds **essentially to the assumption of the existence of the neutrino.**”*

“Direct proof of the existence of the neutrino, consequently, must be based on experiments, the interpretation of which does not require the law of conservation of energy, i.e. on experiments in which some characteristic process produced by free neutrinos (a process produced by neutrinos after they have been emitted in a disintegration) is observed.”

Il metodo radiochimico di Bruno Pontecorvo



“The actual emission of a β particle ... is certainly not detectable in practice. However, the nucleus of charge $Z \pm 1$, which is produced... may be (and generally will be) radioactive, with a well-known half-life... Consequently the radioactivity of the produced nucleus may be looked for as proof of the inverse β process”



Raymond Davis raccolge la sfida di Pontecorvo

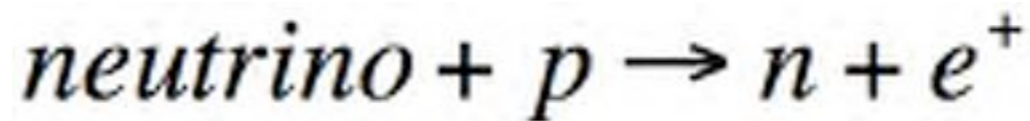
1948 Davis inizia a lavorare sugli esperimenti di rinculo

1951 Comincia a lavorare sul metodo radiochimico per rivelare neutrini da un reattore: *“Bruno Pontecorvo’s short paper was quite detailed... It was not clear at that time, however, whether neutrinos and antineutrinos were different particles, nor was it clear how they could differ.”*

1955 R. Davis, “Attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the ^{37}Cl (antineutrino, electron) ^{37}Ar reaction”: *“... the experiment [at Brookhaven reactor] was not sensitive enough to detect the theoretically computed cross section and therefore conclusions could not be drawn concerning the correctness of beta decay theory, or the identity of neutrinos and antineutrinos”*

1956-1957: Davis usa il flusso di neutrini del reattore di Savannah River e trova che la sezione d’urto del processo risulta di un fattore dieci inferiore al valore teorico calcolato assumendo l’identità neutrino-antineutrino.

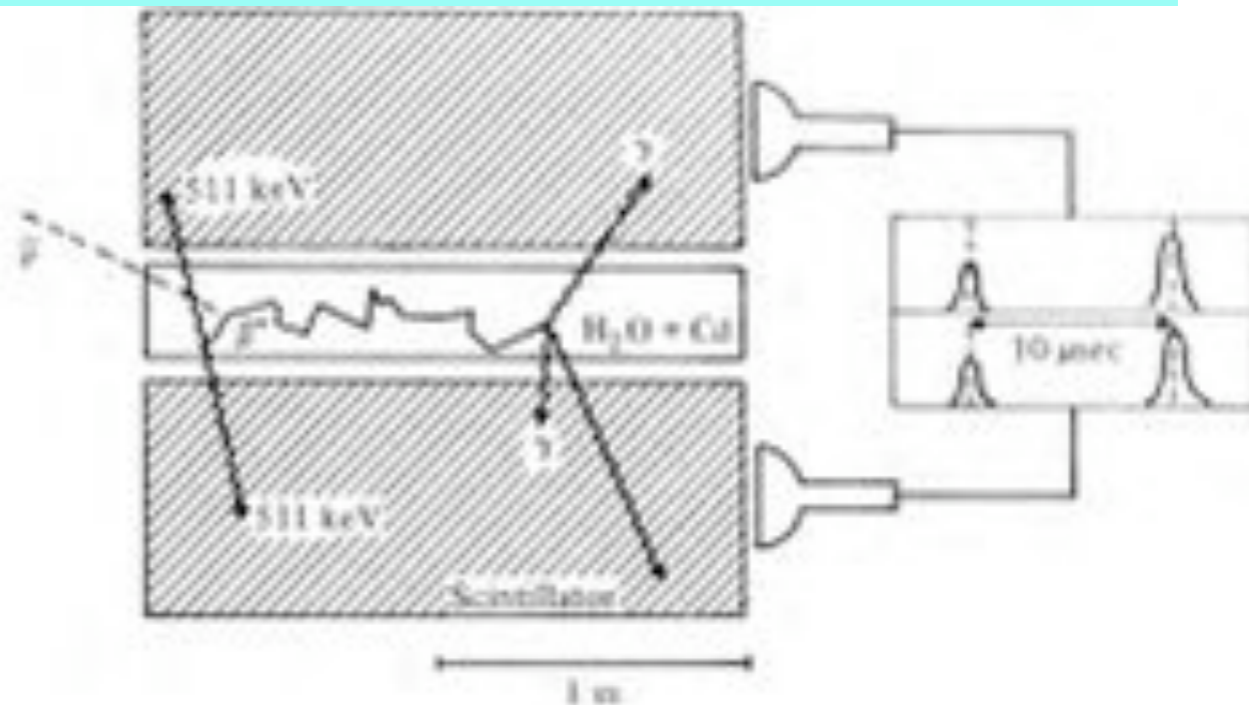
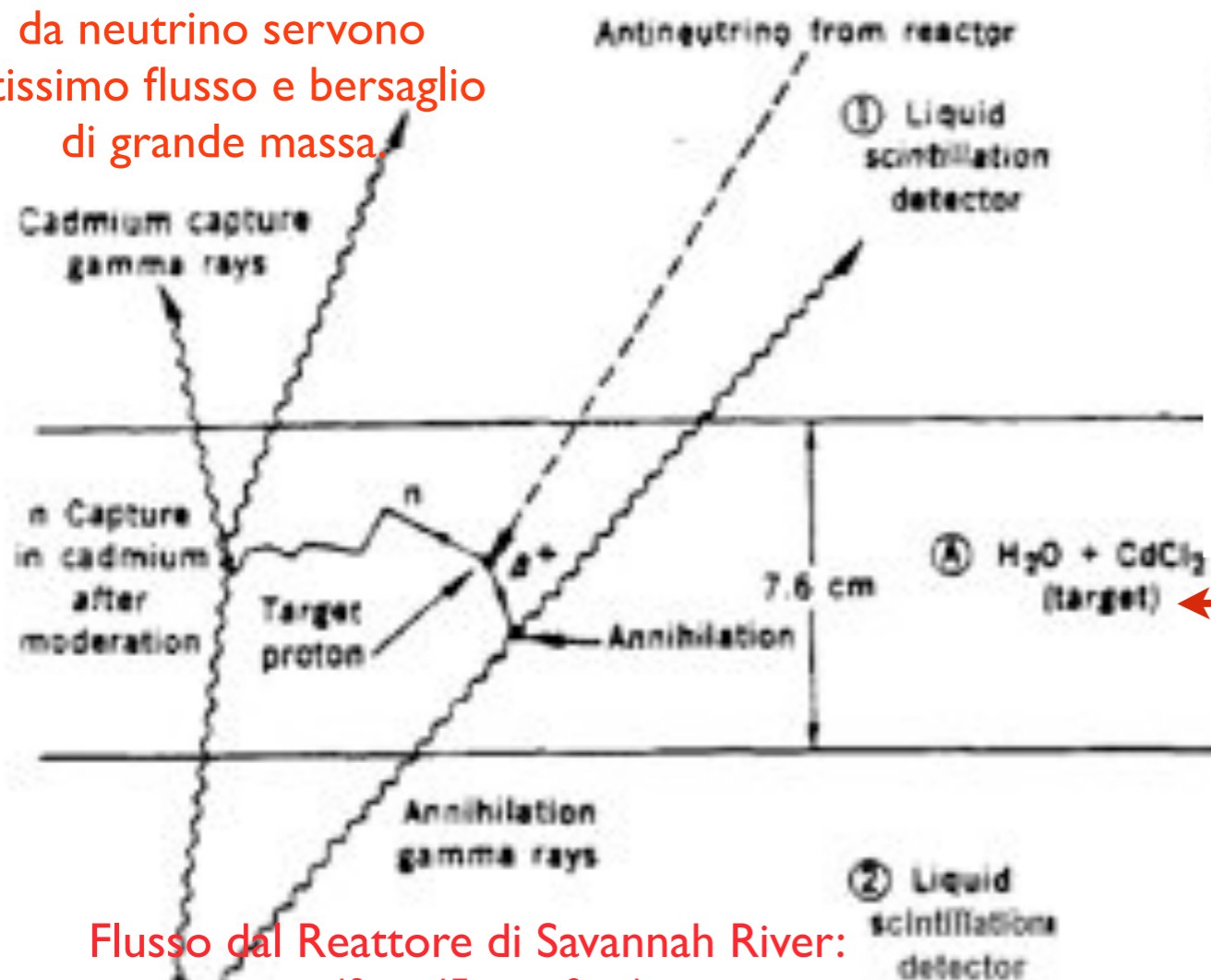
Il neutrino da “poltergeist” a particella



“We chose to focus on this reaction, because of its simplicity.”

Clyde L. Cowan e Frederik Reines

Per osservare interazioni da neutrino servono altissimo flusso e bersaglio di grande massa.



I neutrini vengono catturati dai protoni dell'acqua contenente cloruro di cadmio: i positroni emessi si annichilano con un elettrone producendo simultaneamente due fotoni; il neutrone viene rallentato e catturato dal cadmio con successiva emissione di fotoni (15 μs dopo l'annichilazione). In media rivelavano 3 ± 0.2 eventi in un'ora e fecero girare l'esperimento per 2085 ore prima di poter ritenere di aver osservato il neutrino.

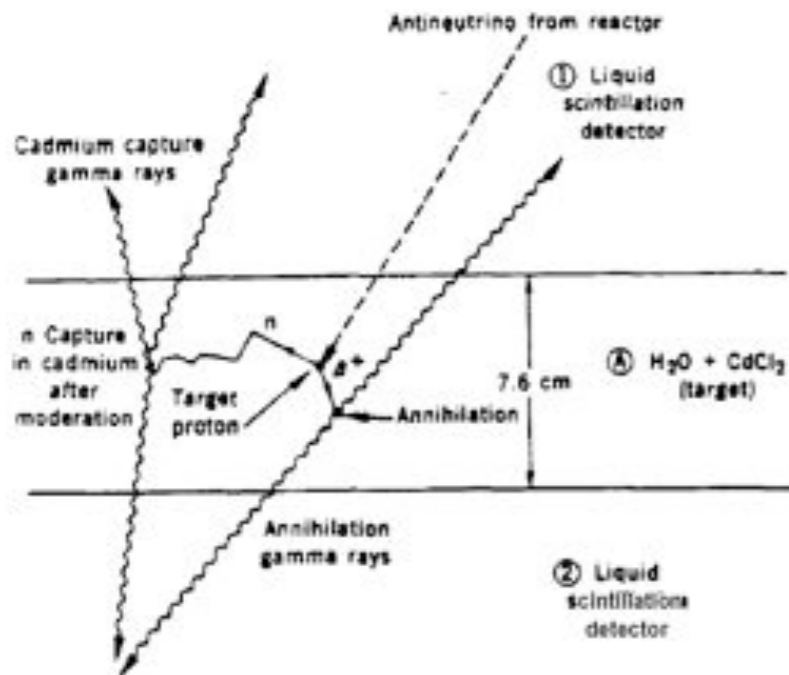
Flusso dal Reattore di Savannah River:
 $10^{13} - 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 1000 litri di acqua + CdCl_2

L'esperimento di Cowan e Reines la misura

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

$e^+ + e^- \rightarrow$ positrone \rightarrow (2 o 3 γ) \rightarrow effetto compton \rightarrow luce dallo scintillatore (tempo caratteristico circa 10^{-9} s)

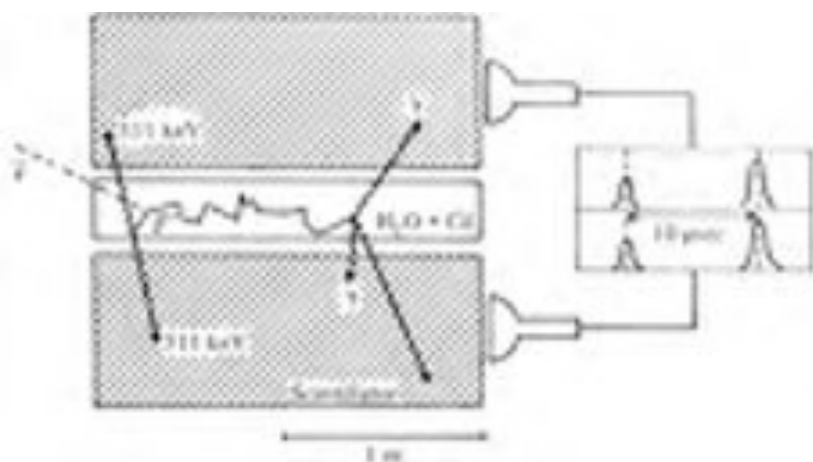
t_0 : coincidenza tra i due scintillatori



Il neutrone viene rallentato dalle collisioni con l'acqua (moderatore) e in un tempo di $\sim 10^{-5}$ s viene catturato dal cadmio e si diseccita emettendo fotoni da ~ 6 MeV. Si ha quindi una coincidenza ritardata rispetto a t_0 tra le coppie di scintillatori.

Le misure danno il seguente risultato per la sezione d'urto del processo:

$$\sigma(\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+) = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-43} \text{ cm}^2$$

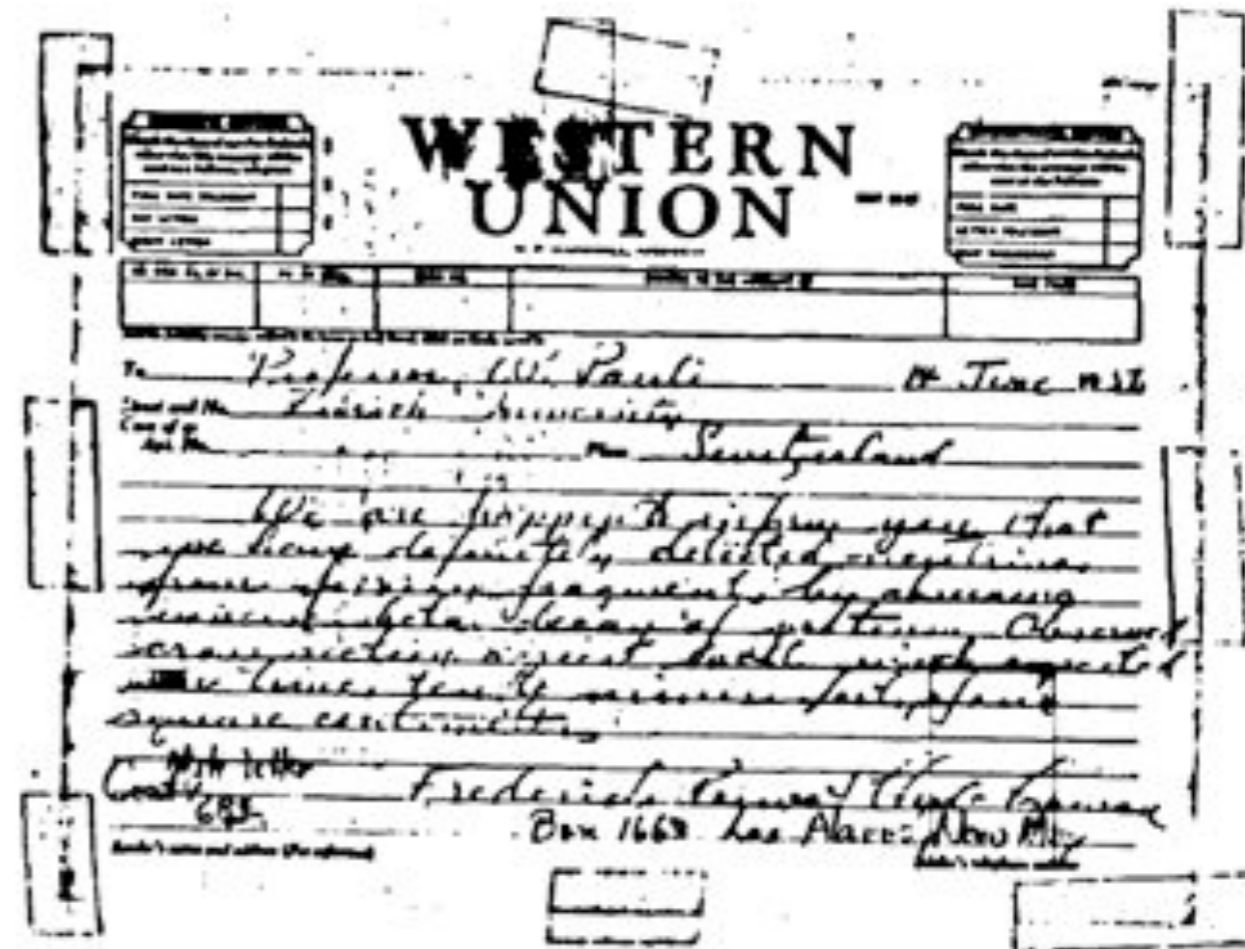


Reazione di Pauli all'esperimento di Cowan e Reines

“The tests were completed and we were convinced...”

“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons.”

**Cowans e Reines a Wolfgang Pauli
(14 giugno 1956)**



Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.

Pauli

Conservazione del numero leptonic

$$\left\{ \begin{array}{ll} \beta^- \text{-decay:} & n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad l(\bar{\nu}_e) = -1; \\ K \text{-capture:} & e^- + p \rightarrow n + \nu_e, \quad l(\nu_e) = +1 \\ \beta^+ \text{-decay:} & p \rightarrow n + e^+ + \nu_e, \quad l(e^+) = -1 \end{array} \right.$$

L'esperimento di Cowans e Reines dimostrava la realtà del neutrino e l'esperimento di Davis era una chiara dimostrazione che questi stessi (anti)neutrini non innescavano la reazione Cloro-Argo: secondo questi esperimenti il neutrino sembrava non coincidere con la sua antiparticella.

In effetti la reazione $\text{neutrino} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow \text{electron} + {}^{37}\text{Ar}$ ipotizzata da Pontecorvo e studiata da Davis usando (anti)-neutrini da reattore è proibita per la conservazione del numero leptonic.

Secondo questa legge di conservazione i decadimenti

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

sono proibiti.

Ma secondo il punto di vista più recente i numeri leptonic L_e e L_μ sono violati a causa delle piccole masse dei neutrini e del mixing. Oggi sappiamo che il processo proposto da Pontecorvo è possibile, seppure fortemente soppresso, se il neutrino è una particella di Majorana e la sua massa è diversa da zero.

Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang $\theta - \tau$ puzzle



The Nobel Prize in Physics 1957

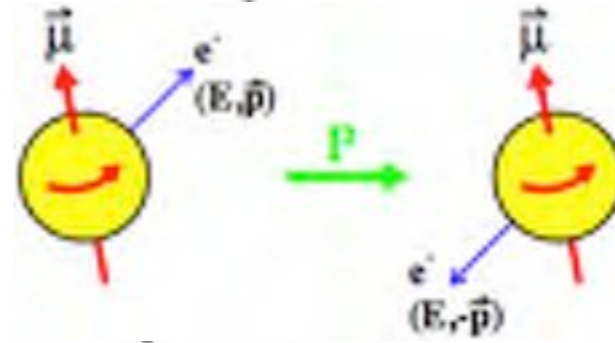
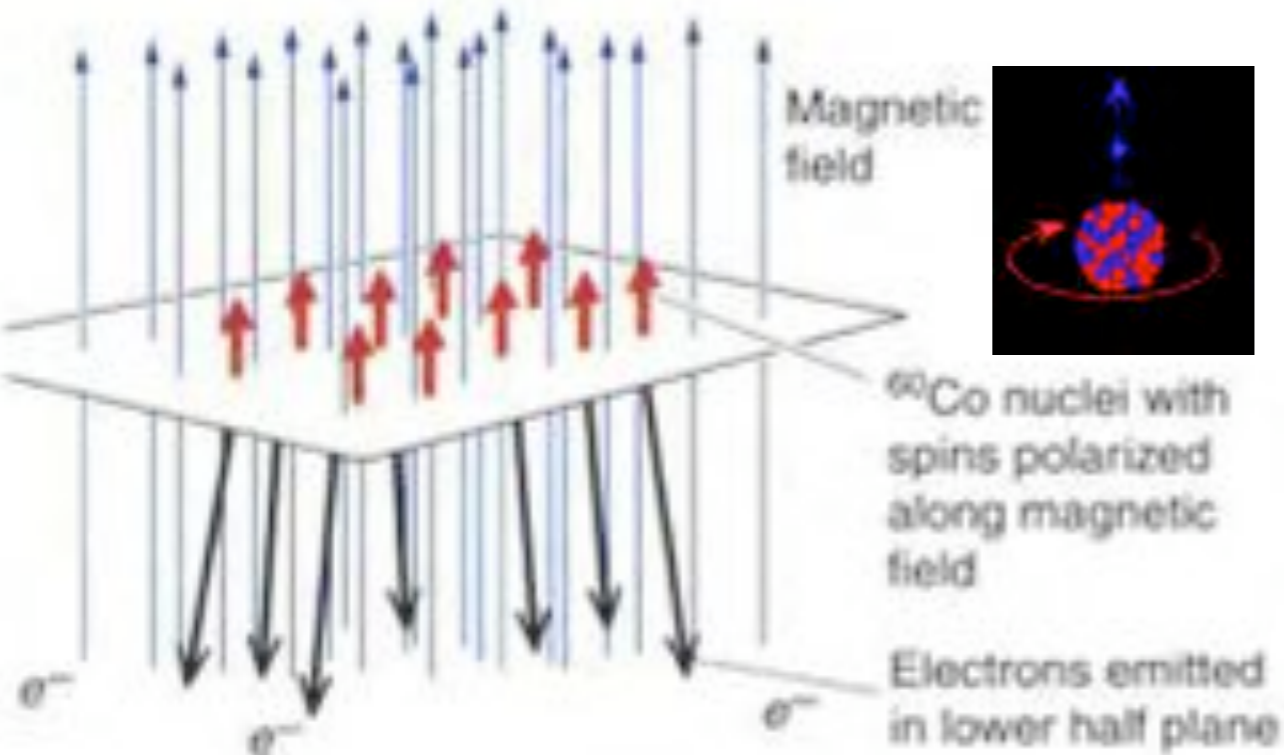
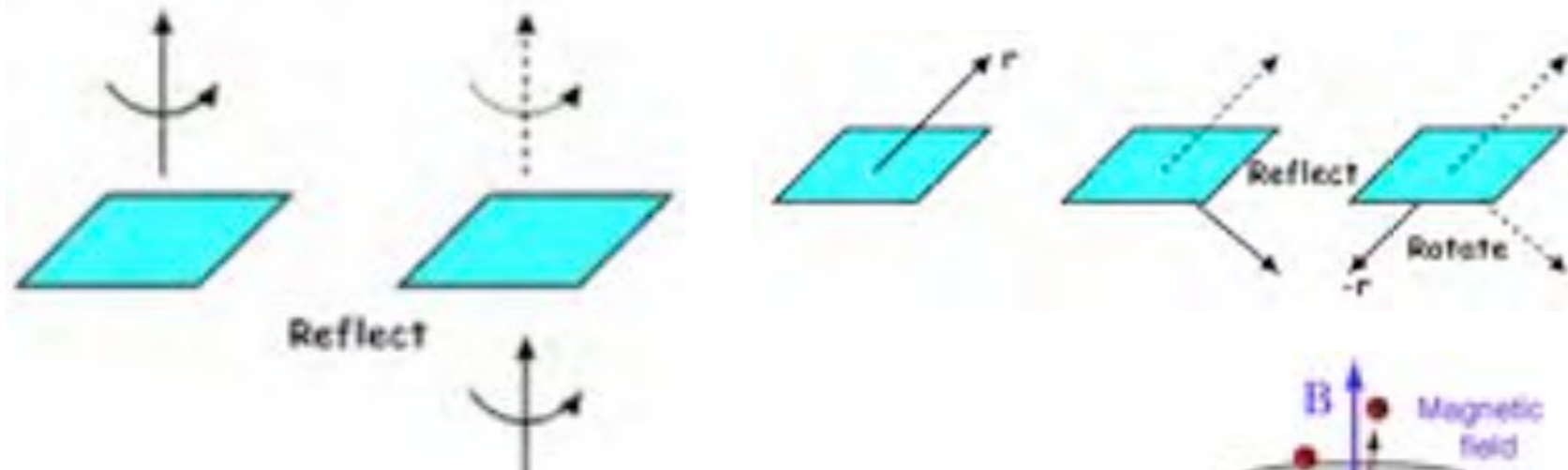
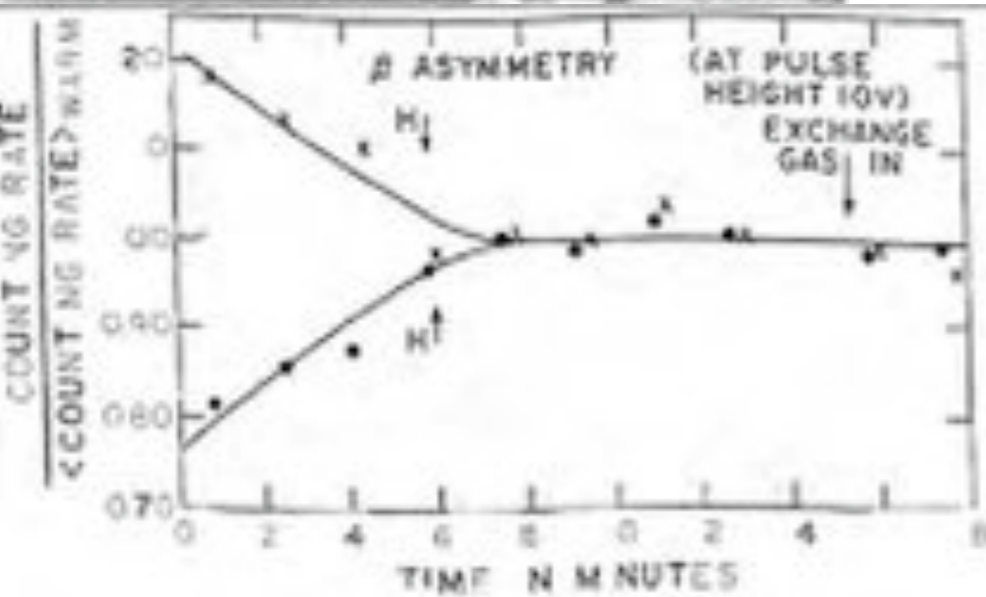
"For their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"



La violazione della parità

Alice through the Looking-glass
 “How would you like to live in Looking-glass House, Kitty?... Perhaps Looking-glass milk isn't good to drink...”

