

# Fisica del Neutrino

Carlo Giunti

INFN, Sezione di Torino

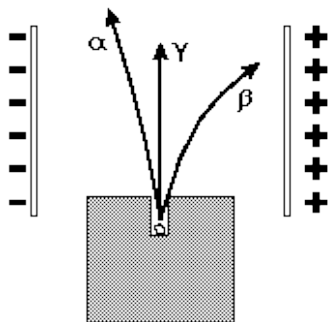
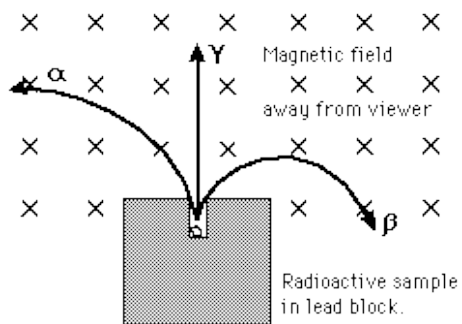
[carlo.giunti@to.infn.it](mailto:carlo.giunti@to.infn.it)

Accademia delle Scienze di Torino

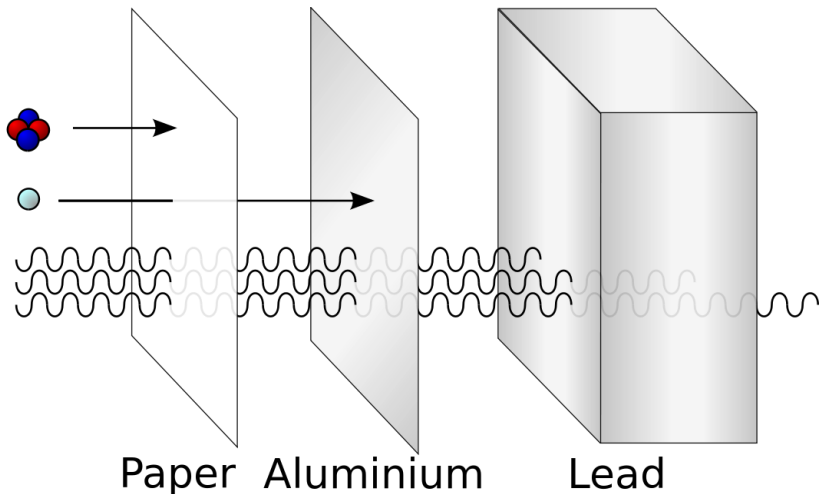
31 Gennaio & 7 Febbraio 2019

## Preistoria del Neutrino

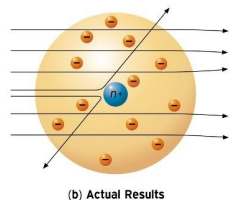
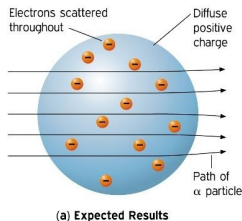
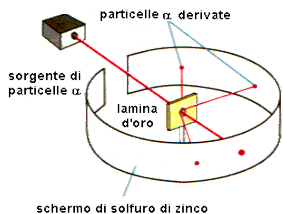
- ▶ **1896:** Henri Becquerel scopre la radioattività dell'Uranio (“raggi uranici”).  
(Premio Nobel 1903 per la Fisica)
- ▶ **1897:** Joseph John Thomson studiando i “raggi catodici” scopre che sono particelle cariche che chiama **elettroni**.  
(Premio Nobel 1906 per la Fisica)
- ▶ **1898:** Marie Curie scopre la radioattività del Torio e propone il nome radioattività. Pierre e Marie Curie scoprono due nuovi elementi, il Radio e il Polonio, che sono molto più radioattivi dell'Uranio.  
(Pierre e Marie Curie: Premio Nobel 1903 per la Fisica - Marie Curie: Premio Nobel 1911 per la Chimica)
- ▶ **1899:** Ernest Rutherford scopre che ci sono due tipi di radiazione: alfa, carica positivamente, e **beta**, carica negativamente.  
(Premio Nobel 1908 per la Chimica)
- ▶ **1900:** Paul Villard scopre un terzo tipo di radiazione: i raggi **gamma**.



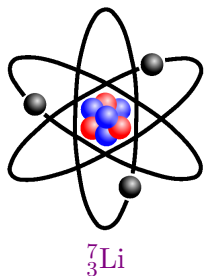
$\alpha$   
 $\beta$   
 $\gamma$



- ▶ **1902:** Ernest Rutherford e Frederick Soddy formulano la teoria delle trasformazioni atomiche: gli elementi radioattivi sono atomi instabili che decadono in atomi diversi emettendo radiazione: gli elementi non sono immutabili! (Soddy: Premio Nobel 1921 per la Chimica)
- ▶ **1911:** Ernest Rutherford formula il primo modello nucleare dell'atomo: un nucleo pesante positivo con elettroni leggeri orbitanti. L'atomo più leggero è quello di Idrogeno e Rutherford chiamò il suo nucleo **protone**.



- ▶ **1932:** James Chadwick scopre il **neutrone**, che ha una massa simile al protone, ma è neutro.
- ▶ Modello attuale dell'atomo:



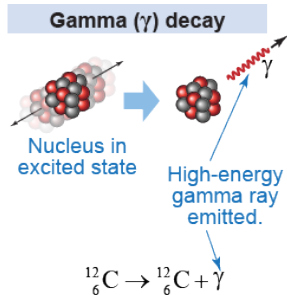
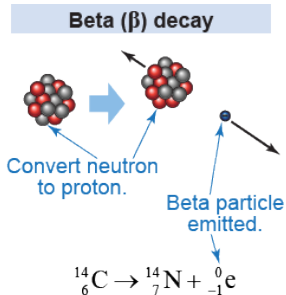
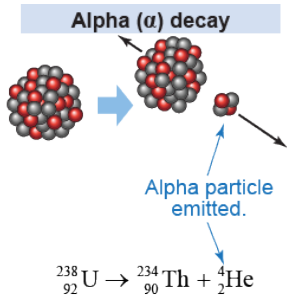
Notazione nucleare:  ${}^A_Z\text{Elemento}$

$Z$  numero atomico (numero di protoni)

$A$  numero di massa (numero di protoni + neutroni)

numero di elettroni = numero di protoni

- ▶ Un nucleo radioattivo può decadere emettendo:
  - ▶  $\alpha$ : un nucleo di Elio-4 (2 protoni + 2 neutroni:  ${}^4_2\text{He}$ );
  - ▶  $\beta$ : un elettrone ( $e$ );
  - ▶  $\gamma$ : un fotone di alta energia ( $\gamma$ ).

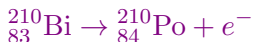
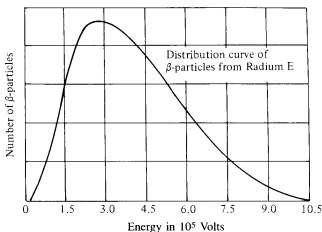


# Decadimento Beta

- ▶ **1914:** James Chadwick scopre che lo spettro di energia degli elettroni (“raggi beta”) emessi nei decadimenti beta è continuo.

Esempio:

[C.D. Ellis e W.A. Wooster, 1927]



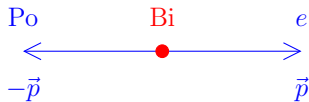
Bi = Bismuto (Radio E)

Po = Polonio

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- ▶ Lo stato finale del decadimento è composto da 2 particelle (il nucleo decaduto e l'elettrone)  $\implies$  La conservazione dell'energia e dell'impulso implica che l'energia dell'elettrone puo' assumere solo un valore determinato.



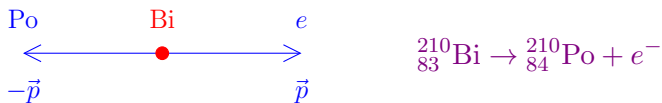


- ▶ Conservazione dell'impulso:  $\vec{p}_{\text{Po}} = -\vec{p}_e \implies \vec{p}_e = \vec{p}$  e  $\vec{p}_{\text{Po}} = -\vec{p}$
- ▶ Conservazione dell'energia:  $E_{\text{Po}} + E_e = E_{\text{Bi}}$

### Fisica classica (non relativistica) + energia di massa

$$\vec{p} = m\vec{v} \qquad E = E_m + \frac{1}{2}mv^2 = E_m + \frac{p^2}{2m}$$

- ▶  $E_{m_{\text{Po}}} + \frac{p^2}{2m_{\text{Po}}} + E_{m_e} + \frac{p^2}{2m_e} = E_{m_{\text{Bi}}}$
- ▶  $p^2 = 2(E_{m_{\text{Bi}}} - E_{m_{\text{Po}}} - E_{m_e}) \left( \frac{m_{\text{Po}}m_e}{m_{\text{Po}} + m_e} \right)$
- ▶  $E_e = E_{m_e} + \frac{p^2}{2m} = E_{m_e} + (E_{m_{\text{Bi}}} - E_{m_{\text{Po}}} - E_{m_e}) \left( \frac{m_{\text{Po}}}{m_{\text{Po}} + m_e} \right)$

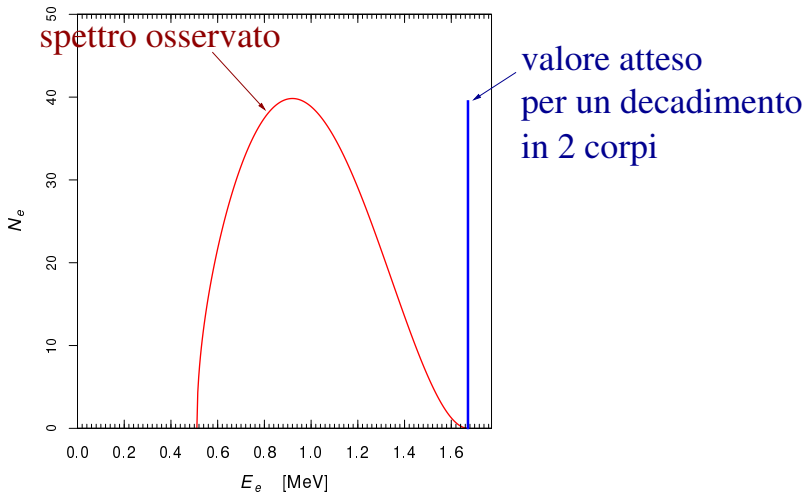


- ▶ Conservazione dell'impulso:  $\vec{p}_{\text{Po}} = -\vec{p}_e \implies \vec{p}_e = \vec{p}$  e  $\vec{p}_{\text{Po}} = -\vec{p}$
- ▶ Conservazione dell'energia:  $E_{\text{Po}} + E_e = E_{\text{Bi}}$

### Fisica moderna (relativistica)

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

- ▶  $\sqrt{m_{\text{Po}}^2c^4 + p^2c^2} + \sqrt{m_e^2c^4 + p^2c^2} = m_{\text{Bi}}c^2$
- ▶  $p^2 = \frac{(m_{\text{Bi}}^4 + m_{\text{Po}}^4 + m_e^4 - 2m_{\text{Bi}}^2m_{\text{Po}}^2 - 2m_{\text{Bi}}^2m_e^2 - 2m_{\text{Po}}^2m_e^2)c^2}{4m_{\text{Bi}}^2}$
- ▶  $E_e = \sqrt{m_e^2c^4 + p^2c^2} = \frac{(m_{\text{Bi}}^2 - m_{\text{Po}}^2 + m_e^2)c^2}{2m_{\text{Bi}}}$



### Spiegazioni?

- ▶ Niels Bohr: Nei decadimenti  $\beta$  l'energia non è conservata.
- ▶ ...?

# La nascita del Neutrino: Pauli - 4 Dicembre 1930

- ▶ 4 Dicembre 1930: lettera pubblica di Wolfgang Pauli al “gruppo dei Radioattivi” di un congresso di fisica a Tubinga:

*Cari Signore e Signori Radioattivi,*

*... a causa dello spettro continuo del decadimento beta, ... ho pensato a un disperato rimedio per salvare ... il principio di conservazione dell'energia.*

*Si tratta della possibilità che esista ... una particella elettricamente neutra, che vorrei chiamare neutrone ...*

*Potremmo così spiegare lo spettro continuo assumendo che nel decadimento beta è emesso un neutrone assieme all'elettrone*

*...*

*Per il momento, comunque, non oso pubblicare niente su questa idea ...*

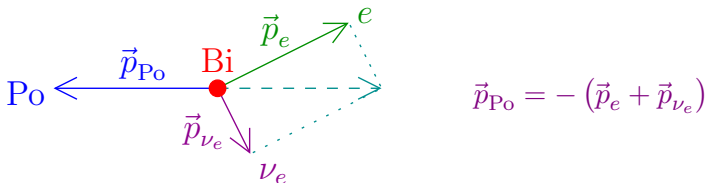
- ▶ Pochi giorni dopo Pauli ricevette una lettera da Hans Geiger con una risposta positiva e incoraggiante.
- ▶ Nel 1931 Pauli andò a Roma dove incontrò Enrico Fermi che fu subito interessato alla nuova idea.

- ▶ Secondo l'ipotesi di Pauli i decadimenti beta sono del tipo



- ▶ Per consistenza con il seguito, ho usato per la nuova particella la notazione attuale  $\bar{\nu}_e$  che indica un **antineutrino elettronico**.
- ▶ Secondo la teoria quantistica relativistica a ogni particella corrisponde una antiparticella (quando non coincidono).
- ▶ La scelta di considerare, ad esempio, l'elettrone una particella e il positrone la sua antiparticella è arbitraria e dovuta al fatto che viviamo in un mondo di elettroni.
- ▶ Per ragioni che vedremo in seguito è conveniente chiamare l'oggetto che viene emesso nel decadimento beta **antineutrino elettronico**.

- ▶ Con uno stato finale composto da 3 particelle, gli impulsi possono essere diversi, con somma totale zero:



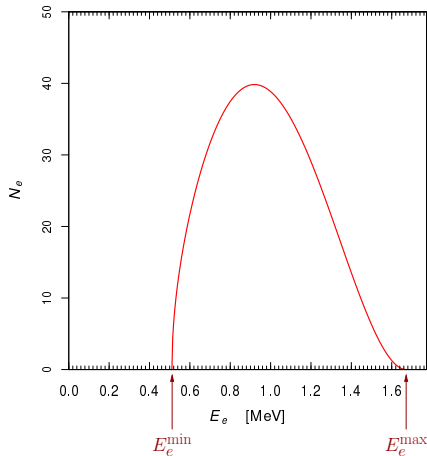
- ▶ Conservazione dell'energia:

$$\sqrt{m_{P_0}^2 c^4 + |\vec{p}_e + \vec{p}_{\nu_e}|^2 c^2} + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} + \sqrt{m_{\nu_e}^2 c^4 + p_{\nu_e}^2 c^2} = m_{Bi} c^2$$

3 incognite:  $p_e^2$ ,  $p_{\nu_e}^2$  e l'angolo tra  $\vec{p}_e$  e  $\vec{p}_{\nu_e}$



soluzione indeterminata



▶ Minimo valore di  $E_e$ :  $\vec{p}_e = 0 \implies E_e^{\min} = m_e c^2$

▶ Massimo valore di  $E_e$ :  $\vec{p}_{\nu_e} = 0 \implies E_e^{\max} = \frac{(m_{\text{Bi}}^2 - m_{\text{Po}}^2 + m_e^2) c^2}{2m_{\text{Bi}}}$

# La teoria delle Interazioni Deboli di Fermi

- ▶ 1932: James Chadwick scopre il neutrone.
- ▶ 1933: Enrico Fermi propone il nome **neutrino** al Congresso Solvay a Brussels.
- ▶ 1933-34: Enrico Fermi formula la teoria delle **Interazioni Deboli**.

