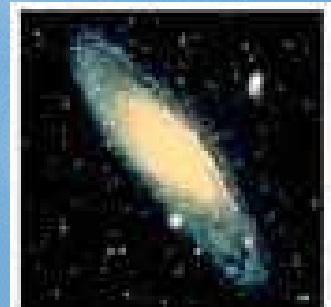


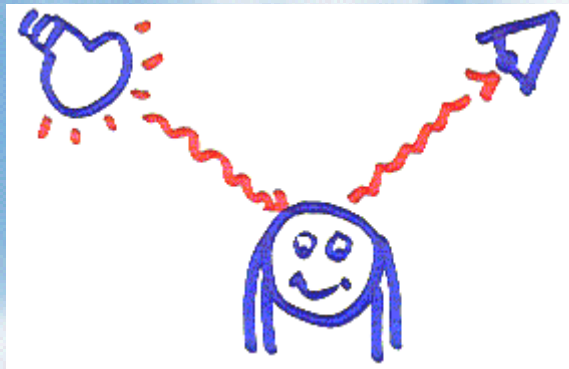


# Il neutrino, questo sconosciuto (L'universo visto coi neutrini)

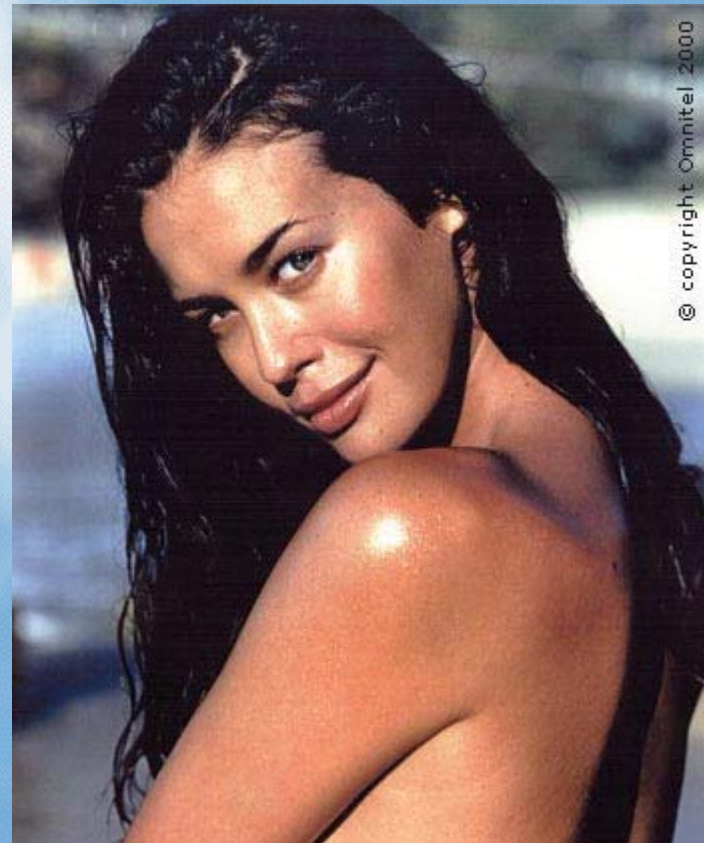
- C'è modo e modo di vedere
- La fonte di energia delle stelle
- Carta di identità del neutrino
- Sottoterra per vedere le stelle: Il Gran Sasso
- Gallex: dal Gran Sasso a Monaco
- Scomparse e apparizioni:  
da Ginevra al Gran Sasso, via Toronto
- Che si può imparare dai/coi neutrini?



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



- Sorgente di radiazione
- Interazione
- Rivelatore (occhio)



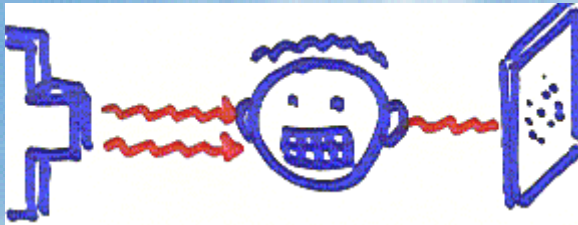
# C'e' modo e modo di vedere: i raggi X



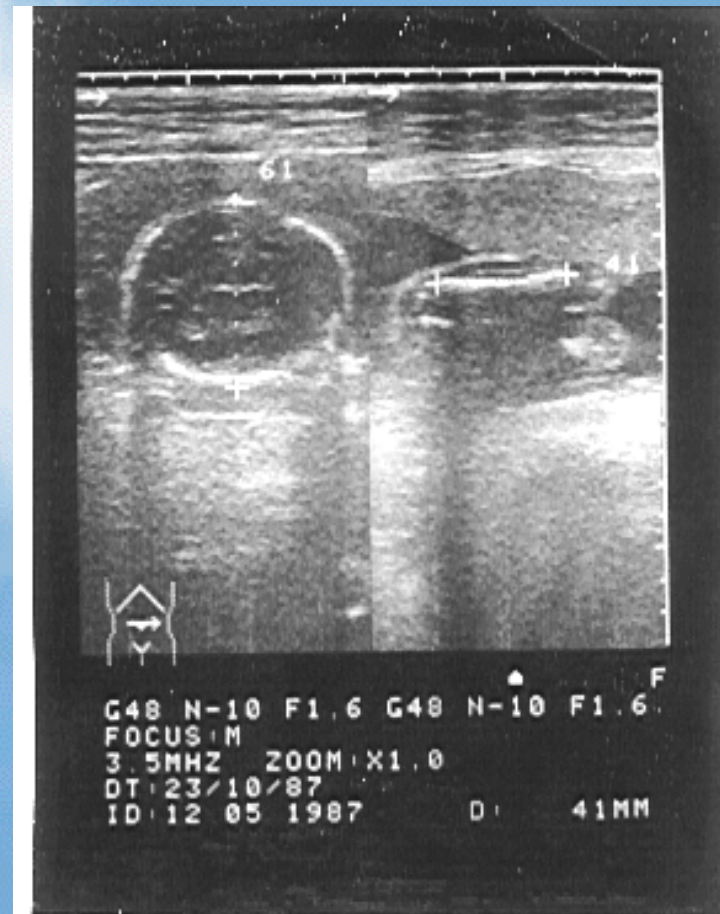
- Se voglio vedere all'interno uso una radiazione **più penetrante**