“What is now disproved was once thought self-evident”
 Tsung Dao Lee, 1968.

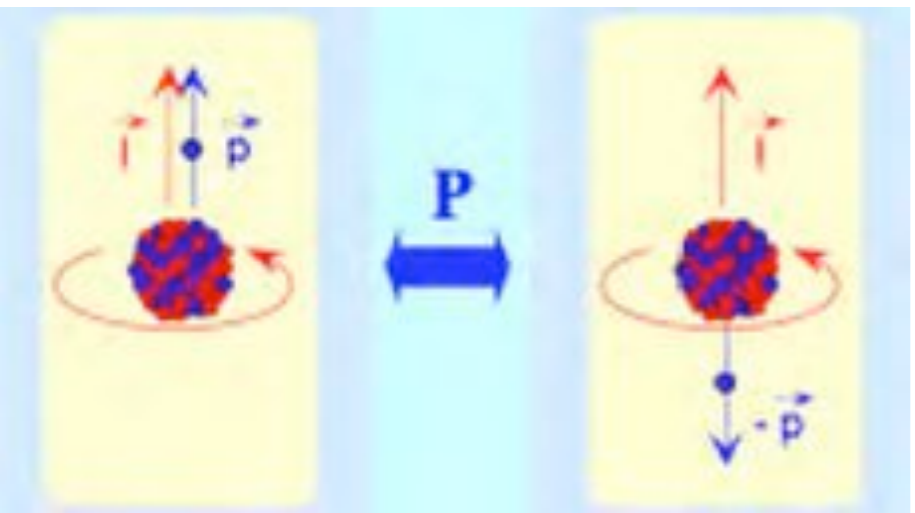
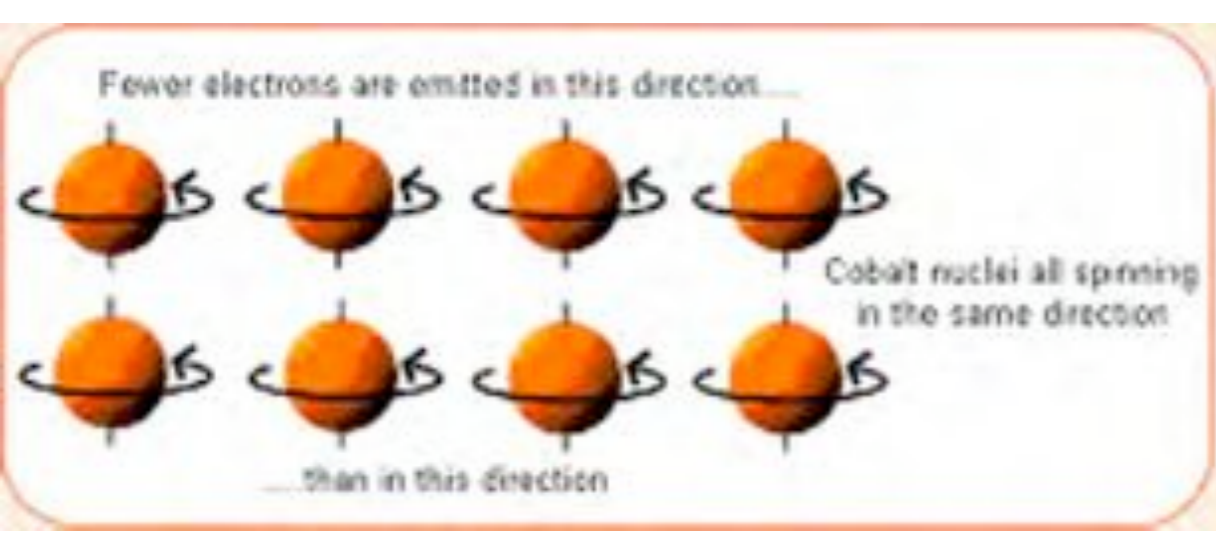


Beta emission is preferentially in the direction opposite the nuclear spin, in violation of conservation of parity.

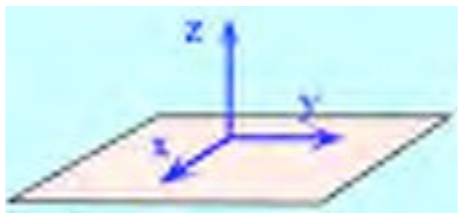
Wu, 1957



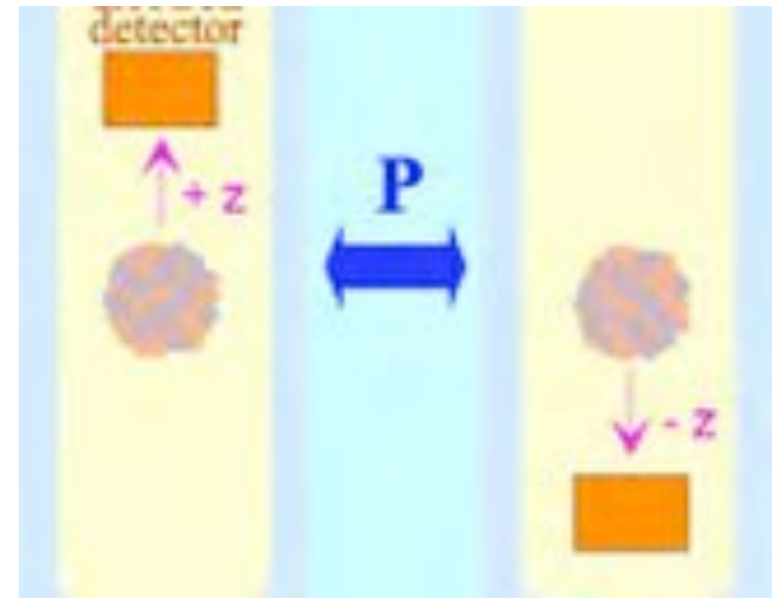
Madame Chien-Shung Wu



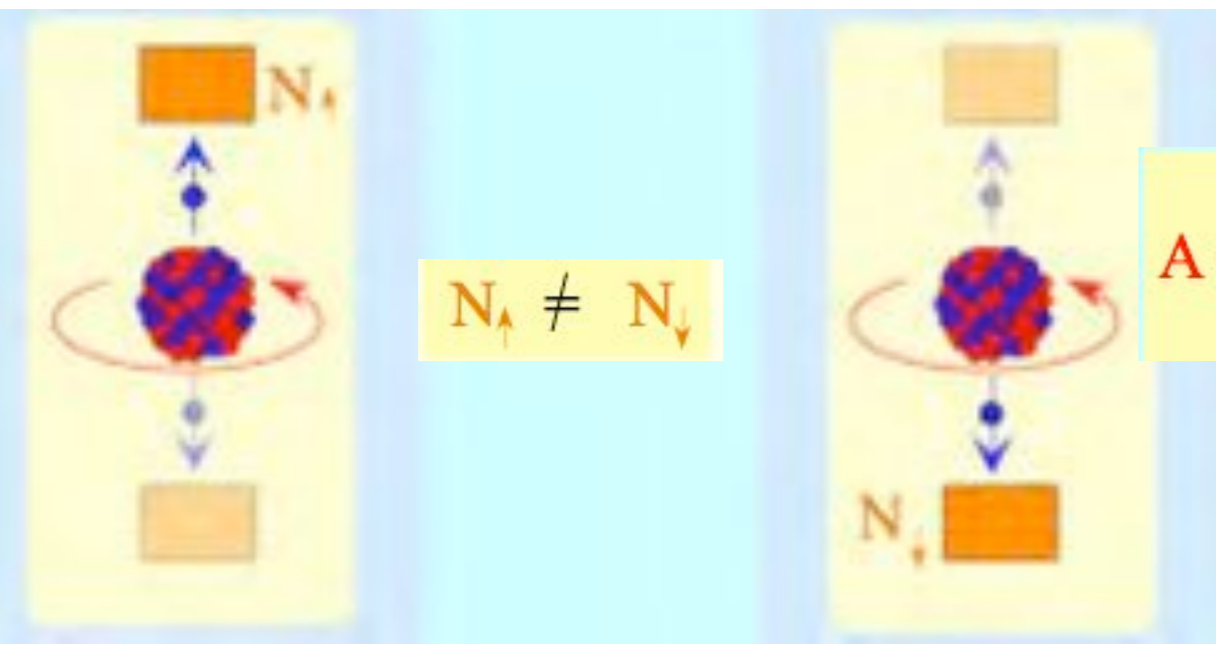
Sistema reale e sistema nello specchio



Piano di riflessione

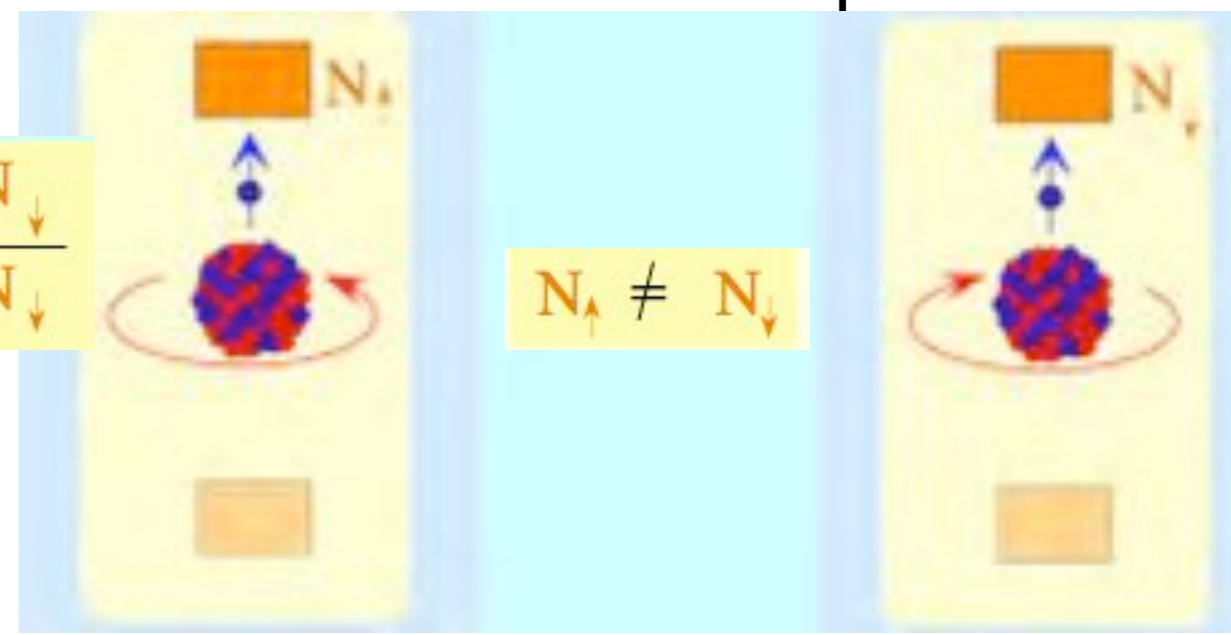


Apparato reale e apparato nello specchio



$$A = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}$$

$A \neq 0$



Ricerca della violazione della parità invertendo sia la chiralità dell'apparato sia la chiralità del sistema e confronto dei due risultati.

Teoria del neutrino a due componenti

In order to demonstrate the idea of a two-component neutrino let us consider the Dirac equation for the field of a neutrino with mass m_ν

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi(x) - m_\nu \psi(x) = 0, \quad (3)$$

From Eq. (3) we have for the left-handed and right-handed components $\psi_L(x)$ and $\psi_R(x)$ two coupled equations

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_L(x) - m_\nu \psi_R(x) = 0, \quad (4)$$

and

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_R(x) - m_\nu \psi_L(x) = 0. \quad (5)$$

Taking into account the bound (2) it looked natural in the fifties that the neutrino mass is equal to zero. This assumption was made by Landau, Lee and Yang and Salam.

For $m_\nu = 0$ we obtain from (4) and (5) two decoupled Weyl equations

$$i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_{L,R}(x) = 0, \quad (6)$$

and in this case the neutrino field can be

$$\psi_L(x) \quad \text{or} \quad \psi_R(x).$$

The authors of the two-component neutrino theory made this choice.

If the neutrino field is $\psi_L(x)$ ($\psi_R(x)$),

1. The general Hamiltonian of the β -decay has the form

$$\mathcal{H}_I = \sum_i G_i (\beta O_i) (\bar{\psi} O_i^{\frac{1}{2}} (1 \mp \gamma_5) \psi) + h.c., \quad (7)$$

where the index i runs over S, V, T, A, P (scalar, vector etc).

Thus, the two-component neutrino theory ensures large violation of parity, as observed in the β -decay.

2. The neutrino helicity is equal to -1 ($+1$) and the antineutrino helicity is equal to $+1$ (-1) in the case of $\psi_L(x)$ ($\psi_R(x)$).

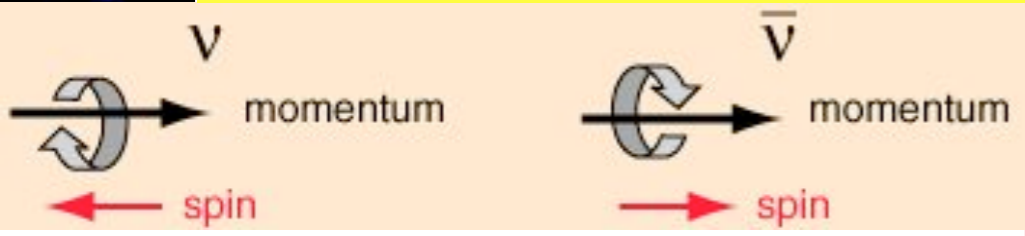
Teoria del neutrino a due componenti.

L'interesse per questa teoria formulata da Hermann Weyl per la coppia elettrone-protone e bollata da Pauli perché violava la parità nasce di nuovo in seguito alle ipotesi di Yang e Lee sulla possibilità di violazione di P. Secondo questa teoria il neutrino poteva avere solo lo spin antiparallelo all'impulso e l'antineutrino parallelo, o vice versa. L'elicità del neutrino implicava un nuovo tipo di violazione della parità. Lo spin rimane invariato per riflessione ma l'impulso cambia in $-p$. Questa teoria richiedeva massa nulla per il neutrino e prevedeva l'asimmetria dei nuclei orientati nel decadimento β .

La teoria del neutrino a due componenti (Landau, Lee e Young, Salam e Touschek) si basava sull'assunzione di massa nulla. Il successo di questa teoria, in perfetto accordo con numerosi esperimenti, fece pensare che effettivamente i neutrini fossero particelle senza massa. Perfino lo Standard Model di Glashow-Weinberg-Salam fu poi costruito sull'assunzione di neutrini senza massa a due componenti.



Il neutrino allo specchio



Chiralità del neutrino = -1 ± 0.3

Un forte supporto alla teoria del neutrino a due componenti venne dall'esperimento di Maurice Goldhaber, Lee Grodzins e Andrew Sunyar che nel 1958 misurarono l'elicità del neutrino con un ingegnoso esperimento (il primo con neutrini da acceleratore). Studiarono cosa accadeva quando un nucleo di europio-152 cattura un elettrone atomico dando origine a un decadimento β inverso e producendo un nucleo instabile di samario-152 e un neutrino. Il samario decade emettendo un raggio γ . Quando il neutrino e il γ vengono emessi valgono le leggi di conservazione dell'impulso e del momento angolare di spin. Misurando la chiralità del γ usando un filtro polarizzato mostrarono che i neutrini sono sempre sinistrorsi. La probabilità di emissione di un neutrino destrorso e di uno destrorso non sono quindi uguali come sarebbe se la parità fosse conservata. Questo risultato implica che i neutrini abbiano massa esattamente nulla. Se non fosse così, secondo la relatività speciale una particella con massa non potrebbe viaggiare alla velocità della luce. In linea di principio, un osservatore in moto alla velocità della luce vedrebbe il neutrino muoversi in direzione opposta. Così che per tale osservatore il neutrino con massa apparirebbe destrorso. Poiché i neutrini destrorsi non erano stati osservati, i fisici per il momento si tennero all'ipotesi di neutrini senza massa.

Pion Decay: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$

Some pions stop in the "skin" of the primary production target. They have zero linear momentum and zero angular momentum.

Conservation of Linear Momentum: The μ^- is emitted with momentum equal & opposite to that of the ν_μ .

Conservation of Angular Momentum: μ^- & ν_μ have equal & opposite spin.

Weak Interaction: Only "left-handed" ν_μ are created.

Thus the emerging ν_μ has its spin pointing antiparallel to its momentum direction.

Neutrino (with spin)

Initial source, europium-152m (no spin)

Recoiling excited nucleus of samarium-152 (with spin)

Gamma-ray emitted by recoiling nucleus (with spin)

Magnetized iron to allow through gamma-rays polarised (spinning) in only one direction

$e^- + \text{Eu} \rightarrow \nu_e + \text{Sm}^*$

$\text{Sm}^* \rightarrow \text{Sm} + \gamma$

Samarium reflector to pick off the highest energy gamma-rays only

Detector

La teoria V–A

La dimostrazione sperimentale della non conservazione di P, la forte evidenza sperimentale per la teoria a due componenti + la conservazione dei leptoni portò alla conclusione che l'interazione debole responsabile del decadimento del muone doveva essere una combinazione di V–A. Nel 1958 Sudarshan e Marshak insieme a Feynman e Gall-Mann e a J. J. Sakurai conclusero che l'unico possibile candidato per una Interazione universale di Fermi era una combinazione lineare di interazione vettoriale (V) e assiale (A). La corrente vettoriale, analogamente al caso dell'interazione elettromagnetica, si conserva. In analogia con l'interazione elettromagnetica, Fermi aveva postulato per la forma dell'interazione debole uno scalare prodotto da due 4-Vettori. Gamow e Teller trovarono che l'interazione doveva essere generalizzata per includere interazioni dipendenti dallo spin (interazioni tra correnti assiali). Ma per tener conto della relatività speciale è necessario considerare tutte le cinque interazioni scalari corrispondenti ai cinque operatori covarianti. La forma più generale della lagrangiana dell'interazione doveva quindi essere:

$$L_i = \sum_{i=1}^5 g_i \{ \bar{\psi}_1 O_i \psi_2 \} \{ \bar{\psi}_3 O_i \psi_4 \}$$

O_i	Matrix element	Type of interaction
1	$\bar{\psi}\psi$	scalar
γ_μ	$\bar{\psi}\gamma_\mu\psi$	vector (Fermi)
$\sigma_{\mu\nu} (= \gamma_\mu\gamma_\nu) \cdot$	$\bar{\psi}\sigma_{\mu\nu}\psi$	tensor (Gamow-Teller)
$i\gamma_\mu\gamma_5 (= \gamma_\nu\gamma_\rho\gamma_\sigma)$	$i\bar{\psi}\gamma_\mu\gamma_5\psi$	axial vector (Gamow-Teller)
$\gamma_5 (= \gamma_\mu\gamma_\nu\gamma_\rho\gamma_\sigma)$	$\bar{\psi}\gamma_5\psi$	pseudoscalar

Alla fine degli anni '50 la teoria di Fermi risultava più che consolidata: dalle sue prime previsioni della forma dello spettro di energia del decadimento β e della dipendenza della vita media del nucleo radiattivo dall'energia rilasciata nel decadimento, fino alla sua abilità nell'incorporare la non conservazione della parità. Il suo successo era stato confermato dalla rivelazione dell'interazione di un neutrino libero con la materia. Il neutrino assumeva definitivamente lo status di particella.

B. Pontecorvo, "Electron and Muon Neutrinos" 1959. In questo lavoro viene discusso in dettaglio per la prima volta il problema dell'identità tra ν_μ e ν_e attraverso una lista di 21 reazioni prodotte da neutrini o antineutrini, indicando con chiarezza le reazioni proibite se $\nu_\mu \neq \nu_e$

"The question whether ν_μ and ν_e are identical particles is open..."

