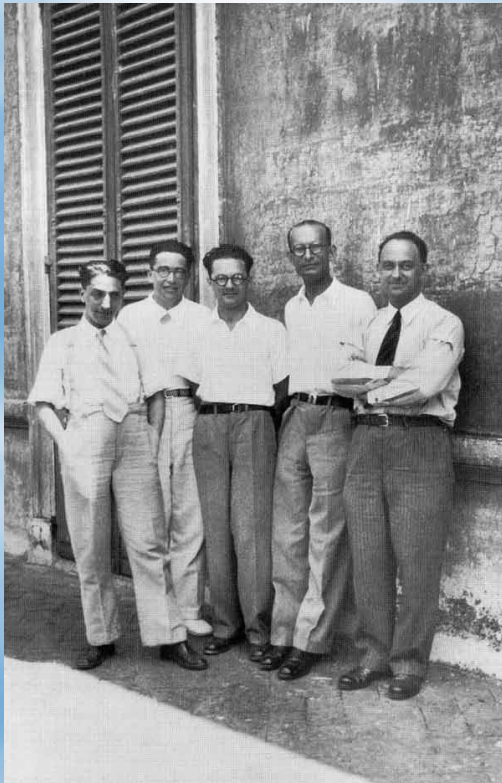


# Enrico Fermi, i ragazzi di via Panisperna e i neutrini



**Gianni Fiorentin(i)**  
**Laboratori Nazionali di Legnaro**  
**Università di Ferrara**

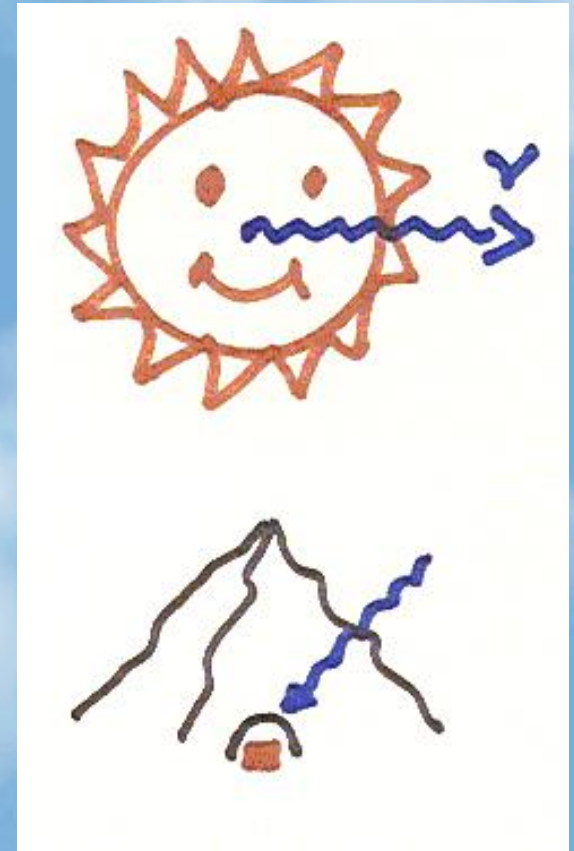


- **Carta di identità del neutrino**
- **Proprietà dei neutrini**
- **Che si puo' imparare dai neutrini?**
- **Che si puo' imparare coi neutrini?**
- **Neutrini per guardare il cielo**
- **La fonte di energia del Sole**
- **Sottoterra per vedere le stelle: Il Gran Sasso**
- **Scomparse e apparizioni...**
- **Neutrini nel cosmo...**



# Carta di Identità del neutrino

- Particella, associata a un tipo di radiazione
- Nascita (del concetto): 1930
- Maternità/Paternità: Pauli, Fermi
- Familiari: Amaldi, Majorana, Pontecorvo
- Residenza: quasi ovunque
- Provenienza: interno della Terra, Sole e stelle, reattori nucleari, acceleratori di particelle...
- Segni particolari: **Estremamente elusiva** (penetrante)
- Massa: “**estremamente piccola**”, rispetto alle altre particelle



$$m < 10^{-6} m_e$$



# Le origini

W. Pauli avanza l'ipotesi di una particella invisibile che, in certi processi nucleari, trasportasse energia e momento della quantità di moto.

- Se invisibile, deve essere senza carica elettrica (**neutra**)
- Poiche' puo' trasportare anche minime quantità di di energia, la sua massa deve essere **minima** (rispetto a quella delle altre particelle nucleari)

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

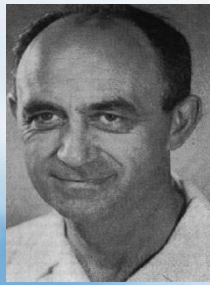
Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

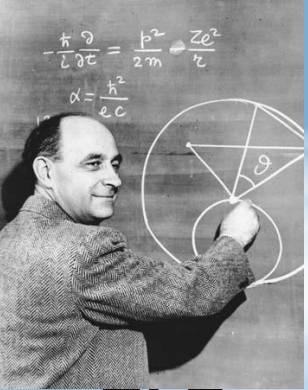
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich baldvöllst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.



# Il battesimo : neutroni o neutrini ?



- Negli stessi anni Chadwick aveva scoperto il neutrone, uno dei componenti del nucleo, **pesante** all'incirca quanto il protone ma elettricamente neutro
- Il neutrone di Chadwick e' diverso dalla particella leggera ipotizzata da Pauli.
- In una discussione con Fermi, Edoardo Amaldi conio' il nome neutrino, col tipico suffisso diminutivo italiano
- Fermi diffuse il nome nella comunità scientifica



# Come interagiscono i neutrini ?



- E' Fermi a formulare la prima teoria quantistica e quantitativa delle interazioni dei neutrini.
- Ancora oggi valida per la descrizione delle interazioni di neutrini a bassa energia<sup>0</sup> ( $E \ll M(W)$ )
- Ancora oggi la Teoria di Fermi e' il paradigma per la costruzione di nuove teorie per ipotetiche interazioni, nel limite di energia piccola rispetto alla tipica scala di queste
- (L'articolo di Fermi fu rifiutato dalla prestigiosa rivista Nature...)

# Il programma di Bruno Pontecorvo:

- Quali sono le sorgenti di neutrini?
- Come si possono rivelare i neutrini?



NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA

DIVISION OF ATOMIC ENERGY

INVERSE  $\beta$  PROCESS

P.D. - 205

A LECTURE

BY

B. PONTECORVO

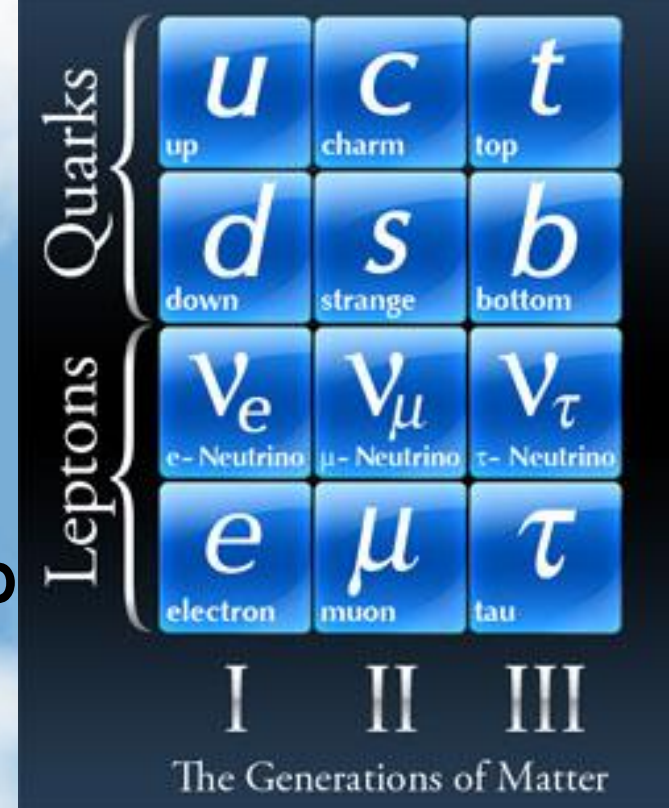
CHALK RIVER, ONTARIO

20 NOVEMBER, 1946

# Il puzzle delle tre famiglie

- Ci sono tre tipi di neutrino, ciascuno associato a una particella carica
- Tutte i costituenti della materia appaiono replicati tre volte (tre famiglie)
- Accanto alle particelle, altrettante antiparticelle (anti leptoni, antiquarks...)
- Perché 3 ? Siamo ancora senza risposta, come 60 anni fa, quando Rabi alla scoperta del muone:

“Who orderd that?”