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

# C'e' modo e modo di vedere: gli ultrasuoni

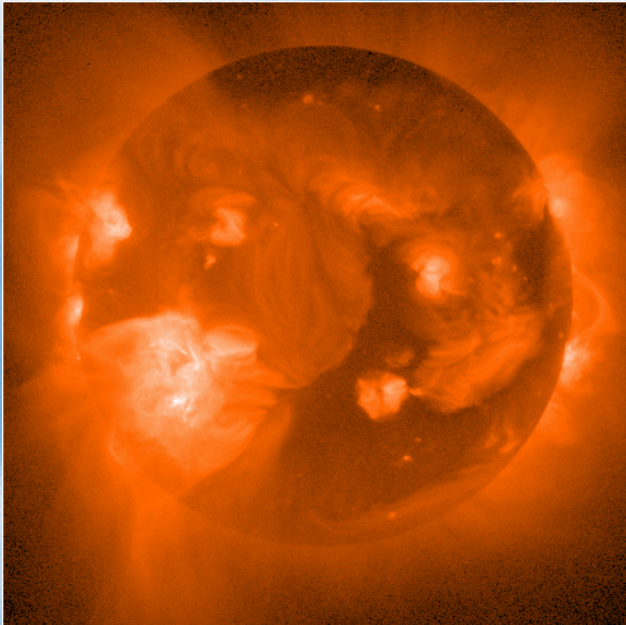


- Radiazione diversa (onde **acustiche**)
- Il rivelatore e' ancora più complicato...





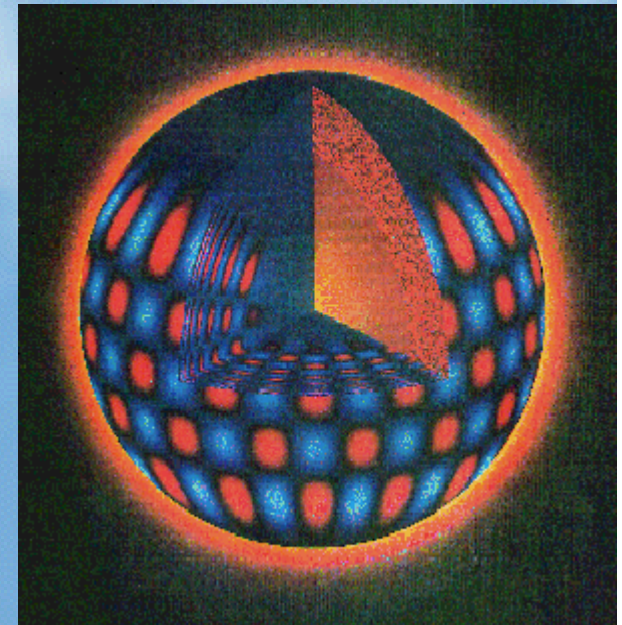
# Vedere l'interno delle stelle (e dei pianeti)



- 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

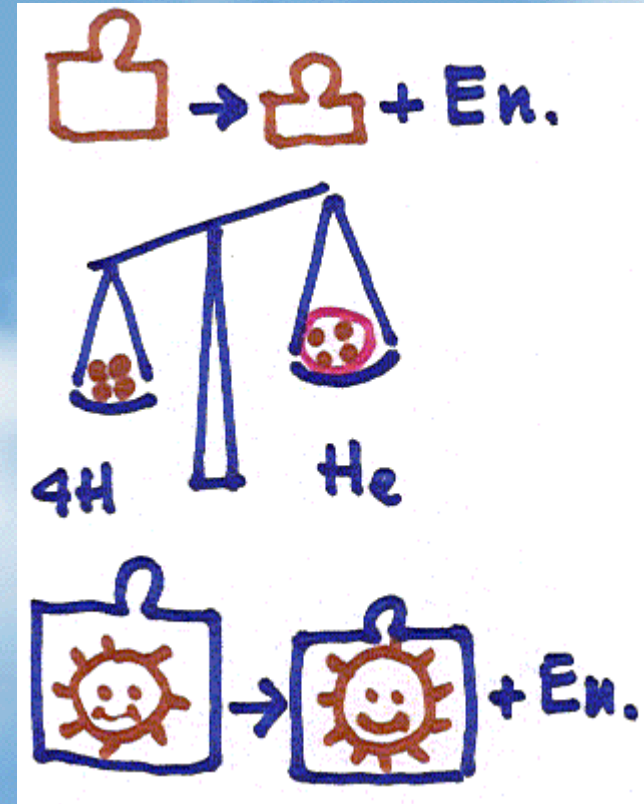
Einstein:

$$E=mc^2$$

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)