## *TENTATIVO DI UNA TEORIA DELL'EMISSIONE DEI RAGGI BETA*

*[E. Fermi, Ricerca Scientifica 4 (1933) 491]*

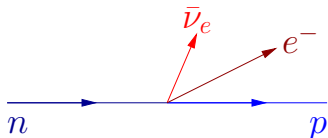
*Riassunto. – Teoria della emissione dei raggi  $\beta$  delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.*



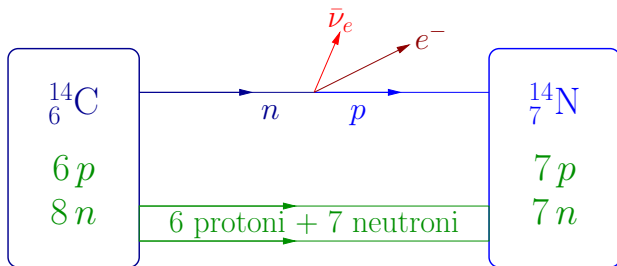
# Interazioni dei neutrini

La teoria di Fermi descrive le interazioni dei neutrini nei decadimenti nucleari e implica la possibilità di rivelare i neutrini.

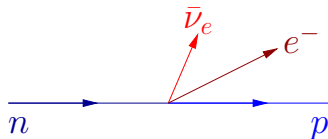
- ▶ Decadimento del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



- ▶ Decadimento  $\beta$  nucleare:  ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$



## L'esistenza dell'interazione



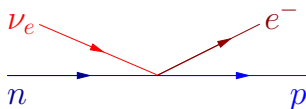
implica che esistono anche tutte le interazioni ottenute con:

- ▶ Scambio degli stati iniziali e finali.
- ▶ Simmetria di crossing: scambio di una particella iniziale (finale) con la corrispondente antiparticella finale (iniziale).

Quindi si possono avere i processi di

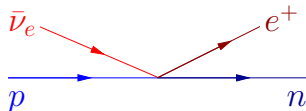
- ▶ Rivelazione di neutrini:

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$



- ▶ Rivelazione di antineutrini:

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



# È possibile rivelare i neutrini?

- ▶ Fin dall'inizio fu chiaro che la rivelazione dei neutrini è molto difficile, perchè interagiscono solo con le Interazioni Deboli.
- ▶ Con la teoria di Fermi fu possibile calcolare l'interazione dei neutrini con la materia:

## *The "Neutrino"*

*[H. Bethe, R. Peierls, Nature 133 (1934) 532]*

*For an energy of 2 – 3 MeV ... a penetrating power of  $10^{16}$  km in solid matter. It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.*

*... one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.*

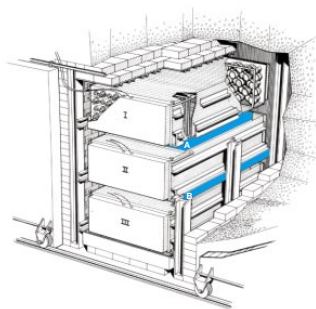
- ▶  $10^{16}$  km  $\approx 10^3$  anni luce  $\approx 10$  volte il diametro della Via Lattea.
- ▶ Quindi per molti anni nessuno pensò alla rivelazione dei neutrini, che restarono nel limbo delle ipotesi fisiche.

- ▶ Però, la rarità delle interazioni dei neutrini può essere controbilanciata da una sorgente sufficientemente intensa.
- ▶ Se i neutrini hanno una lunghezza di penetrazione di circa  $10^{16}$  km =  $10^{19}$  m, la probabilità di interazione in ogni metro di materia è circa  $10^{-19}$ .
- ▶ Quindi con una sorgente che emette  $10^{19}$  neutrini si può avere una interazione in un rivelatore lungo circa 1 m.
- ▶ Il problema era che negli anni 30 non si conosceva nessuna sorgente così intensa e non si era in grado di costruire grandi rivelatori.

- 1951: Clyde Cowan e Frederick Reines iniziano a progettare la rivelazione di antineutrini tramite il processo

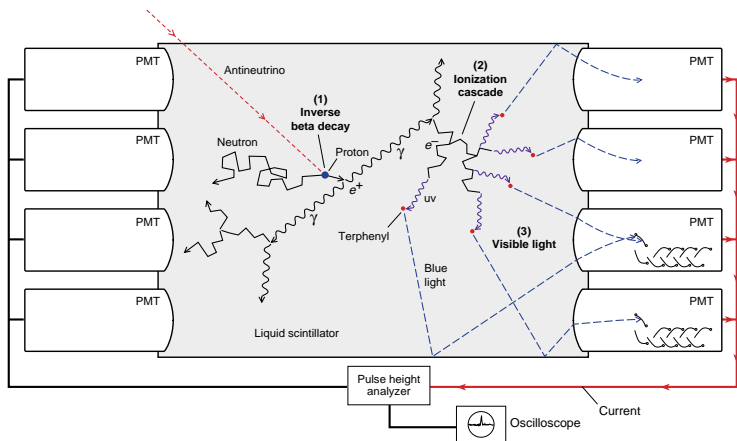


con un grande rivelatore ( $\sim 1 \text{ m}^3$ ) riempito di scintillatore liquido e tappezzato di fotomoltiplicatori: **El Monstro**

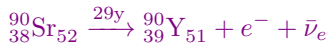
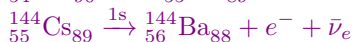
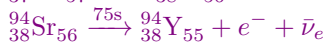
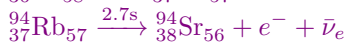
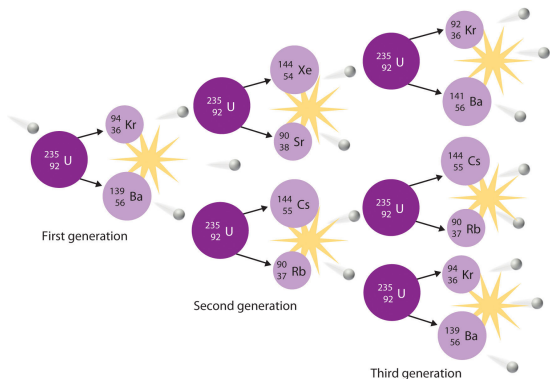


The neutrino detector is illustrated here inside its lead shield. Each of two large, flat plastic tanks (pictured in light blue and labeled A and B) was filled with 200 liters of water. The protons in the water provided the target for inverse beta decay; cadmium chloride dissolved in the water provided the cadmium nuclei that would capture the neutrons. The target tanks were sandwiched between three scintillation detectors (I, II, and III). Each detector contained 1,400 liters of liquid scintillator that was viewed by 110 photomultiplier tubes. Without its shield, the assembled detector weighed about 10 tons.

- ▶ In quel tempo i rivelatori più grandi avevano un volume di circa un litro!
- ▶ Lo scintillatore liquido era stato appena scoperto nel 1949-50.
- ▶ L'idea era di rivelare il positrone emesso nel processo  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ .



- ▶ Problema: come trovare una sorgente di antineutrini sufficientemente intensa?
- ▶ Una **bomba atomica**?
- ▶ Reines aveva lavorato a Los Alamos ai test delle bombe atomiche dopo la seconda guerra mondiale.
- ▶ Nella fissione di nuclei pesanti si creano nuclei leggeri altamente radioattivi, perchè ricchi di neutroni.
- ▶ I decadimenti  $\beta$  dei prodotti di fissione producono un enorme flusso di neutrini.





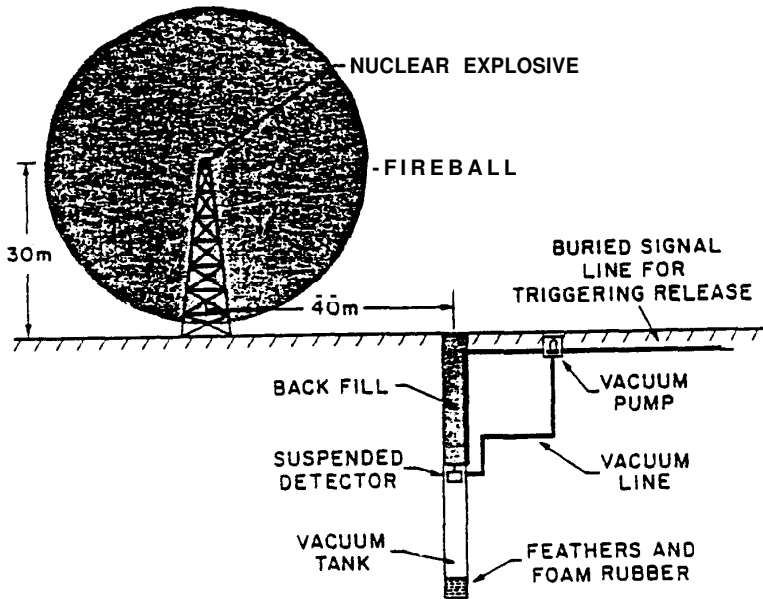
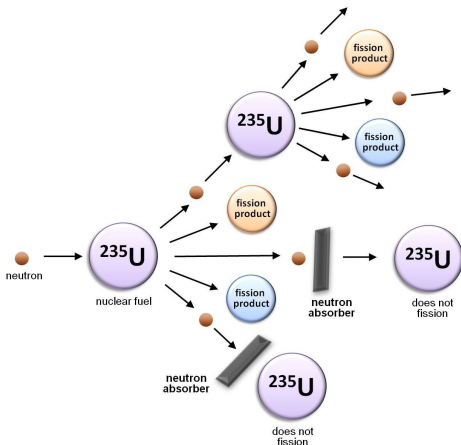
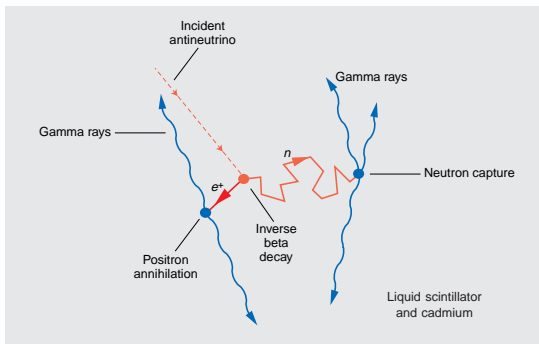


Figure 1. Sketch of the originally proposed experimental setup to detect the neutrino using a nuclear bomb. This experiment was approved by the authorities at Los Alamos but was superseded by the approach which used a fission reactor. [Reines, Nobel Lecture 1995]

- ▶ Mentre portavano avanti il progetto con la bomba atomica, Cowan e Reines pensavano anche alla possibilità preferibile di usare come sorgente un **reattore nucleare**.
- ▶ Il primo reattore nucleare fu costruito all'Università di Chicago nel **1942** da un gruppo di fisici guidato da **Enrico Fermi**.

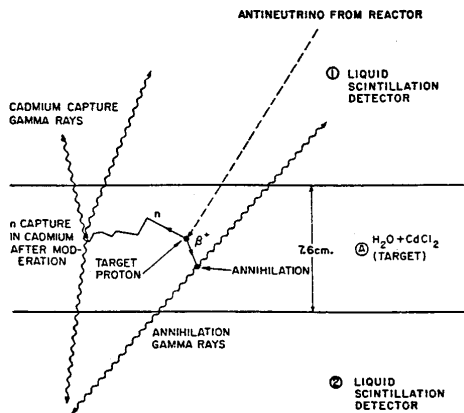


- ▶ Le prime centrali nucleari iniziarono a operare nei primi anni 50.
- ▶ Un reattore nucleare emette un flusso di circa  $2 \times 10^{20}$  antineutrini al secondo per ogni GigaWatt di potenza termica.
- ▶ Il problema per la rivelazione dei neutrini sono i segnali spuri (fondo) generati da altre particelle: raggi cosmici (principalmente  $\mu$ ), neutroni, raggi gamma.
- ▶ **1952:** Cowan e Reines capiscono che la rivelazione del neutrone in coincidenza ritardata ( $\lesssim 200 \mu\text{s}$ ) con il positrone in  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  permette di ridurre drasticamente il fondo.



# La scoperta del Neutrino

- 1956: Un gruppo di fisici guidato da Clyde Cowan e Frederick Reines rivela per la prima volta gli antineutrini ( $\bar{\nu}_e$ ) emessi dal reattore della centrale nucleare di Savannah River in South Carolina.



- Frederick Reines ha ricevuto il Premio Nobel 1995 per la Fisica. Sfortunatamente Clyde Cowan è mancato nel 1974.

## Mai Dire Mai

- ▶ La rivelazione degli (anti)neutrini di Cowan e Reines nel 1956 dimostrò che le previsioni pessimistiche dello studio del 1934 di Bethe e Peierls erano sbagliate (“there is no practically possible way of observing the neutrino”).

*I confronted Bethe with this pronouncement some 20 years later and with his characteristic good humor he said, “Well, you shouldn’t believe everything you read in the papers”.*

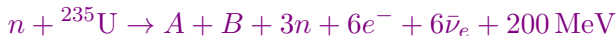
*[Reines, Nobel Lecture 1995]*

- ▶ È importante però notare che non ci è possibile interagire direttamente con i neutrini, come facciamo con i protoni, neutroni e elettroni che costituiscono la materia, o con la radiazione elettromagnetica (luce).
- ▶ Possiamo solo rivelare le particelle che vengono prodotte dai neutrini nelle loro rare interazioni con la materia.
- ▶ Ad esempio, i circa  $2 \times 10^{20}$  antineutrini al secondo per GigaWatt prodotti in un reattore nucleare producono solamente circa una interazione ogni 2 secondi in un rivelatore di una tonnellata posto a una distanza di circa 10 m.
- ▶ I neutrini possono essere considerati una specie di **particelle fantasma** (ghost, poltergeist).

## Esercizio

Calcolo della frequenza di interazioni dei  $\bar{\nu}_e$  emessi da un reattore della potenza di 1 GW in un rivelatore con una massa di 1 tonnellata alla distanza di 10 m

- ▶  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 6.2 \times 10^{12} \text{ MeV/s}$
- ▶  $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W} = 6.2 \times 10^{21} \text{ MeV/s}$
- ▶ Fissione dell' $^{235}\text{U}$ : in media circa



- ▶ Frequenza approssimata delle fissioni:

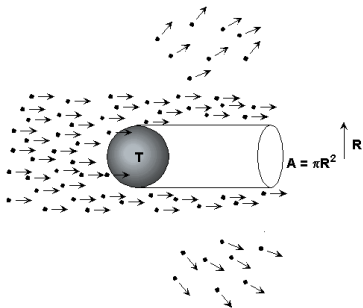
$$6.2 \times 10^{21} \text{ MeV/s} \left( \frac{1 \text{ fissione}}{200 \text{ MeV}} \right) = 3.1 \times 10^{19} \text{ fissioni/s}$$

- ▶ Intensità approssimata di antineutrini:

$$3.1 \times 10^{19} \text{ fissioni/s} \left( \frac{6\bar{\nu}_e}{1 \text{ fissione}} \right) \simeq 2 \times 10^{20} \bar{\nu}_e/\text{s}$$

► Processo di rivelazione:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

► Concetto necessario: sezione d'urto



$$\sigma = A = \pi R^2$$

► Per un oggetto macroscopico la sezione d'urto  $\sigma$  e' l'area della sezione nel piano ortogonale alla direzione dei proiettili.