# Il puzzle delle masse (dei neutrini)

- Le masse dei leptoni carichi vanno da  $1m_e$  a  $1000 m_e$ .
- Le masse dei quark vanno da  $1m_e$  a  $100.000 m_e$ .
- Le masse dei neutrini sono piu' piccole di un milionesimo di  $m_e$ .
- Perche' ?

|         |                           |                               |                                 |
|---------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Quarks  | $u$<br>up                 | $c$<br>charm                  | $t$<br>top                      |
|         | $d$<br>down               | $s$<br>strange                | $b$<br>bottom                   |
| Leptons | $\nu_e$<br>e- Neutrino    | $\nu_\mu$<br>$\mu$ - Neutrino | $\nu_\tau$<br>$\tau$ - Neutrino |
|         | $e$<br>electron           | $\mu$<br>muon                 | $\tau$<br>tau                   |
|         | I                         | II                            | III                             |
|         | The Generations of Matter |                               |                                 |

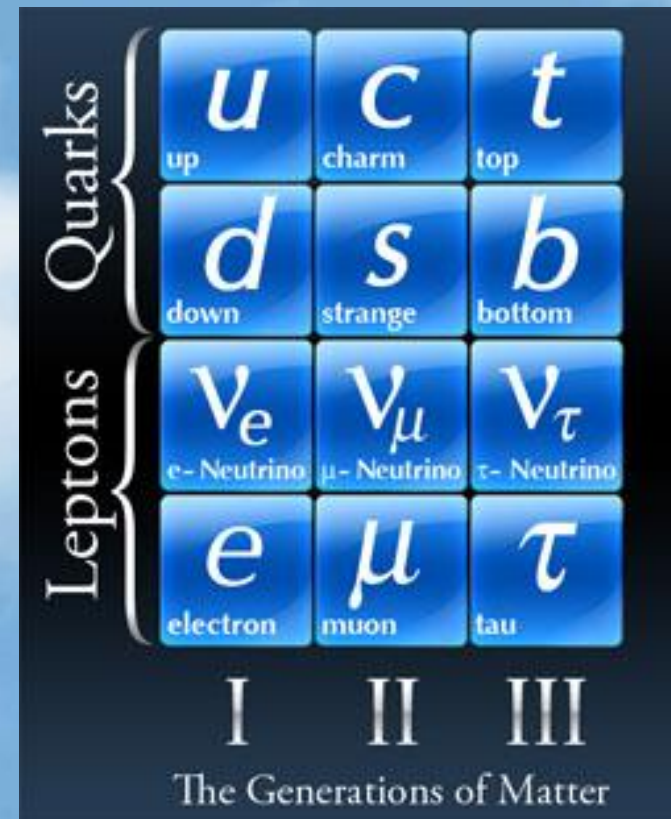


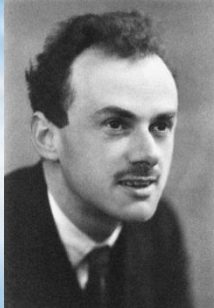


## Il puzzle delle metamorfosi dei neutrini (oscillazioni)



- Gia' nel 1957 Pontecorvo aveva formulato l'ipotesi che i neutrini di un tipo potessero spontaneamente trasformarsi negli altri
- Dal 1970 abbiamo avuto indizi che questo succeda
- Dal 2001 ne abbiamo la prova, anzi piu' prove...





## Neutrini ed antineutrino: Dirac o Majorana



- Ad ogni particella secondo la teoria di Dirac si associa un'antiparticella, “i cui numeri quantici additivi sono opposti”)
- Es: elettrone-positrone, protone-antiprotone, neutrone-antineutrone
- Per particelle neutre, particella ed antiparticella **possono** coincidere, come dimostrato da E. Majorana nel 1937
- **I neutrini coincidono con le loro antiparticelle ?**
- Domanda con implicazioni estremamente importanti (violazione del numero leptonico, asimmetria materia antimateria) cui non abbiamo per ora risposta sperimentale
- Ricerche di frontiera in tutto il mondo, fra cui ai laboratory del Gran-Sasso ( esp. GERDA , CUORE...)

# Una breve storia del neutrino



1898 Discovery of the radioactivity

1926 Problem with beta radioactivity

1930 Pauli invents the neutrino particle

1932 Fermi baptizes the neutrino and  
theory of weak interaction

builds the

1946 Pontecorvo program of neutrino detection

1956 First observation of the neutrino by an experiment

1957 Pontecorvo: hyp of neutrino oscillations

1962 Discovery of an other type of neutrino:  $\nu_\mu$

1970 Davis experiment opens the solar neutrino puzzle

1974 Discovery of neutral currents thanks to the neutrinos

1987 Neutrinos from SN 1987A

1991 LEP experiments show that there are only three light  
neutrinos

1992 Missing solar neutrinos confirmed by GALLEX

2001 SNO closes the solar neutrino puzzles, by directly  
proving the transformation of solar neutrinos

2002 Kamland observes transmutation of man made  
(reactor) neutrinos

2009 Borexino at GS detects geo-neutrinos

2010 OPERA at GS detects transformation  $\nu_\mu$   
 $\nu_\tau$ ...



# The Nobel Prize in Physics 2015



Photo: A. Mahmoud

**Takaaki Kajita**

**Prize share: 1/2**



Photo: A. Mahmoud

**Arthur B. McDonald**

**Prize share: 1/2**

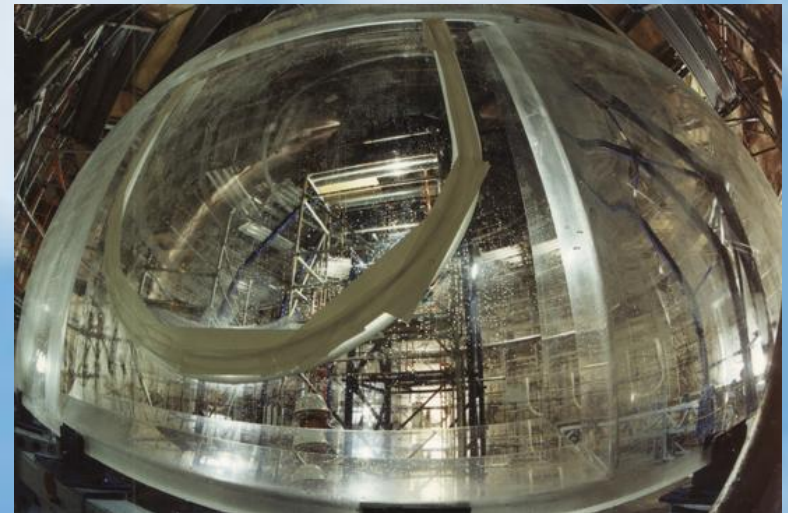
The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald *"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"*

# Le oscillazioni dei neutrini solari



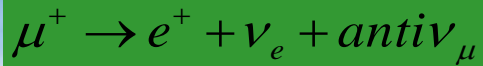
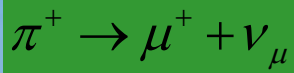
- L 'esperimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory), in Canada, ha dimostrato che una frazione dei neutrini **elettronici** emessi dal sole si trasforma nel viaggio in altre particelle.

- SNO rivela sia il flusso di  $\nu_e$ , sia il flusso totale di neutrini provenienti dal sole ( $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ )
- SNO dimostra che il Sole produce tanti neutrini quanti predetti dalla teoria, ma che una frazione dei neutrini cambia tipo nel viaggio Sole-Terra



# Oscillazioni dei neutrini atmosferici

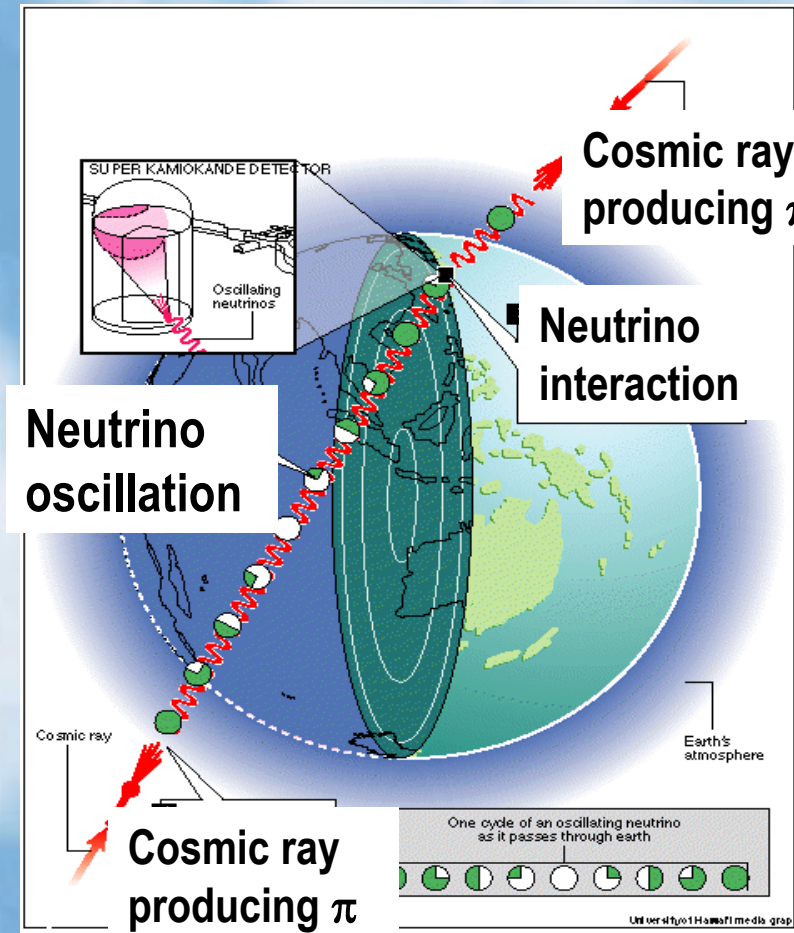
- Dall'interazione dei raggi cosmici primari (p, a) con i nuclei dell'atmosfera vengono prodotti prodotti pioni e da questi neutrini muonici ed elettronici:



- Ci si aspetta che il numero di eventi "muonici" sia il doppio del numero di eventi "elettronici"

$$R = \text{ev}(\mu)/\text{ev}(e) = 2$$

- L'esperimento mostra che  $R = 2$  per i neutrini che arrivano dall'alto, mentre  $R=1$  per quelli che vengono dal basso, ossia attraversando la terra i neutrini hanno subito la metamorfosi.