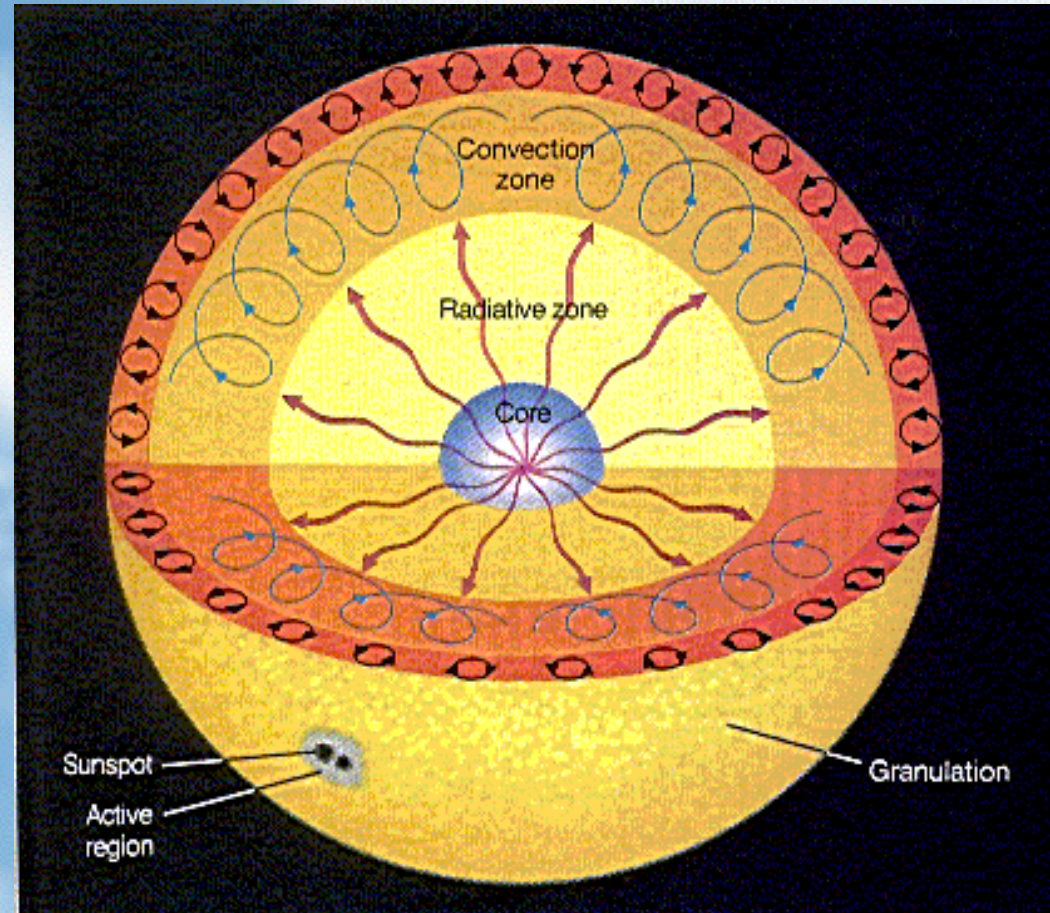
# La prova ?

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 '47); occorre rivelarli per avere la prova della fonte di energia del sole ,



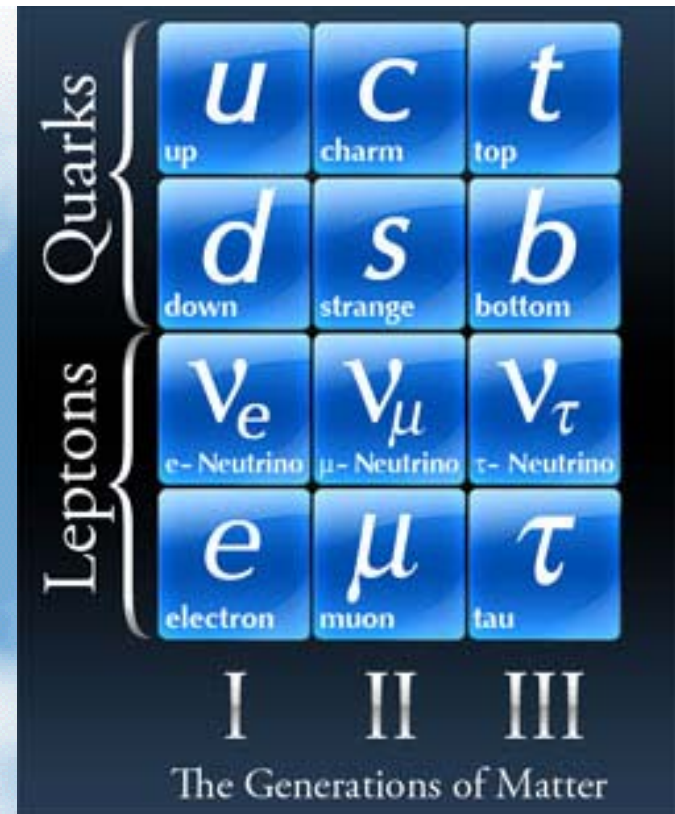
# Carta di Identità del neutrino

- Particella, associata a un tipo di radiazione
- Nascita: 1930
- Maternità/Paternità: Pauli Fermi (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



# 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 neutrini, antiquarks...)
- Perché 3 ? Siamo ancora senza risposta, come 60 anni fa, quando Rabi alla scoperta del muone: “Who ordererd that?”