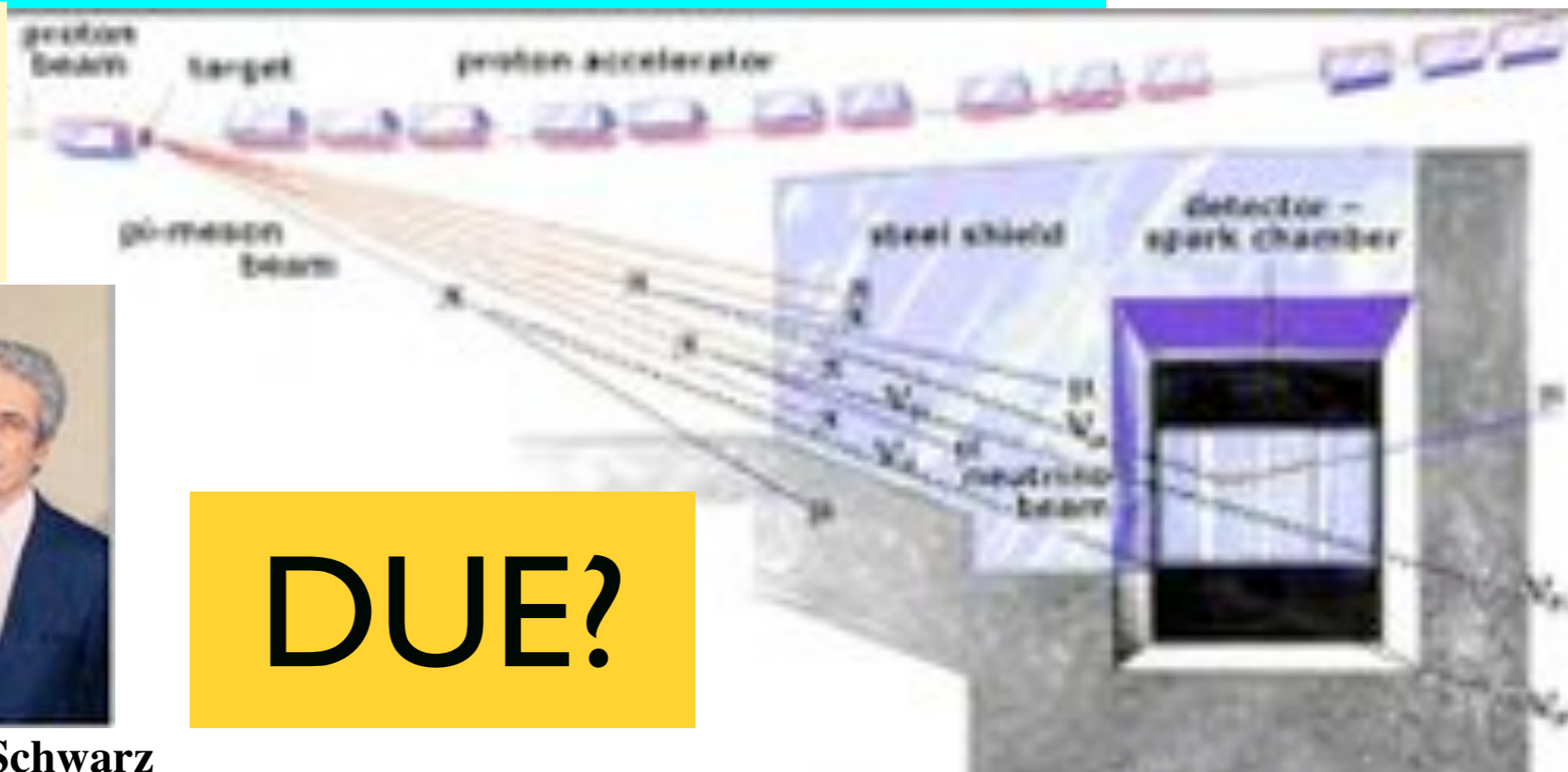
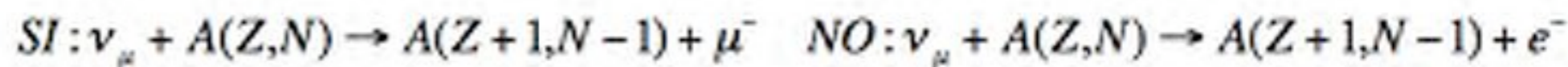
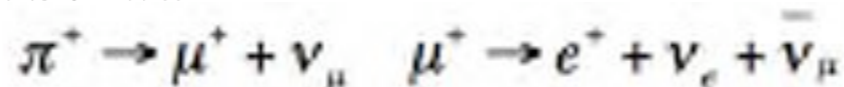
"There are no reasons for asserting that ν_μ and ν_e are identical particles."



L. Lederman, J. Steinberger, M. Schwarz

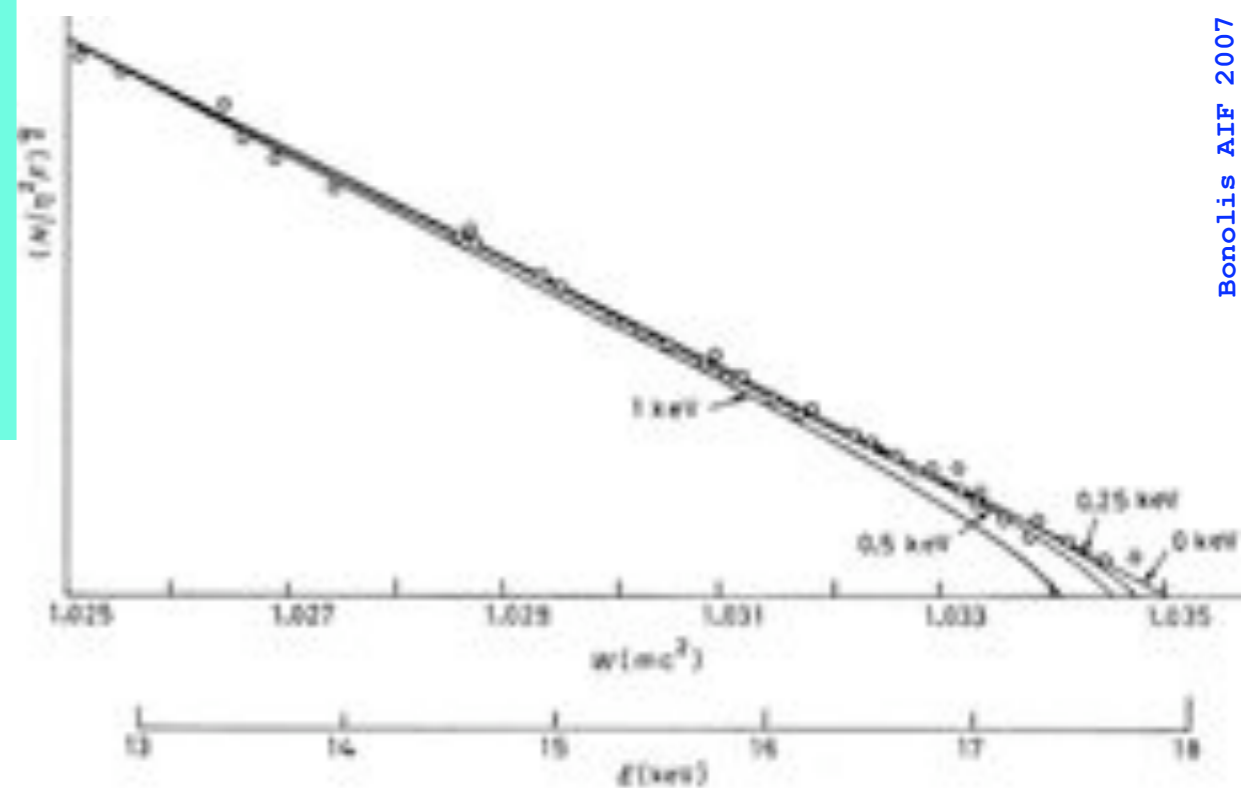
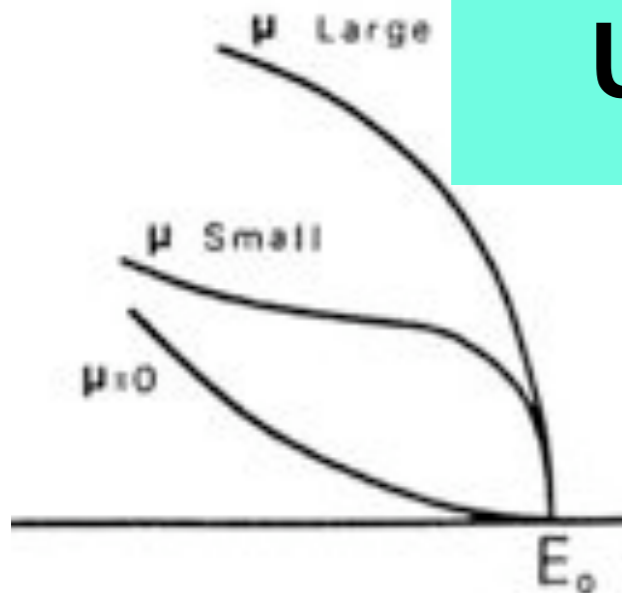
$$\nu_\mu \neq \nu_e$$

Brookhaven 1962, Nobel 1988



DUE?

Il neutrino ha una massa?



$$\frac{dN}{dE_e} \propto \sqrt{E_0^2 - m_\nu^2} E_e (E_0 - E_e)^2$$

Pauli - Neutrino con massa inferiore a quella dell'elettrone.

Fermi e Perrin - Propongono di misurare la massa basandosi sulla forma della testa dello spettro dovuta all'emissione di neutrini di bassa energia (alta energia degli elettroni).

Kurie plot - inventato da Kurie nel 1936. Funzione che linearizza lo spettro e taglia l'asse verticalmente a $E = E_0 - m_\nu c^2$. Se la massa del neutrino è nulla la cosiddetta funzione di Kurie risulta lineare rispetto all'energia dell'elettrone emesso. Lo spettro del decadimento β può essere utilizzato per la determinazione della massa della nuova particella (piccola!).

Difficoltà dovute alla scarsa statistica alla fine dello spettro. Si può estrapolare fino a intersecare l'asse. I risultati erano compatibili con una massa a riposo nulla, nonostante il limite relativamente alto trovato, che all'epoca non era considerato una seria indicazione contro la ipotesi comunemente accettata di $m_\nu = 0$

Metodo del decadimento del tritio negli anni 40 si trova come limite superiore $m_\nu \leq 500 \text{ eV} \cong 10^{-3} m_e$.

Migliorando la tecnica si arrivò a $m_\nu \leq 200 \text{ eV} \cong 4 \cdot 10^{-4} m_e$ all'epoca della *parity violation* (1956-57).

Pontecorvo e la massa del neutrino

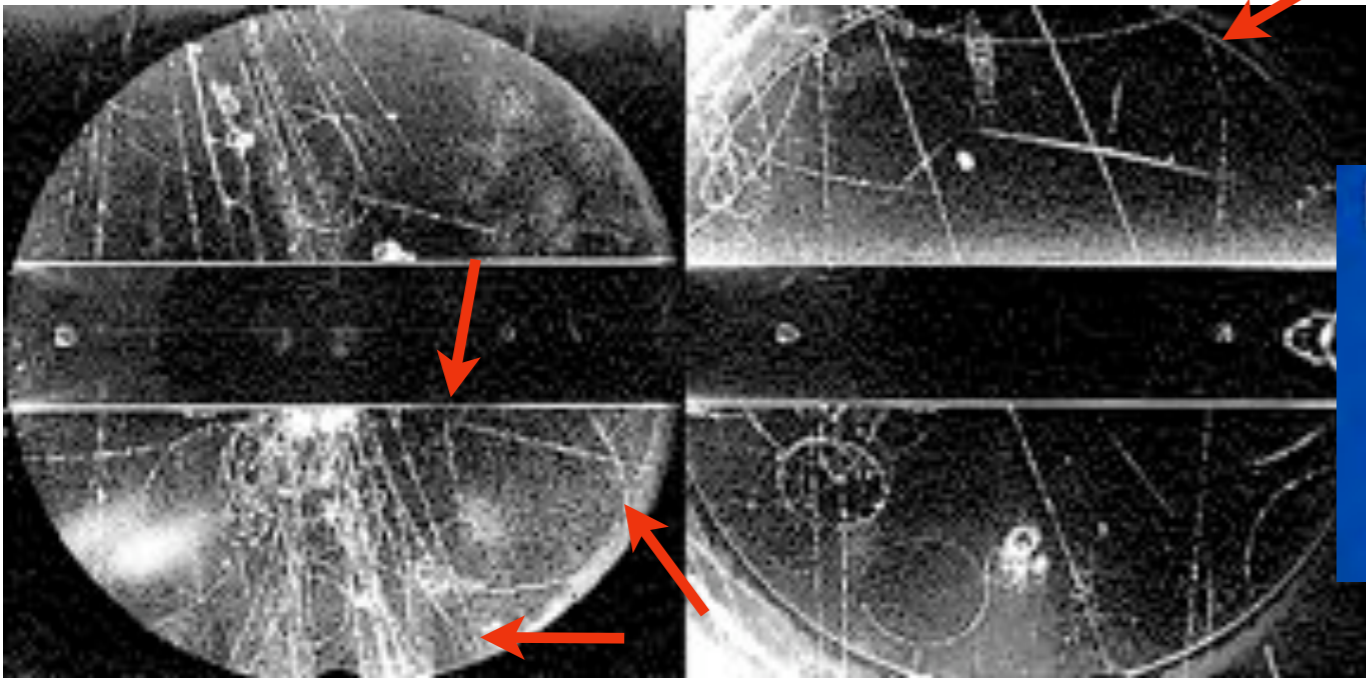


Bruno Pontecorvo

Nel 1956, Pontecorvo avanza l'ipotesi di oscillazioni **neutrino**↔**antineutrino** (primo esperimento di Davis). Nel 1956-57 Pontecorvo considerò la possibilità di una massa piccola ma diversa da zero. Il fotone, unica particella a massa zero, è giustificata dalla invarianza di gauge della QED. Nel caso del neutrino, diceva Pontecorvo, non vale questo principio (Inverse β -Processes and non-conservation of lepton charge) e mostrò che gli stati dei neutrini prodotti nei processi deboli sono la sovrapposizione di stati di neutrini con piccole masse, simili alle ben note oscillazioni dei K.

La teoria V-A di Feynman Gell-Mann, Marshak e Sudarshan (1958) usa una Hamiltoniana con componenti left-handed, ma la violazione non è connessa con proprietà particolari dei neutrini. Si comincia a pensare che il neutrino abbia massa diversa da zero come gli altri fermioni.

Le particelle strane



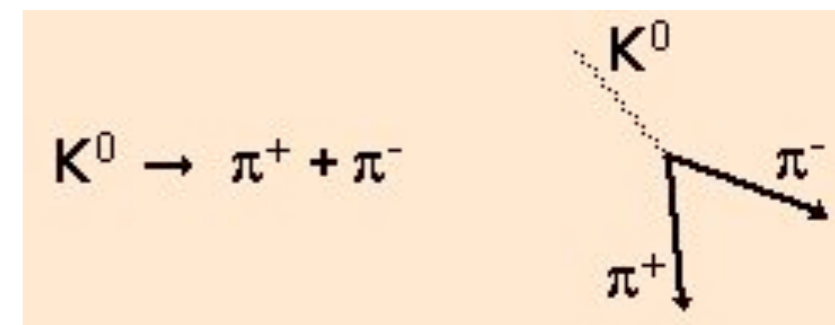
Massa delle V	$\approx 1000 m_e$
Massa del pione	$273 m_e$
Massa del muone	$207 m_e$
Massa del protone	$1840 m_e$

G. Rochester e C. Butler
15 ottobre 1946 e 23 maggio 1947

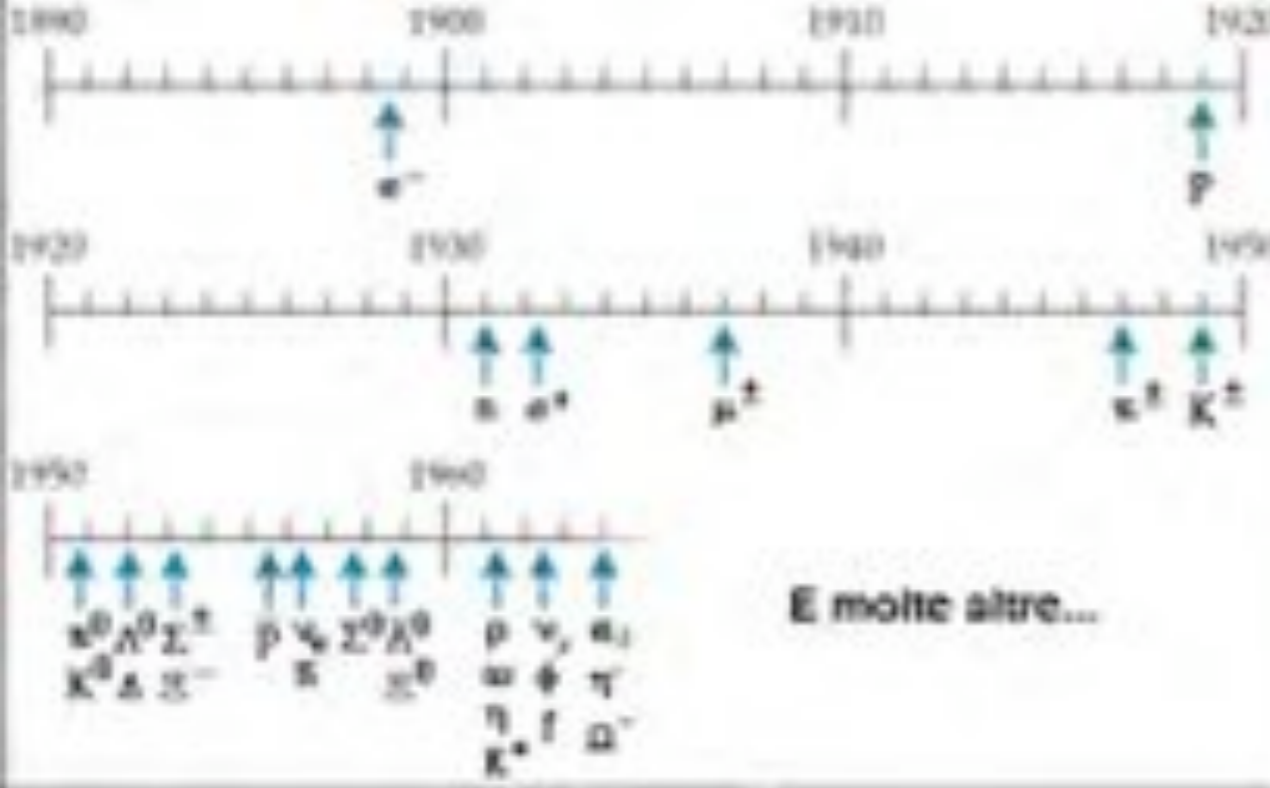
Si veda A. Russo: <http://www.lfns.it/STORIA/Materiali%20Scuole/Index.php>

B. Rossi, 1953

Le emulsioni nucleari e le camere a nebbia esposte ai raggi cosmici rivelarono che la traccia a forma di V nascondeva un intero universo di nuove particelle: quattro nuovi mesoni che furono indicati con K, due dei quali neutri (K^0 e \bar{K}^0) e due carichi (K^- e K^+) e sette barioni, che vennero chiamati iperoni. Queste particelle furono chiamate strane perché prodotte dall'interazione dei raggi cosmici con i nuclei con sezioni d'urto tipiche delle interazioni forti (tempi dell'ordine di 10^{-23} s),



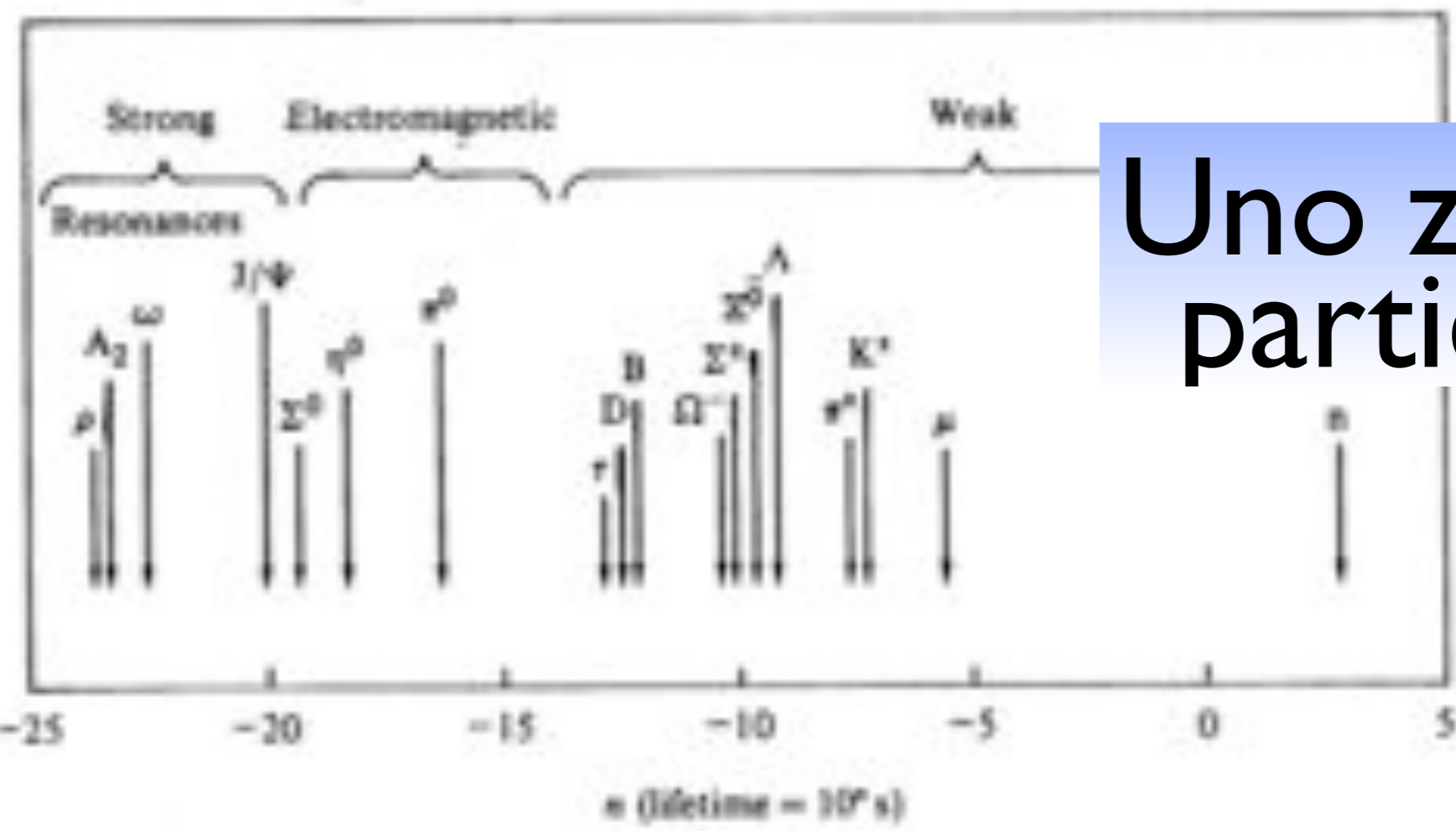
ma decadevano con vite medie tipiche dell'interazione debole $10^{-10} \div 10^{-8}$ s. Inoltre si osservava la "produzione associata di particelle strane. Per classificare i kaoni e gli iperoni Murray Gell-Mann e Kazuhiko Nishijima introdussero nel 1955 un nuovo numero quantico, la *stranezza*, in base al quale il processo $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$ è proibito, mentre il processo $n + p \rightarrow \Lambda + p$ è permesso. Infatti nucleoni e pioni hanno $S=0$, K^0 ha $S=1$ e Λ ha $S=-1$. Nella produzione (interazione forte) la stranezza si conserva, nel decadimento (interazione debole) la stranezza non si conserva, ma varia di 1: $|\Delta S| = 1$



Nel 1964 Gell-Mann e Zweig formularono l'ipotesi che il protone, il neutrone, i pioni, le particelle strane e tutti gli altri adroni fossero stati legati di quark, particelle con spin 1/2 carica elettrica 2/3 o -1/3, e numero barionico uguale a 1/3. Se queste particelle non sono *elementari* l'interazione debole è un'interazione tra leptoni, neutrini e *quark*. Tutte queste particelle venivano spiegate in termini di combinazioni dei più fondamentali quark, u, d, s e dei loro antiquark.

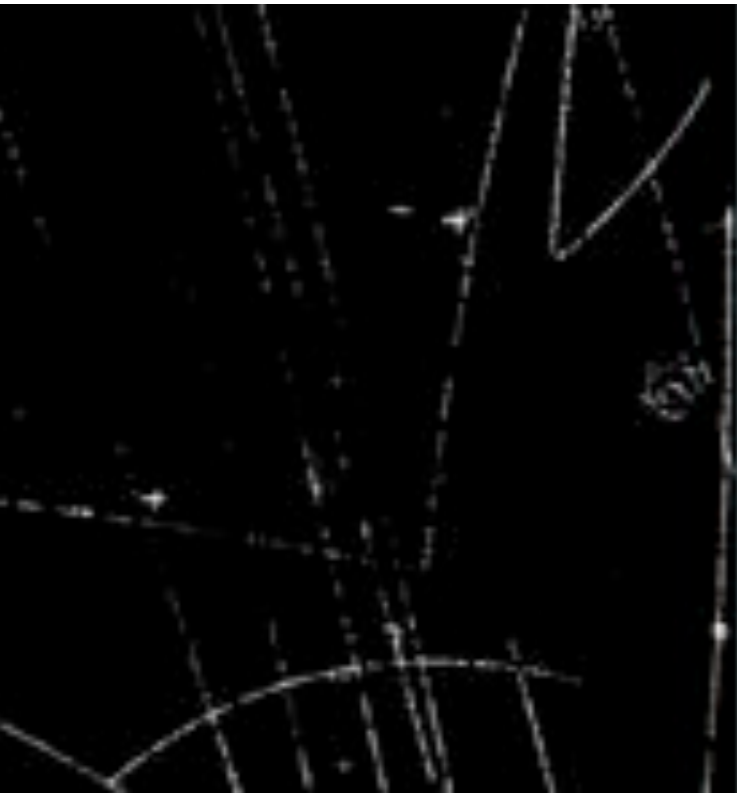
La simmetria tra quark e leptoni verrà ristabilita con la scoperta del quark *charm* (GIM 1970) nel 1974, del terzo leptone tau nel 1975 e del quarto quark, *bottom*, nel 1978.