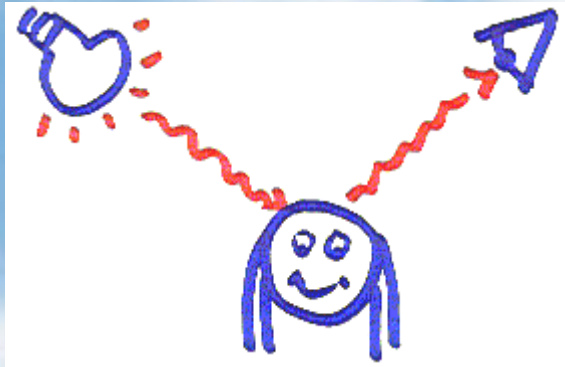


# Neutrini in fisica ed astrofisica

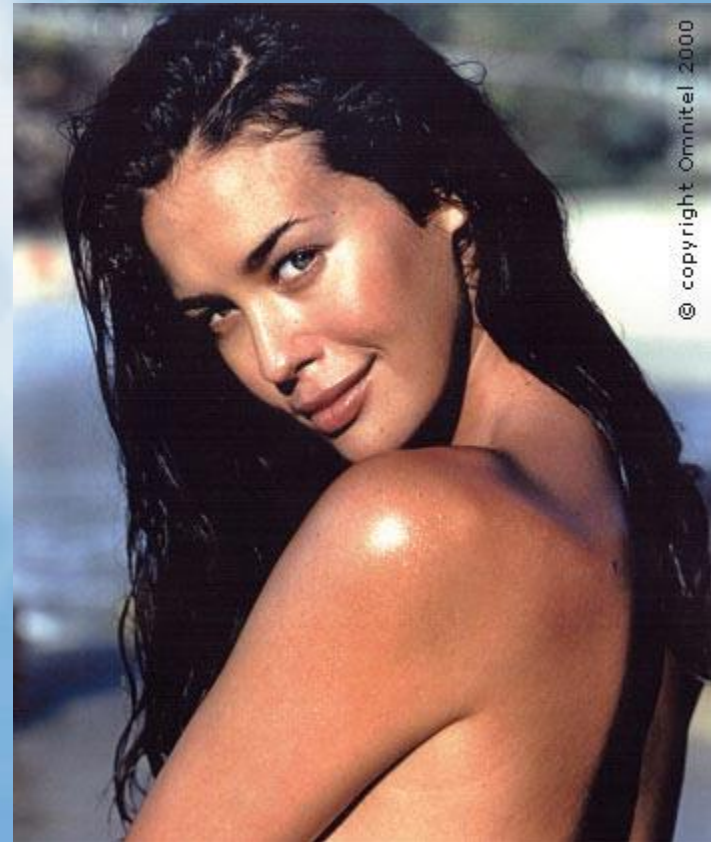
- Che si puo' imparare sulle leggi della fisica studiando i neutrini ?
- Che si puo' imparare sull'universo utilizzando i neutrini come strumento d'indagine



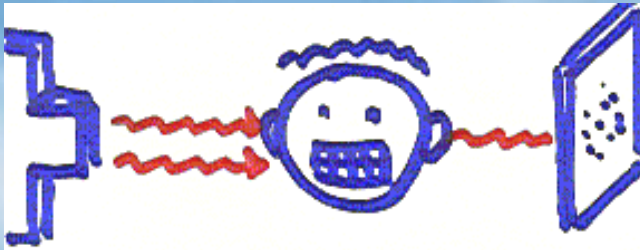
# C'e' modo e modo di vedere: la luce visibile



- Sorgente di radiazione
- Interazione
- Rivelatore (occhio)



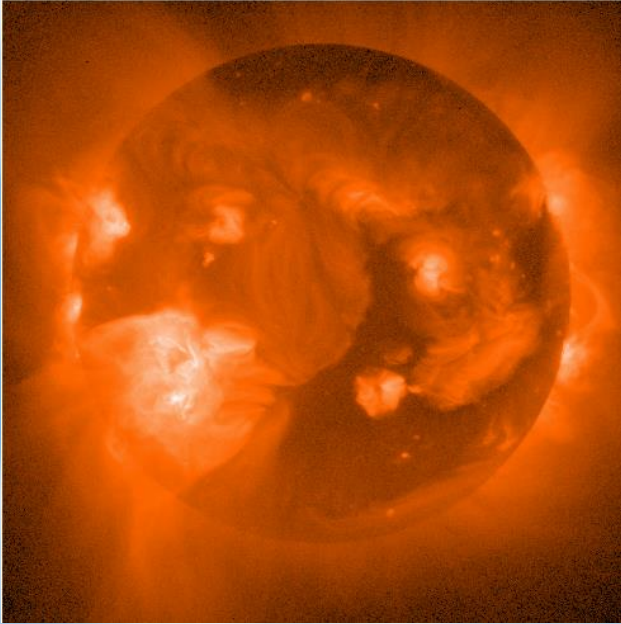
# C'e' modo e modo di vedere: i raggi X



- Se voglio vedere all'interno uso una radiazione **più penetrante**

- ancora una radiazione e.m
- Rivelatore (lastra ....occhio)

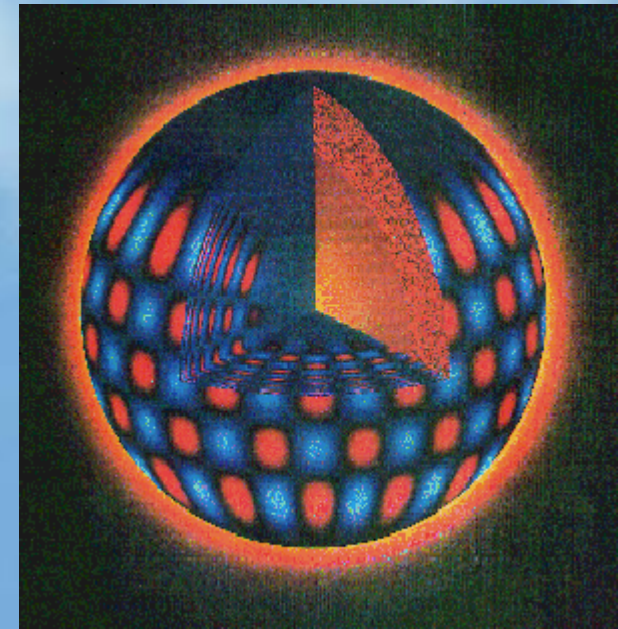
# Vedere l'interno delle stelle (e dei pianeti)



- Le stelle producono ogni tipo di radiazione: visibile, infrarosso,....