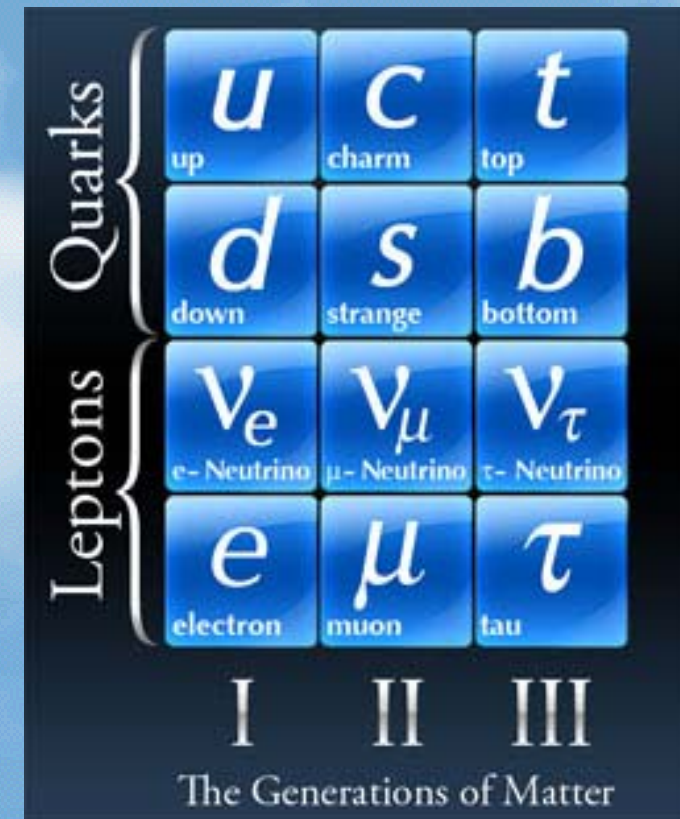




## Il puzzle delle metamorfosi dei neutrini (oscillazioni)

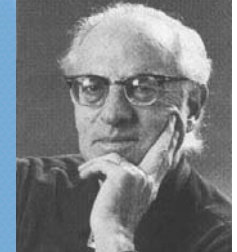
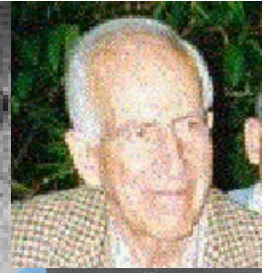
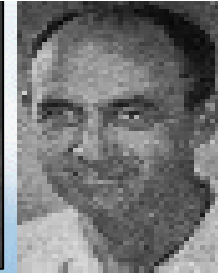


- Gia' nel 1957 Pontecorvo aveva formulato l'ipotesi che i neutrini di un tipo potessero spontaneamente trasformarsi negli altri
- Dal 1970 abbiamo avuto indizi che questo succedesse
- Dal 2001 ne abbiamo la prova, anzi piu' prove....



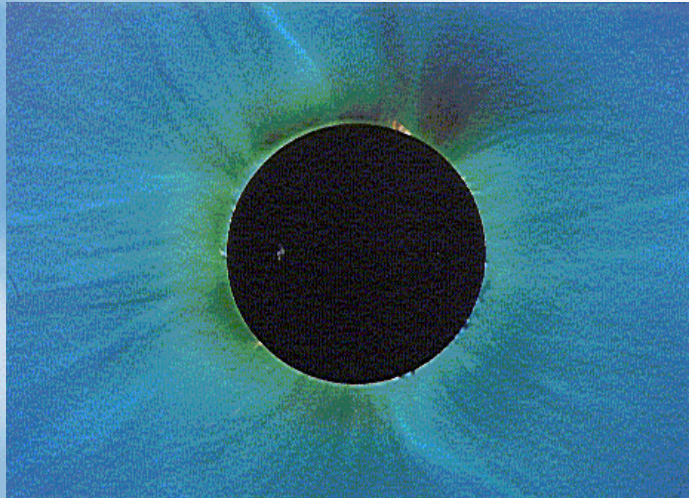
# Una breve storia del neutrino

- 1898 Discovery of the radioactivity
- 1926 Problem with beta radioactivity
- 1930 Pauli invents the neutrino particle
- 1932 Fermi baptizes the neutrino and builds the theory of weak interaction
- 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  $\nu_{\mu}$   $\nu_{\tau}$