Particelle che decadono secondo l'interazione debole: vite medie "lunghe" e piccole sezioni d'urto.

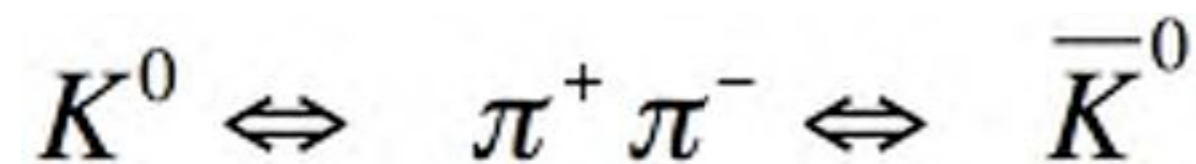


Uno zoo di particelle

Produzione associata dei K neutri



Una conseguenza dello schema di produzione e decadimento è rappresentato dall'esistenza di una coppia particella-antiparticella ben diversa dal neutrone e dall'antineutrone, per cui la conversione neutrone \leftrightarrow antineutrone è proibita dalla conservazione del numero barionico. I K^0 e gli anti- K^0 , che hanno rispettivamente *stranezza* $+1$ e -1 , sono particelle distinte e possono trasformarsi l'uno nell'altro attraverso l'interazione debole che *non conserva la stranezza*.



Se, come osservato, i K^0 e gli anti- K^0 , possono decadere in una coppia di pioni carichi, come sappiamo quale delle due è all'origine del processo di decadimento? In realtà ciò che osserviamo è il mixing di due stati. In questo modo è comparsa nella meccanica quantistica il fenomeno dell'interferenza tra stati caratterizzati da una massa leggermente diversa. Le due particelle K^0_L e K^0_S (vita media definita) sono sovrapposizioni dei K^0 e degli anti- K^0 (massa definita) e viceversa. I K^0_L e K^0_S hanno rispettivamente vita media diversa e modalità di decadimento diverse (Gell-Mann e Pais, 1955).

Il fenomeno del mixing aveva come conseguenza che i K^0_S decadono più rapidamente; i K^0_L rimasti interagiscono con la materia *rigenerando* i K^0_S (Pais e Piccioni).

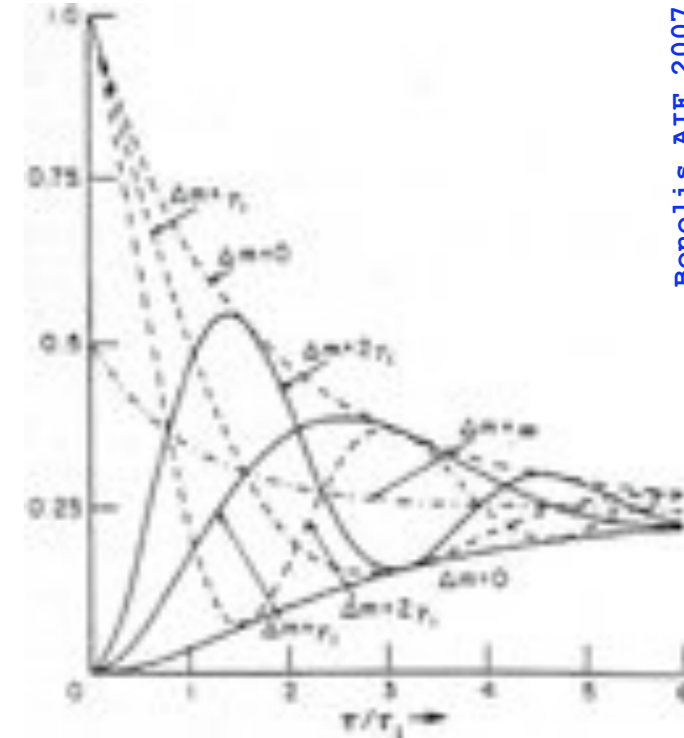
$$|K_S\rangle = \frac{1}{[2(1+|\epsilon|^2)]^{1/2}} [(1+\epsilon)|K^0\rangle + (1-\epsilon)|\bar{K}^0\rangle]$$

$$|K_L\rangle = \frac{1}{[2(1+|\epsilon|^2)]^{1/2}} [(1+\epsilon)|K^0\rangle - (1-\epsilon)|\bar{K}^0\rangle]$$



Oscillazioni

Seconda conseguenza del fenomeno del mixing dei mesoni K neutri: la previsione di interferenza e oscillazioni per i K^0_L e i K^0_S . La probabilità di trovare un K^0 o un anti- K^0 in un fascio costituito inizialmente da soli K^0 varia nel tempo, a seconda dei valori della differenza di massa $K^0_L - K^0_S$, da cui dipende la frequenza delle oscillazioni.



Ispirato dal lavoro di Gell-Mann e Pais, Bruno Pontecorvo considerò la possibilità del mixing quantomeccanico nel caso di un'altra particella neutra, il neutrino. Nel 1957, quando ancora si conosceva soltanto il neutrino elettronico, suggerì la possibilità di oscillazioni *neutrino* ↔ *antineutrino*. Questa transizione

" The flux of neutral leptons consisting mainly of antineutrino when emitted from a reactor will consist at some distance R from the reactor of half neutrinos and half antineutrinos. "

può avvenire se il numero leptonico del neutrino non si conserva: "This means that the neutrino and antineutrino are *mixed* particles, i.e. a symmetric and antisymmetric combination of two truly neutral Majorana particles ν_1 and ν_2 ." (B.P. 1958)

" It will be extremely interesting to perform C.L. Cowan and F. Reines experiment at different distances from reactor. "

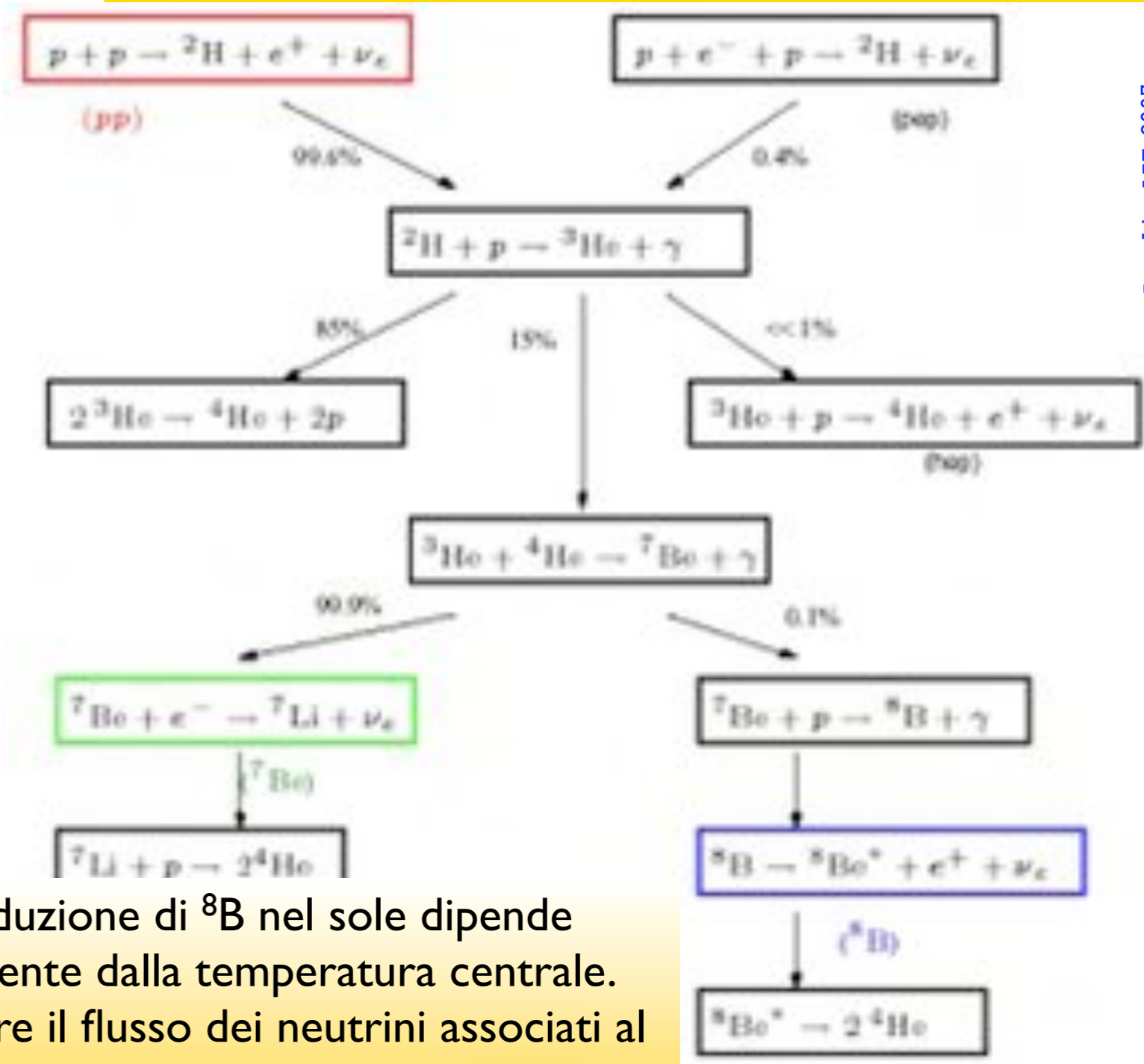
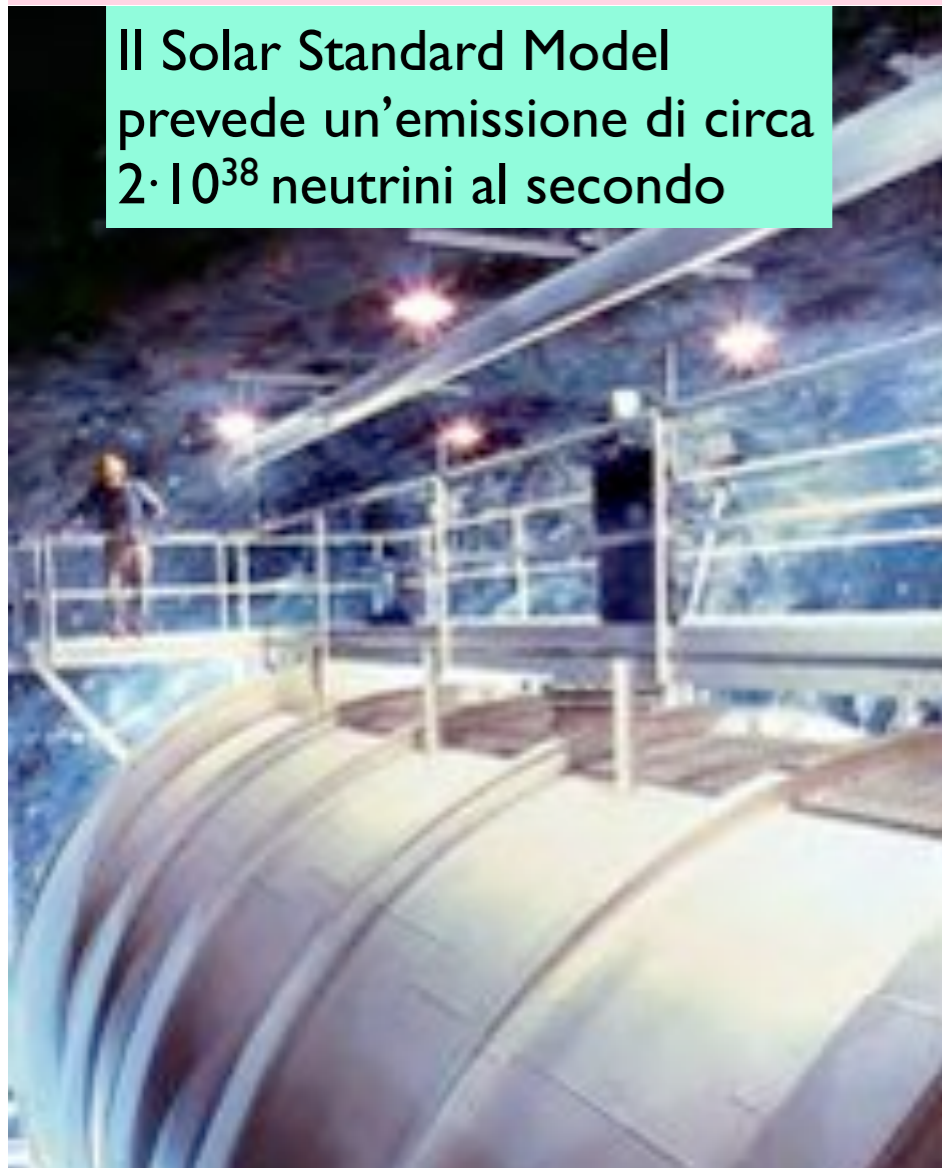
Oscillazioni tra due diverse specie di neutrino furono poi proposte da Maki, Nakagawa e Sakata nel 1962 e da altri più tardi.

Nel 1967 ("Neutrino Experiments and the Question of Leptonic-Charge Conservation", 60mo compleanno di G. Bernardini) Pontecorvo formulò la previsione che le oscillazioni di neutrino avrebbero avuto l'effetto di ridurre a metà il flusso di neutrini proveniente dal sole rispetto a quello aspettato.

“Vedere l'interno del sole” a 1500 metri sotto terra

1963 - Raymond Davis e John Bahcall propongono un esperimento per rivelare i neutrini provenienti dal sole: “Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars”.

Il Solar Standard Model prevede un'emissione di circa $2 \cdot 10^{38}$ neutrini al secondo



La produzione di ^8B nel sole dipende fortemente dalla temperatura centrale. Misurare il flusso dei neutrini associati al suo decadimento permette una accurata valutazione di tale temperatura.

Serbatoio contenente circa 380.000 litri di C_2Cl_4 , lungo circa 15 m con un diametro di circa 6 m. In 2 mesi vengono estratti circa 16 atomi di argon.

Il problema dei neutrini solari

GALLEX

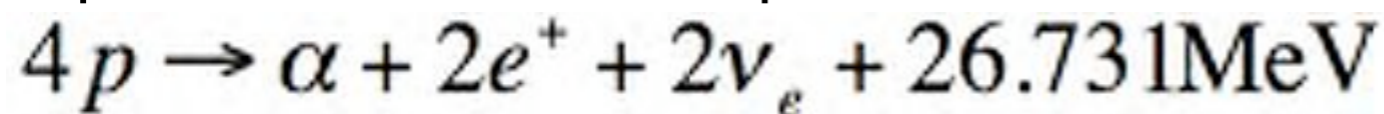
SAGE

Super-Kamiokande

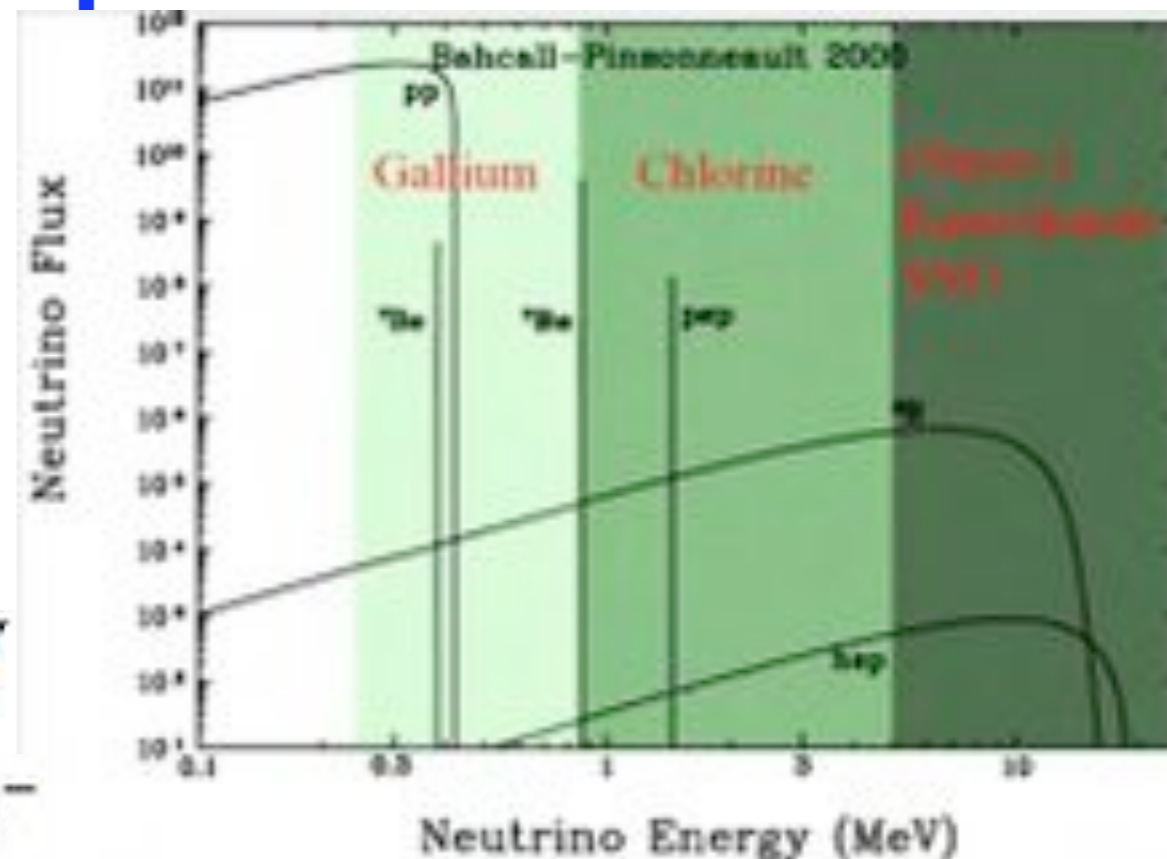
Le seguenti asserzioni risultavano possibili:

- 1 - L'esperimento di Davis è sbagliato
- 2 - Il modello solare è sbagliato
- 3 - La fisica nucleare è sbagliata
- 4 - La fisica delle particelle è sbagliata

Necessità di riprodurre l'esperimento osservando i neutrini provenienti dalla reazione primaria

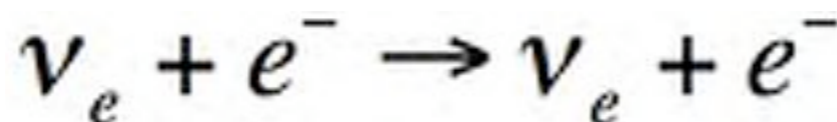


attraverso la reazione $\nu_e + Ga^{71} \rightarrow Ge^{71} + e^-$



Gallex al Gran Sasso e SAGE (Soviet-American-Gallium-Experiment) nel Caucaso trovarono ugualmente un deficit nel flusso di neutrini solari se comparato alle previsioni del modello solare, che nel frattempo era ulteriormente migliorato.

Il grande rivelatore Čerenkov di Super-Kamiokande in Giappone diventò operativo. Determinando anche la direzione di incidenza osservò i neutrini solari attraverso la reazione elastica

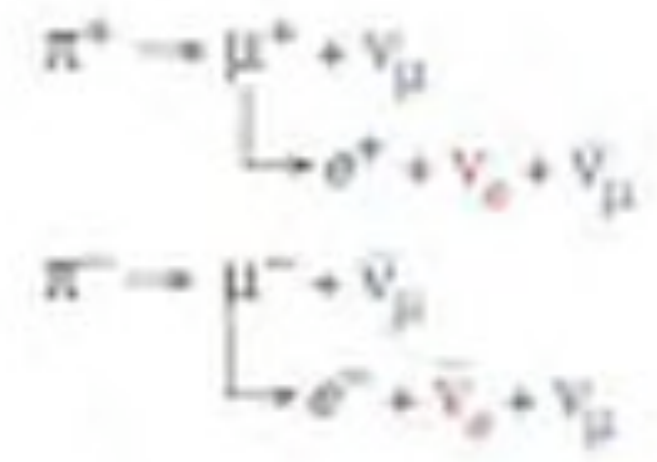
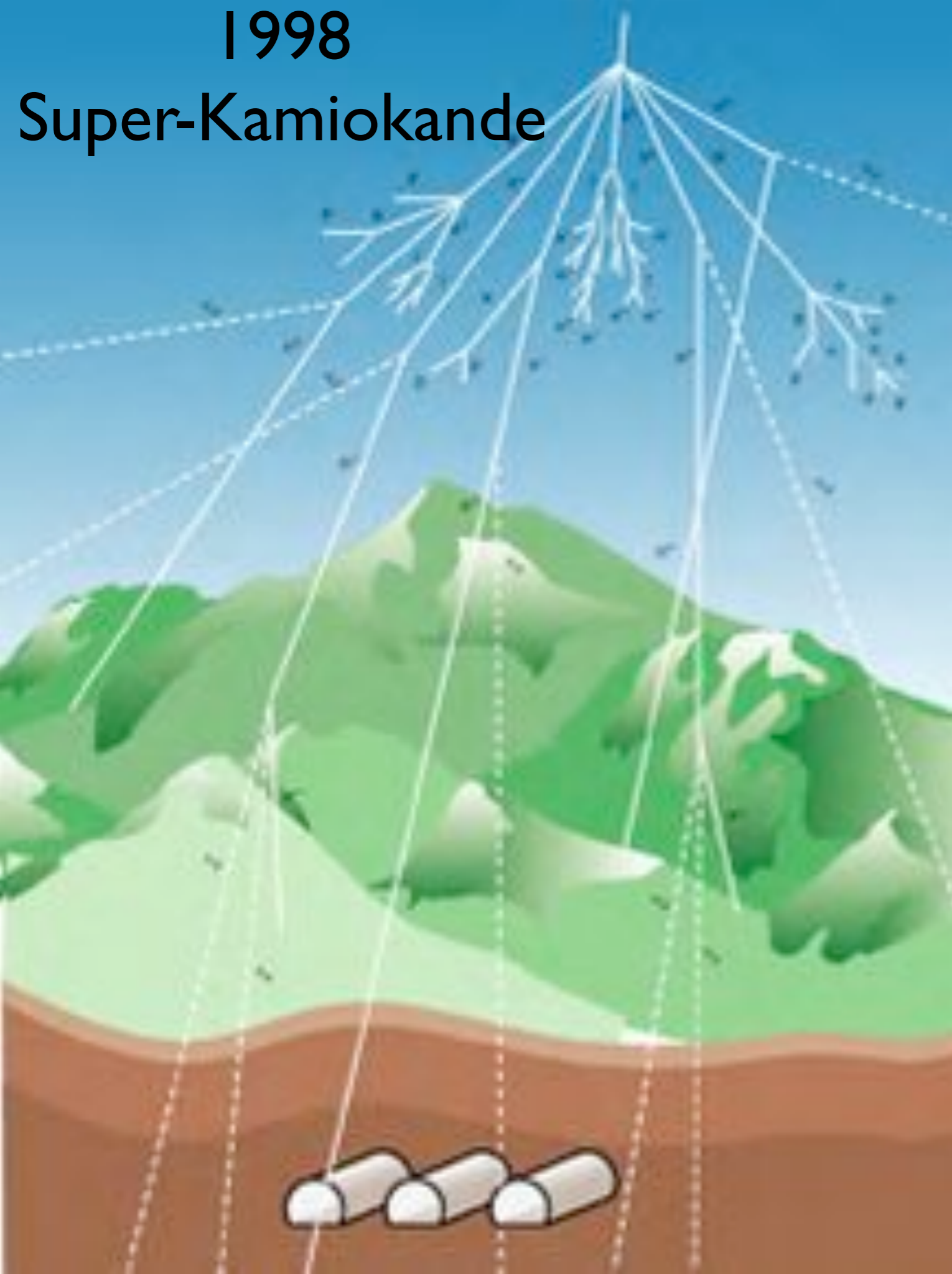