► Conoscendo la sezione d'urto  $\sigma$  si può calcolare la frequenza di interazioni  $F_{\text{int}}$  di un flusso uniforme  $\Phi_P$  di proiettili:

$$F_{\text{int}} = \sigma \Phi_P \quad \text{con il flusso} \quad \Phi_P = \frac{N_P}{\text{area} \times \text{tempo}}$$



- ▶ Processo di rivelazione:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$
- ▶ Le particelle elementari sono puntiformi, ma sono circondate da un campo di forza che genera una sezione d'urto (area efficace per l'interazione).
- ▶ Conoscendo la sezione d'urto  $\sigma$  si può calcolare la frequenza di interazioni  $F_{\text{int}}$  di un flusso uniforme  $\Phi_{\bar{\nu}_e}$  di  $\bar{\nu}_e$  in un rivelatore contenente  $N_p$  protoni:

$$F_{\text{int}} = \sigma N_p \Phi_{\bar{\nu}_e} \quad \text{con il flusso} \quad \Phi_{\bar{\nu}_e} = \frac{N_{\bar{\nu}_e}}{\text{area} \times \text{tempo}}$$

- ▶ Per i  $\bar{\nu}_e$  prodotti nella fissione dell' $^{235}\text{U}$ :  $\sigma \simeq 1.1 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$

- ▶ Flusso di  $\bar{\nu}_e$  a  $d = 10 \text{ m} = 10^3 \text{ cm}$ :

$$\Phi_{\bar{\nu}_e} = \frac{N_{\bar{\nu}_e}}{\text{area} \times \text{tempo}} \simeq \frac{2 \times 10^{20} / \text{s}}{4\pi d^2} = \frac{2 \times 10^{20} / \text{s}}{4\pi 10^6 \text{ cm}^2} = \frac{1.6 \times 10^{13}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

- ▶ Numero di protoni in 1 tonnellata di scintillatore (principalmente  ${}^{12}_6\text{C}$ ):

$$N_p \simeq 6 N_{{}^{12}_6\text{C}} = 6 \frac{10^6 \text{ g}}{12 \text{ g}} N_A = \frac{10^6}{2} 6 \times 10^{23} = 3 \times 10^{29}$$

- ▶ Frequenza di interazioni:

$$F_{\text{int}} = \sigma N_p \Phi_{\bar{\nu}_e} \simeq (1.1 \times 10^{-43} \text{ cm}^2) (3 \times 10^{29}) \left( \frac{1.6 \times 10^{13}}{\text{cm}^2 \text{ s}} \right)$$

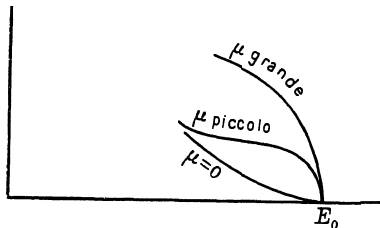
$$F_{\text{int}} \simeq 0.5/\text{s}$$

# Quanto vale la massa del neutrino?

## TENTATIVO DI UNA TEORIA DEI RAGGI $\beta$

[E. Fermi, *Nuovo Cimento* 11 (1934) 1]

La dipendenza della forma della curva di distribuzione dell'energia da  $\mu$  è marcata specialmente in vicinanza della energia massima  $E_0$  dei raggi  $\beta$ .



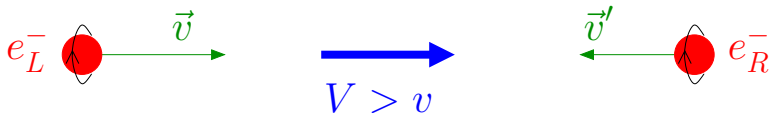
La maggiore somiglianza con le curve sperimentali si ha per la curva teorica corrispondente a  $\mu = 0$ . Arriviamo così a concludere che la massa del neutrino è uguale a zero o, in ogni caso, piccola in confronto della massa dell'elettrone.

## Teoria dei Neutrini senza massa

- ▶ 1957: Landau, Lee & Yang, e Salam ipotizzano che i neutrini sono privi di massa ed esistono solamente con polarizzazione sinistrorsa ( $\nu_{eL}$ ) o polarizzazione destrorsa ( $\nu_{eR}$ ).



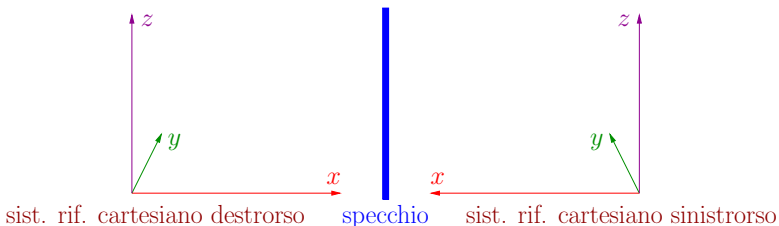
- ▶ Le particelle massive si muovono a velocità inferiori a quella della luce.
- ▶ E' possibile considerare un osservatore che si muove nella stessa direzione della particella con velocità superiore:



- ▶ La polarizzazione delle particelle massive dipende dal sistema di riferimento dell'osservatore.
- ▶ Le particelle massive esistono necessariamente sia nello stato sinistrorso che in quello destrorso.
- ▶ Solo le particelle senza massa possono esistere unicamente con polarizzazione sinistrorsa o destrorsa.
- ▶ C'e' anche un altro requisito: la **violazione della parità**.

# Violazione della Parità

- ▶ La Parità è la simmetria per **inversione spaziale**, che si ottiene in uno specchio, dove sinistra e destra vengono scambiate.

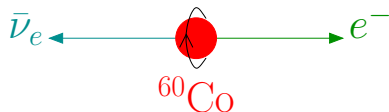


- ▶ Prima del 1956 la Parità era considerata una simmetria esatta.
- ▶ **1956:** T.D. Lee e C.N. Yang ipotizzano che la Parità sia violata nelle Interazioni Deboli (Premio Nobel 1957 per la Fisica).
- ▶ **1957:** C.S. Wu e collaboratori scoprono la violazione della Parità nei decadimenti  $\beta$  del  $^{60}\text{Co}$ .

# L'esperimento di Wu

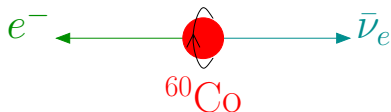


mondo reale



A

mondo dello specchio



B

specchio

- ▶ Se la parità fosse conservata, nel mondo reale si dovrebbero osservare le configurazioni A e B con la stessa frequenza.
- ▶ Invece, si osserva la configurazione A con una frequenza maggiore della configurazione B.
- ▶ Quindi, la parità è violata nelle interazioni deboli.

- ▶ Consideriamo la possibilità che i neutrini siano solamente sinistrorsi:

$\nu_{eL}$

- ▶ È possibile solamente se la parità è violata, perchè  $\nu_{eL} \xrightarrow{P} \nu_{eR}$ :

mondo reale

mondo dello specchio

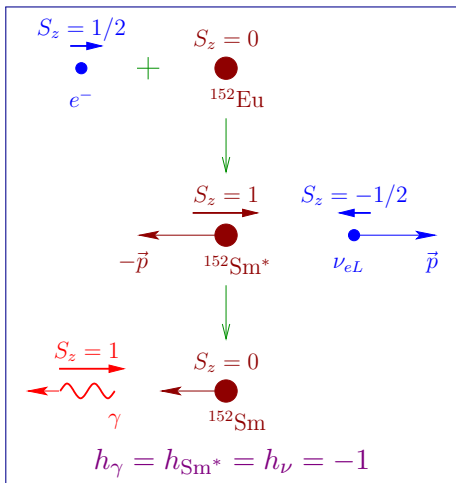


- ▶ Se la parità fosse conservata, nel mondo reale si dovrebbero osservare entrambe le configurazioni A e B, cioè i neutrini dovrebbero necessariamente esistere in entrambi gli stati di polarizzazione  $\nu_{eL}$  e  $\nu_{eR}$ .
- ▶ Siccome la parità non è conservata, se i neutrini non hanno massa possono esistere solamente nello stato sinistrorso, come ipotizzato da Landau, Lee & Yang, e Salam nel 1957, immediatamente dopo la scoperta della violazione della parità.

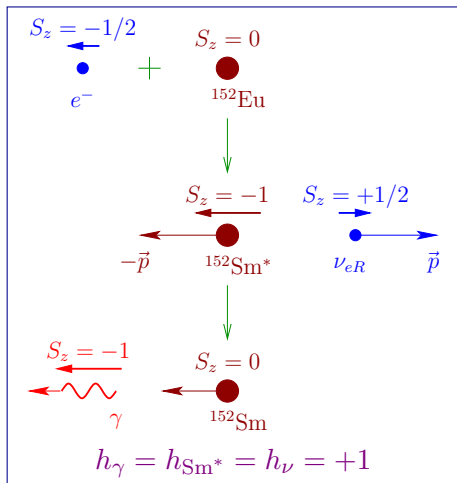


# I neutrini sono sinistrorsi

- 1958: Goldhaber, Grodzins and Sunyar misurano la polarizzazione del neutrino.



configurazione osservata



configurazione non osservata

## Proliferazione delle Particelle

- ▶ **1936:** Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer scoprono il muone ( $\mu$ ), che è un leptone, come l'elettrone, ma è circa 200 volte più pesante ( $m_e = 0.5 \text{ MeV}$  e  $m_\mu = 106 \text{ MeV}$ ).

I muoni non si trovano stabilmente nella materia perchè decadono:



- ▶ **1947:** Cecil Powell, Cesar Lattes e Giuseppe Occhialini scoprono il pione ( $\pi$ ), che è un mesone, non un leptone, e ha massa  $m_\pi = 139.6 \text{ MeV}$ .

I pioni non si trovano stabilmente nella materia perchè decadono:



## Il neutrino muonico

- ▶ Prima del 1962 non si sapeva che il neutrino elettronico  $\nu_e$  e il neutrino muonico  $\nu_\mu$  sono diversi.
- ▶ **1960: Bruno Pontecorvo** ipotizzò che l'antineutrino prodotto nel decadimento

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

possa essere diverso dal  $\bar{\nu}_e$  prodotto nei decadimenti beta:

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

che come abbiamo visto viene rivelato nel processo

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

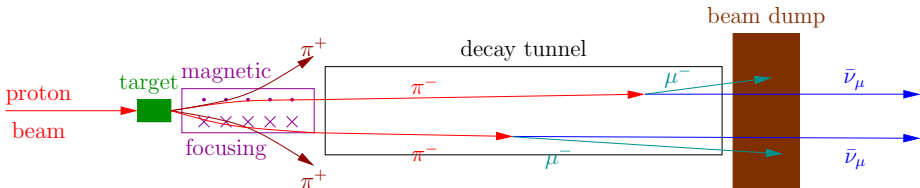
- ▶ **Pontecorvo** propose di controllare sperimentalmente se

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \xrightarrow{\text{propagazione}} \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + e^+$$

sorgente  rivelatore

- ▶ **1962: Lederman, Schwartz e Steinberger** effettuano l'esperimento al Brookhaven National Laboratory (BNL) e non osservano nessuna interazione  $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + e^+$ . Quindi  $\bar{\nu}_\mu \neq \bar{\nu}_e$  e  $\nu_\mu \neq \nu_e$ . È la scoperta di una nuova particella (Premio Nobel 1988 per la Fisica).

## Fasci di neutrini da acceleratore



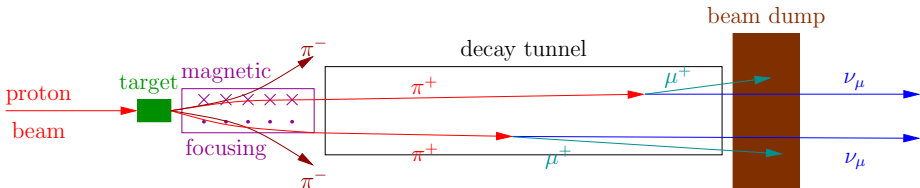
fascio composto da  $\bar{\nu}_\mu$  prodotti nei decadimenti

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \tau_{\pi^-} \simeq 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

con una piccola contaminazione di  $\bar{\nu}_e$  e  $\nu_\mu$  prodotti nei decadimenti

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \tau_{\mu^-} \simeq 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

## Fasci di neutrini da acceleratore



fascio composto da  $\nu_\mu$  prodotti nei decadimenti



con una piccola contaminazione di  $\nu_e$  e  $\bar{\nu}_\mu$  prodotti nei decadimenti



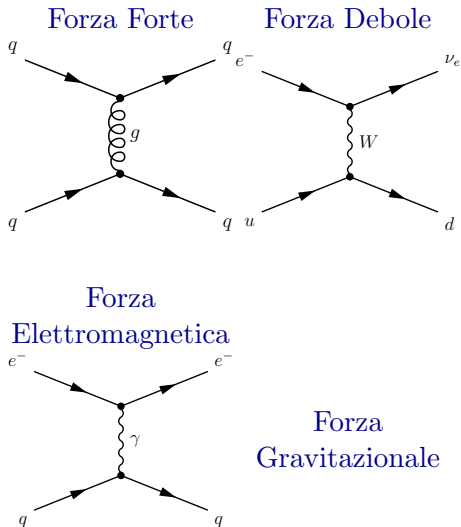
- ▶ Nei decadimenti beta nucleari:
  - ▶ Vengono prodotti solo  $\bar{\nu}_e$ .
  - ▶ Gli antineutrini sono emessi in tutte le direzioni (flusso isotropo).
  - ▶ L'energia degli antineutrini è dell'ordine del MeV.
- ▶ Nei fasci di neutrini da acceleratore:
  - ▶ Vengono prodotti principalmente  $\nu_\mu$  o  $\bar{\nu}_\mu$  a seconda della polarità della focalizzazione magnetica. C'è sempre una contaminazione di  $\nu_e$  e  $\bar{\nu}_\mu$  nel primo caso e  $\bar{\nu}_e$  e  $\nu_\mu$  nel secondo caso.
  - ▶ Gli antineutrini sono emessi in una direzione (fascio).
  - ▶ L'energia degli antineutrini è determinata dall'energia dei protoni prodotti dall'acceleratore: si va dalle centinaia di MeV a circa 100 GeV.

# Particelle e Forze

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quark</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
<b>Leptoni</b>	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole

Bosoni di gauge



► **Adroni** (dal greco  $\alpha\delta\rho\acute{o}\varsigma$  = forte): particelle che sono composte da quarks e quindi interagiscono con le interazioni forti:

► **Barioni** (dal greco  $\beta\alpha\rho\acute{\upsilon}\varsigma$  = pesante): Adroni con spin semintero:

$$p = uud, \quad n = udd, \quad \bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}, \quad \bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$$

► **Mesoni** (dal greco  $\mu\acute{\epsilon}\sigma\omicron\varsigma$  = medio): Adroni con spin intero:

$$\pi^+ = u\bar{d}, \quad \pi^- = \bar{u}d, \quad \pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} - d\bar{d})$$

► **Leptoni** (dal greco  $\lambda\epsilon\pi\tau\acute{o}\varsigma$  = leggero): particelle con spin semintero che non interagiscono con le interazioni forti:

► **Leptoni carichi:**

$$e^-, \quad \mu^-, \quad \tau^-, \quad e^+, \quad \mu^+, \quad \tau^+$$

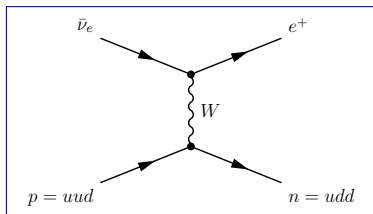
► **Neutrini:** leptoni neutri:

$$\nu_e, \quad \nu_\mu, \quad \nu_\tau, \quad \bar{\nu}_e, \quad \bar{\nu}_\mu, \quad \bar{\nu}_\tau$$

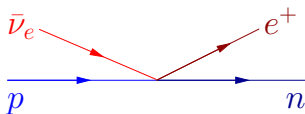
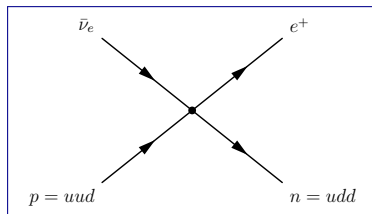


# Interazioni Deboli

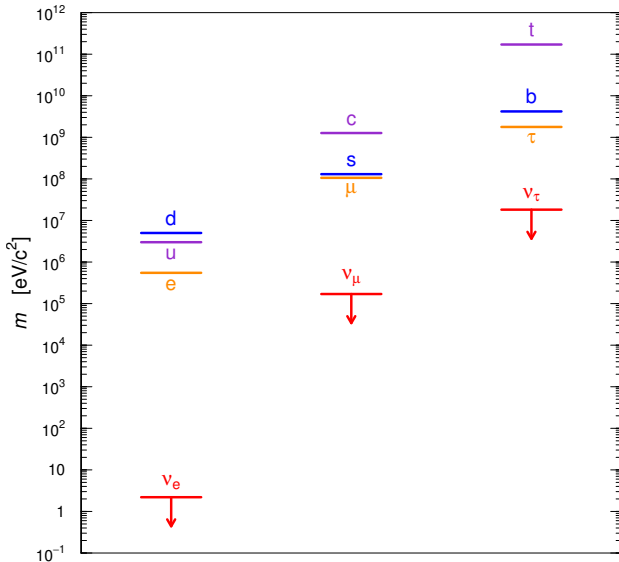
Alle basse energie, tipiche dei decadimenti nucleari, si ha l'approssimazione della teoria di Fermi:



Fermi  $\rightarrow$



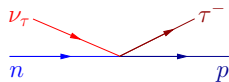
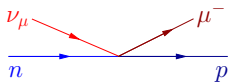
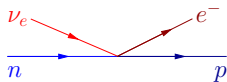
# Le masse delle particelle



- ▶ Negli anni 60 Glashow (1961), Weinberg (1967) and Salam (1968) formulano il Modello Standard che descrive le interazioni deboli e elettromagnetiche (Premio Nobel 1979 per la Fisica), incorporando la teoria di Landau, Lee & Yang, e Salam dei neutrini sinistrorsi privi di massa.
- ▶ Quindi nel Modello Standard i neutrini sono privi di massa per costruzione.
- ▶ In realtà però non esiste una ragione di principio per cui i neutrini non dovrebbero avere massa e anche gli stati destrorsi, come tutte le altre particelle.
- ▶ Ma se i neutrini hanno masse piccolissime come è possibile scoprirle?