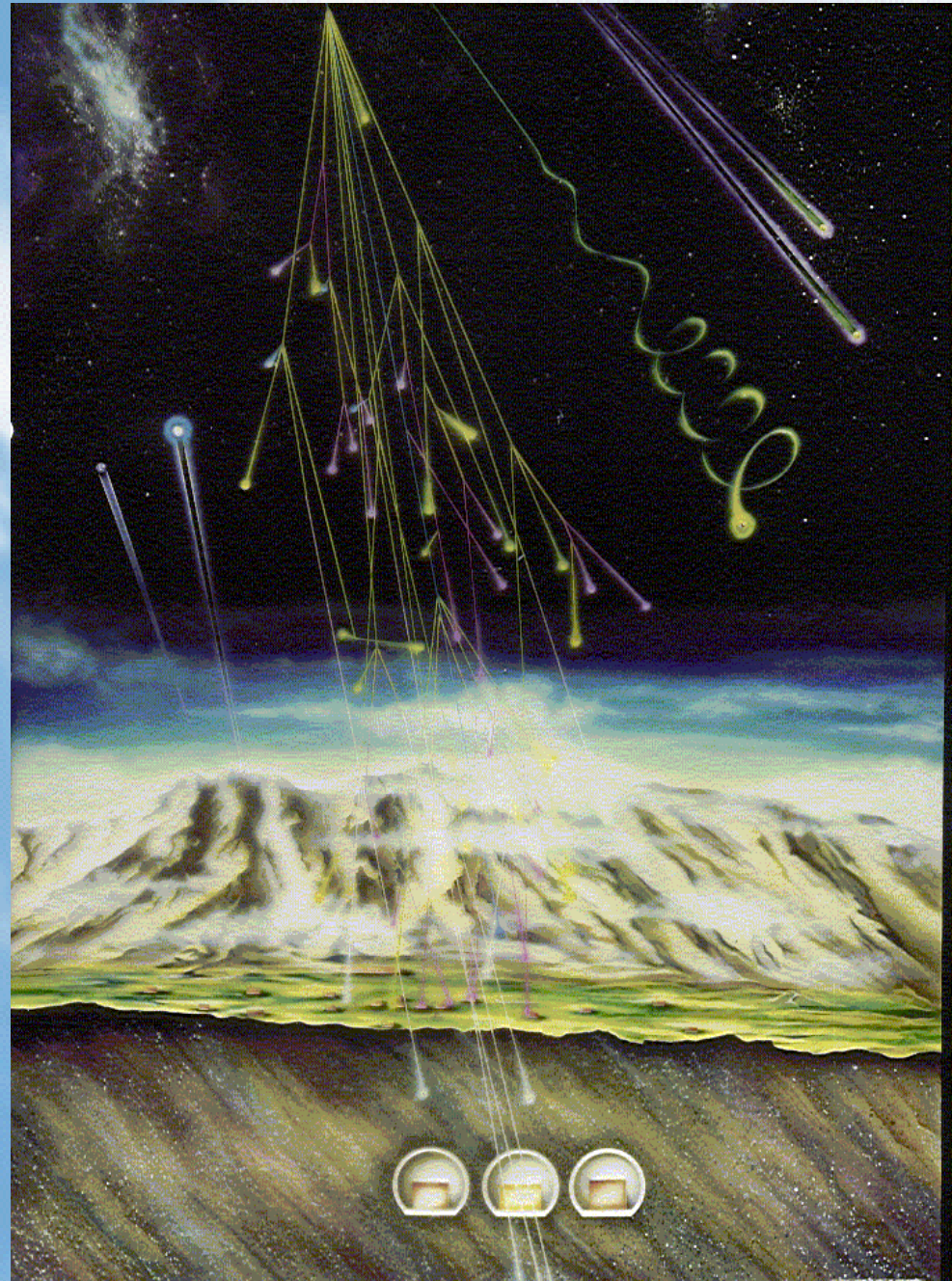




# Underground physics

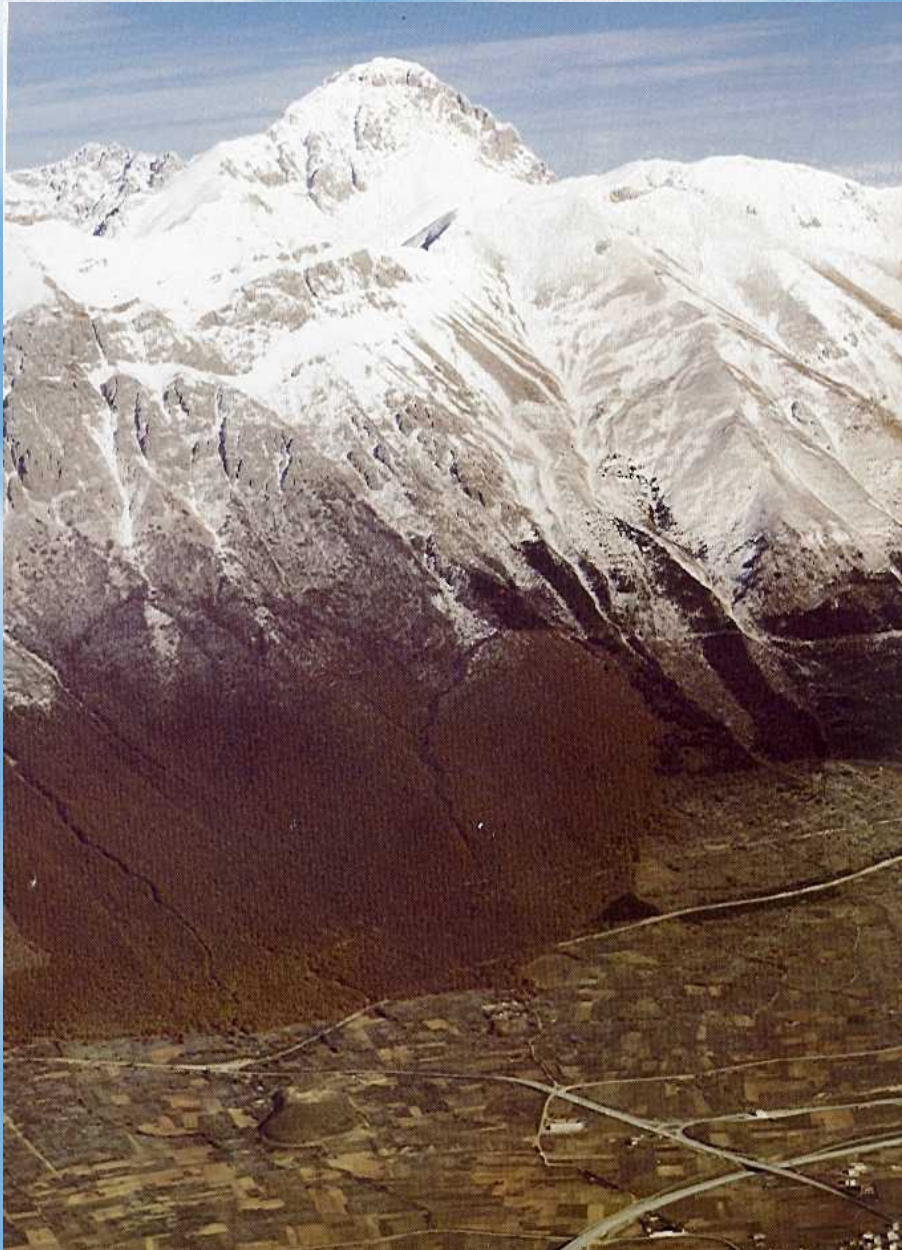


Per rivelare una radiazione elusiva, penetrante, occorre **schermarsi** dalle altre radiazioni