Rapporto tra flusso osservato e previsioni del modello solare	Esperimento con il Cloro	0.3±0.03
	Esperimento con il Gallio	0.53±0.03
	Super-Kamiokande	0.403±0.013

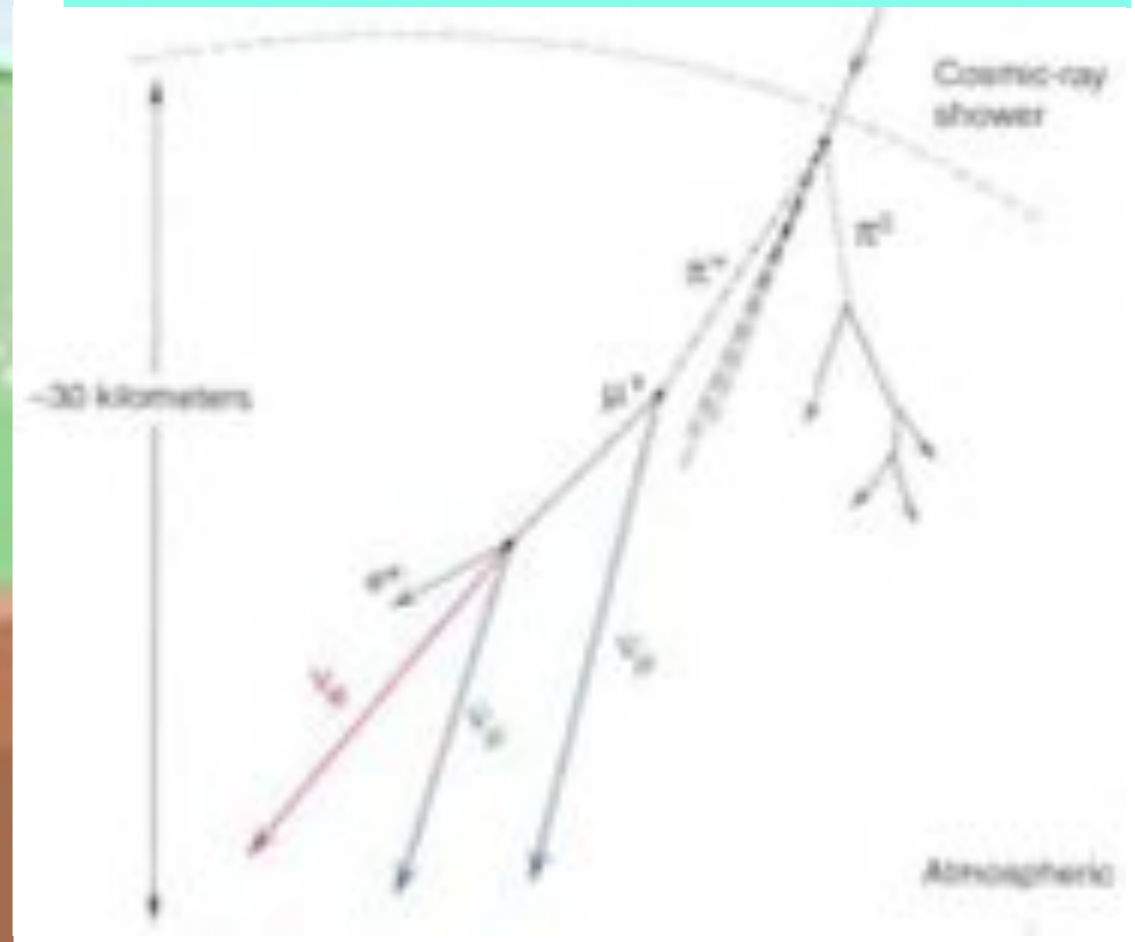


1998

Super-Kamiokande



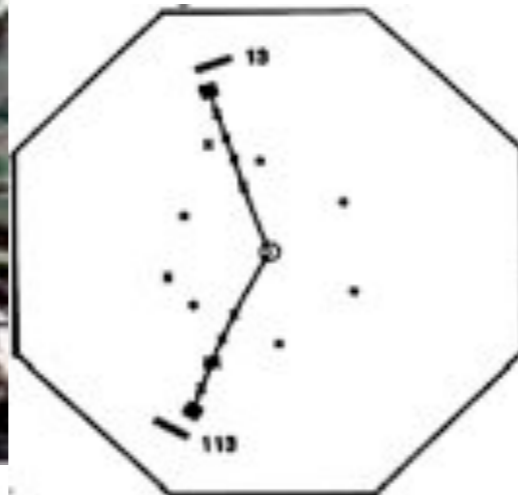
Neutrini atmosferici





TRE

Nel 1978
Martin Perl
scopre il
terzo
leptone. Il tau
ha una massa
di 1.8 GeV



The Nobel Prize in Physics 1995

The Royal Swedish Academy of Sciences
has awarded the 1995 Nobel Prize in Physics for pioneering experimental
contributions to lepton physics

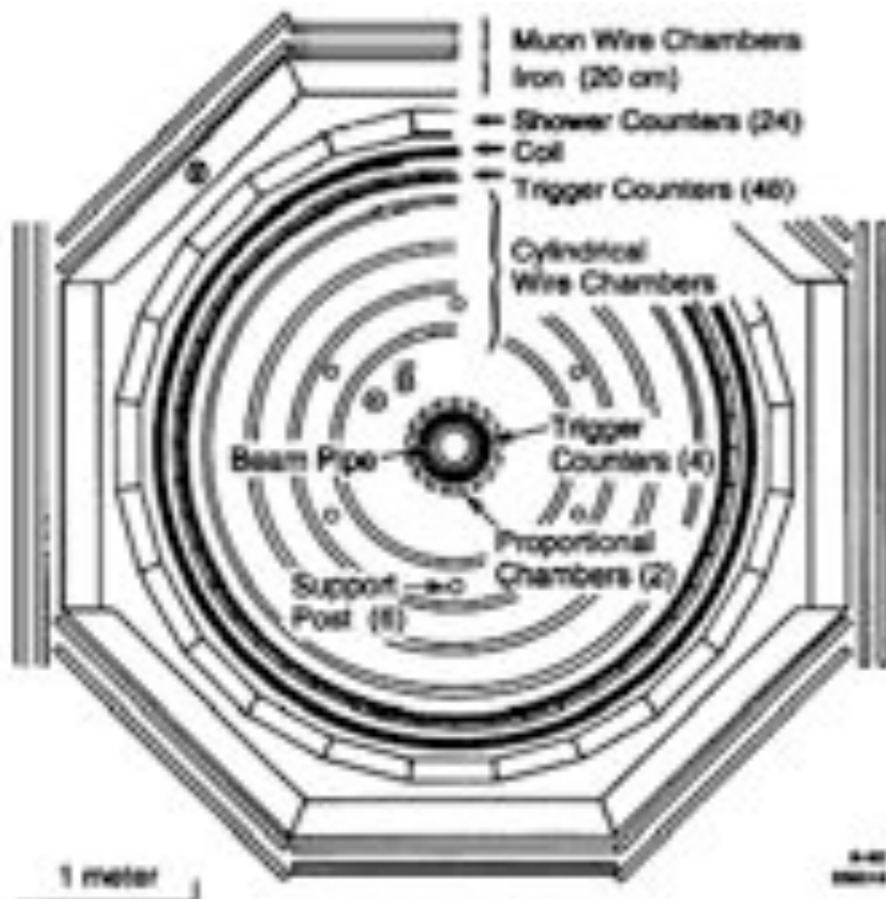
$$e^+e^- \rightarrow \mu^\pm + e^\mp + \text{Energia mancante}$$

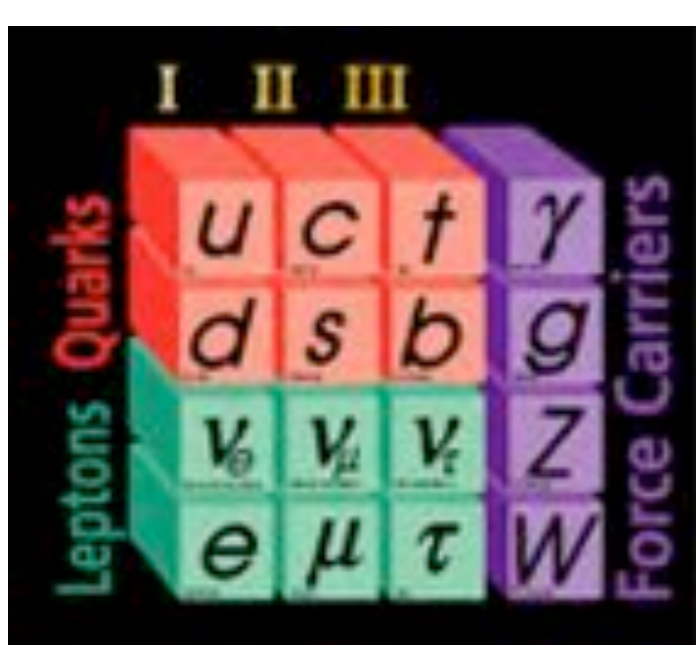


July 20, 2000
FOR IMMEDIATE RELEASE

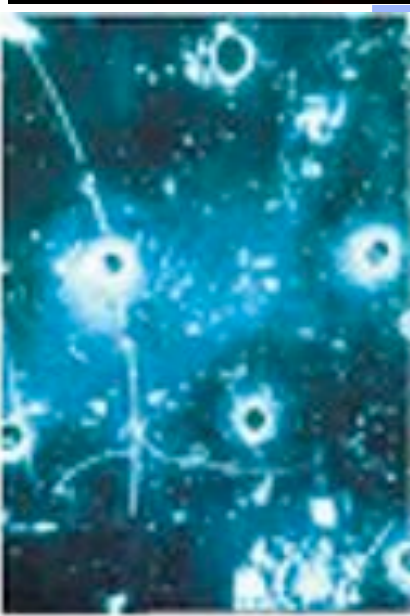
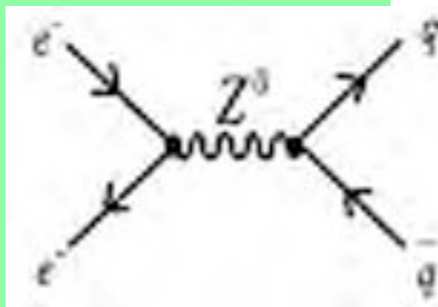
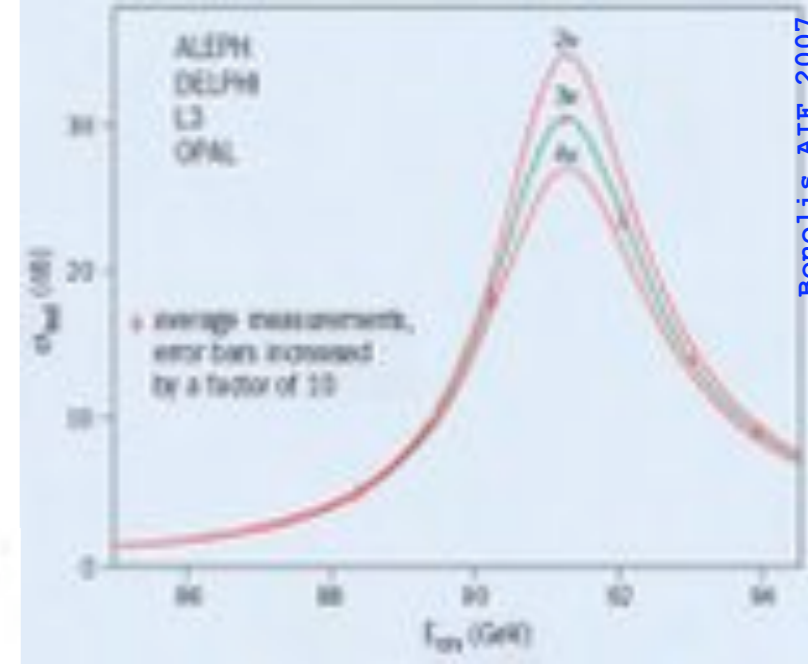
Physicists Find First Direct Evidence for Tau Neutrino at Fermilab

Batavia, Illinois—An international collaboration of scientists at the Department of Energy's Fermi National Accelerator Laboratory will announce on July 21, 2000, the first direct evidence for the subatomic particle called the tau neutrino, the third kind of neutrino known to particle physicists. They will report four instances of a neutrino interacting with an atomic nucleus to produce a charged particle called a tau lepton, the signature of a tau neutrino.





2.9841 ± 0.0082 neutrini al CERN ~ 1990



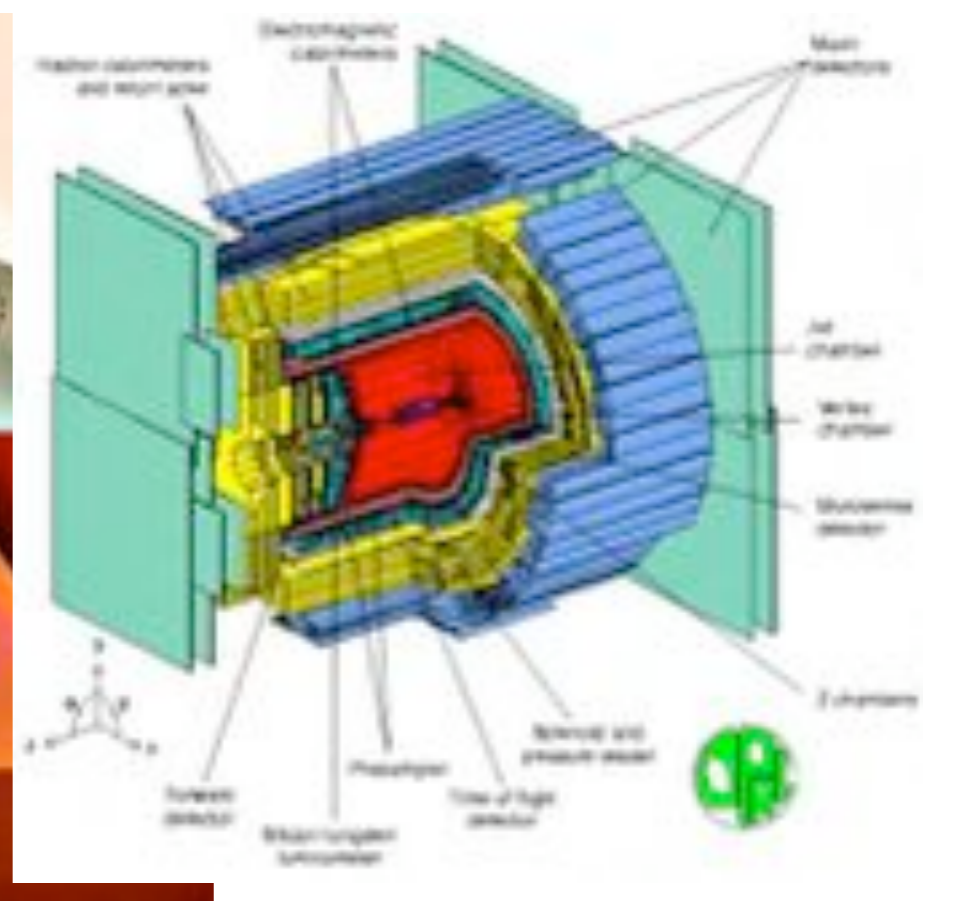
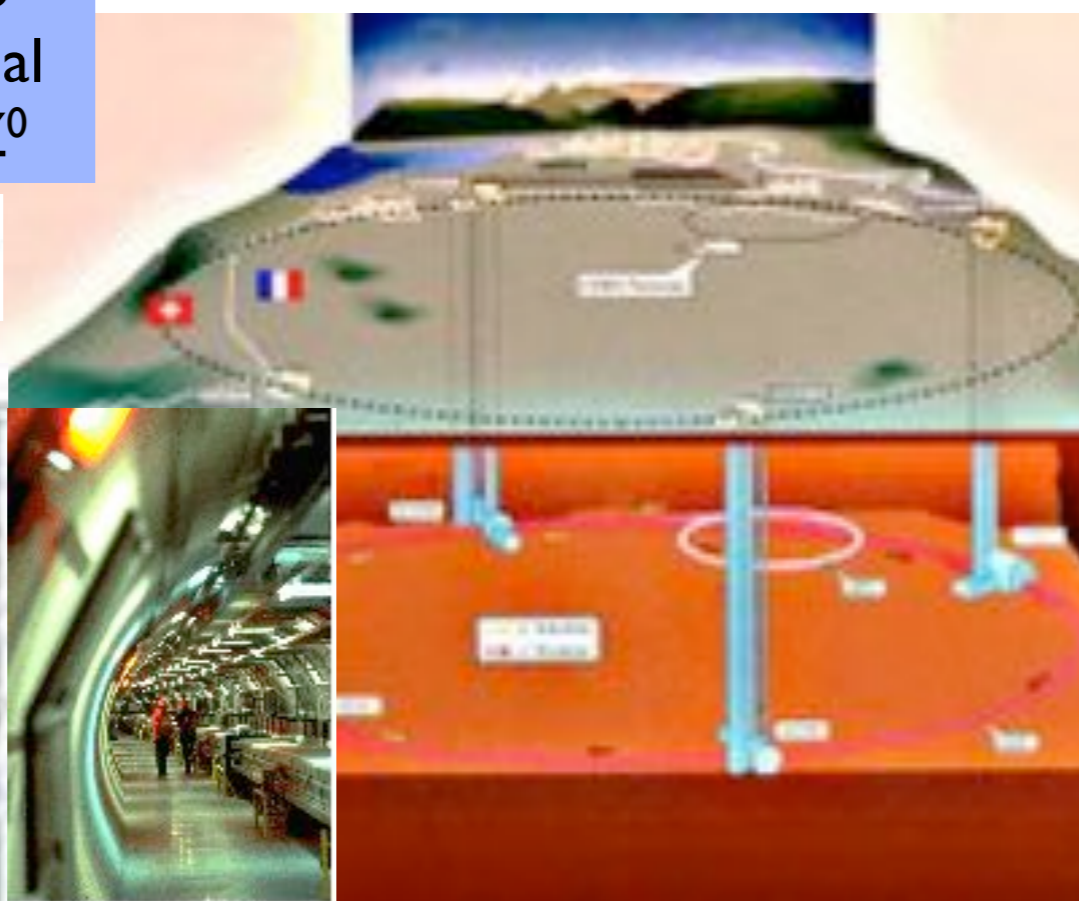
1974
Primo esempio di corrente neutra, un processo mediato dal bosone Z⁰

Negli anni ottanta esperimenti di scattering di neutrini su nucleoni hanno rivelato e stabilito la struttura a quark dei nucleoni

Misura della sezione d'urto per la produzione di adroni intorno alla risonanza dello Z⁰. Le curve indicano la sezione d'urto prevista per 2, 3 e 4 neutrini

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

CASCADE BUBBLE CHAMBER



Correnti e mediatori

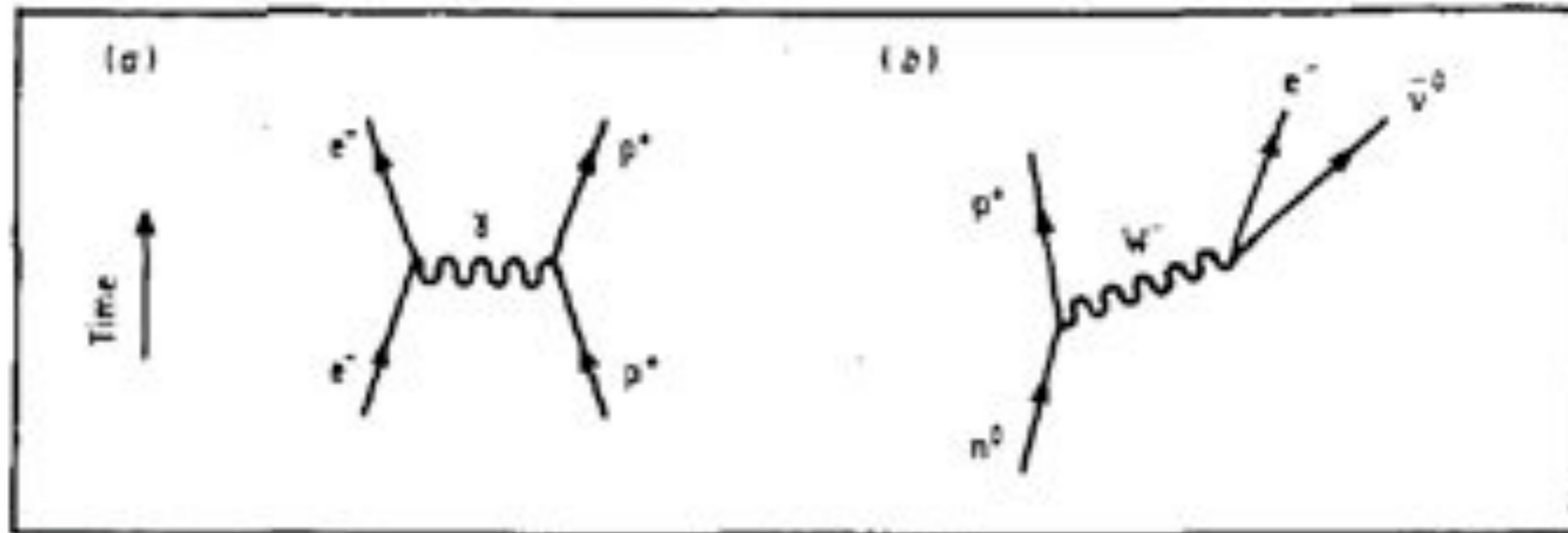


Figure 1. (a) EM interaction between an electron and a proton. (b) Weak interaction in beta decay: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}^0$.

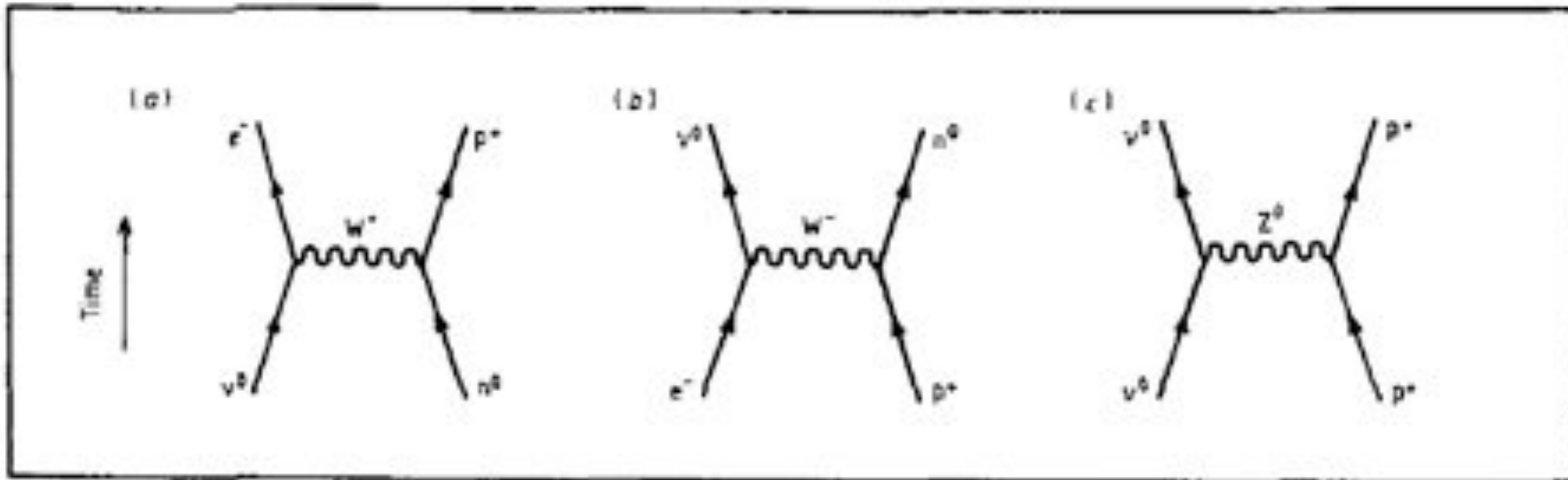


Figure 2. Charged current interaction: (a) $\nu^0 + n \rightarrow e^- + p^+$, (b) $e^- + p^+ \rightarrow \nu^0 + n^0$. (c) Neutral current interaction; particles retain their identities.