- Per vedere al loro interno occorrono radiazioni **molto più penetranti** dei raggi X

- Per vedere l'interno del sole, e della Terra si usano: onde acustiche [(Elio) sismologia] e **i neutrini**



# Perche' guardare l'interno delle stelle?



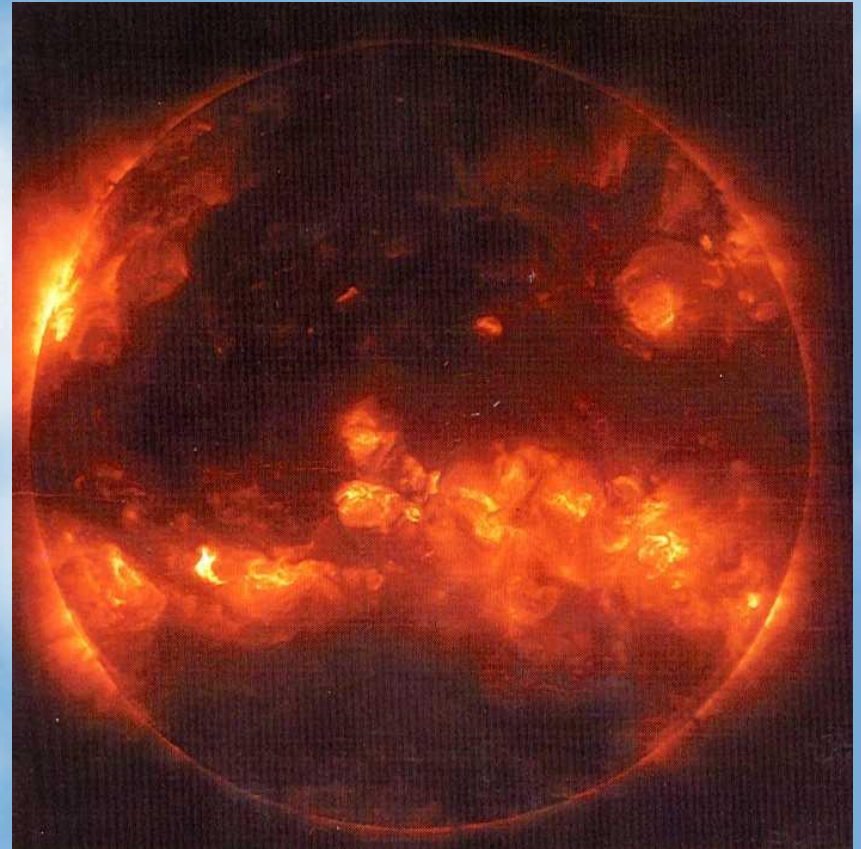
**Il Beduino, il pastore, passava la notte nel deserto, che era completamente oscuro e buio. Allora Dio, per aiutare il suo fedele, invio' i suoi angeli a forare la volta nera della notte con le loro lance. Quelle che noi percepiamo come stelle, non sono altro che i fori nella volta della notte dai quali si vede la luce che c'è al di la', nel paradiso di Dio**

**(leggenda della cultura beduina sull'origine delle stelle)**

# La fonte di energia delle stelle

- **Kelvin**: L'energia gravitazionale può sostenere la luminosità del sole per circa 30.000.000 di anni.
- **Troppo poco** per rendere conto dell'evoluzione dei processi biologici e geologici
- Comprendere la fonte di energia delle stelle era il **problema** scientifico del secolo scorso:

**quale fonte di energia può sostenere il sole per circa 5.000.000.000 anni?**

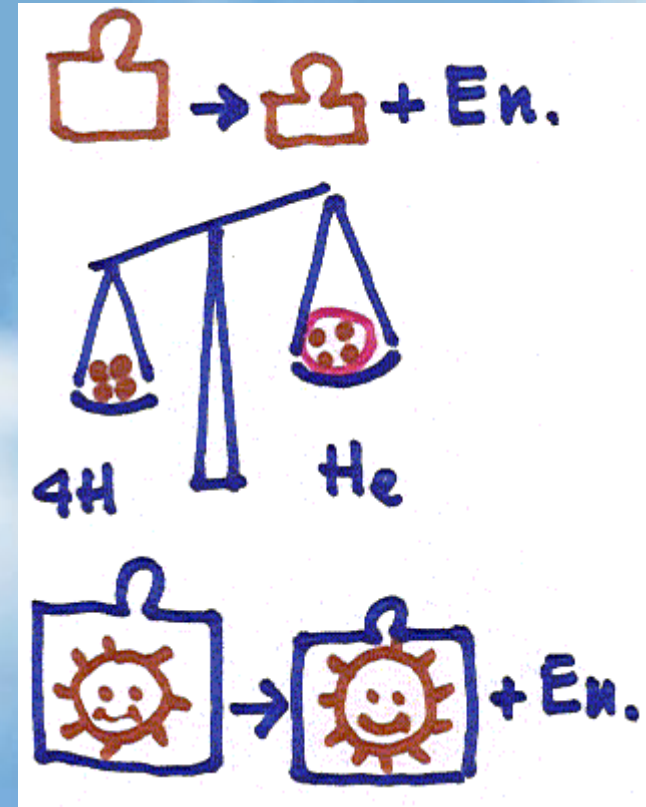


# La nascita dell'astrofisica nucleare

**Einstein:**  $E=mc^2$

**Aston:**  $m(\text{He}) < 4 m(\text{H})$

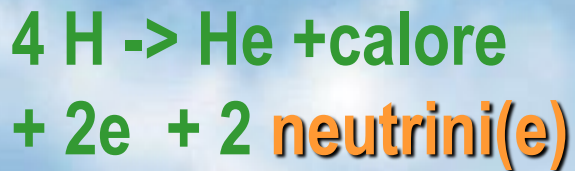
**Eddington:** Se una stella consiste inizialmente di idrogeno, che viene gradualmente trasformato in elementi più pesanti, allora abbiamo compreso la fonte di energia delle stelle....



...Se questo e' vero, allora siamo più vicini al sogno di controllare questo potere latente, **a beneficio dell'umanità o per il suo suicidio** (1920)

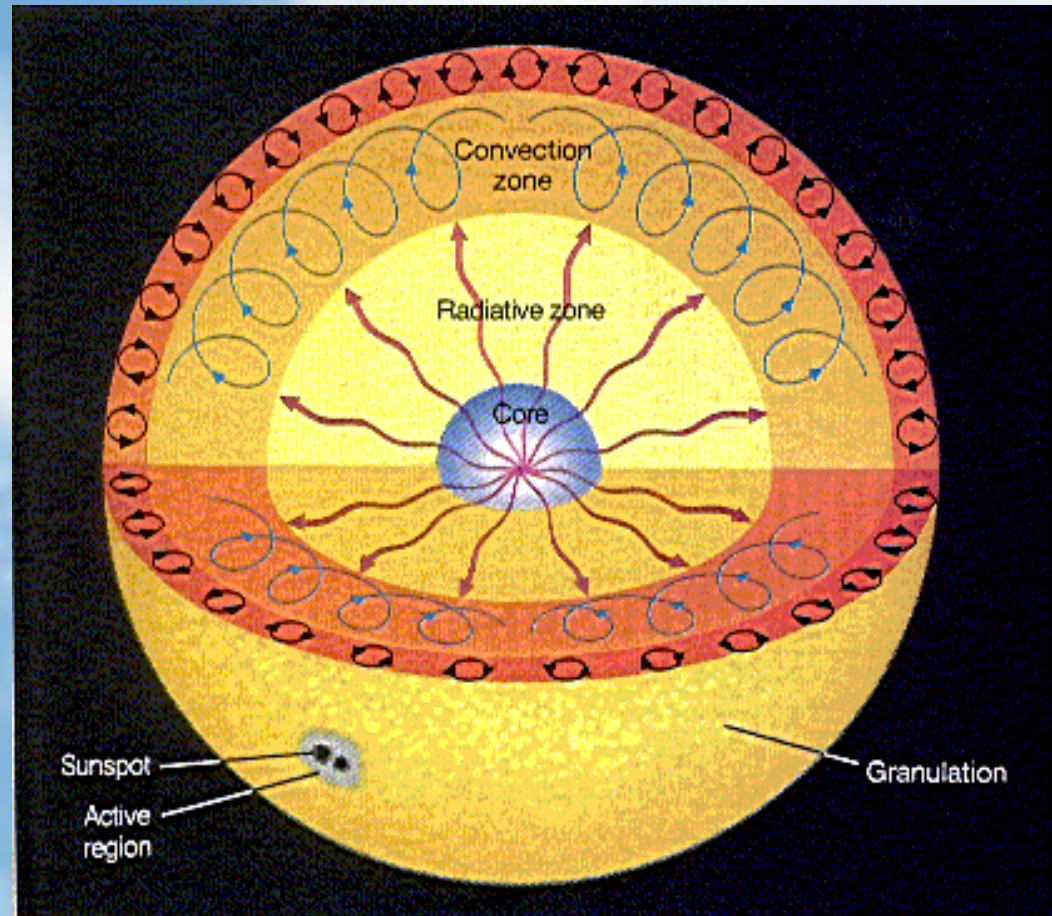
# La prova ?

Riteniamo che nel nucleo del sole avvengano reazioni nucleari:

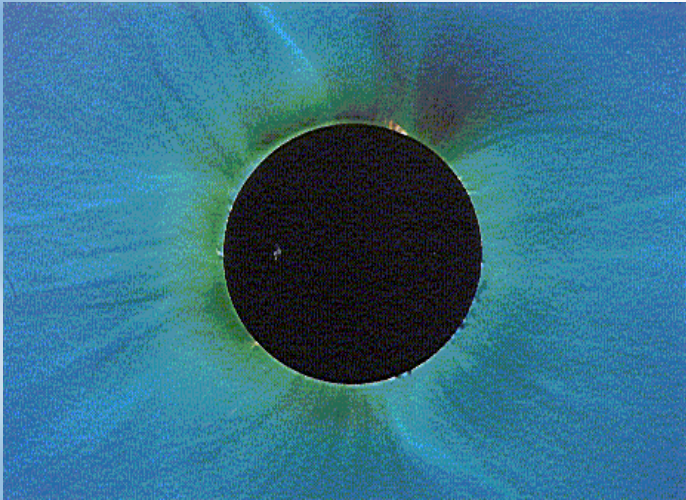


Come dimostrarlo?