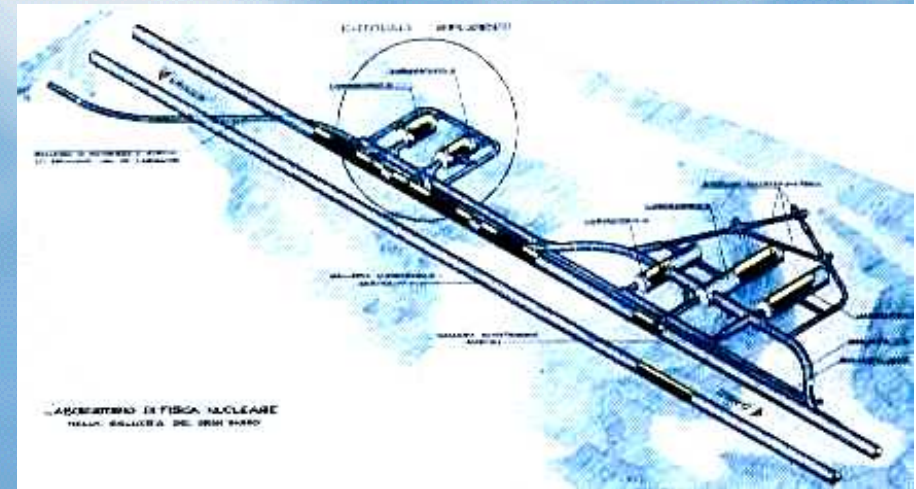


# Il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso



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
- Per lungo tempo si e' pensato che i neutrini prodotti dal sole si siano **trasformati in altre particelle**, invisibili nei rivelatori attuali (Oscillazioni di Pontecorvo).
- Ciò e' possibile se i neutrini **hanno una massa, anche se piccolissima**



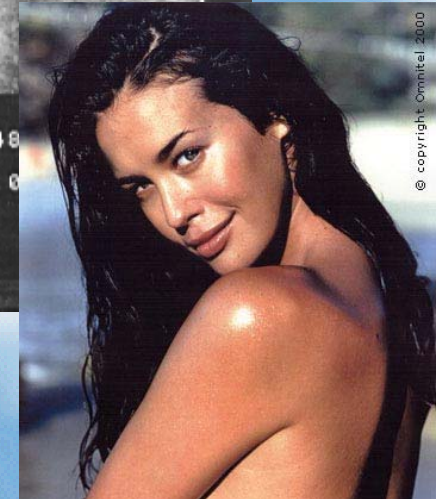
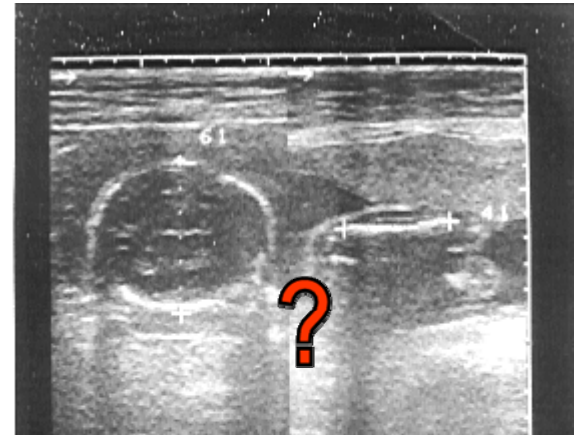


# Cose viste e non viste

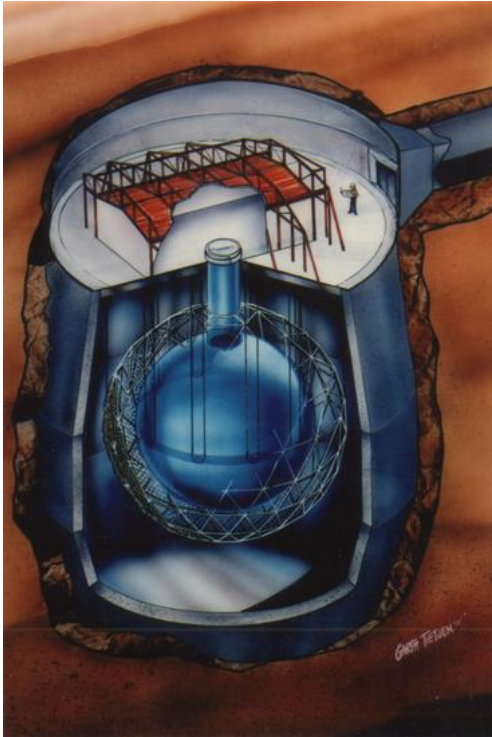
Una scomparsa non e' una scoperta

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

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

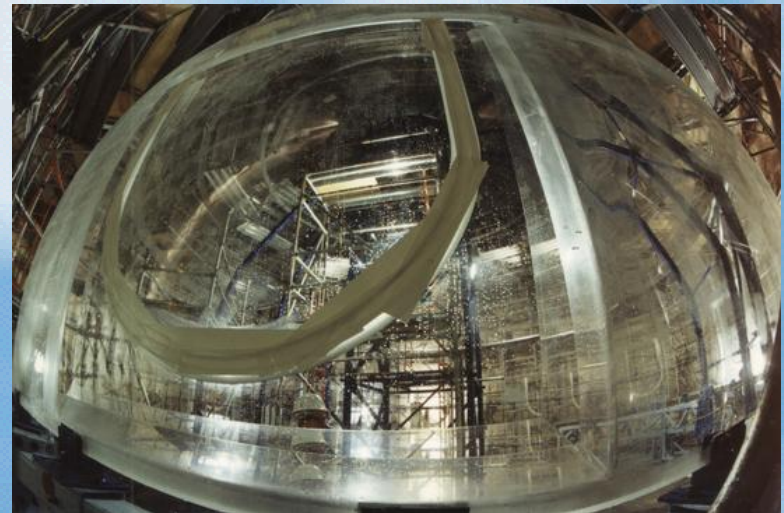


# Cose intraviste



- 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.