# Le Oscillazioni dei Neutrini

- ▶ Le oscillazioni di neutrini sono state ipotizzate per la prima volta da Bruno Pontecorvo nel 1957.
- ▶ **Neutrini Interagenti:**  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  (flavor neutrinos o neutrini di sapore) prodotti e rivelati nelle interazioni deboli con la materia.



- ▶ Le oscillazioni di neutrini sono trasformazioni tra neutrini di sapore che dipendono in modo oscillante dalla distanza di propagazione.
- ▶ **Neutrini Massivi:**  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  si propagano tra la sorgente e il rivelatore.
- ▶ Un **Neutrino Interagente** (di sapore) è una **sovrapposizione quantistica** di **Neutrini Massivi**.
- ▶ Considerando per semplicità solo due generazioni:

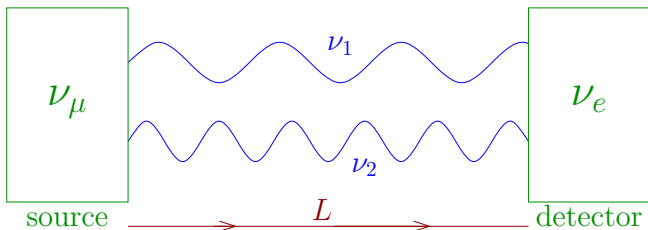
$$\nu_e = \cos \vartheta \nu_1 + \sin \vartheta \nu_2$$

$$\nu_\mu = -\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2$$

$\vartheta$ : angolo di mixing

## Esempio di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$\nu(L=0) = \nu_\mu = -\sin\vartheta \nu_1 + \cos\vartheta \nu_2$$

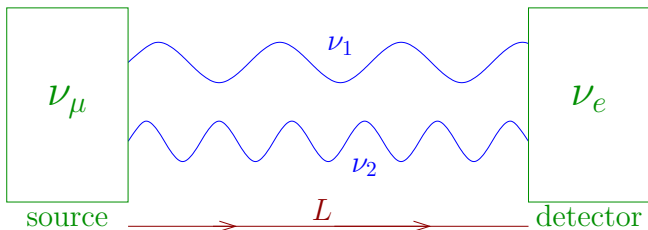


$$\nu(L > 0) = -\sin\vartheta e^{ip_1 L/\hbar} \nu_1 + \cos\vartheta e^{ip_2 L/\hbar} \nu_2$$

- ▶ Costante di Planck:  $h = 4.1 \times 10^{-15} \text{ eV s}$
- ▶ Costante di Planck ridotta:  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.6 \times 10^{-16} \text{ eV s}$

## Esempio di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$\nu(L = 0) = \nu_\mu = -\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2$$



$$\nu(L > 0) = -\sin \vartheta e^{ip_1 L/\hbar} \nu_1 + \cos \vartheta e^{ip_2 L/\hbar} \nu_2$$

- ▶ Se le masse di  $\nu_1$  e  $\nu_2$  sono uguali ( $m_1 = m_2 = m$ ) o nulle ( $m = 0$ ):

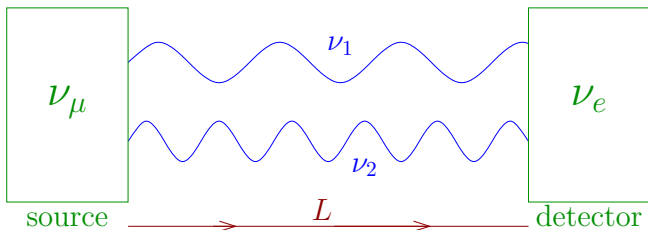
$$p_1 = p_2 = p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - m^2 c^4}$$

$$\nu(L > 0) = e^{-ipL/\hbar} (-\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2) = e^{-ipL/\hbar} \nu_\mu$$

Il  $\nu_\mu$  resta un  $\nu_\mu$  e non si ha oscillazione.

## Esempio di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$\nu(L = 0) = \nu_\mu = -\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2$$



$$\nu(L > 0) = -\sin \vartheta e^{ip_1 L/\hbar} \nu_1 + \cos \vartheta e^{ip_2 L/\hbar} \nu_2$$

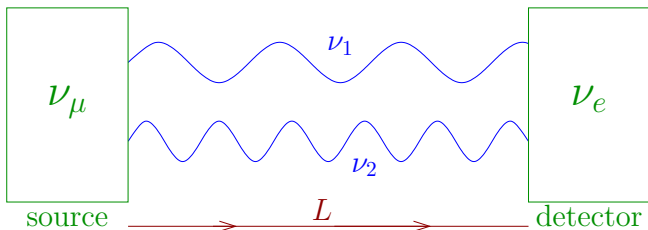
- ▶ Se le masse di  $\nu_1$  e  $\nu_2$  sono diverse:

$$p_1 = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - m_1^2 c^4} \quad \text{e} \quad p_2 = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - m_2^2 c^4}$$

Quindi  $p_1 \neq p_2$  e  $\nu(L > 0) \neq \nu_\mu$ , per cui si ha oscillazione.

## Esempio di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$$\nu(L = 0) = \nu_\mu = -\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2$$



$$\nu(L > 0) = -\sin \vartheta e^{ip_1 L/\hbar} \nu_1 + \cos \vartheta e^{ip_2 L/\hbar} \nu_2$$

- Le oscillazioni dipendono dalla differenza degli impulsi per la distanza:

$$\frac{(p_2 - p_1) L}{\hbar}$$



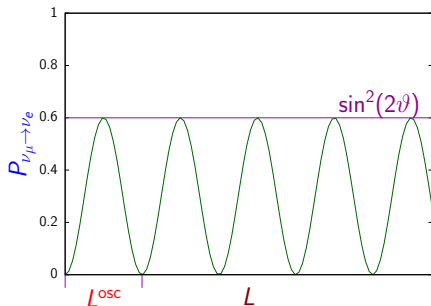
$$\blacktriangleright p_1 = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - m_1^2 c^4} \quad \text{e} \quad p_2 = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - m_2^2 c^4}$$

- ▶ Le masse dei neutrini sono più piccole di circa  $2 \text{ eV}/c^2$ .
- ▶ L'energia dei neutrini è molto più grande: circa  $1 \text{ MeV}$  per i neutrini da reattore e molto più grande per i fasci di neutrini da acceleratore.
- ▶ In questo caso si può fare **l'approssimazione ultrarelativistica**

$$p_1 \simeq \frac{E}{c} + \frac{m_1^2}{2E} c^3 \quad \text{e} \quad p_2 \simeq \frac{E}{c} + \frac{m_2^2}{2E} c^3$$

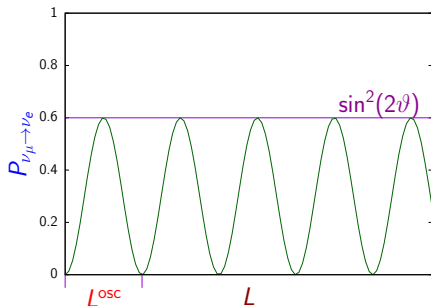
- ▶ Quindi in pratica le oscillazioni dipendono da

$$\frac{(p_2 - p_1) L}{\hbar} \simeq \frac{\Delta m^2}{2E} \frac{c^3}{\hbar} L \quad \text{con} \quad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$



$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \frac{c^3}{\hbar}\right)$$

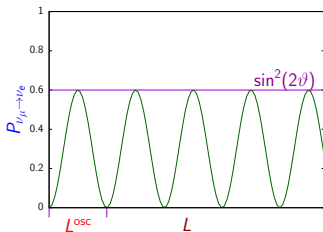
- ▶ La probabilità di oscillazione dipende dall'angolo di mixing  $\vartheta$  e da  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ .
- ▶ I neutrini oscillano perché hanno massa!
- ▶ Le oscillazioni di neutrini sono lo strumento ottimale per rivelare piccole differenze di massa, perché l'effetto è amplificato dalla distanza di propagazione  $L$ .



$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}\right)$$

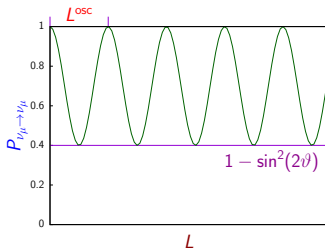
$$L \sim \begin{cases} 10 - 100 \text{ m} & \text{esperimenti short-baseline} & \Delta m^2 \sim 0.1 \frac{\text{eV}^2}{c^4} \\ 1 - 13000 \text{ km} & \text{esperimenti long-baseline} \\ & \text{e neutrini atmosferici} & \Delta m^2 \sim 10^{-4} \frac{\text{eV}^2}{c^4} \\ 150 \times 10^6 \text{ km} & \text{neutrini solari} & \Delta m^2 \sim 10^{-11} \frac{\text{eV}^2}{c^4} \end{cases}$$

- Probabilità di transizione:  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2[\text{eV}^2] L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]}\right)$



- Probabilità di sopravvivenza:

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} = 1 - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2[\text{eV}^2] L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]}\right)$$



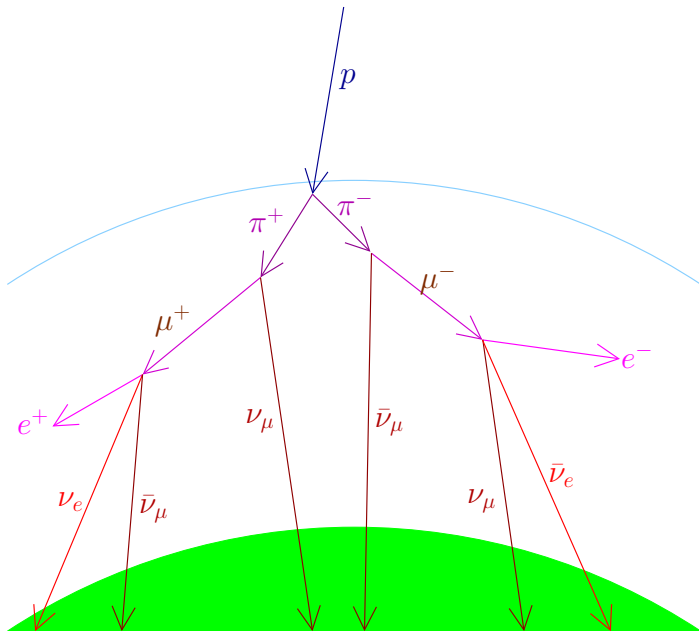
# Scoperta delle oscillazioni di neutrini

1998: l'esperimento Super-Kamiokande scopre le oscillazioni dei neutrini atmosferici

Takaaki Kajita: Premio Nobel 2015 per la Fisica

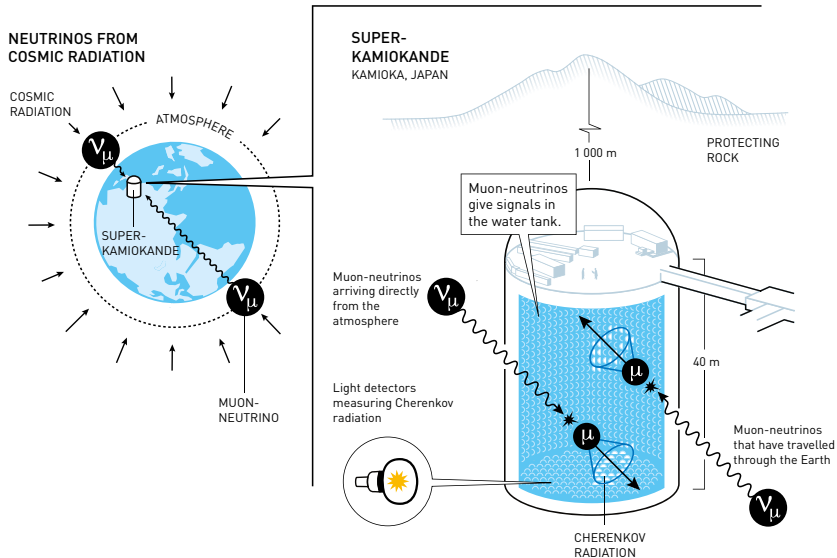


# I neutrini atmosferici



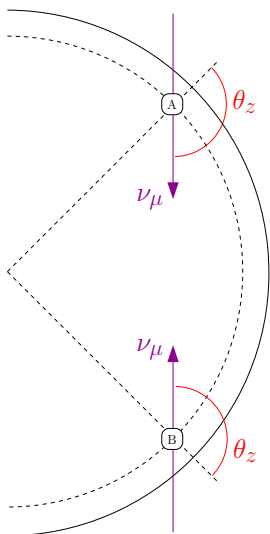
# L'esperimento Super-Kamiokande

50000 tonnellate di acqua in una miniera in Giappone



# L'asimmetria up-down

Presentata per la prima volta da Kajita alla conferenza Neutrino 1998



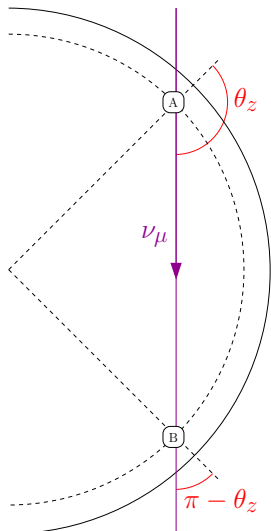
- ▶ I raggi cosmici con energia minore di circa 1 GeV sono deviati dai campi magnetici solare e terrestre.
- ▶ Il flusso di raggi cosmici con energia maggiore di circa 1 GeV è isotropo.
- ▶ Il flusso di neutrini atmosferici con  $E > 1 \text{ GeV}$  è isotropo.
- ▶ Considerando il flusso  $\phi_{\nu_\mu}$  di  $\nu_\mu$  con  $E > 1 \text{ GeV}$ , se non ci sono oscillazioni

$$\phi_{\nu_\mu}^{(B)}(\theta_z) = \phi_{\nu_\mu}^{(A)}(\theta_z)$$



# L'asimmetria up-down

Presentata per la prima volta da Kajita alla conferenza Neutrino 1998



- ▶ I raggi cosmici con energia minore di circa 1 GeV sono deviati dai campi magnetici solare e terrestre.
- ▶ Il flusso di raggi cosmici con energia maggiore di circa 1 GeV è isotropo.
- ▶ Il flusso di neutrini atmosferici con  $E > 1$  GeV è isotropo.
- ▶ Considerando il flusso  $\phi_{\nu_\mu}$  di  $\nu_\mu$  con  $E > 1$  GeV, se non ci sono oscillazioni

$$\phi_{\nu_\mu}^{(B)}(\theta_z) = \phi_{\nu_\mu}^{(A)}(\theta_z)$$

$$\phi_{\nu_\mu}^{(B)}(\pi - \theta_z) = \phi_{\nu_\mu}^{(A)}(\theta_z)$$

⇓

$$\phi_{\nu_\mu}^{(B)}(\theta_z) = \phi_{\nu_\mu}^{(B)}(\pi - \theta_z)$$

▶ In assenza di oscillazioni i flussi di  $\nu_\mu$  con  $E > 1 \text{ GeV}$  diretti verso l'alto e verso il basso sono uguali.