Neutrinos they are very small,
They have no charge and have no mass
And do not interact at all,
The earth is just a silly ball
To them, through which they simply pass,
Like dustmaids down a drafty hall
Or photons through a sheet of glass.
They snub the most exquisite gas,
Ignore the most substantial wall,
Cold-shoulder steel and sounding brass,
Insult the stallion in his stall,
And, scorning barriers of class,
Infiltrate you and me! Like tall
And painless guillotines, they fall
Down through our heads into the grass.
At night, they enter at Nepal
And pierce the lover and his lass
From underneath the bed – you call
It wonderful; I call it crass.

John Updike,
Cosmic Gall,
“The New
Yorker
Magazine”
17 dicembre
1960

Un Nobel per i neutrini

Raymond Davis Jr
Masatoshi Koshiba

J.N. Bahcall e R. Davis Jr

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

1964: J.N. Bahcall, Solar Neutrinos. I. Theoretical, *Phys. Rev. Lett.* 13, 300

R. Davis, Jr, Solar neutrinos II. Experimental, *Phys. Rev. Lett.* 13, 303.

"Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the in

1964: J.N. Bahcall, Solar Neutrinos. I. Theoretical, *Phys. Rev. Lett.* 13, 300

R. Davis, Jr, Solar neutrinos II. Experimental, *Phys. Rev. Lett.* 13, 303.

"Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars".

terior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars".

R. Davis *et al.*, A search for neutrinos from the Sun, *Phys. Rev. Lett.* 20, 1968, 1205.

Transizioni Gallio-Germanio: SAGE, GALLEX

1998 SuperKamiokande: oscillazioni neutrini atmosferici

2002 SNO: flusso di neutrini elettronici e flusso totale neutrini solari

In realtà i neutrini elettronici generati dal Sole che mancano all'appello si tramutano in parte in neutrini μ e neutrini τ in seguito alle oscillazioni.

2003 KamLAND Oscillazioni di neutrini prodotti da reattore

2003 K2K Oscillazioni di neutrini prodotti da acceleratore

Oscillazioni

Il campo di un neutrino ν_f di sapore f ($f = e, \mu, \tau$) si può scrivere come una combinazione lineare dei campi ν_m dei neutrini di massa definita M_m e energia definita E_m : $\nu_f = \sum_{m=1}^3 U_{fm} \nu_m$ dove U_{fm} sono gli elementi di una matrice unitaria.

Si ottiene quindi

$$|\nu_f\rangle = \sum_{m=1}^3 U_{fm}^* |\nu_m\rangle$$

Gli stati di sapore (ν_e, ν_μ, ν_τ) risultano infatti una sovrapposizione degli autostati della massa.

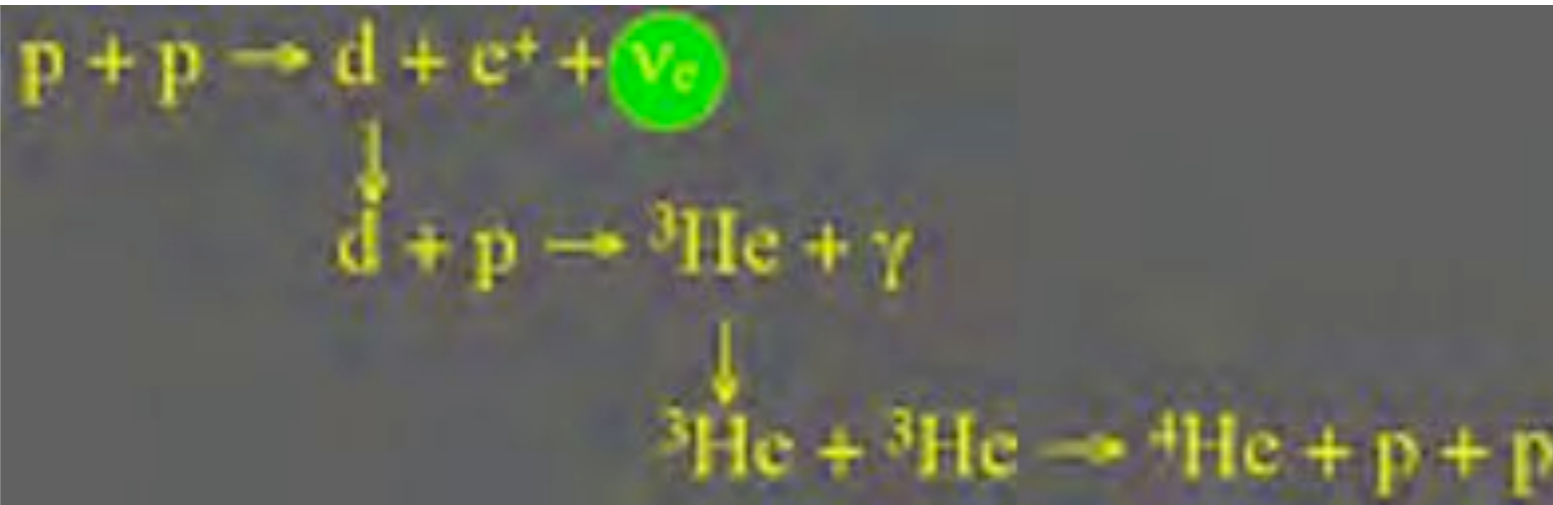
Considerando poi lo stato al tempo t , $|\nu_m\rangle_t = e^{-iE_m t} |\nu_m\rangle$

Dove $|\nu_m\rangle$ rappresenta lo stato di massa del neutrino al tempo 0 nel sistema di riferimento del neutrino. Combinando con l'equazione precedente si ottiene lo stato di sapore al tempo t

$$\begin{aligned} |\nu_f\rangle_t &= \sum_{m=1}^3 U_{fm}^* e^{-iE_m t} |\nu_m\rangle \\ &= \sum_{f'} \left(\sum_{m=1}^3 U_{fm}^* e^{-iE_m t} U_{f'm} \right) |\nu_{f'}\rangle \\ &= \sum_{f'} M(\nu_f \rightarrow \nu_{f'}) |\nu_{f'}\rangle \end{aligned}$$

Matrice del mixing PMKS
Pontecorvo, Maki,
Nakagawa, Sakata

dove $f' = e, \mu, \tau$ e $M(\nu_f \rightarrow \nu_{f'})$ rappresenta l'ampiezza della transizione di sapore al tempo t . L'equazione mostra chiaramente come un neutrino che inizialmente ha sapore f si trasforma in una sovrapposizione di differenti stati di sapore dopo aver viaggiato per un tempo t . Si ottiene quindi subito la probabilità di transizione di sapore nel vuoto da ν_f a $\nu_{f'}$



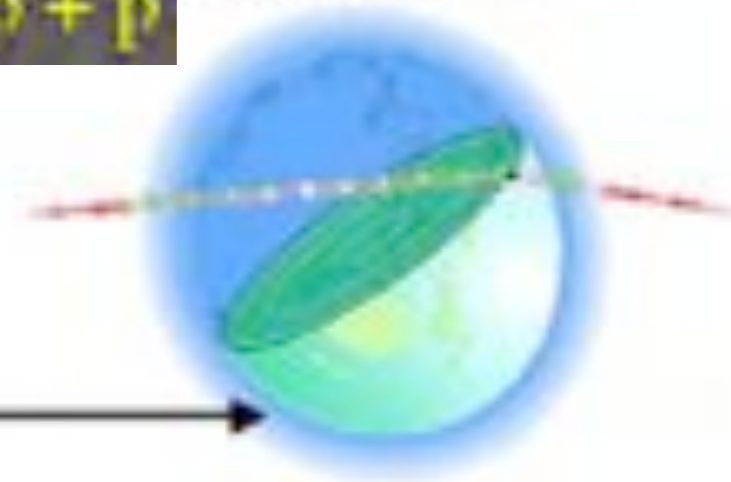
source



propagation

L

detection



The weak interaction produces neutrinos of a given flavor

$$\begin{aligned}
 |v(x_0)\rangle &= |\nu_e\rangle \\
 &= c|\nu_1\rangle + s|\nu_2\rangle
 \end{aligned}$$

The mass eigenstates propagate at different velocities

$$\begin{aligned}
 |v(x)\rangle &= c|\nu_1\rangle e^{i(E - \bar{k}_1 x)} \\
 &\quad + s|\nu_2\rangle e^{i(E - \bar{k}_2 x)}
 \end{aligned}$$

Detection again via weak interaction

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

$$\nu_e N \rightarrow e^- X$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | v(t) \rangle|^2$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Mixing

The leptonic mixing matrix:

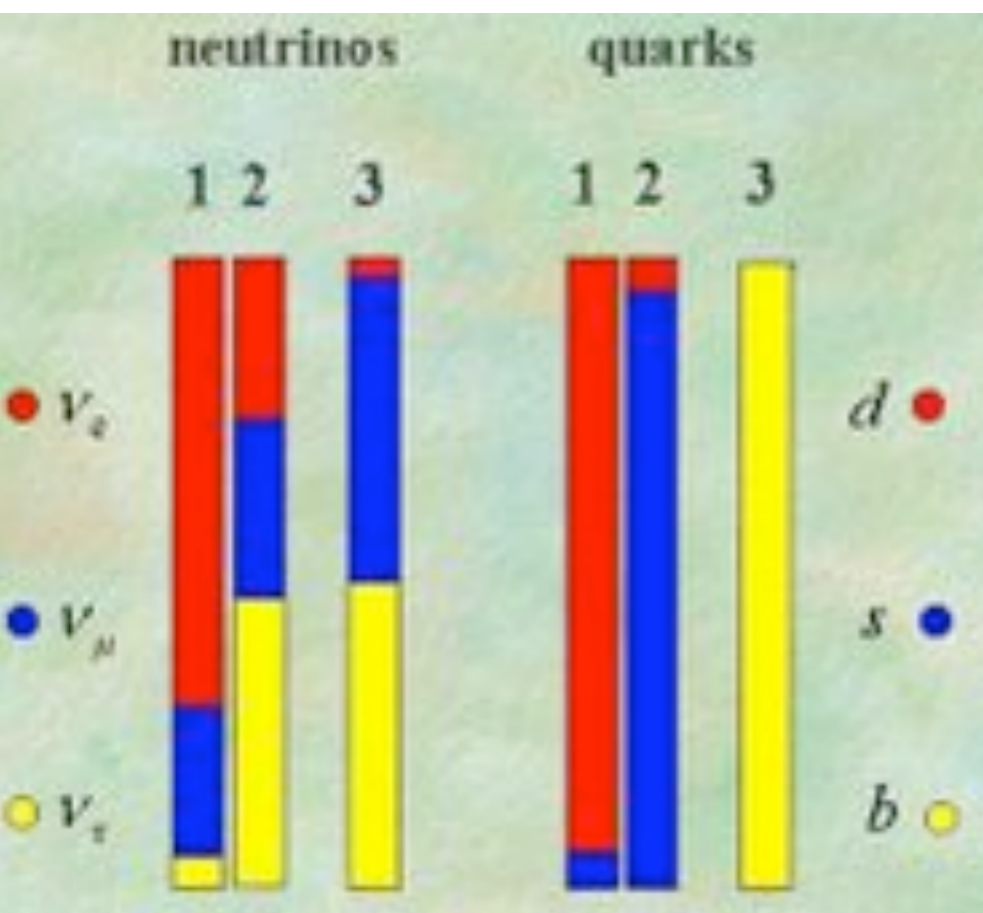
$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{12} & s_{12} \\ 0 & -s_{12} & c_{12} \end{pmatrix}}_{\text{"atmospheric neutrinos"}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\phi} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\phi} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{"reactor neutrinos"}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{"solar neutrinos"}}$$

where $c_{ab} \equiv \cos \theta_{ab}$ and $s_{ab} \equiv \sin \theta_{ab}$.

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & c_{13}s_{12} & s_{13} \\ -c_{23}s_{12}e^{i\phi} - c_{12}s_{13}s_{23} & c_{12}c_{23}e^{i\phi} - s_{12}s_{13}s_{23} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12}e^{i\phi} - c_{12}c_{23}s_{13} & -c_{12}s_{23}e^{i\phi} - c_{23}s_{12}s_{13} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

dove $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ e $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$

Fisica oltre il Modello Standard



Il problema dei neutrini mancanti si può quindi risolvere se i neutrini hanno massa. In questo caso, l'esistenza di un neutrino può oscillare tra i sapori. Secondo la meccanica quantistica il neutrino si può rappresentare con due pacchetti di onde corrispondenti ai due sapori che si propagano con velocità differenti. Le modalità con cui interferiscono variano lungo il cammino secondo differenti rapporti tra i sapori. Analogia con i quark (matrice CKM: Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

La matrice PMNS

From **S.L.Glashow** talk

at the Venice "Neutrino Telescope Workshop"
(March 2003)

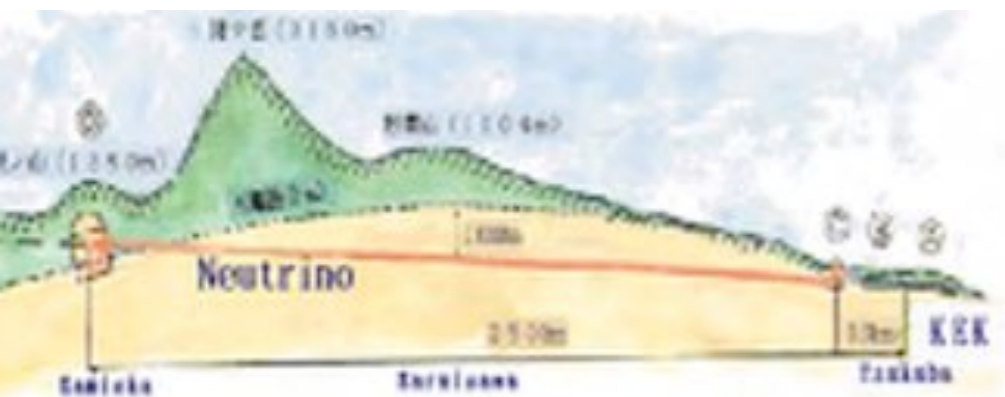
"...if only Bruno Pontecorvo could have seen how far we have come towards understanding the pattern of neutrino masses and mixing! Way back in 1963 he was among the first to have envisaged the possibility of neutrino flavor oscillations. For that reason the analog to the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix pertinent to neutrino oscillations should be known as the PMNS matrix to honour four neutrino visionaries: Pontecorvo, Maki, Nakagawa, and Sakata."

Un bagno di neutrini

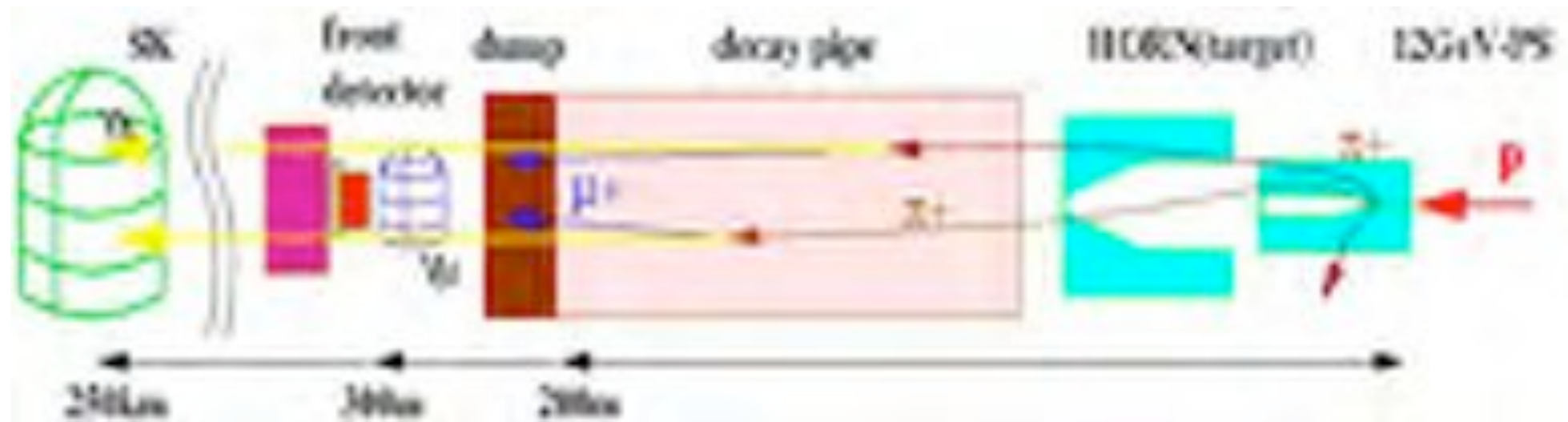
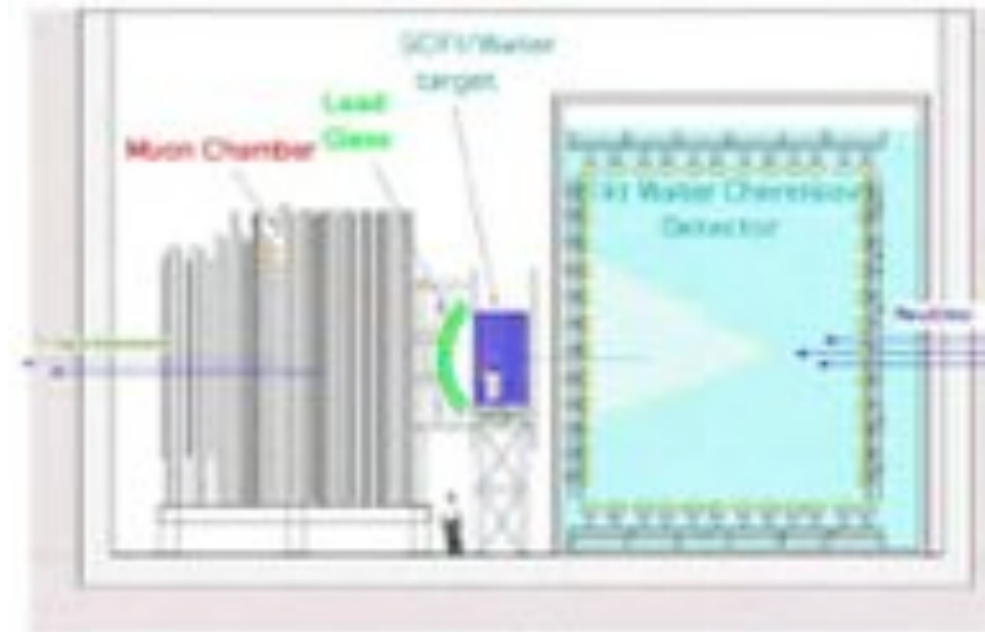
I neutrini sono le particelle più diffuse nell'Universo

- Decadimenti nucleari (naturali, reazioni di fissione). Radioattività naturale terrestre: 20,000 GW, 6 milioni di neutrini/cm/s. Un tipico reattore nucleare da 1GW produce $5 \cdot 10^{20}$ neutrini/s.
- Fusione termonucleare: dal sole ci arrivano $4 \cdot 10^{10}$ neutrini/s/cm²
- Supernovae. ($6 \cdot 10^{57}$ neutrini al secondo)
- Acceleratori di particelle (alcune particelle cariche sono instabili e decadono in neutrini).
- Reazioni prodotte dai raggi cosmici negli strati alti dell'atmosfera.
- L'universo attuale è permeato da circa 300 neutrini per cm³ prodotti nel big-bang.
- (Il nostro corpo contiene circa 20 mg di Potassio 40 che emette 340 milioni di neutrini al giorno).

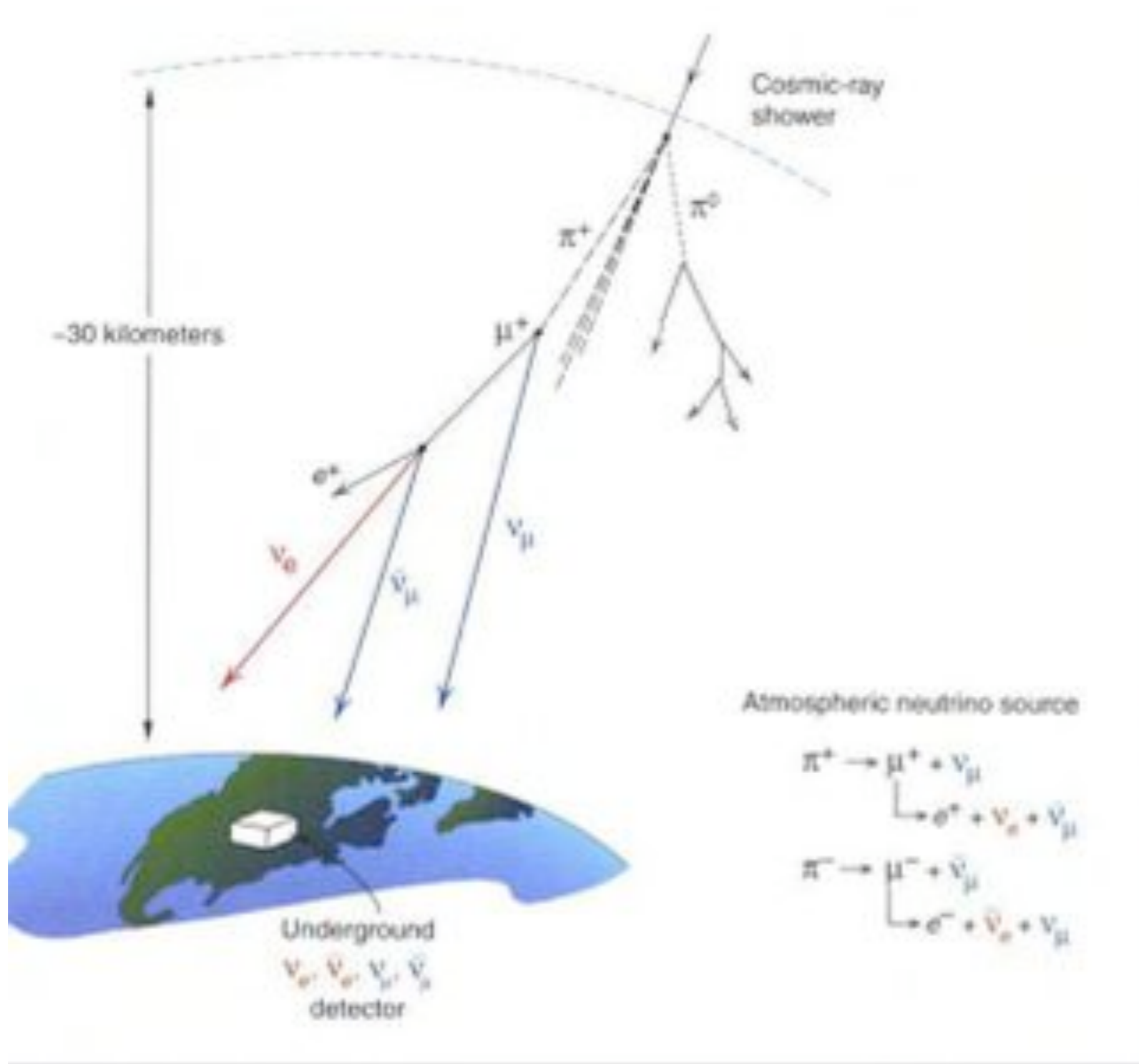
Long baseline neutrino oscillation experiment K2K



L'esperimento K2K, utilizza il protosincrotrone da 12 GeV nella città di Tsukuba e il rivelatore di Super-Kamiokande che si trova a 250 km di distanza nella città di Kamioka. Il fascio di neutrini creato nel sito KEK viene rivelato entro un millisecondo da Super-Kamiokande, dove si trova un rivelatore Cerenkov e un rivelatore a fibra scintillante.