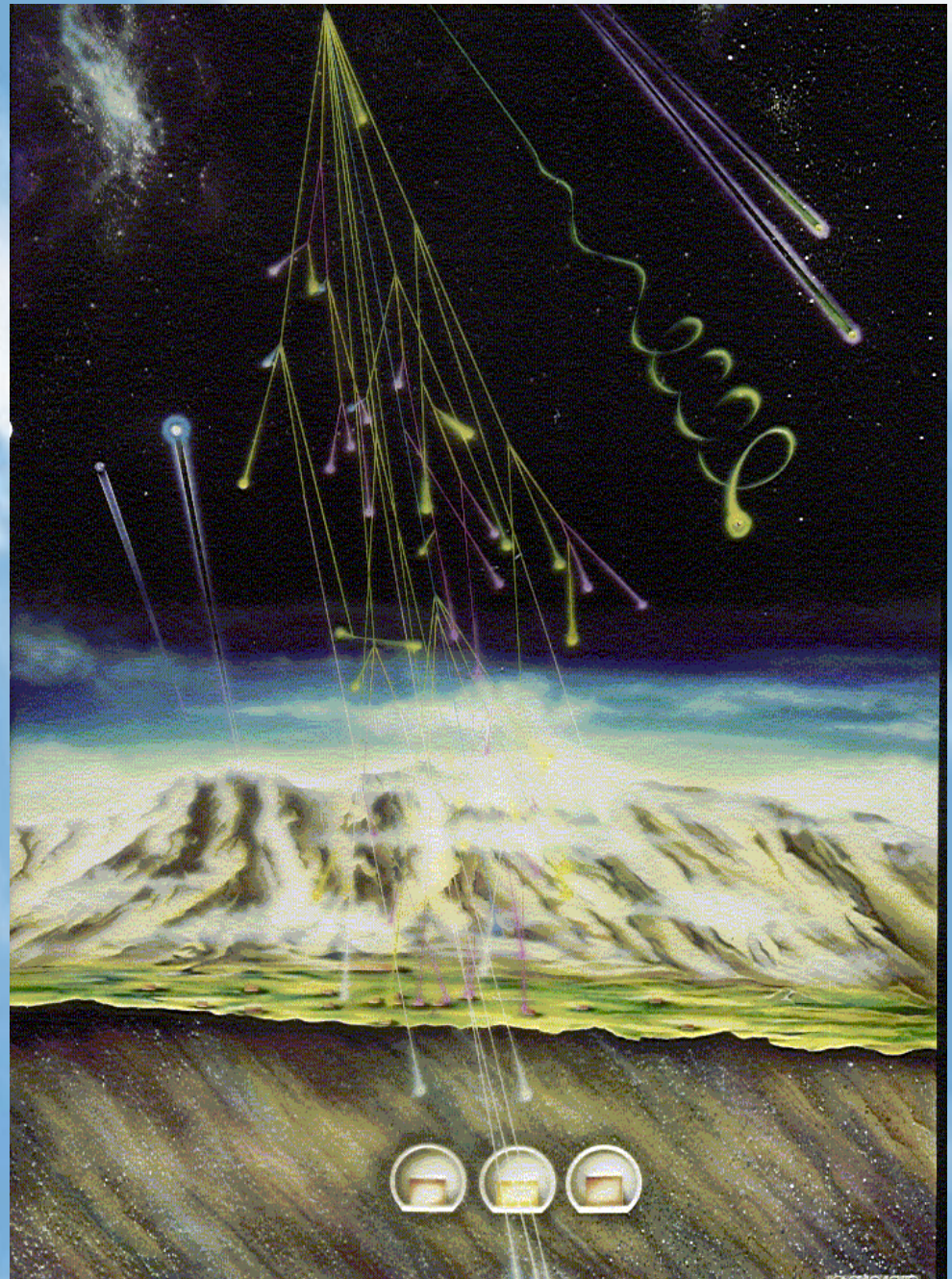
I neutrini, i costituenti della la radiazione più penetrante, riescono ad attraversare la stella (**Pontecorvo '46**); occorre **rivelarli per avere la prova della fonte di energia del sole**



# Underground physics



Per rivelare una radiazione elusiva, penetrante, **occorre schermarsi** dalle altre radiazioni



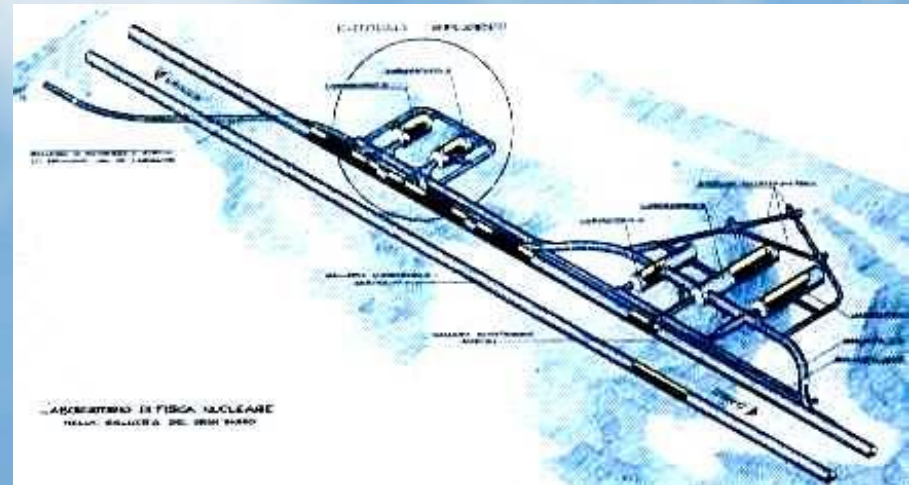


# Il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso



**Il laboratorio del silenzio  
cosmico**

**La frontiera della  
radioattività zero**



# Gli uomini



# Gli scavi



# I rivelatori



# Dal Gran Sasso al Deutschen Museum

- Gallex ha **rivelato i neutrini** provenienti dalle fusioni nucleari nel sole
- Gallex ha dimostrato che **l'energia del sole e' prodotta da reazioni nucleari** al suo interno



# Cose viste e non viste

- Il segnale osservato da Gallex e' circa la **meta'** di quello atteso
- Lo stesso e' successo in altri 5 esperimenti di neutrino solare.

A) Nel sole avvengono la metà delle reazioni previste?

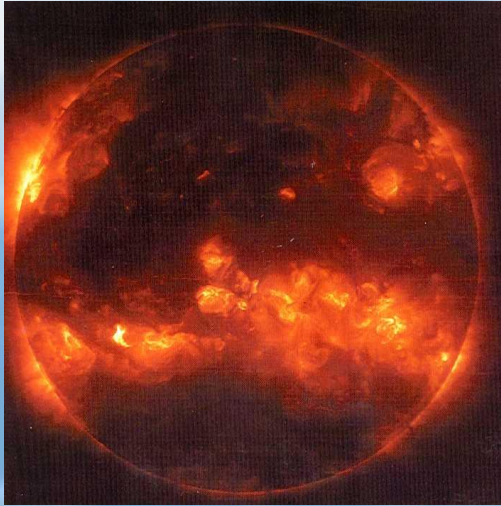
oppure

B) La metà dei neutrini elettronici si e' trasformata in altri tipi di neutrini?

- Gli esperimenti sulle oscillazioni di neutrino ci han detto che B e' la risposta giusta
- In altre parole, il telescopio coi neutrini e' stato calibrato !!!