▶  $\phi_{\nu_\mu}^{\text{up}}$ : flusso di  $\nu_\mu$  con  $E > 1 \text{ GeV}$  diretti verso l'alto (up).

▶  $\phi_{\nu_\mu}^{\text{down}}$ : flusso di  $\nu_\mu$  con  $E > 1 \text{ GeV}$  diretti verso il basso (down).

▶ In assenza di oscillazioni  $A_{\nu_\mu}^{\text{up-down}} = \left( \frac{\phi_{\nu_\mu}^{\text{up}} - \phi_{\nu_\mu}^{\text{down}}}{\phi_{\nu_\mu}^{\text{up}} + \phi_{\nu_\mu}^{\text{down}}} \right) = 0$

▶ Valore misurato:

$$A_{\nu_\mu}^{\text{up-down}}(\text{SK}) = -0.30 \pm 0.05$$

▶ Il valore di  $A_{\nu_\mu}^{\text{up-down}}(\text{SK})$  è negativo!

▶ **Scoperta delle oscillazioni:** i  $\nu_\mu$  provenienti dal basso si sono trasformati in un altro sapore per effetto delle oscillazioni dovute alla grande distanza percorsa (fino a quasi 13000 km), mentre quelli provenienti dall'alto non sono oscillati perchè hanno percorso una distanza troppo corta (circa 15 km).

## Esercizio

Determinare quale è l'intervallo approssimato di  $\Delta m^2$  che può spiegare l'asimmetria up-down considerando  $\nu_\mu$  con energia media di 4 GeV e sapendo che i neutrini che arrivano verticalmente dall'alto percorrono una distanza di circa 15 km e che il diametro della terra è circa 12740 km.

$$\blacktriangleright P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu} = 1 - \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2[\text{eV}^2] L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]}\right)$$

- $\blacktriangleright$  Affinchè  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}$  sia sufficientemente minore di uno per i neutrini che vengono dalla parte opposta della terra ( $L = D = 12740$  km), bisogna che  $\sin^2(2\vartheta)$  sia sufficientemente grande e che

$$1.27 \frac{\Delta m^2[\text{eV}^2] D[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \gtrsim \frac{\pi}{2} \implies \Delta m^2[\text{eV}^2] \gtrsim \frac{\pi}{2.54} \frac{E[\text{GeV}]}{D[\text{km}]}$$

$\blacktriangleright$  Quindi  $\Delta m^2[\text{eV}^2] \gtrsim \frac{\pi}{2.54} \frac{4}{12740} \simeq 4 \times 10^{-4}$

- ▶ Affinchè  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}$  sia molto minore di uno per tutti i neutrini che vengono dall'alto, bisogna che

$$1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L_{\text{oriz}} [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \lesssim \frac{\pi}{2} \implies \Delta m^2 [\text{eV}^2] \lesssim \frac{\pi}{2.54} \frac{E [\text{GeV}]}{L_{\text{oriz}} [\text{km}]}$$

- ▶ La distanza percorsa dai neutrini che arrivano orizzontalmente è

$$L_{\text{oriz}} = \sqrt{(R + d)^2 - R^2} \simeq 437 \text{ km}$$

$$\text{con } R \simeq 6370 \text{ km} \quad \text{and} \quad d \simeq 15 \text{ km}$$

- ▶ Quindi 
$$\Delta m^2 [\text{eV}^2] \lesssim \frac{\pi}{2.54} \frac{4}{437} \simeq 1 \times 10^{-2}$$

- ▶ In conclusione, l'asimmetria up-down può essere spiegata con  $\Delta m^2$  nell'intervallo

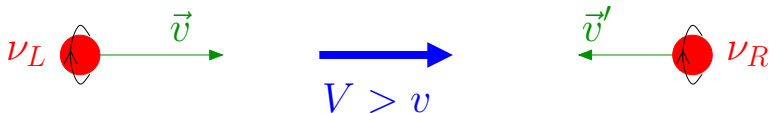
$$4 \times 10^{-4} \text{ eV}^2 \lesssim \Delta m^2 \lesssim 1 \times 10^{-2} \text{ eV}^2$$

Valore stabilito:

$$\Delta m^2 \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

## Domanda

- ▶ La scoperta delle oscillazioni dimostra che i neutrini hanno una piccola massa.
- ▶ Ma allora esistono anche i neutrini destrorsi?
- ▶ Come abbiamo visto per le altre particelle massive, se i neutrini hanno massa:

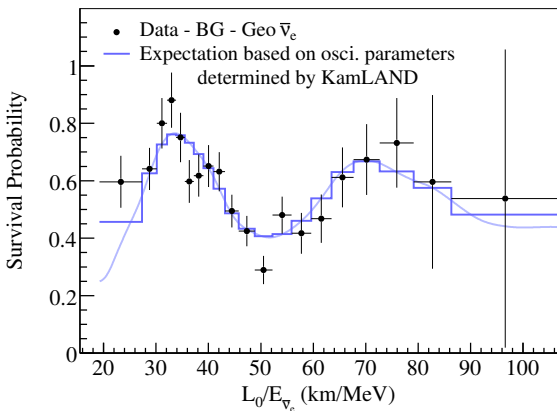


- ▶ Sì, esistono anche i neutrini destrorsi, ma sono molto rari perché interagiscono molto più debolmente di quelli sinistrorsi: l'interazione è soppressa dal rapporto  $(m/E)^2$ .
- ▶ Ad esempio, per i neutrini da reattore

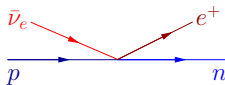
$$\left(\frac{m}{E}\right)^2 \lesssim \left(\frac{1 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}}\right)^2 = \left(\frac{1}{10^6}\right)^2 = 10^{-12}$$

- ▶ Quindi in pratica non è possibile (almeno con le conoscenze attuali) rivelare i neutrini destrorsi, che perciò sono chiamati anche **sterili**.

# Osservazione diretta delle oscillazioni di neutrini

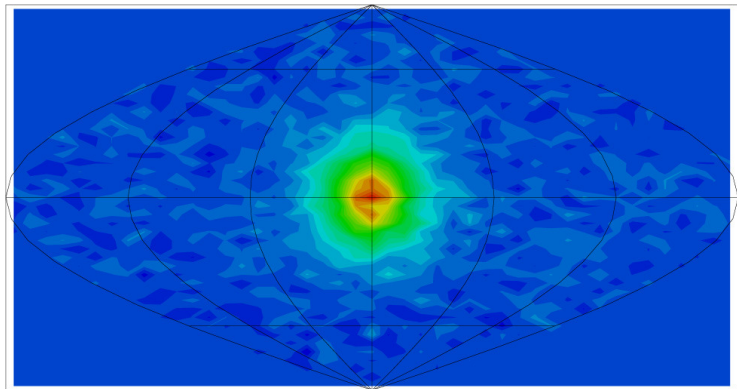


- ▶ L'esperimento KamLAND (Giappone) ha misurato le interazioni dei  $\bar{\nu}_e$  prodotti da circa 30 reattori nucleari giapponesi e coreani.



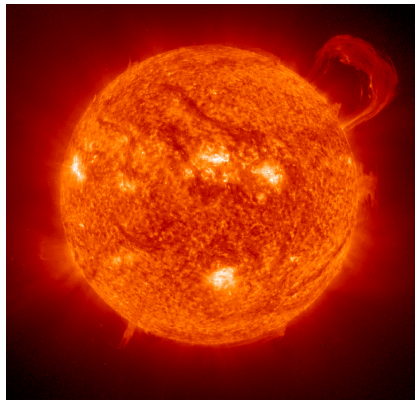
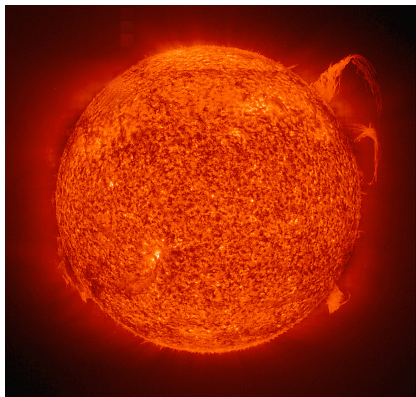
- ▶ Probabilità di sopravvivenza:  $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - (P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu} + P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau})$

## I neutrini solari



Il sole visto con i neutrini in Super-Kamiokande

# La superficie del sole

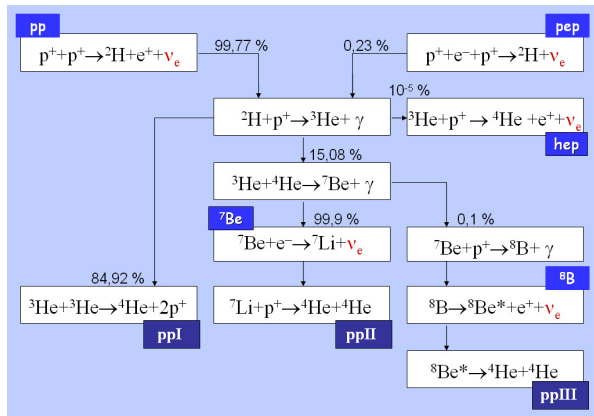


Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) 304 Å images of the Sun emission in this spectral line (He II) shows the upper chromosphere at a temperature of about 60,000 K

[The Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>]



- ▶ L'energia solare è generata da **reazioni termonucleari di fusione** nel centro del sole, dove la temperatura è di circa  $1.5 \times 10^7$  °C.
- ▶ La principale sorgente di energia e' la **catena pp**:



- ▶ I neutrini solari sono gli unici **messaggeri diretti dal centro del sole!**
- ▶ Il flusso di neutrini solari sulla terra è enorme: circa  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ !

## Esercizio

Calcolare l'energia  $Q$  emessa nella catena  $pp$



sapendo che:

- la massa del protone è  $m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2$ ,
  - la massa del neutrone è  $m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2$ ,
  - e la massa dell'elettrone è  $m_e = 0.5 \text{ MeV}/c^2$ ,
  - l'energia di legame del nucleo  ${}^4\text{He}$  è  $B_{4\text{He}} = 28.3 \text{ MeV}$ .
- ▶ L'energia emessa è data dalla differenza tra la somma delle masse nello stato iniziale e la somma delle masse nello stato finale.
- ▶ La massa del nucleo  ${}^4\text{He}$  è data dalla somma delle masse dei suoi costituenti (2 protoni e 2 neutroni) meno l'energia di legame:

$$m_{4\text{He}} = 2m_p + 2m_n - B_{4\text{He}}/c^2 = 3727.5 \text{ MeV}/c^2$$

- ▶ Trascurando la massa del neutrino, si ottiene

$$Q = 4m_p + 2m_e - m_{4\text{He}} = 26.7 \text{ MeV}$$

## Esercizio

Calcolare il flusso dei neutrini dal sole in  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  sapendo che

- $4p + 2e^- \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2\nu_e + Q$  con  $Q = 26.7 \text{ MeV}$ ,
- la luminosità del sole è  $\mathcal{L}_\odot = 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ ,
- la distanza sole-terra è  $1 \text{ au} = 150 \times 10^6 \text{ km}$ ,

trascurando l'energia emessa in neutrini.

- ▶  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 6.2 \times 10^{12} \text{ MeV/s}$
- ▶  $\mathcal{L}_\odot = (3.8 \times 10^{26}) (6.2 \times 10^{12}) \text{ MeV/s} = 23.6 \times 10^{38} \text{ MeV/s}$
- ▶ Trascurando l'energia emessa in neutrini, l'intensità di neutrini emessa dal sole é

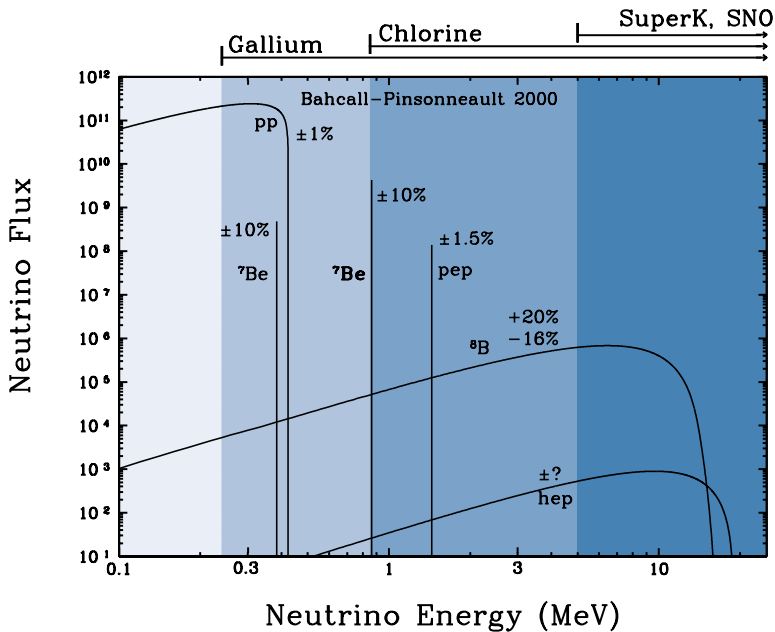
$$I_{\nu_e} = 2 \frac{\mathcal{L}_\odot}{Q} = 1.8 \times 10^{38} \nu_e/\text{s}$$

- ▶ La distanza sole-terra è  $1 \text{ au} = 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}$ .
- ▶ Il flusso di neutrini sulla terra è

$$\Phi_{\nu_e} = \frac{I_{\nu_e}}{4\pi(1 \text{ au})^2} = 6.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

# Osservazione dei neutrino solari

- ▶ **1957:** Bruno Pontecorvo suggerisce di rivelare i neutrini solari usando un rivelatore contenente molte tonnellate di Cloro tramite la reazione  
$$\nu_e + {}_{17}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}_{18}^{37}\text{Ar} + e^-$$
- ▶ **1964:** John N. Bahcall calcola la sezione d'urto dei neutrini e trova che è sufficiente per rivelare i neutrini solari.
- ▶ **1964:** Raymond Davis propone l'esperimento the Homestake, che viene costruito negli anni 1965–1967. Si basa sul conteggio radiochimico degli atomi di  ${}^{37}\text{Ar}$  prodotti in un rivelatore di 615 tonnellate di tetrachloroethylene ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ).
- ▶ **1970:** Davis (Premio Nobel 2002 per la Fisica) e collaboratori osservano i neutrini solari estraendo circa un atomo di  ${}^{37}\text{Ar}$  ogni 2 giorni dal rivelatore Homestake contenente circa  $2 \times 10^{30}$  atomi!
- ▶ I neutrini solari sono stati osservati negli esperimenti Homestake (1970-1994), Kamiokande (1987-1995) SAGE (1990-2010), GALLEX/GNO (1991-2000), Super-Kamiokande (1996-2019), SNO (1999-2008), Borexino (2007-2019).