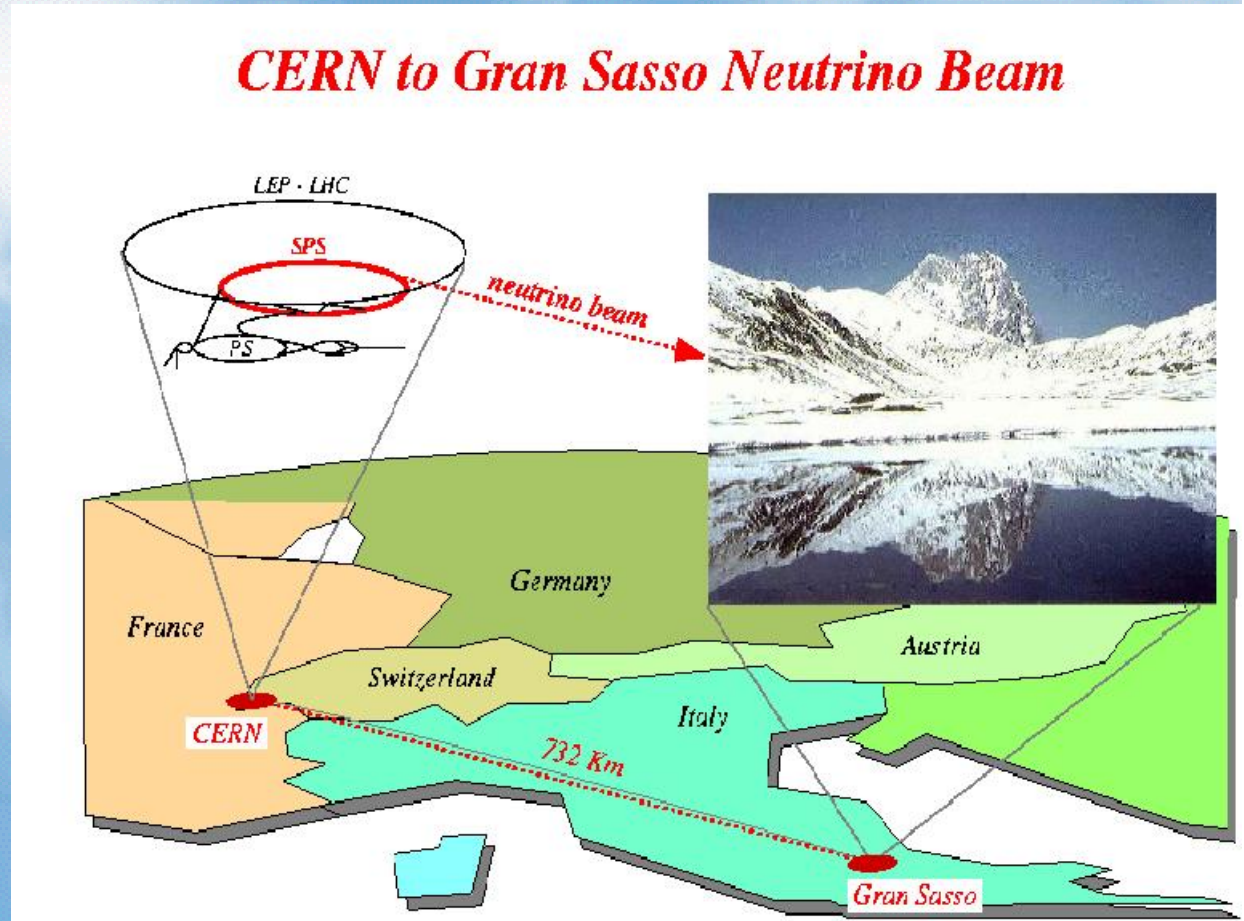
- SNO dice che con certezza si tratta degli altri tipi di neutrino (**muonici** o **taonici**, o loro mescolanze ), ma non sa dire quali



**Prossimo passo: individuare i prodotti della 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... 23



# 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

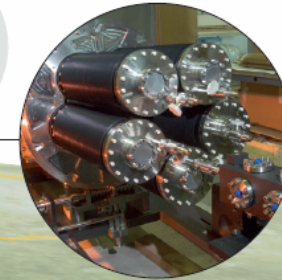
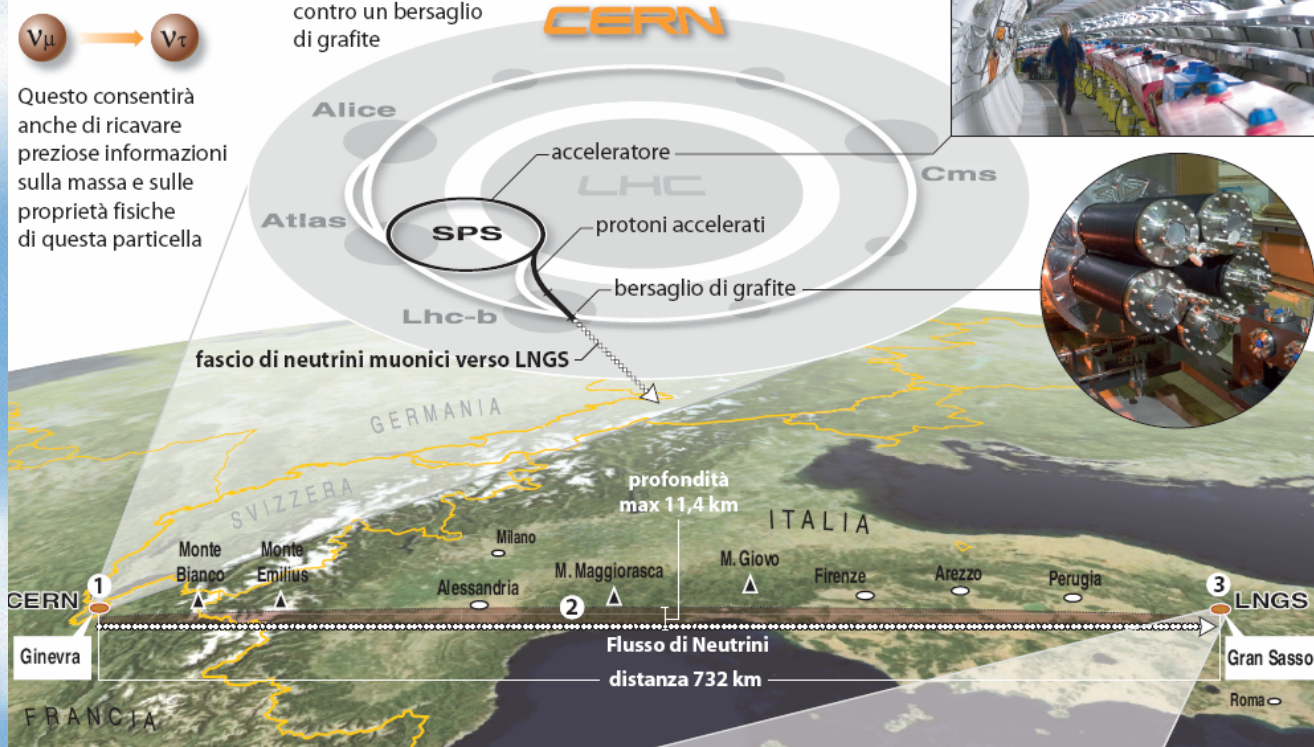
Osservare per la prima volta in modo diretto l'**oscillazione del neutrino**.