Neutrini atmosferici



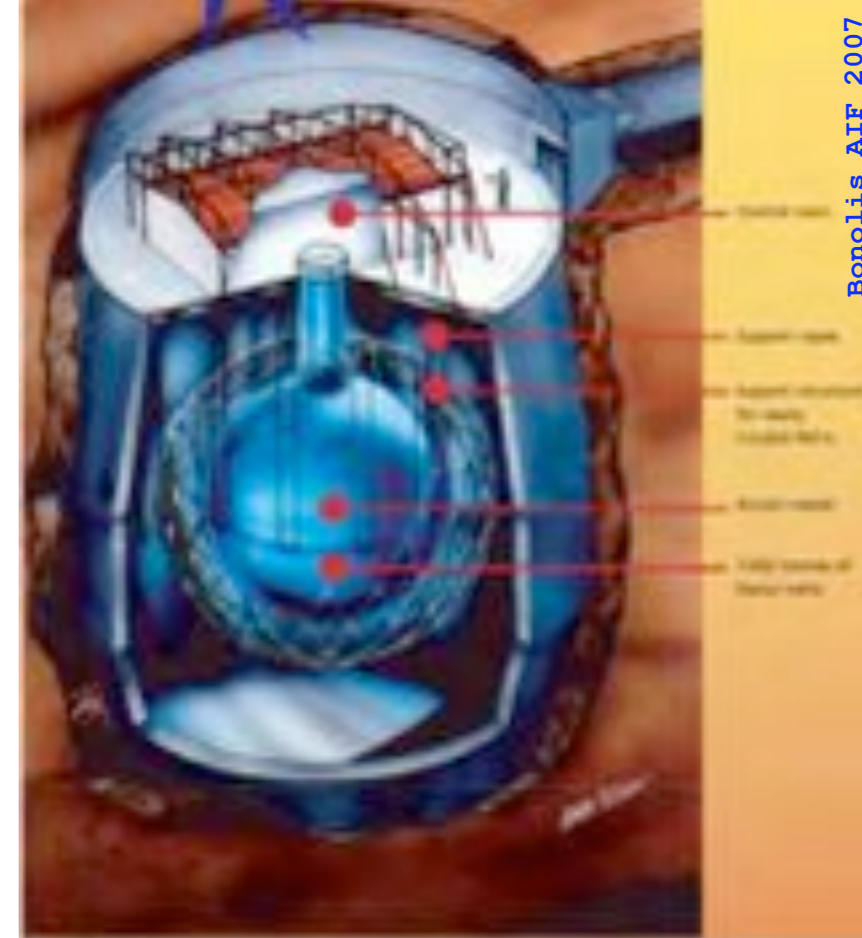
Atmospheric Neutrinos

Expect $\nu_\mu/\nu_e \approx 2$



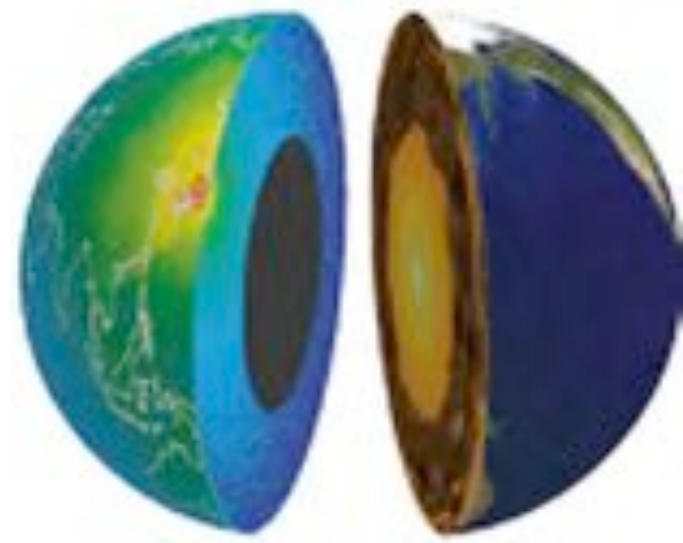
Sudbury Neutrino Observatory

SNO



Il rivelatore di SNO si trova a 2000 metri di profondità nella miniera di Creighton, in Canada. Il serbatoio contiene 1000 tonnellate di acqua pesante. Alcuni dei neutrini che lo attraversano interagiscono producendo elettroni che viaggiano ad una velocità superiore a quella della luce nel mezzo producendo così lampi di luce Cerenkov che vengono rivelati da 9600 tubi fotomoltiplicatori che circondano il contenitore. Nel 2002 l'esperimento ha definitivamente rivelato la presenza di tutti e tre i tipi di neutrini, confermando l'ipotesi delle oscillazioni.





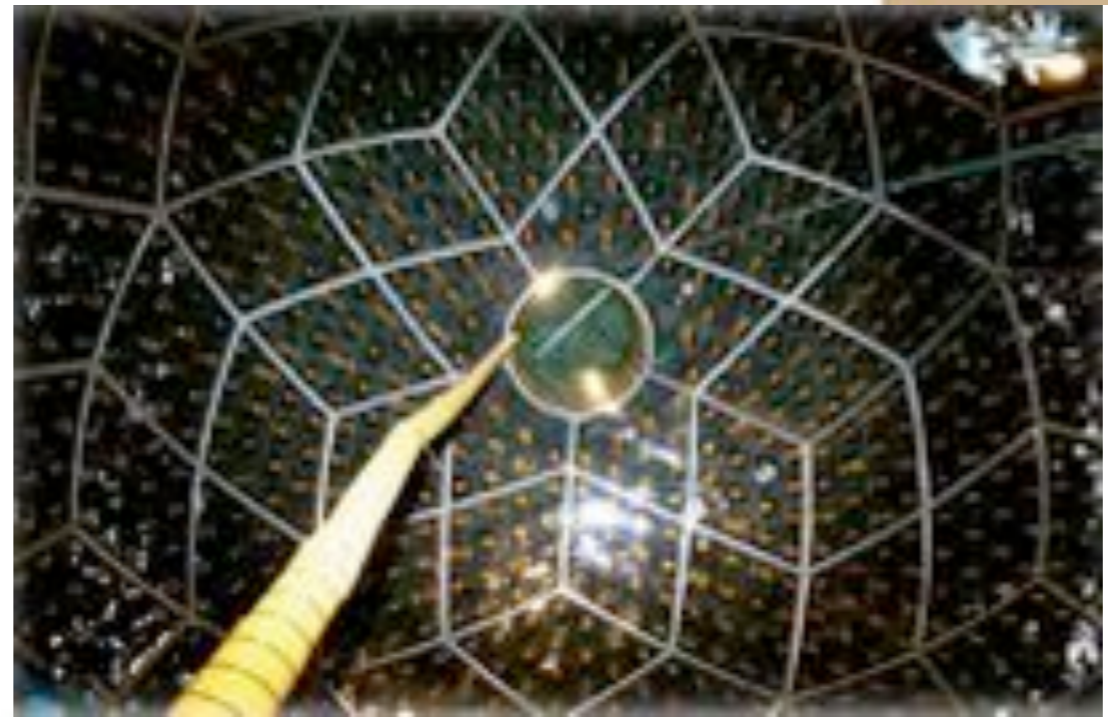
KamLAND

neutrini geologici e da reattori

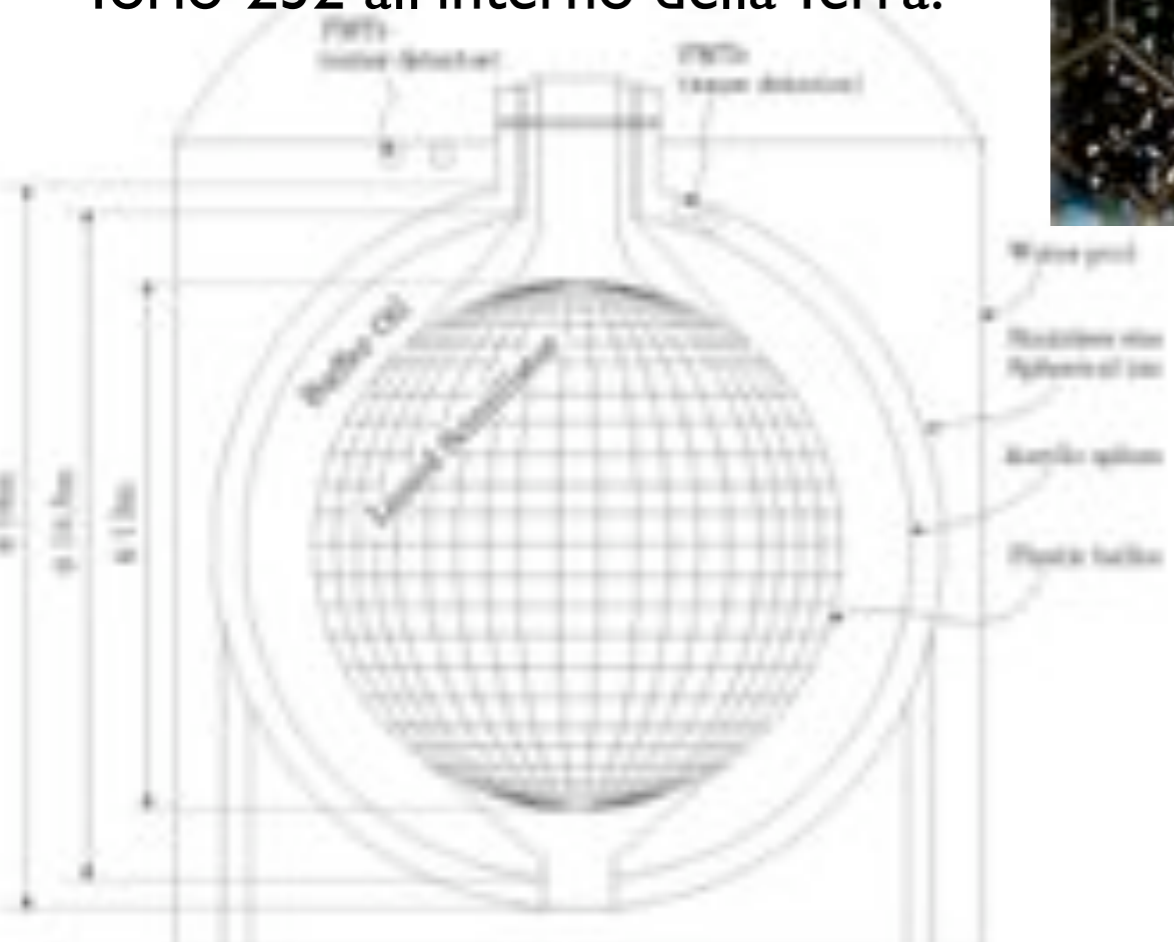


2003: oscillazione di neutrini da reattore

Anti-neutrini elettronici da reattori e anti-neutrini prodotti dal decadimento dell'Uranio-238 e del Torio-232 all'interno della Terra.

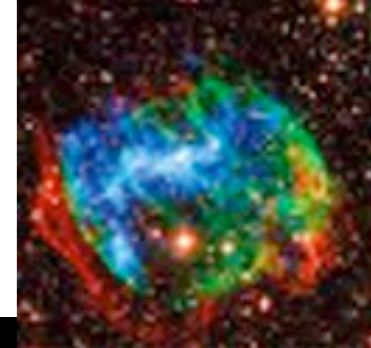


Il rivelatore di KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Anti-Neutrino Detector) si trova nella miniera di Kamioka in Giappone.



Il rivelatore esterno è ad acqua (1000 tonnellate di liquido scintillatore) tipo Cerenkov e agisce come “veto” per i muoni cosmici. Il rivelatore interno consiste in una sfera metallica su cui sono distribuiti circa 2100 tubi fotomoltiplicatori. Un olio minerale è contenuto in un pallone sospeso all'interno della sfera dove le particelle cariche producono la luce rivelata dai fotomoltiplicatori che la traducono in tensione che viene inviata ai computer per la successiva analisi dati.

telescopi per neutrini



Studiare l'Universo con i neutrini al Polo Sud

4200 moduli ottici sepolti tra 1450 e 2450 metri

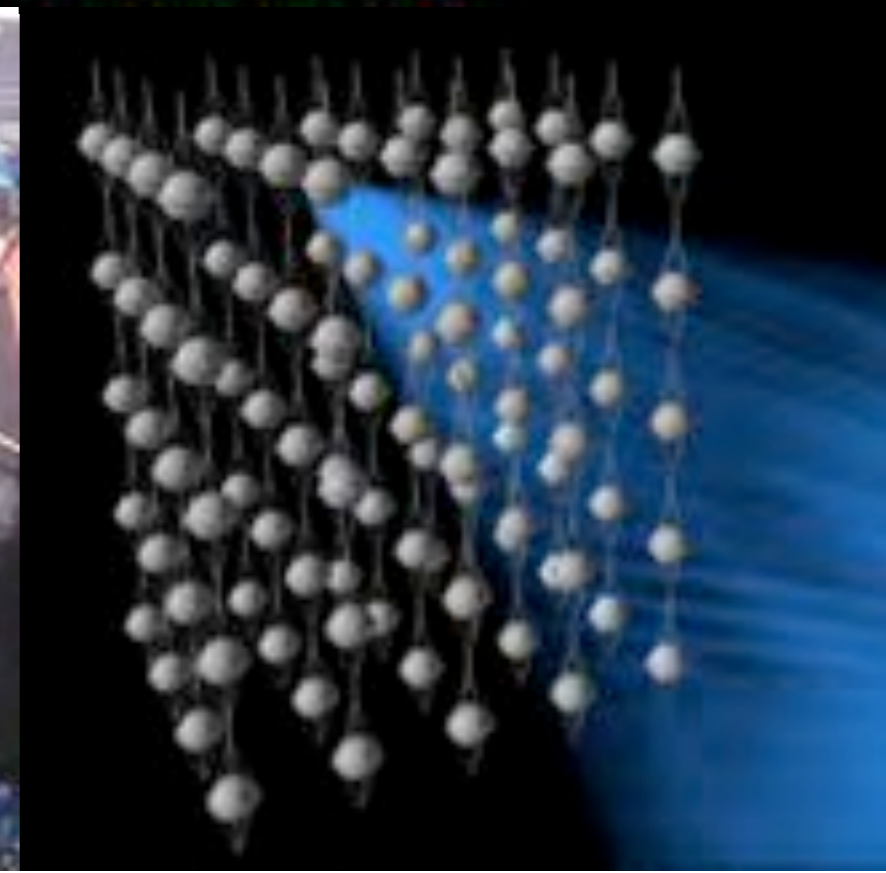
sotto il ghiaccio antartico.



GHIACCIO: SCHERMO, BERSAGLIO E MEZZO TRASPARENTE

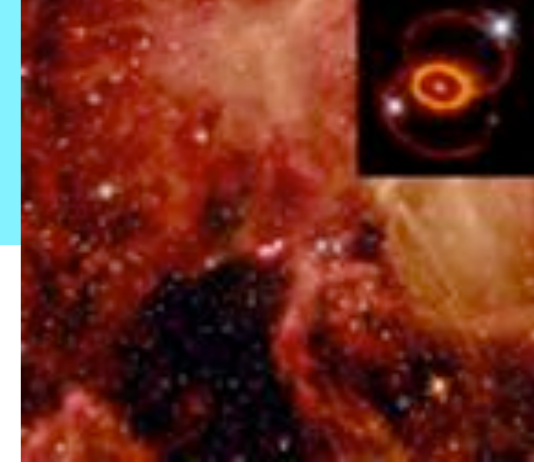
IceCube

I neutrini di alta energia interagiscono con il ghiaccio antartico e producono elettroni, muoni o tau che emettono luce Cerenkov rivelata dai moduli ottici di IceCube



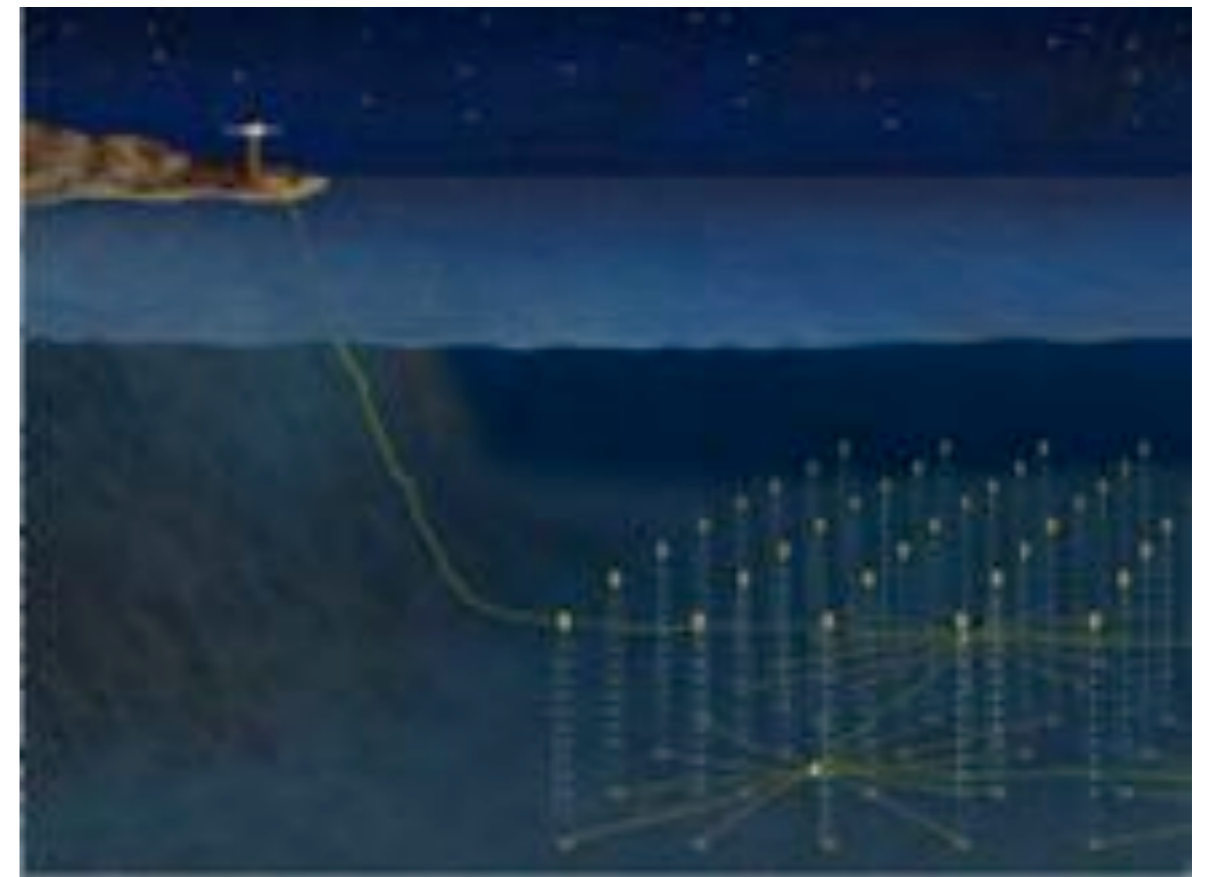
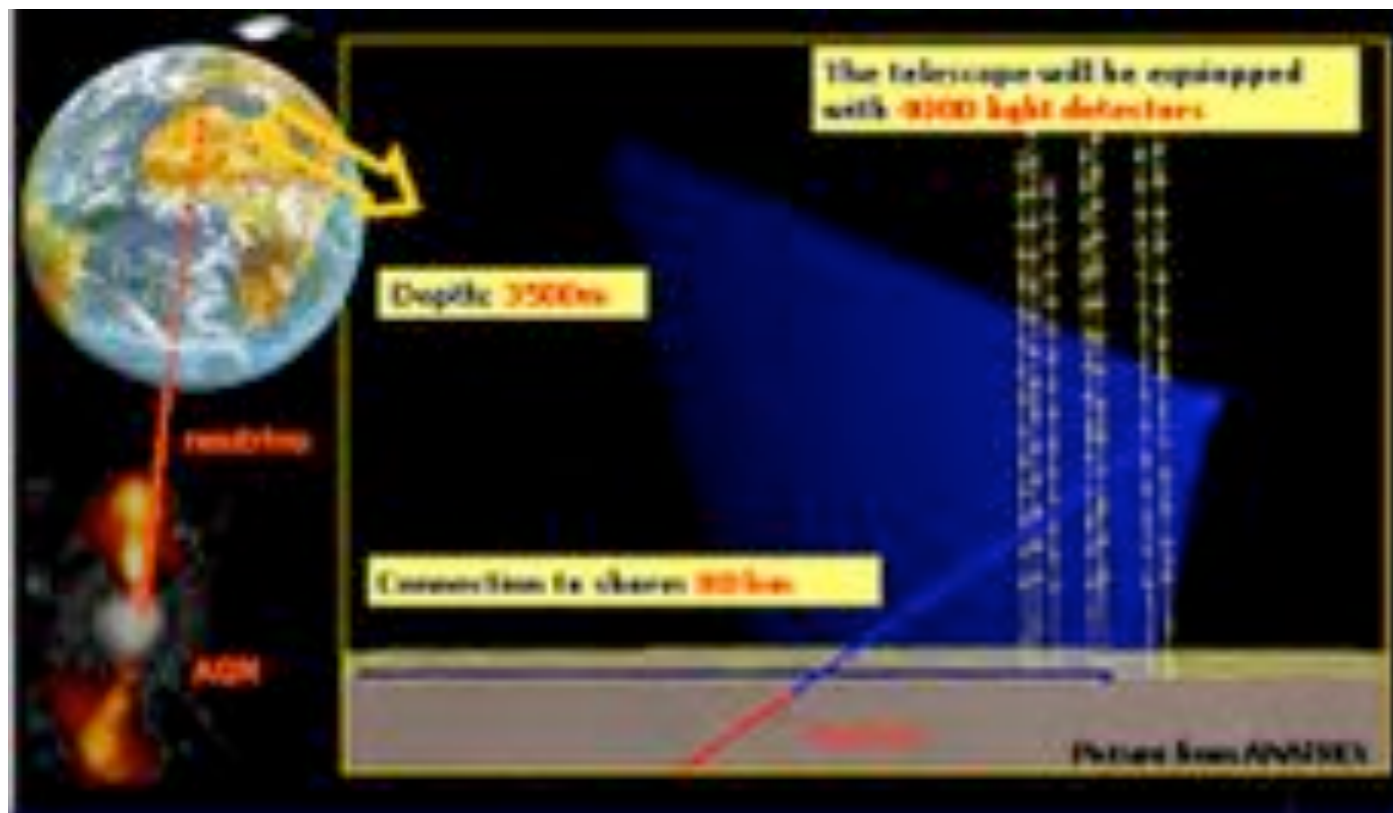
telescopi per neutrini