## Esercizio

Calcolare la frequenza  $F_{37\text{Ar}}$  di produzione di atomi di  $^{37}\text{Ar}$  causata dai neutrini solari nell'esperimento Homestake tramite la reazione  $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$  in 615 tonnellate di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , sapendo che sono rivelabili i neutrini del  ${}^7\text{Be}$  e del  ${}^8\text{B}$  e

- $\sigma_{37\text{Cl}}({}^7\text{Be}) = 2.4 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$  e  $\sigma_{37\text{Cl}}({}^8\text{B}) = 1.06 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ ,
- $\Phi_{7\text{Be}} = 4.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  e  $\Phi_{8\text{B}} = 5.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,
- il cloro ha peso atomico  $A_{\text{Cl}} = 35.45$  e l'abbondanza isotopica del  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$  è 24%.

$$\blacktriangleright F_{37\text{Ar}} = (\sigma_{37\text{Cl}}({}^7\text{Be})\Phi_{7\text{Be}} + \sigma_{37\text{Cl}}({}^8\text{B})\Phi_{8\text{B}}) N_{\text{Cl}}$$

$$\blacktriangleright \sigma_{37\text{Cl}}({}^7\text{Be})\Phi_{7\text{Be}} = 1.2 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1}$$

$$\blacktriangleright \sigma_{37\text{Cl}}({}^8\text{B})\Phi_{8\text{B}} = 5.3 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1}$$

- ▶ Peso atomico di  $C_2Cl_4$ :  $A_{C_2Cl_4} = 2A_C + 4A_{Cl} = 165.8$
- ▶ Numero di molecole di  $C_2Cl_4$ :  $N_{C_2Cl_4} = \frac{615 \times 10^6}{A_{C_2Cl_4}} N_A = 2.2 \times 10^{30}$
- ▶ Numero di atomi di  $^{37}Cl$ :  $N_{^{37}Cl} = 0.24 \times 4 \times N_{C_2Cl_4} = 2.2 \times 10^{30}$
- ▶  $F_{^{37}Ar} = (\sigma_{^{37}Cl}(^7Be)\Phi_{^7Be} + \sigma_{^{37}Cl}(^8B)\Phi_{^8B}) N_{Cl} = 1.4 \times 10^{-5} s^{-1}$
- ▶  $1 d = 86400 s \quad \Rightarrow \quad F_{^{37}Ar} = 1.2 d^{-1}$

La frequenza osservata è  $F_{^{37}Ar}^{obs} = 0.5 d^{-1}$

**PROBLEMA DEI NEUTRINI SOLARI!**

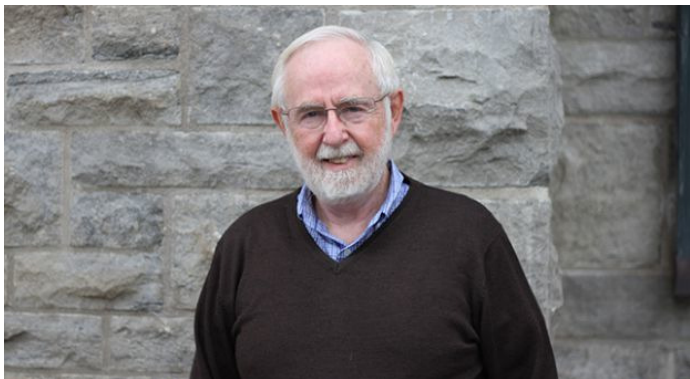
# Il problema dei neutrini solari

- ▶ **1968:** Bruno Pontecorvo ipotizza che una parte dei  $\nu_e$  solari possono sparire per effetto delle oscillazioni  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ .
- ▶ **1970:** Nascita del problema dei neutrini solari con l'osservazione nell'esperimento Homestake di un flusso di  $\nu_e$  inferiore a quello previsto dal modello solare.
- ▶ Dal **1970** al **2002** gli esperti hanno dibattuto accanitamente su diverse soluzioni possibili (e impossibili).
- ▶ Le due spiegazioni che venivano considerate più plausibili sono:
  - ▶ C'è un errore nel calcolo del flusso di  $\nu_e$  previsto dal modello solare.
  - ▶ Una parte dei  $\nu_e$  sparisce per effetto delle oscillazioni  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  e/o  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ .



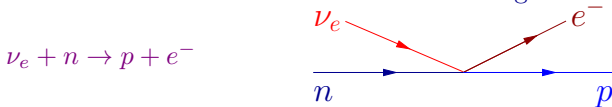
Nel 2002 l'esperimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory)  
ha dimostrato che il problema dei neutrini solari è dovuto  
alle oscillazioni dei neutrini

Arthur B. McDonald: Premio Nobel 2015 per la Fisica



# SNO: Sudbury Neutrino Observatory

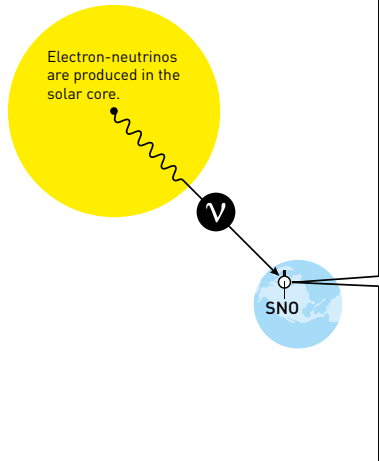
- ▶ Un rivelatore di 1000 tonnellate di  $D_2O$  a 2000 m di profondità in una miniera a Sudbury (Canada).
- ▶ Nell'acqua pesante  $D_2O$  i due idrogeni dell'acqua  $H_2O$  sono costituiti dall'isotopo pesante deuterio  $D = {}^2_1H$  costituito da un protone e un neutrone.
- ▶ I neutrini possono interagire con il deuterio in due modi:
  - ▶ Interazione di **corrente carica** (CC):  $\nu_e + D \rightarrow p + p + e^-$   
Il neutrone nel deuterio viene trasformato in un protone con emissione di un elettrone secondo l'interazione che abbiamo già visto nella slide 18:



- ▶ Interazione di **corrente neutra** (NC): 
$$\begin{cases} \nu_e + D \rightarrow p + n + \nu_e \\ \nu_\mu + D \rightarrow p + n + \nu_\mu \\ \nu_\tau + D \rightarrow p + n + \nu_\tau \end{cases}$$

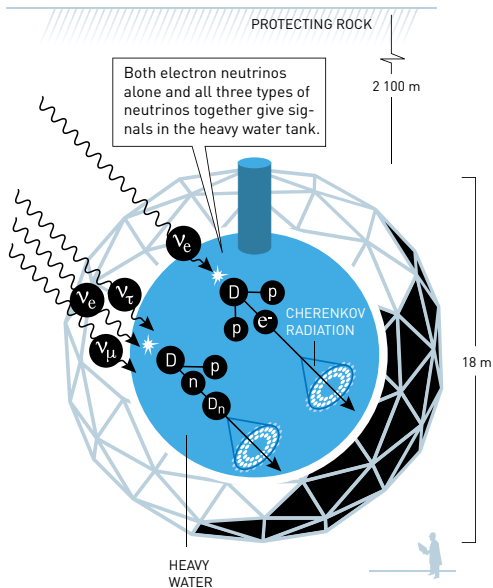
È una dissociazione del deuterio nei suoi costituenti  $p$  e  $n$ , che avviene con la stessa sezione d'urto per  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ .

## NEUTRINOS FROM THE SUN



## SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)

ONTARIO, CANADA



- ▶ Misure di SNO relative alle previsioni del modello solare senza le oscillazioni:

$$\frac{F_{CC}^{SNO}}{F_{CC}^{m.s.}} = 0.35 \pm 0.02$$

$$\frac{F_{NC}^{SNO}}{F_{NC}^{m.s.}} = 1.02 \pm 0.13$$

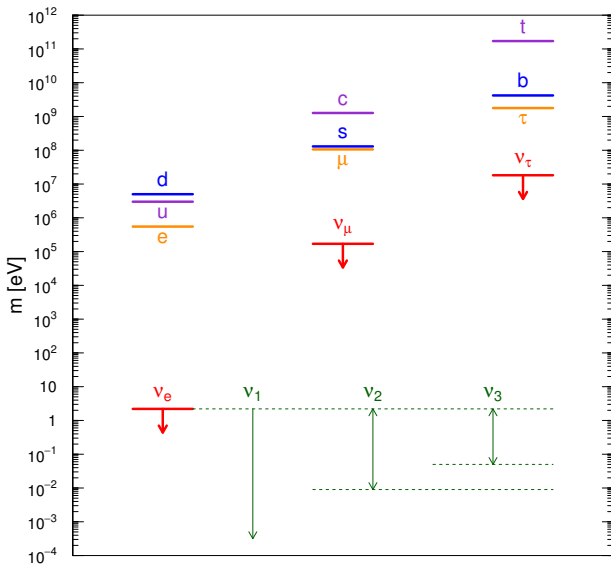
- ▶ La misura CC conferma il problema dei neutrini solari: sparizione dei  $\nu_e$  che sono gli unici che interagiscono tramite le interazioni CC.
- ▶ La misura NC mostra che la somma dei flussi di  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  è in accordo con la previsione del modello solare.
- ▶ L'unica spiegazione possibile è che i  $\nu_e$  solari si siano trasformati in  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  in modo da mantenere invariato il flusso totale di neutrini.
- ▶ Questa è la prova delle oscillazioni dei neutrini solari:

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu \quad e/o \quad \nu_e \rightarrow \nu_\tau$$

# Due Tipi di Oscillazioni

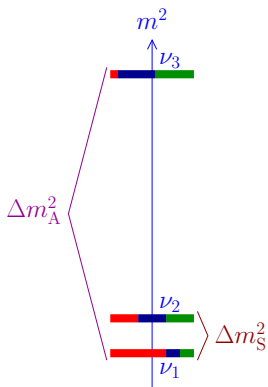
Solari $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$	$\left( \begin{array}{c} \text{SNO, Borexino} \\ \text{Super-Kamiokande} \\ \text{GALLEX/GNO, SAGE} \\ \text{Homestake, Kamiokande} \end{array} \right)$	}	$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_S^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 \vartheta_S \simeq 0.30 \end{array} \right.$
Reattori $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$	(KamLAND)		
Atmosferici $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$	$\left( \begin{array}{c} \text{Super-Kamiokande} \\ \text{Kamiokande, IMB} \\ \text{MACRO, Soudan-2} \end{array} \right)$	}	$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_A^2 \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 \vartheta_A \simeq 0.50 \end{array} \right.$
Acceleratori $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$	$\left( \begin{array}{c} \text{K2K, MINOS} \\ \text{T2K, NO}\nu\text{A} \\ \text{Opera} \end{array} \right)$		

# Misure delle Masse dei Neutrini

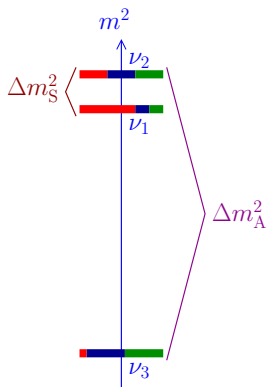


# Ordinamento delle Masse

$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
---------	-----------	------------



Ordinamento Normale



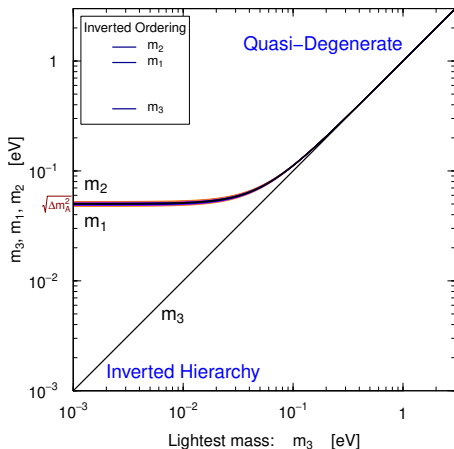
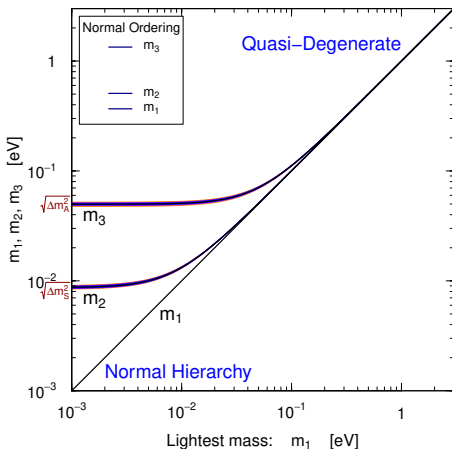
Ordinamento Inverso

Solo due  $\Delta m^2$  indipendenti:

$$\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{13}^2 + \Delta m_{32}^2 = (m_2^2 - m_1^2) + (m_1^2 - m_3^2) + (m_3^2 - m_2^2) = 0$$

la scala delle masse non è determinata dalle misure di oscillazione

# Scala delle Masse



$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 = m_1^2 + \Delta m_S^2$$

$$m_3^2 = m_1^2 + \Delta m_{31}^2 = m_1^2 + \Delta m_A^2$$

$$m_1^2 = m_3^2 - \Delta m_{31}^2 = m_3^2 + \Delta m_A^2$$

$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 \simeq m_3^2 + \Delta m_A^2$$



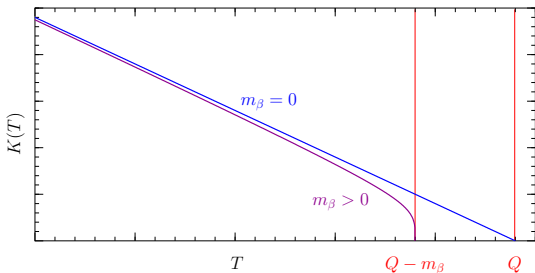
# Decadimento Beta del Trizio

$${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e \quad Q = M_{{}^3\text{H}} - M_{{}^3\text{He}} - m_e = 18.58 \text{ keV}$$

$$\text{Spettro energetico dell'elettrone: } K(T) = \sqrt{(Q - T) \sqrt{(Q - T)^2 - m_\beta^2}}$$

$$\text{Massa Efficace del Neutrino: } m_\beta = \sqrt{\cos^2\vartheta m_1^2 + \sin^2\vartheta m_2^2}$$

$$m_\beta = 0 \iff K(T) = Q - T$$



Limite attuale:

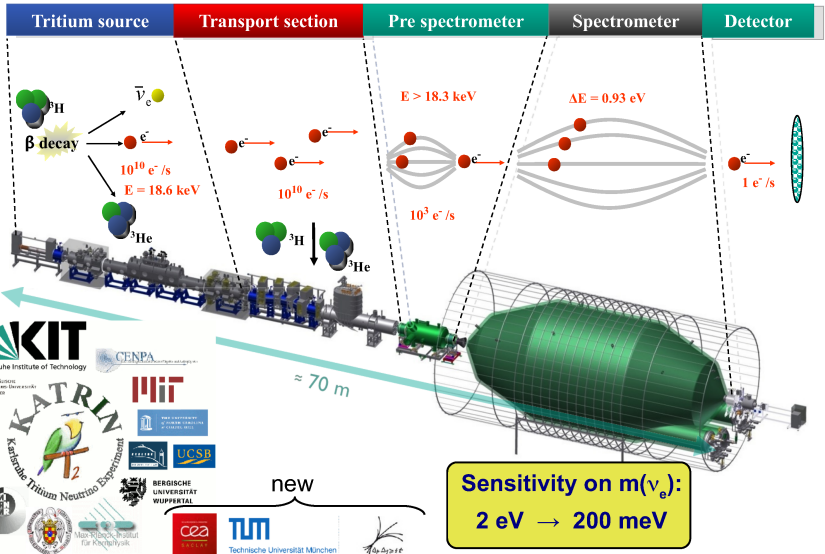
$$m_\beta \lesssim 2 \text{ eV}$$

Esperimenti:

Mainz (Germania)

Troitsk (Russia)

# The Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN - overview





Trasporto dello spettrometro dal Reno al Karlsruhe Institute of Technology.  
(Novembre 2006)

# Neutrini e Antineutrini

- ▶ **1928:** Paul Dirac formula “The Quantum Theory of the Electron” che applicata alle particelle elementari implica che ad ogni particella corrisponde una antiparticella. (Premio Nobel per la Fisica 1933)

- ▶ Particelle e antiparticelle hanno carica elettrica opposta:

Particella	Carica	Antiparticella	Carica
$u$	$+2/3$	$\bar{u}$	$-2/3$
$d$	$-1/3$	$\bar{d}$	$+1/3$
$e^-$	$-1$	$e^+$	$+1$
$\nu_e$	$0$	$\bar{\nu}_e$	$0$

- ▶ Nel caso di particelle cariche, particella e antiparticella sono necessariamente diverse:  $\bar{u} \neq u$ ,  $\bar{d} \neq d$ ,  $e^+ \neq e^-$  (Particelle di Dirac)
- ▶ **1937:** Ettore Majorana formula la “Teoria simmetrica dell’elettrone e del positrone” secondo la quale una particella neutra può essere identica alla propria antiparticella.
- ▶ Poichè i neutrino sono neutri, neutrino e antineutrino possono essere la stessa particella:  $\bar{\nu}_e = \nu_e$  ? (Particella di Majorana)

# Neutrini: Particelle di Dirac o di Majorana?

---

Neutrino Dirac:  $\bar{\nu}_e \neq \nu_e$

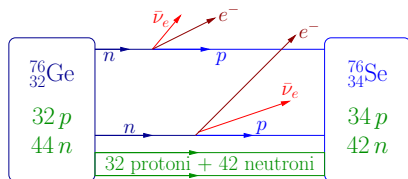
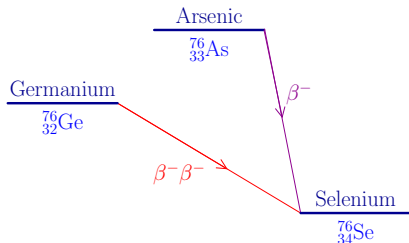
Neutrino Majorana:  $\bar{\nu}_e = \nu_e$

Come distinguere le due possibilità?