# Che cosa si puo' vedere coi neutrini?



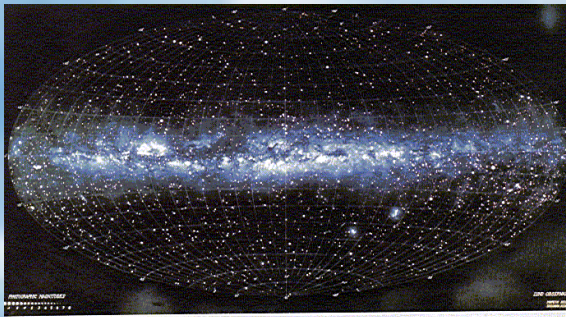
**L'interno del Sole**



**L'interno della  
terra**



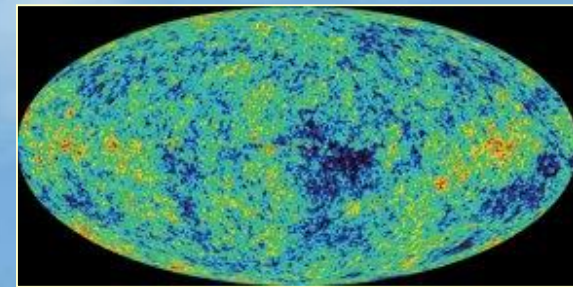
**L'interno delle  
Supernovae**



**I neutrini della Galassia**



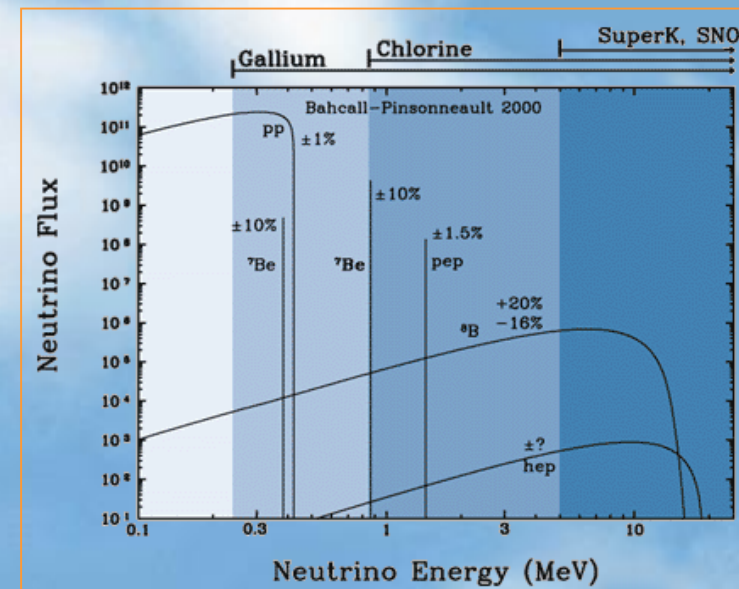
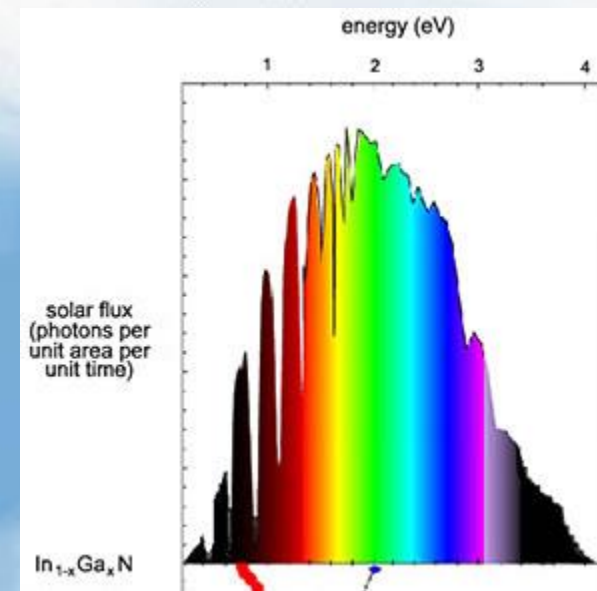
**La materia oscura  
nell'universo**



**Il Big Bang**

# L'interno del sole, visto coi neutrini

- Adesso che comprendiamo i neutrini, possiamo usarli per studiare il Sole.
- Si sta compiendo una spettroscopia neutrinica del Sole, misurando la radiazione neutrinica a diverse energie
- Questa da' informazioni sul nucleo del Sole, altrimenti inaccessibile.
- Al G.S. sono stati misurati i neutrini piu' difficili, di bassa e media energia
- Nel futuro si studiera' anche il ciclo CNO...



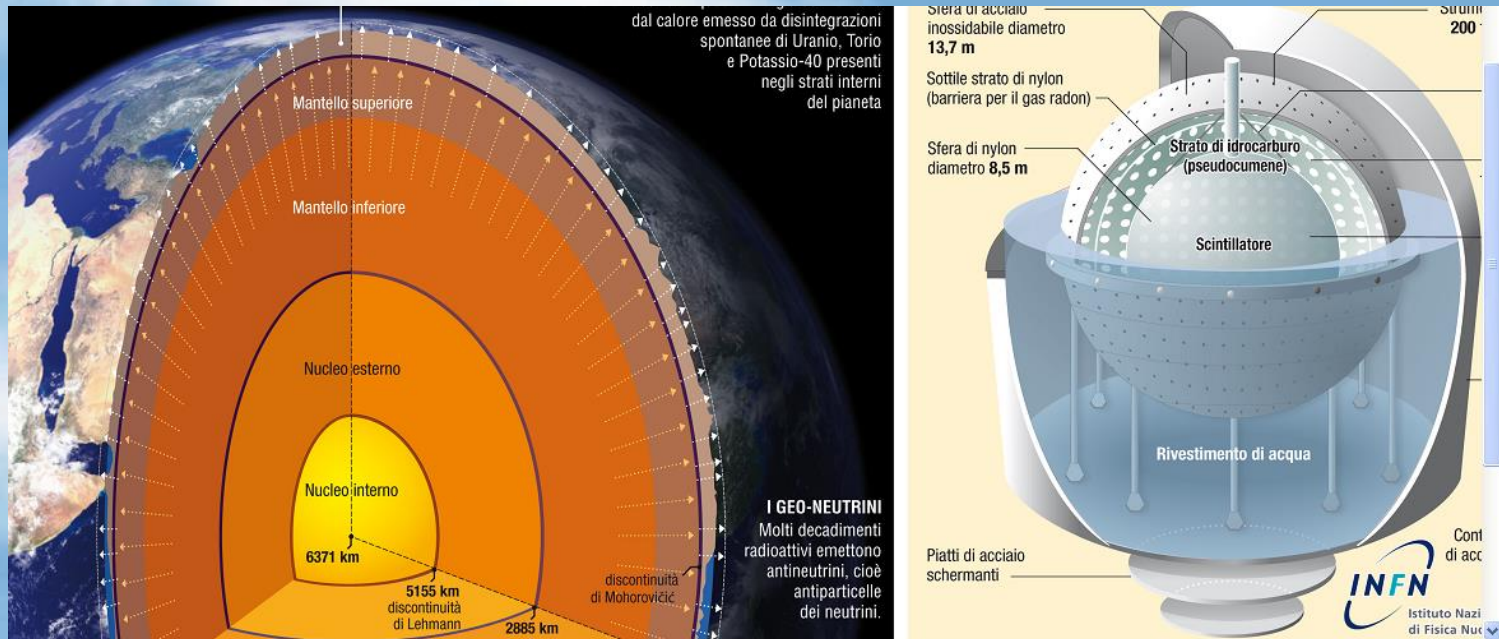


# I neutrini della Terra

- La terra e' radioattiva
- Quanto e' il contenuto di elementi radioattivi all'interno della terra?
- Rivelare (anti) **neutrini prodotti dall'interno terrestre** e' **il** modo per misurare la "radioattività" della terra.



# Borexino al G.S. ha aperto una finestra sull'interno della Terra



Altri dati da KAMLAND in Giappone e nel futuro da SNO (Canada) e JUNO (Cina) potranno confermare/smentire teorie correnti sulle origini e composizione della terra