NEutrino Mediterranean Observatory



NEMO

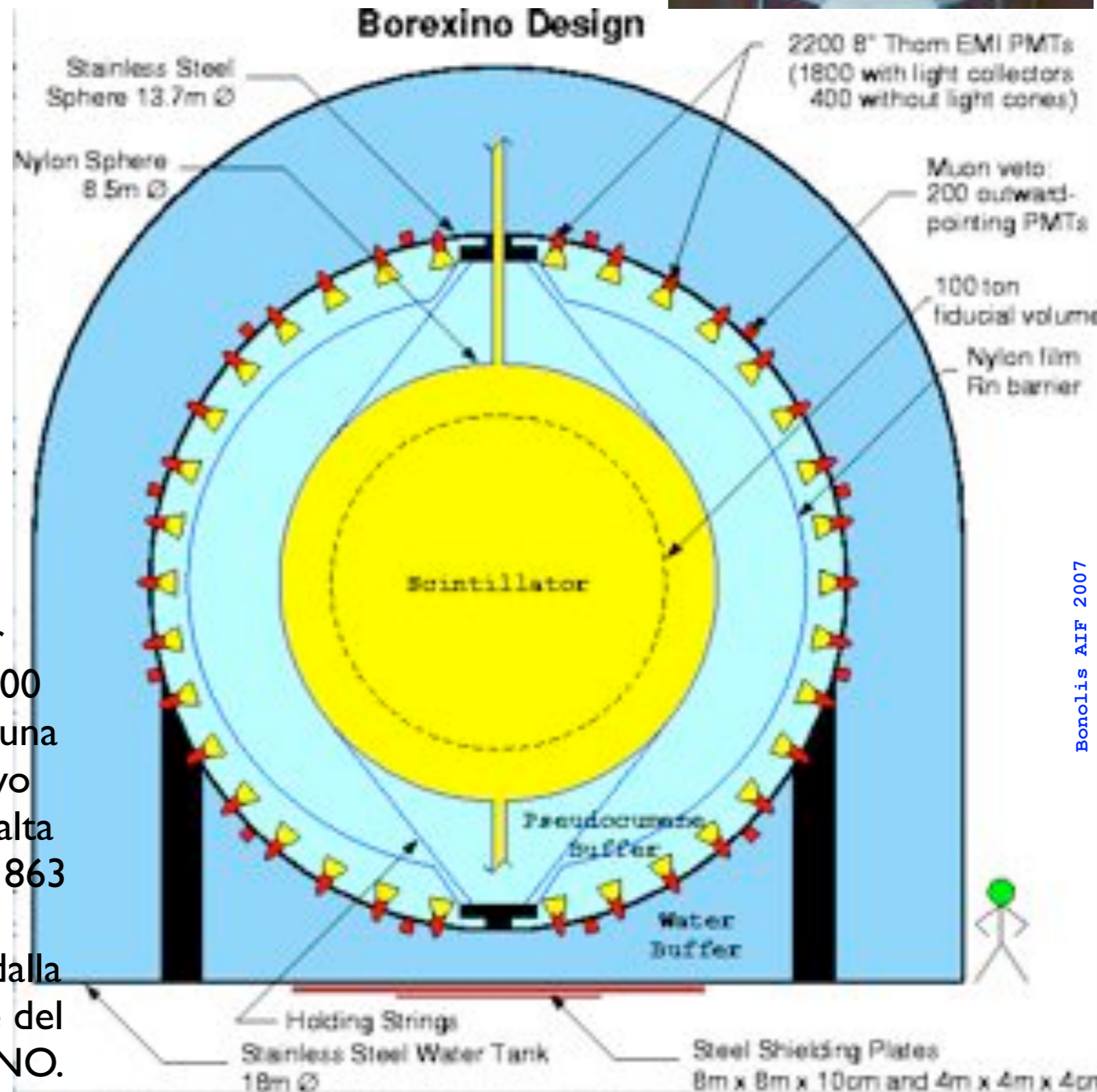
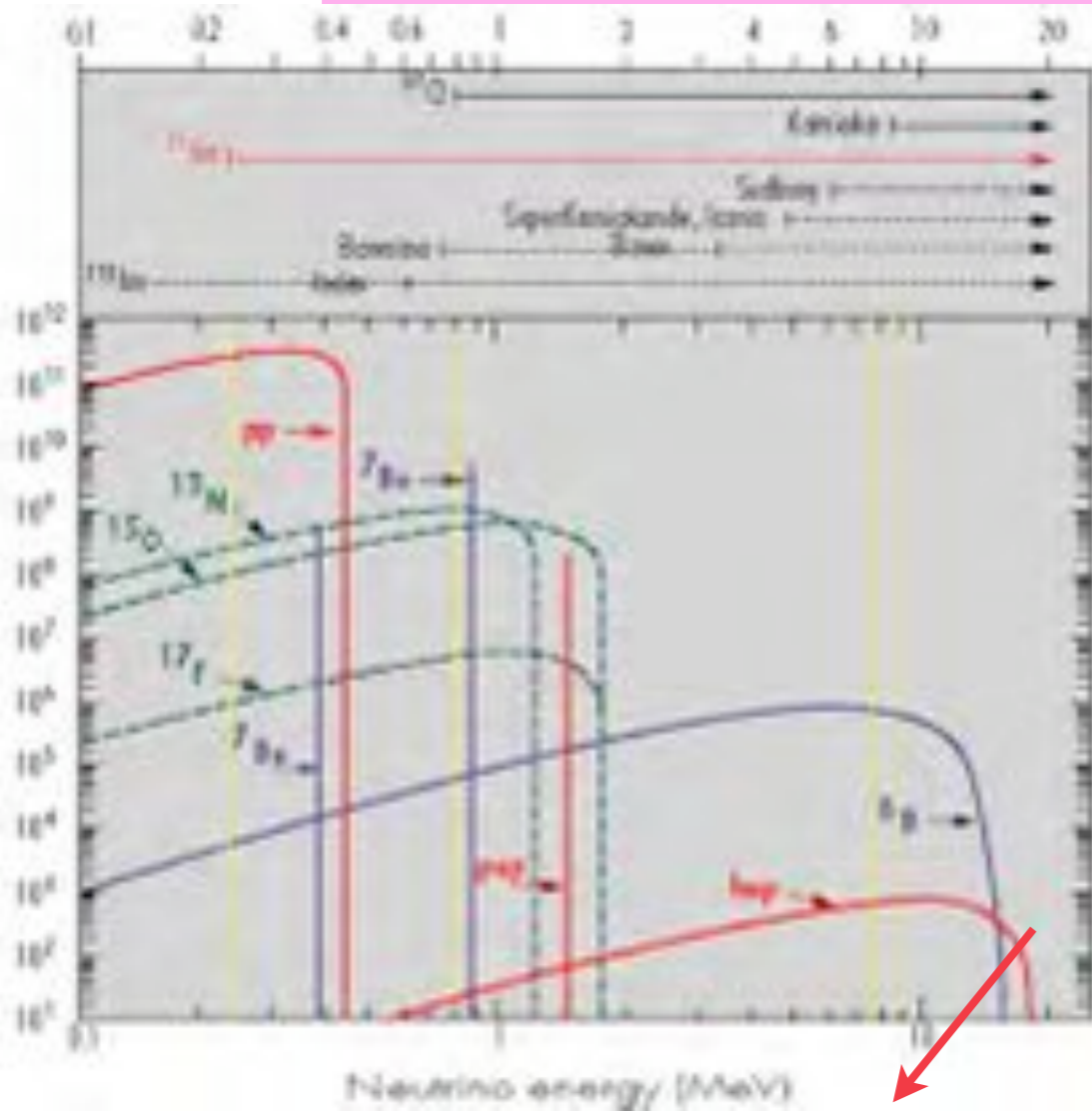
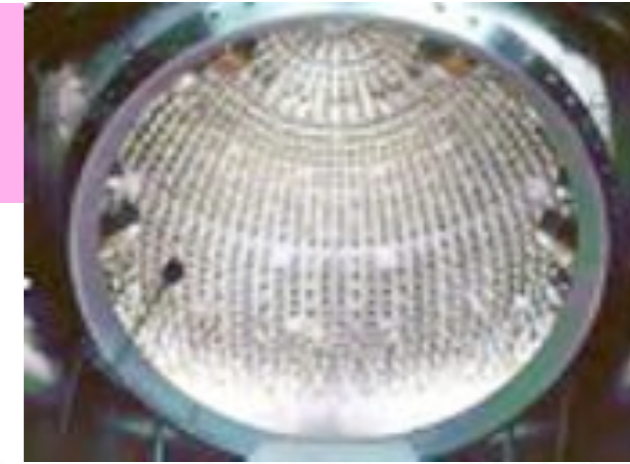
Supernova nella nube di Magellano esplosa circa 167000 anni a.C. I neutrini prodotti sono arrivati sulla terra il 23 febbraio 1987.



Bonolis AIF 2007

Telescopio di nuova concezione, complementare ad IceCube) “Antenna” sottomarina studiata per rivelare neutrini astrofisici di altissima energia. Estende le conoscenze dell’astronomia attuale basata in generale sulla radiazione elettromagnetica. I fotoni di alta energia (raggi gamma) provenienti dalle sorgenti distanti dell’Universo, vengono fortemente assorbiti nello spazio a causa delle interazioni con la radiazione di bassa energia (infrarossi e microonde). L’identificazione dei neutrini, che arrivano direttamente dalle sorgenti più lontane, permette di esplorare regioni sconosciute e di studiare la fisica dei buchi neri, delle sorgenti astrofisiche come i Nuclei Galattici Attivi, i Gamma Ray Burst ecc.

Borexino - Gran Sasso



Borexino utilizza 2240 fotomoltiplicatori per rivelare i lampi di luce emessa dal target di 300 tonnellati di scintillatore liquido in seguito a una interazione con un neutrino solare. L'obiettivo principale è quello di osservare i neutrini di alta energia relativi a una linea monocromatica a 863 keV. Questo flusso di neutrini è il secondo come produzione dopo quello proveniente dalla reazione pp ed è circa 1000 volte più grande del flusso misurato da SuperKamiokande e da SNO.

Double Beta Decay Experiments



COBRA Cadmium-Telluride O-neutrino double-Beta Research App



EXO Enriched Xenon Observatory R&D Detector being built



CUORE Cryogenic Underground Observatory for Rare Events R&D



Majorana The Majorana Project Proposed



GERDA Gerda The Gerda Project under construction at LNGS



NEMO at the **Frejus Underground Laboratory** R&D Detector being built

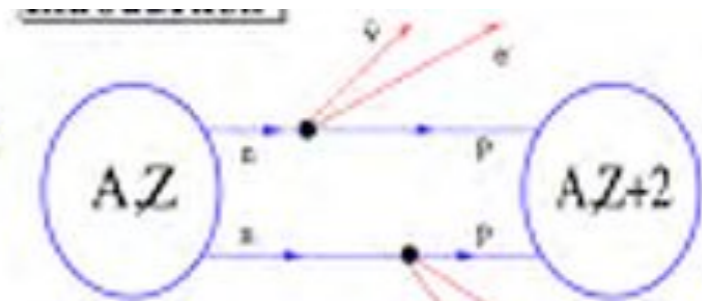


Gotthard Xe-136 experiment

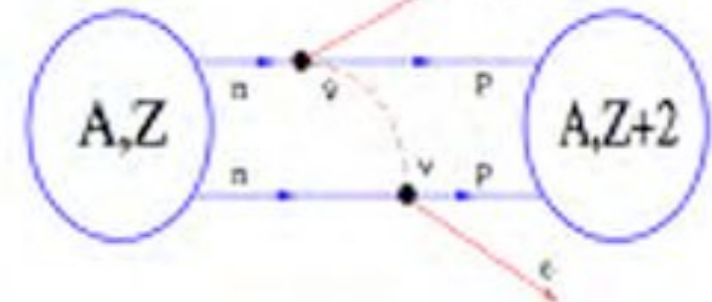


Heidelberg-Moscow Ge Experiment Completed

Nuclear $2\nu\beta\beta$ -decay



Nuclear $0\nu\beta\beta$ -decay



Lo studio del decadimento doppio beta senza emissione di neutrini ha lo scopo di determinare lo spettro di massa dei neutrini e la scala assoluta di massa. In particolare sono gli unici esperimenti che il linea di principio possono consentire di stabilire se il neutrino è una particella di Majorana.

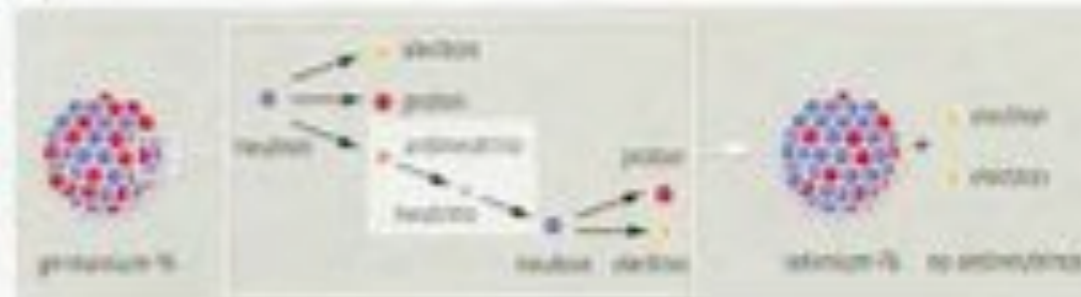
Normal beta decay

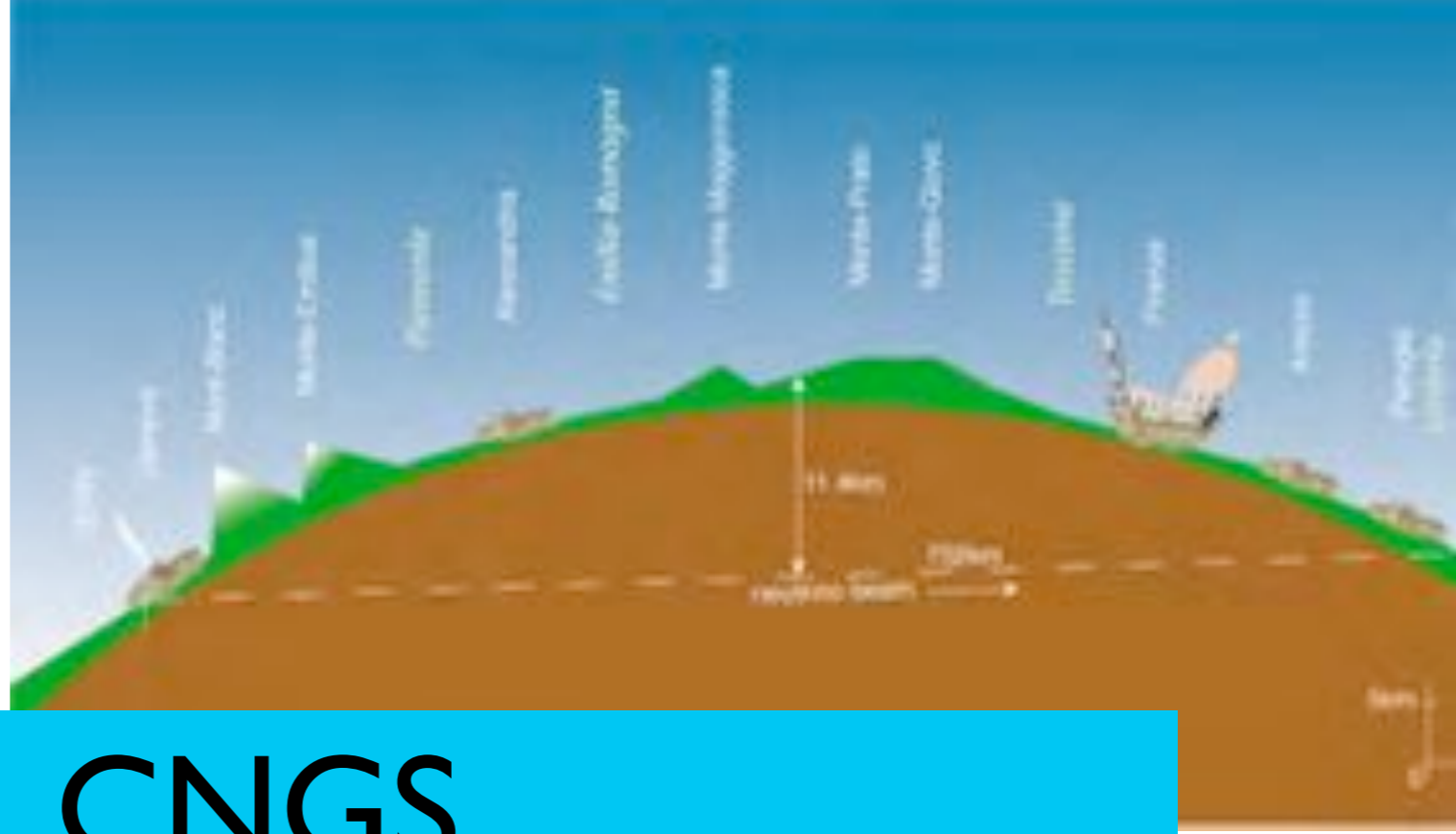
Radioactive uranium 238 decays into neptunium and spits out an electron (plus an antineutrino).



Neutrinos: double beta decay

The neutron undergoes normal beta decay and emits an antineutrino. This is absorbed by a second neutron, which decays into a proton and an electron. This can only happen if the antineutrinos can transform into a neutrino.



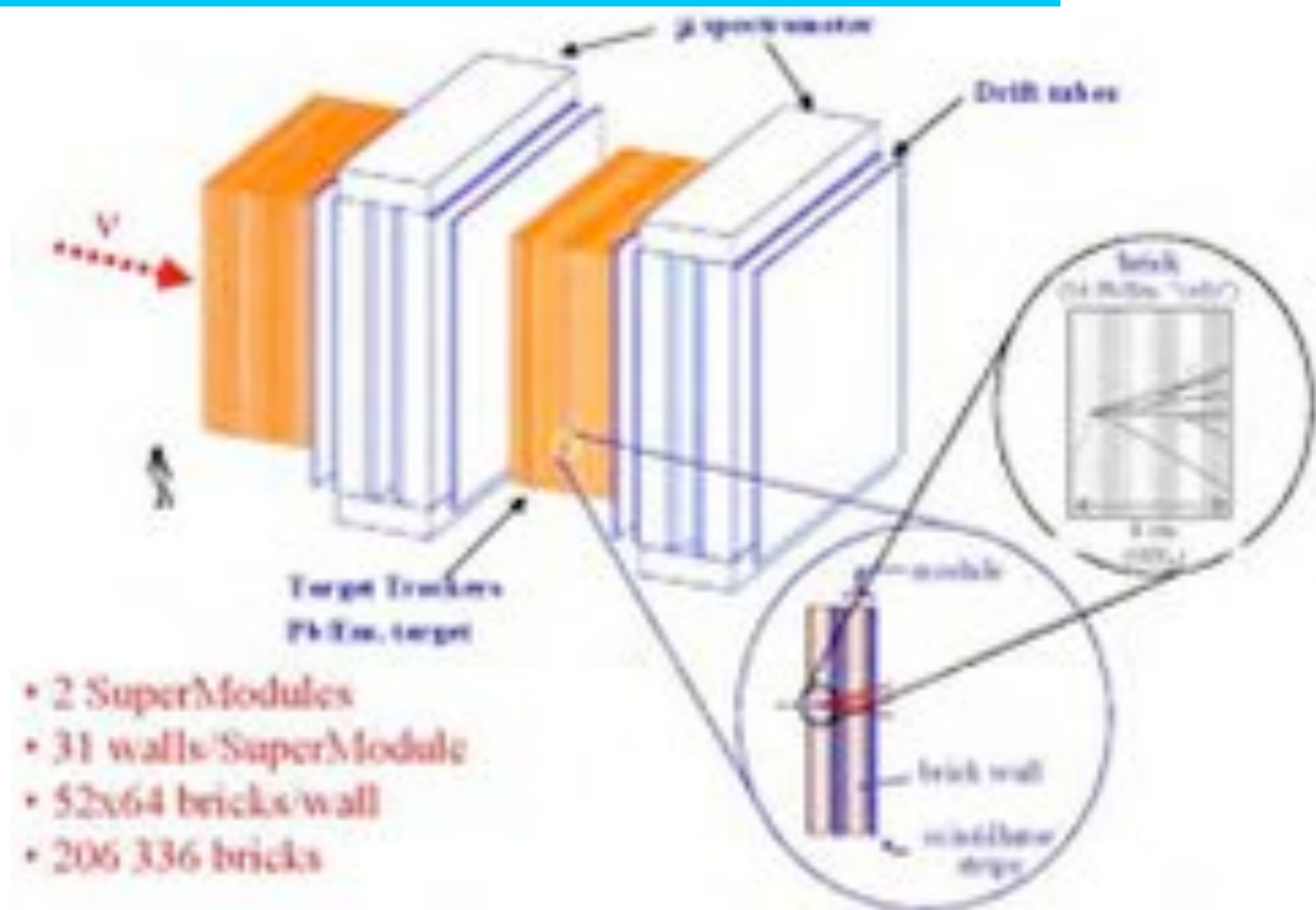


CNGS

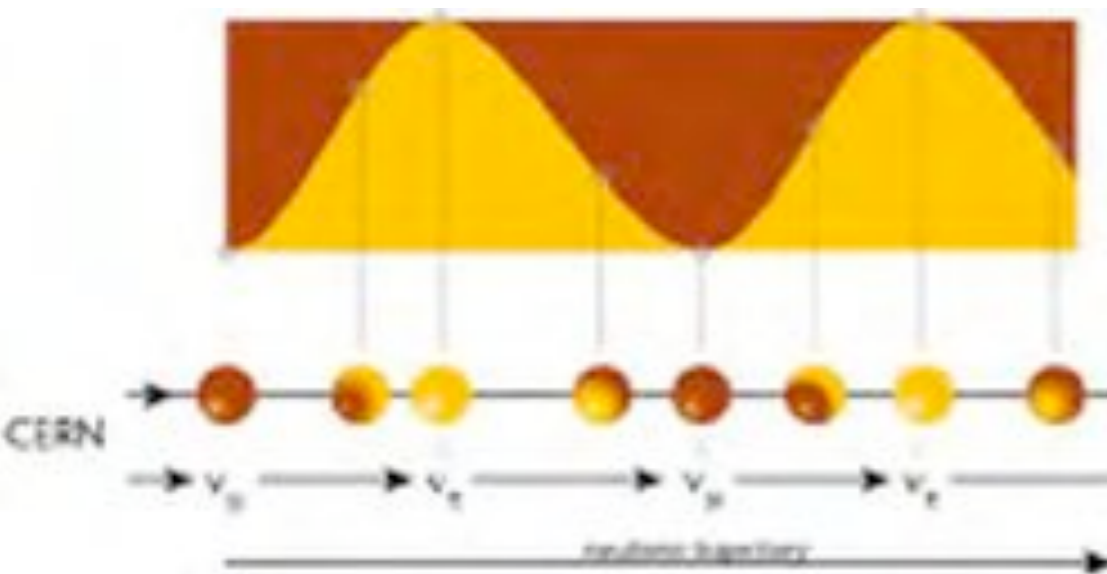
Da Ginevra al Gran Sasso in 2.5 millisecondi



Lavori di posa del grande tubo a vuoto (lunghezza di 1 km e diametro di 2.5 m) in cui vengono prodotti i neutrini diretti al Gran Sasso. Cngs promette di essere il primo a fornire una prova diretta del fenomeno dell'oscillazione dei neutrini.



Due esperimenti sono stati concepiti per identificare le particelle in arrivo. Al CERN verranno prodotti esclusivamente neutrini muonici, come prodotto di decadimento di π e K in un tunnel lungo 1 km e diretto verso il Gran Sasso. 2.5 millisecondi dopo, quando il fascio arriverà al Gran Sasso, dopo aver percorso circa 730 chilometri alla velocità della luce, i ricercatori si aspettano di captare un piccolissimo numero di neutrini-tau, anche se quelli che subiscono l'oscillazione saranno molti di più, circa 15 sui molti miliardi di miliardi che arriveranno. Gli esperimenti sono Opera e IcarusT600. Il primo è un gigantesco rivelatore dal peso di 1700 tonnellate, essenzialmente formato da 12 milioni di emulsioni nucleari alternate con sottili strati di piombo. I pochissimi neutrini tau interagiranno con gli atomi di piombo, producendo una particella carica che lascerà una traccia nell'emulsione fotografica e potrà essere così individuata da rivelatori costituiti da strisce scintillanti. T600 utilizzerà invece come rivelatore 600 tonnellate di argon liquido e i prodotti dell'interazione fra i suoi atomi e i neutrini verranno registrati da una serie di sensori. È necessario che gli esperimenti si svolgano presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso perché questi si trovano sotto circa 1400 metri di roccia che costituisce un efficientissimo schermo contro la radiazione cosmica.



Oscillazioni del fascio di ν prodotto al CERN e diretto al Gran Sasso