Il processo più conveniente è il

Doppio decadimento  $\beta$  senza neutrini

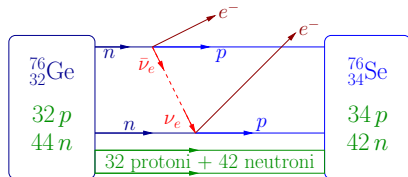
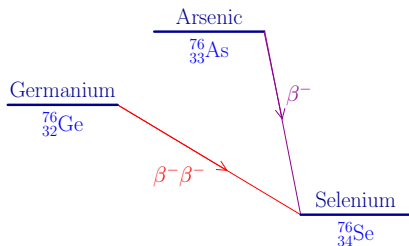
# Doppio decadimento $\beta$ con neutrini



- ▶ È un processo molto raro previsto dalla teoria delle interazioni deboli di Fermi e dal Modello Standard delle interazioni elettrodeboli.
- ▶ In processo è stato osservato con un tempo di decadimento enorme:

$$T_{1/2}({}^{76}\text{Ge}) = 1.8 \times 10^{21} \text{ y}$$

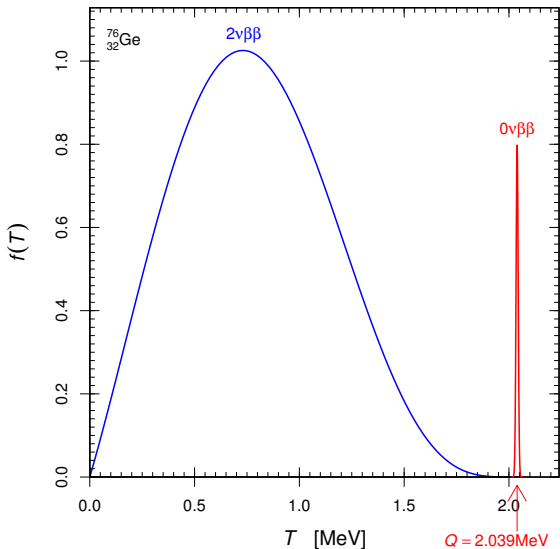
# Doppio decadimento $\beta$ senza neutrini



Possibile solo se  $\bar{\nu}_e = \nu_e \iff$  Neutrini di Majorana!

Massa Efficace del Neutrino:  $m_{\beta\beta} = \cos^2\vartheta m_1 + \sin^2\vartheta m_2$

# Come distinguere $0\nu\beta\beta$ da $2\nu\beta\beta$ ?

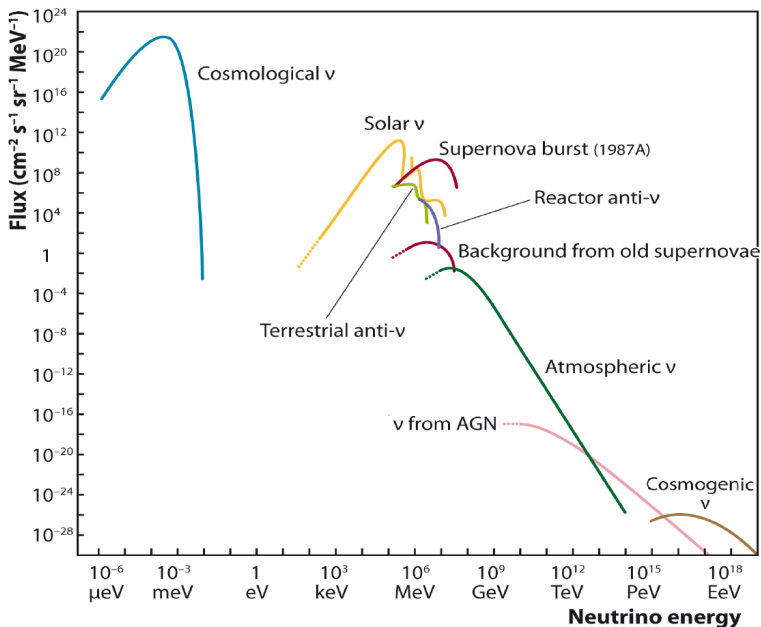




## Limiti sperimentali

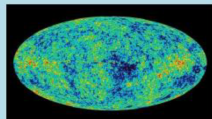
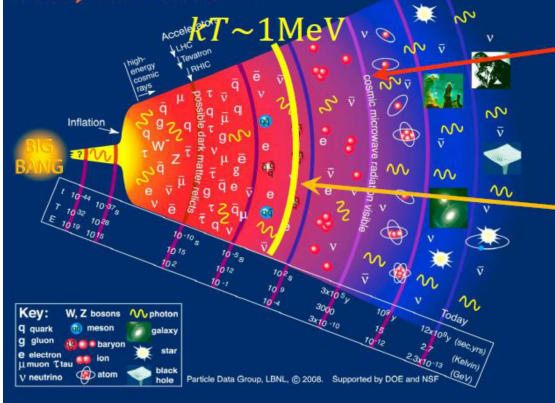
$\beta\beta^-$ decay	experiment	$T_{1/2}^{0\nu}$ [y]	$m_{\beta\beta}$ [eV]
$^{48}_{20}\text{Ca} \rightarrow ^{48}_{22}\text{Ti}$	ELEGANT-VI	$> 1.4 \times 10^{22}$	$< 6.6 - 31$
	Heidelberg-Moscow	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.23 - 0.67$
$^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow ^{76}_{34}\text{Se}$	IGEX	$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.25 - 0.73$
	Majorana	$> 4.8 \times 10^{25}$	$< 0.20 - 0.43$
	GERDA	$> 8.0 \times 10^{25}$	$< 0.12 - 0.26$
$^{82}_{34}\text{Se} \rightarrow ^{82}_{36}\text{Kr}$	NEMO-3	$> 1.0 \times 10^{23}$	$< 1.8 - 4.7$
$^{100}_{42}\text{Mo} \rightarrow ^{100}_{44}\text{Ru}$	NEMO-3	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 0.32 - 0.88$
$^{116}_{48}\text{Cd} \rightarrow ^{116}_{50}\text{Sn}$	Solotvina	$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1.5 - 2.5$
$^{128}_{52}\text{Te} \rightarrow ^{128}_{54}\text{Xe}$	CUORICINO	$> 1.1 \times 10^{23}$	$< 7.2 - 18$
$^{130}_{52}\text{Te} \rightarrow ^{130}_{54}\text{Xe}$	CUORE	$> 1.5 \times 10^{25}$	$< 0.11 - 0.52$
$^{136}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{136}_{56}\text{Ba}$	EXO	$> 1.1 \times 10^{25}$	$< 0.17 - 0.49$
	KamLAND-Zen	$> 1.1 \times 10^{26}$	$< 0.06 - 0.16$
$^{150}_{60}\text{Nd} \rightarrow ^{150}_{62}\text{Sm}$	NEMO-3	$> 2.1 \times 10^{25}$	$< 2.6 - 10$

# Flussi di neutrini



# I Neutrini Primordiali

## History of the Universe



**CMB**

$$n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

**CvB**

$$n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left( \frac{T_\nu}{T_\gamma} \right)^3 \frac{n_\gamma}{2}$$

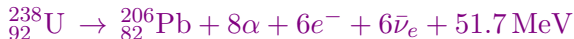
$$= 56/\text{cm}^3$$

$$T_\nu = \left( \frac{4}{11} \right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95 \text{ K}$$

- ▶ I neutrini primordiali sono estremamente freddi:  $(0 \text{ K} = -273.15 \text{ }^\circ\text{C})$   
 $T_\nu = 1.95 \text{ K} = -271.2 \text{ }^\circ\text{C}$
- ▶ Sono lenti:  $E_\nu = 1.7 \times 10^{-4} \text{ eV} < \sqrt{\Delta m_S^2} \simeq 8.7 \times 10^{-3} \text{ eV} \implies v_\nu \ll c$
- ▶ Hanno una probabilità di interazione circa  $10^6$  volte più piccola dei neutrini da reattore!  $\implies$  Riusciremo ad osservarli?

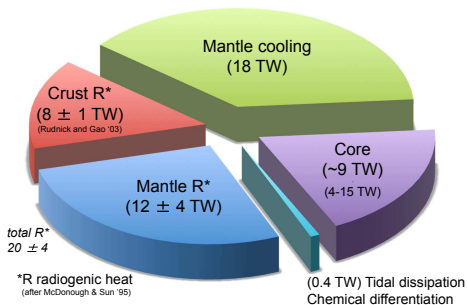
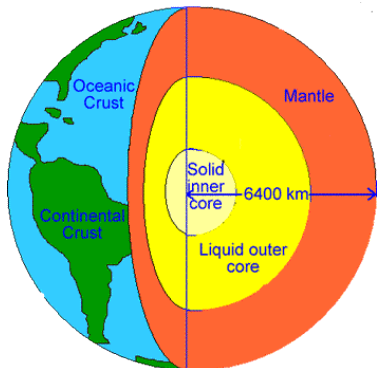
# I geoneutrini

- ▶ L'interno della Terra emette circa 47 TW di calore.
- ▶ E' una piccola quantità rispetto al calore che riceviamo dal sole (circa 173000 TW), ma è cruciale per la dinamica interna della Terra perchè il calore del sole penetra solo qualche metro.
- ▶ Principali sorgenti del calore terrestre:
  - ▶ Calore primordiale ( $\sim 20\text{--}30$  TW)
  - ▶ Calore radiogenico ( $\sim 20\text{--}30$  TW)
- ▶ Decadimenti radioattivi principali:

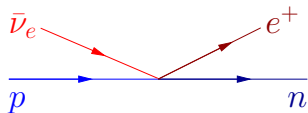


- ▶ Circa 20% dell'energia viene emessa in antineutrini.

Calore emesso totale:  $47 \pm 2$  TW



- ▶ I geoneutrini possono essere rivelati con lo stesso metodo usato per gli antineutrini da reattore:



- ▶ Il segnale di geoneutrini non è uniforme sulla superficie terrestre:

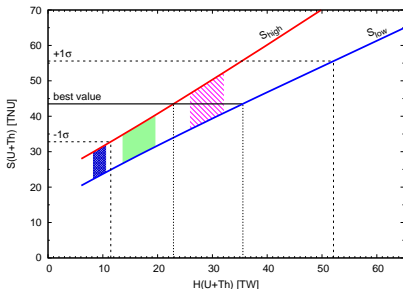
- ▶ Terrestrial Neutrino Unit:

$$1 \text{ TNU} = 1 \text{ interazione per anno per } 10^{32} \text{ protoni}$$

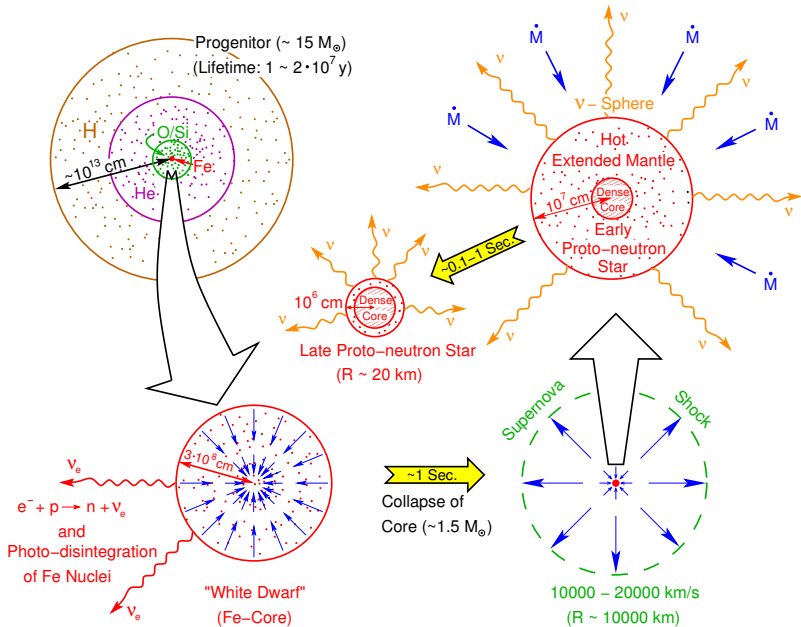
- ▶ **2005:** I geoneutrini sono rivelati per la prima volta nell'esperimento KamLAND in Giappone.
- ▶ **2010:** I geoneutrini sono rivelati nell'esperimento BOREXINO al Gran Sasso.
- ▶ Le misure attuali dei due esperimenti sono:

KamLAND:  $30 \pm 7$  TNU  
 BOREXINO:  $43 \pm 12$  TNU

- ▶ Implicazioni per il calore radiogenico della misura di BOREXINO:



# Neutrini, messaggeri delle Supernove





Energia totale emessa: circa  $3 \times 10^{53}$  erg, di cui:

- ▶ circa 99% neutrini ( $3 \times 10^{53}$  erg),
- ▶ circa 1% energia cinetica ( $\sim 10^{51}$  erg),
- ▶ circa 0.01% energia elettromagnetica ( $\sim 10^{49}$  erg).

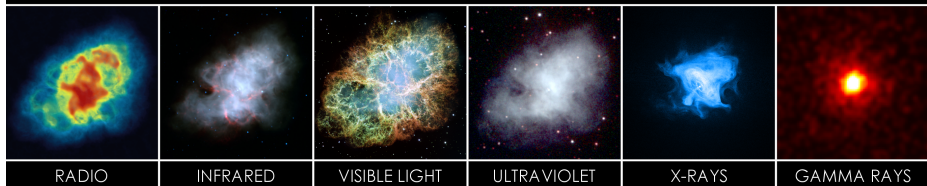
Confronti:

- ▶ L'energia emessa dal sole ogni anno è circa  $1.2 \times 10^{41}$  erg,
- ▶ L'energia equivalente alla massa della terra è circa  $5.4 \times 10^{48}$  erg,
- ▶ L'energia emessa dal sole in 10 miliardi di anni è circa  $1.2 \times 10^{51}$  erg,
- ▶ L'energia equivalente alla massa del sole è circa  $1.8 \times 10^{54}$  erg.