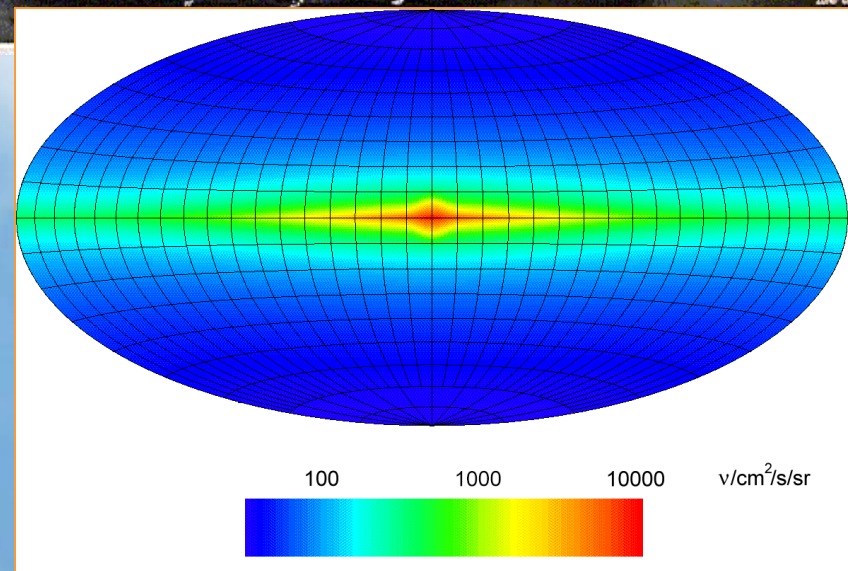
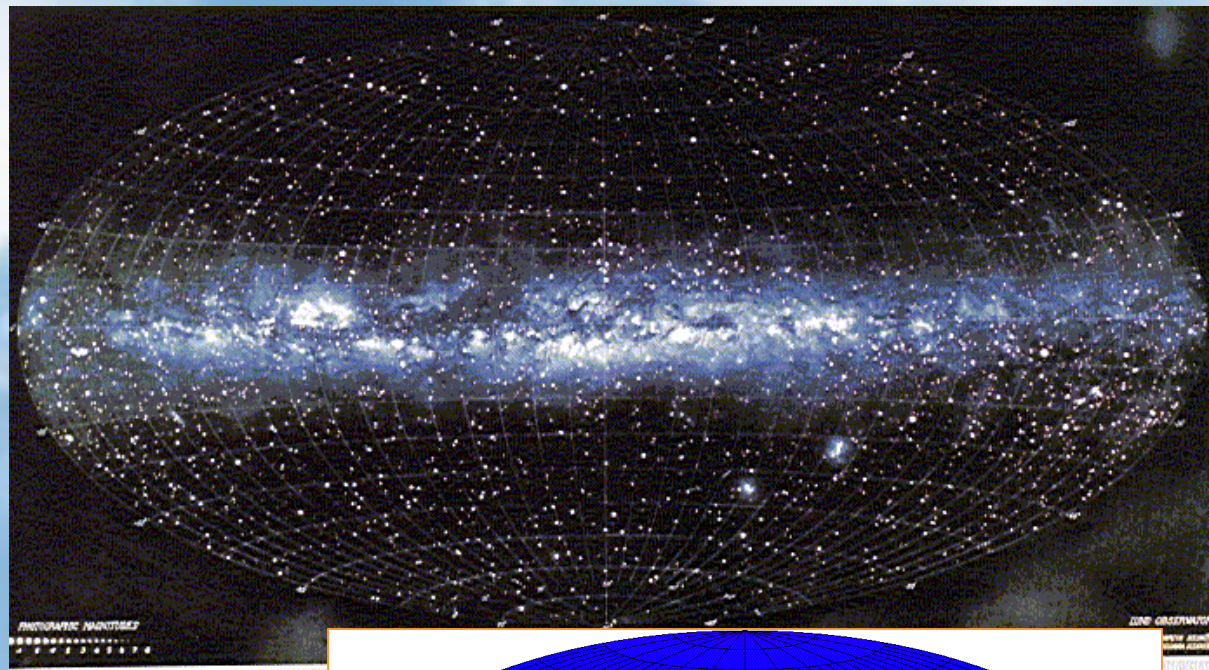
# I neutrini da supernovae

- Lo 0.1% dell'energia di una supernova e' in radiazione visibile, e il 99.9% e' trasportato da neutrini
- Nel 1987, per la prima volta sono stati rivelati neutrini da SN
- I neutrini da SN sono e saranno lo strumento per lo studio della struttura interna



# I neutrini dalla Galassia

- Nella nostra Galassia brillano  $10^{11}$  soli
- Ciascuno di questi produce neutrini
- Come apparirà la galassia in un telescopio a neutrini?



# La materia oscura nell'universo

- All'interno delle galassie e fra le galassie c'è della materia che non brilla, oscura.

- **La materia oscura** costituisce il 90% dell'Universo, ma non sappiamo di che è fatta.
- Sappiamo che i neutrini hanno massa, e dunque contribuiscono alla materia oscura.



**Quanto è il contributo dei neutrini alla massa mancante?**

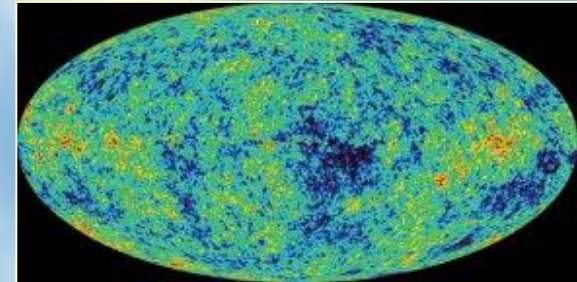
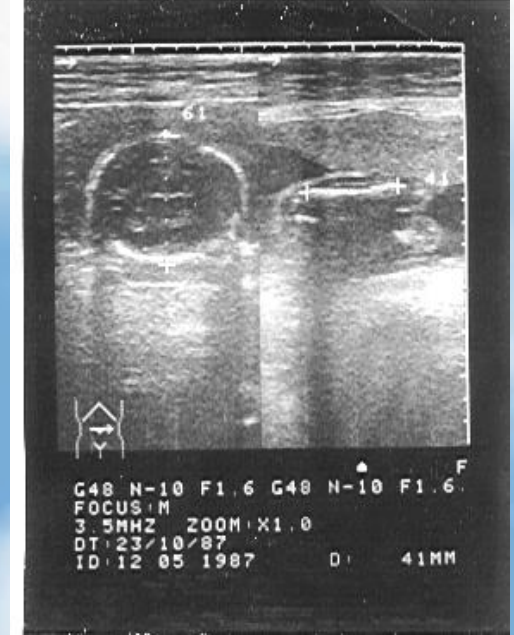
# Quanto pesano i neutrini?

- Oggi sappiamo che i neutrini hanno masse diverse, misuriamo le differenze ma non conosciamo la scala
- Ci sono vari esperimenti in corso e in programma, ma per adesso abbiamo solo un limite superiore per la scala



# I neutrini dal Big Bang

- Guardare lontano nello spazio significa guardare indietro nel tempo.
- Oggi sappiamo vedere le tracce del Big Bang, nella radiazione di fondo (e.m) che permea l'universo.
- Questa fotografa l'universo 300.000 anni dal big bang.
- Non abbiamo immagini antecedenti, perche' l'universo era troppo caldo perche' la luce potesse sfuggire
- C'e' un'altra radiazione di fondo, quella dei neutrini, che riesce a fuggire 1s dopo il Big Bang.
- Rivelarla e' il sogno di tutti I neutrinisti



# Neutrino telescopes



*Milla Baldo Ceri*



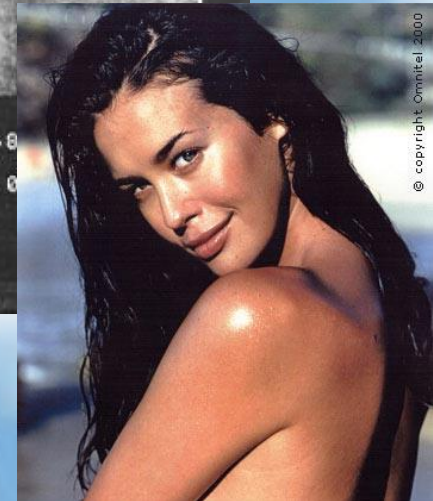
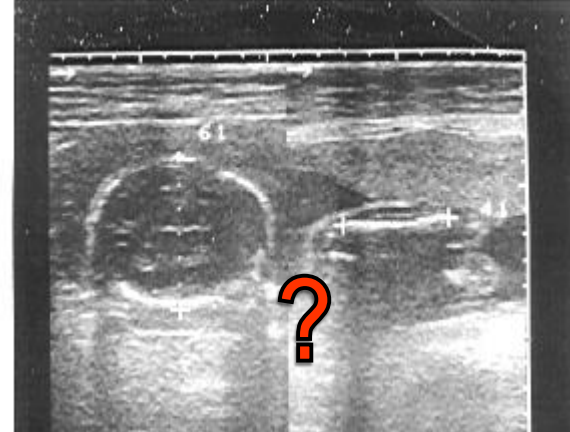
**Grazie**

# Cose viste e non viste

Una scomparsa non e' una scoperta

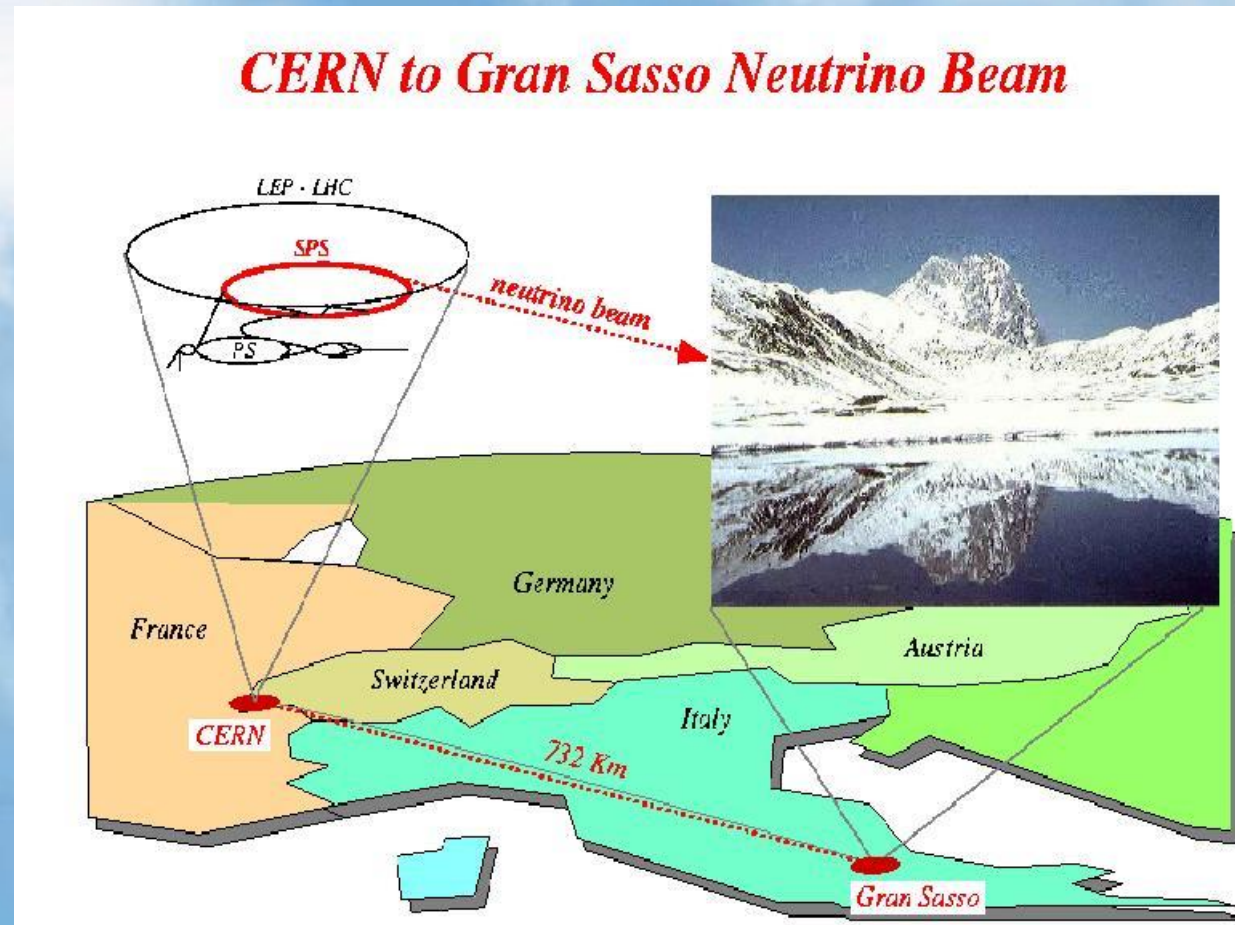
Per fare una scoperta occorre avere un segnale, fare un **esperimento di apparizione**

Per i neutrini, occorre **rivelare i prodotti** della loro (eventuale) trasformazione



# Da Ginevra al Gran Sasso

- Sparare neutrini prodotti al CERN di Ginevra sotto la crosta terrestre per 732 Km
- in questo viaggio i neutrini possono trasformarsi
- Alle energie di un acceleratore sono osservabili e distinguibili i vari tipi di neutrino



**goal: rivelare al Gran Sasso i prodotti della trasformazione...** 43

# Opera al Gran Sasso

- OPERA = Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus).
- Neutrinos "shot" from the European laboratory of CERN in beams directed to the Gran Sasso: in a mere 2.4 milliseconds they travel 732 kilometres beneath the Earth's crust to the core of the Gran Sasso Mountain
- During their journey, there is the possibility that some of them "change" their nature.
- A **single candidate** neutrino that turned (in particle physics is called "oscillation") from a muon neutrino into a **tau neutrino** has been detected by the OPERA scientists in 2010.



# L'esperimento CNGS (Cern Neutrinos to Gran Sasso)

## Obiettivo

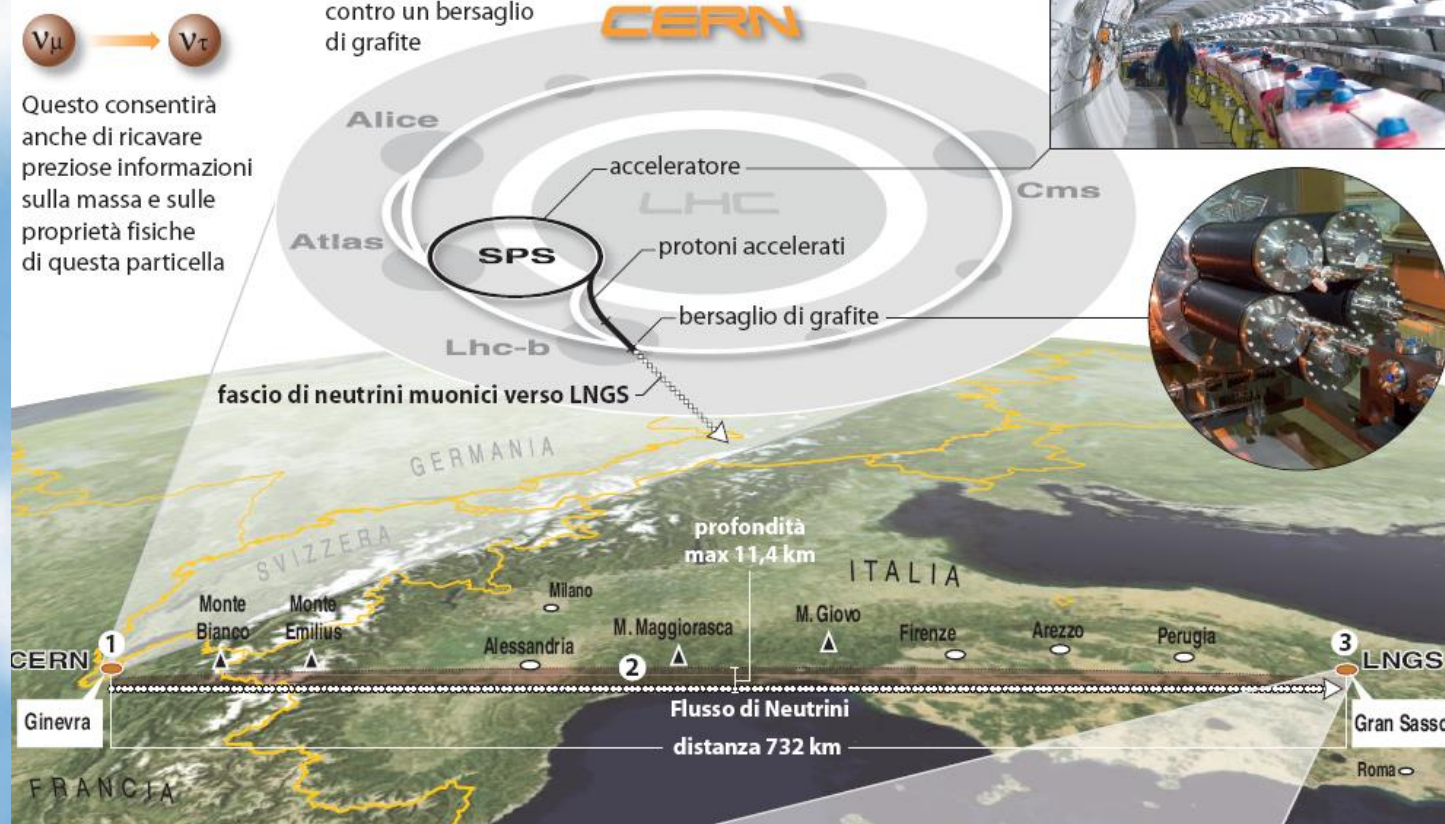
Osservare per la prima volta in modo diretto l'**oscillazione del neutrino**.



Questo consentirà anche di ricavare preziose informazioni sulla massa e sulle proprietà fisiche di questa particella

## Come funziona

1 Al CERN di Ginevra, un fascio di neutrini muonici puntato verso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) viene prodotto facendo scontrare dei protoni accelerati contro un bersaglio di grafite



2 I neutrini attraversano la crosta terrestre per **732 km** e, viaggiando quasi alla **velocità della luce** giungono a destinazione dopo **2,4 millisecondi**

## OPERA

3 Ad attenderli ai LNGS c'è **OPERA** che fotografa i prodotti della loro interazione con i nuclei del piombo di cui è composto il rivelatore.



OPERA volume totale: **2.000 m<sup>3</sup>**  
peso totale: **4.000 tonnellate**  
(come 7 Airbus A380)



Il rivelatore principale è costituito da **150.000 mattoncini**.  
Ogni mattoncino

# Borexino: expectations and results

- Predict a total of 20.7 events in 24 months  
(**G**=6.3 **R**=14. **Bk**=0.4)
- The HER can be used to test the experiment sensitivity to reactors
- In the LER one expects comparable number of geo-nu and reactor-nu
- Observe 21 events in 24 months, attributed to  
**R**=10.7<sup>+4.3</sup><sub>-3.4</sub>  
**G**=9.9<sup>+4.1</sup><sub>-3.4</sub>  
**BK**=0.4
- One event per month experiment !