# Supernove Storiche

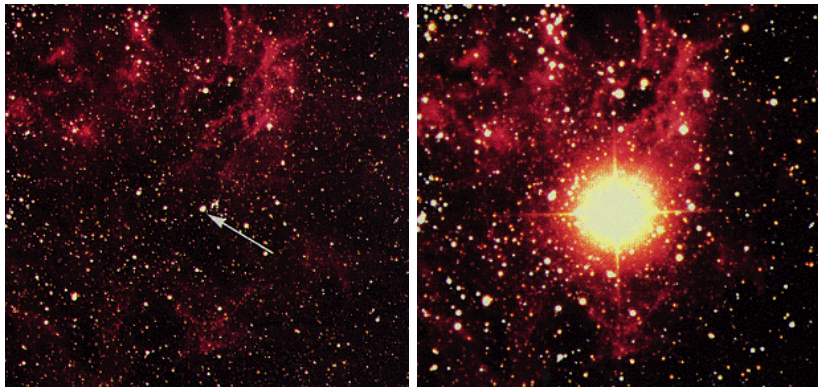
date	length of visibility	remnant	Historical Records				
			Chinese	Japanese	Korean	Arabic	European
AD1604	12 months	G4.5+6.8	few	–	many	–	many
AD1572	18 months	G120.1+2.1	few	–	two	–	many
AD1181	6 months	3C58	few	few	–	–	–
AD1054	21 months	Crab Nebula	many	few	–	one	–
AD1006	3 years	G327.6+14.6	many	many	–	few	two
AD393	8 months	–	one	–	–	–	–
AD386?	3 months	–	one	–	–	–	–
AD369?	5 months	–	one	–	–	–	–
AD185	8-20 months	–	one	–	–	–	–

CRAB NEBULA

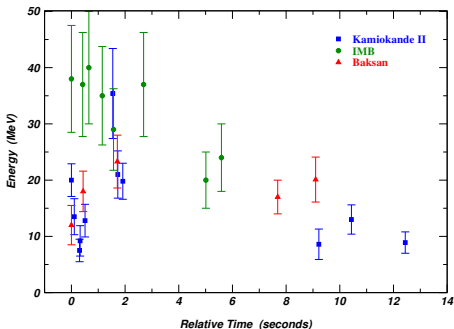


## SN1987A

23 Febbraio 1987 nella Grande Nube di Magellano (168000 anni luce)



# Neutrini dalla SN1987A



7:35 UTC del 23 Febbraio 1987

Kamiokande (Giappone)

11 eventi

M. Koshiba: Premio Nobel 2002 per la Fisica

IMB (Irvine Michigan Brookhaven, USA)

8 eventi

Baksan (Caucaso, Russia)

5 eventi

Number of event	Time UT $\pm$ 2 ms	Energy, MeV
994	2 h 52 min 36.79 s	6.2–7
995	2 h 52 min 40.65 s	5.8–8
996	2 h 52 min 41.01 s	7.8–11
997	2 h 52 min 42.70 s	7.0–7
998	2 h 52 min 43.80 s	6.8–9

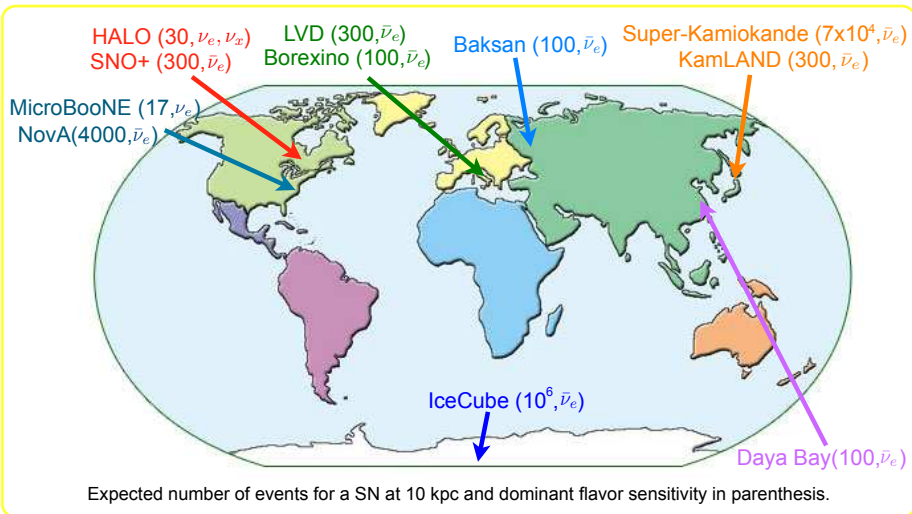
2:52 UTC del 23 Febbraio 1987

LSD (Liquid Scintillator Detector)

Monte Bianco

Collaborazione: Torino e Mosca

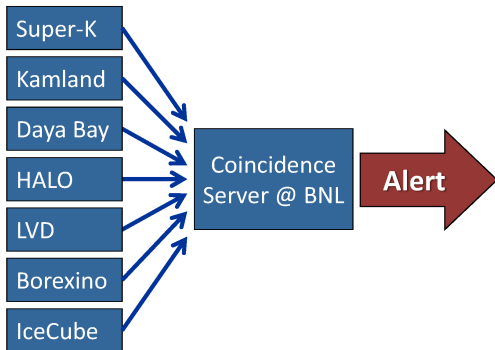
# Siamo Pronti per la Prossima Supernova?



# SuperNova Early Warning System (SNEWS)

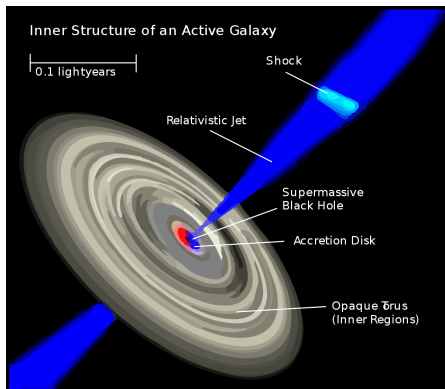
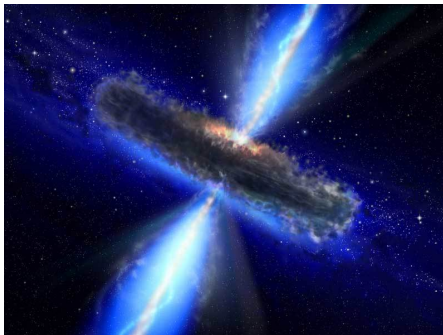


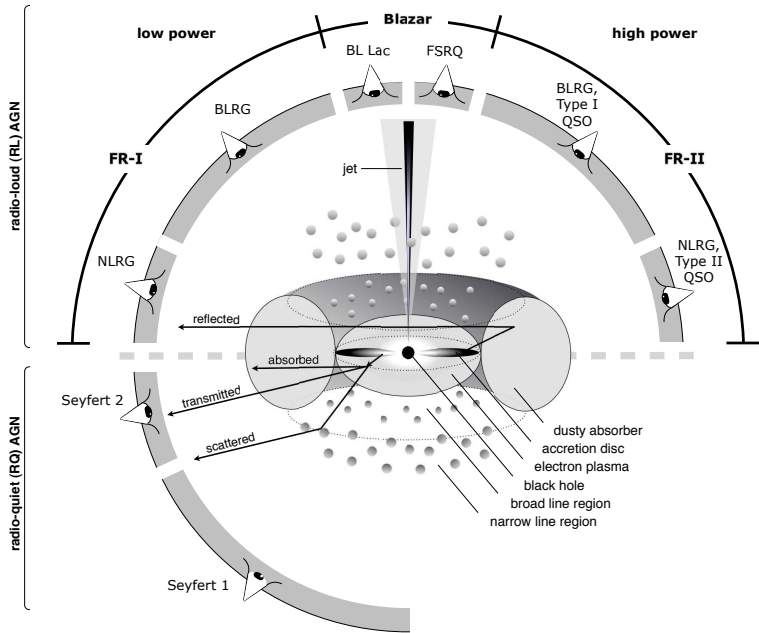
<http://snews.bnl.gov>



- ▶ I neutrini arrivano alcune ore prima del segnale ottico.
- ▶ Il segnale dei neutrini allerta la comunità astronomica.

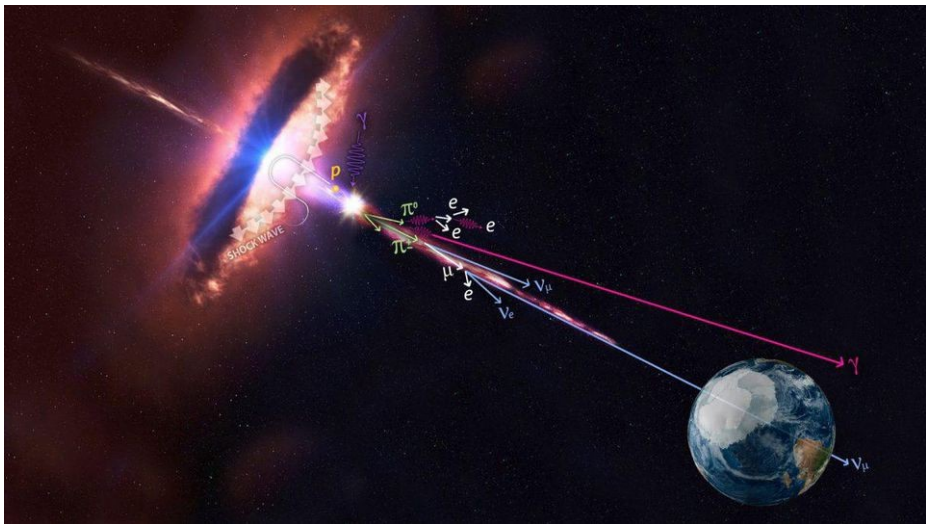
# I Nuclei Galattici Attivi (AGN)

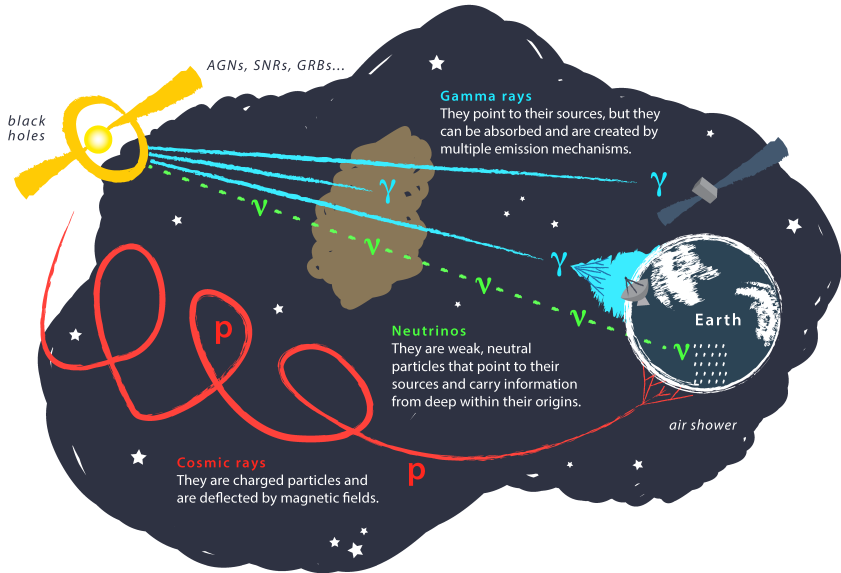




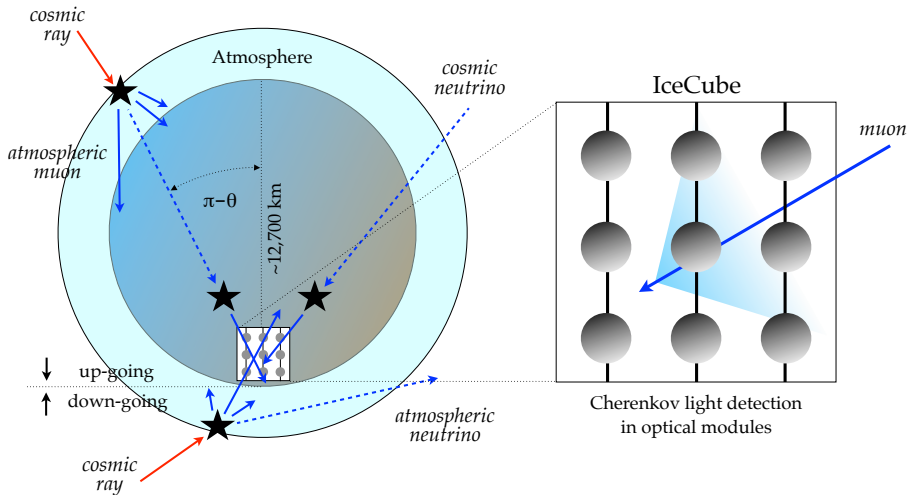


# Neutrini da Nuclei Galattici Attivi





# L'esperimento IceCube





# ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY



**IceCube Laboratory**  
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



**Digital Optical Module (DOM)**  
5,160 DOMs deployed in the ice

50 m

Ice Top

1450 m

2450 m

86 strings of DOMs,  
set 125 meters apart

IceCube detector

DeepCore

Antarctic bedrock

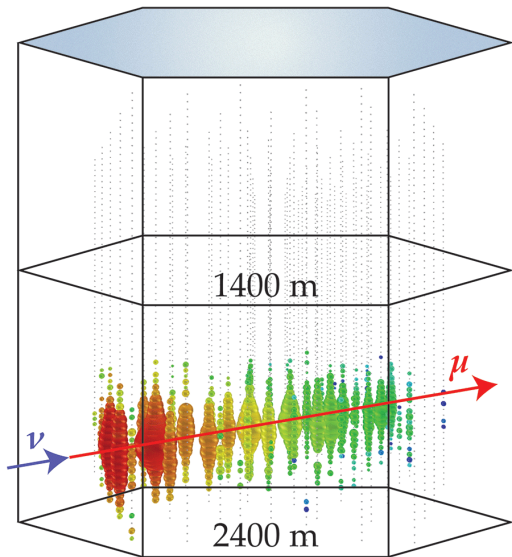
**Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica**  
A National Science Foundation-managed research facility

60 DOMs on each string

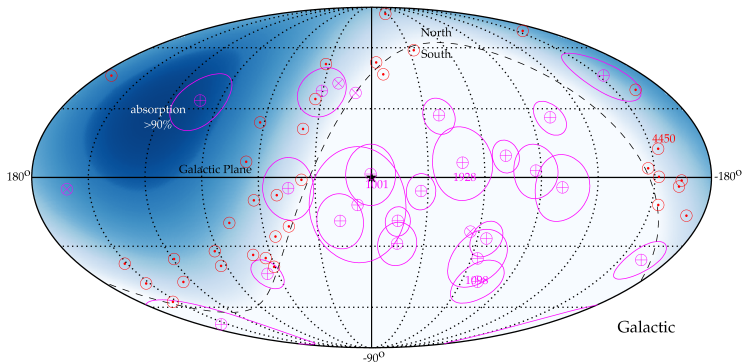
DOMs are 17 meters apart



2015: I neutrini da AGN vengono osservati per la prima volta  
nell'esperimento IceCube.



# Mappa di tutti i segnali di neutrino osservati



- ⊙ Muoni generati fuori dal rivelatore da  $\nu_\mu$  provenienti dal basso.
- ⊗ Muoni generati dentro il rivelatore da  $\nu_\mu$ .
- ⊕ Cascate di particelle generate dentro il rivelatore da  $\nu_e$  o  $\nu_\tau$ .

- ▶ Nell'area blu scura i neutrini di alta energia ( $E \gtrsim 100$  TeV) sono assorbiti dalla terra.
- ▶ Linea tratteggiata: orizzonte. Stella: centro galattico.

## L'astronomia neutrिनica e multimessaggera

- ▶ **1970:** Prima osservazione dei neutrini solari (distanza:  $150 \times 10^6$  km) nell'esperimento Homestake (R. Davis: Premio Nobel 2002 per la Fisica). Ha confermato la teoria della produzione termonucleare di energia nel sole e ha iniziato l'osservazione multimessenger del sole.
- ▶ **1987:** Prima osservazione dei neutrini da supernova (distanza:  $168 \times 10^3$  ly) nell'esperimento Kamiokande (M. Koshiba: Premio Nobel 2002 per la Fisica). Ha confermato le caratteristiche principali del meccanismo di esplosione delle supernove e ha iniziato l'osservazione multimessenger delle supernove.
- ▶ **2015:** Prima osservazione dei neutrini da AGN (distanza dell'ordine di  $10^9$  ly) nell'esperimento IceCube (F. Halzen: Premio Nobel 20?? per la Fisica?). Ha confermato le caratteristiche principali degli AGN e ha iniziato l'osservazione multimessenger degli AGN.

# Conclusioni

I neutrini sono particelle

## ▶ Misteriose:

- ▶ Interagiscono molto debolmente e li possiamo rivelare solo indirettamente osservando le particelle che producono.
- ▶ Sappiamo che hanno una massa molto più piccola delle altre particelle ma non l'abbiamo ancora misurata direttamente.
- ▶ Essendo neutri potrebbero essere “particelle di Majorana”, che coincidono con la propria antiparticella, contrariamente alle altre particelle che sono cariche.

## ▶ Utili per la scienza:

- ▶ Ci portano informazioni da zone altrimenti inaccessibili: il centro della terra, il centro del sole, il nucleo di una supernova, l'universo primordiale.
- ▶ La comprensione delle strane proprietà dei neutrini è fondamentale per gli sviluppi delle nuove teorie fisiche.

## ▶ Potenzialmente utili per la tecnologia:

- ▶ Monitoraggio dei reattori per il controllo degli armamenti (ci sono già molti studi).
- ▶ Tomografia della terra (idea speculativa).
- ▶ Comunicazioni attraverso corpi densi (idea molto speculativa).