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



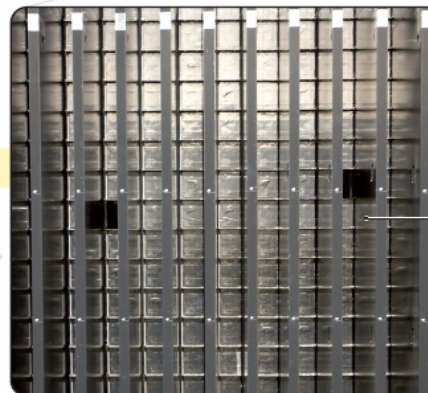
2 I neutrini attraversano la crosta terrestre per **732 km** e, viaggiando quasi alla **velocità della luce** giungono a destinazione dopo **2,4 millisecondi**



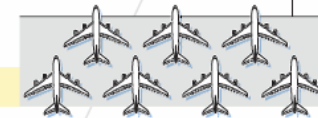
## OPERA

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.

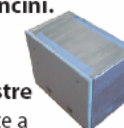
● OPERA ha fotografato all'arrivo una particella tau: prova che un **neutrino muonico si è trasformato in neutrino del tau** nel tragitto dal CERN ai LNGS



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 pesa **8,3 kg** ed è costituito da **56 lastre di piombo** alternate a emulsioni fotografiche ultrasensibili.

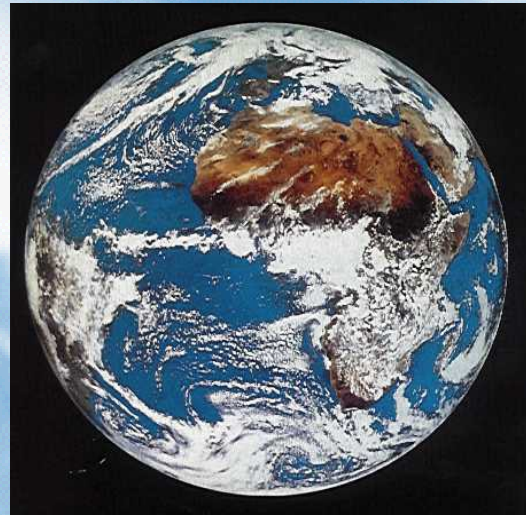




# Che cosa si puo' vedere coi neutrini?



L'interno del Sole



L'interno della terra



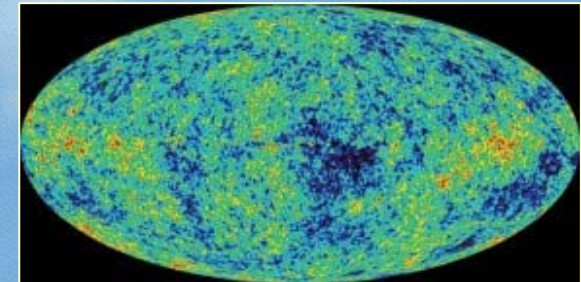
L'interno delle Supernovae



I neutrini della Galassia



La materia oscura nell'universo

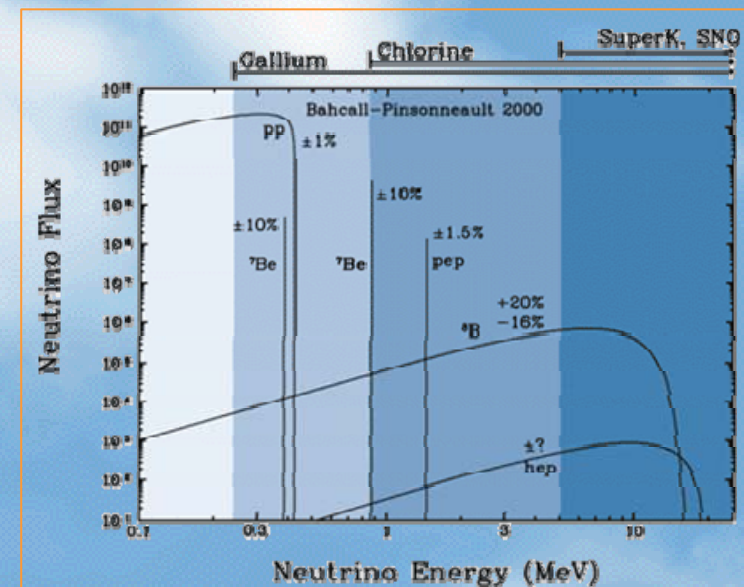
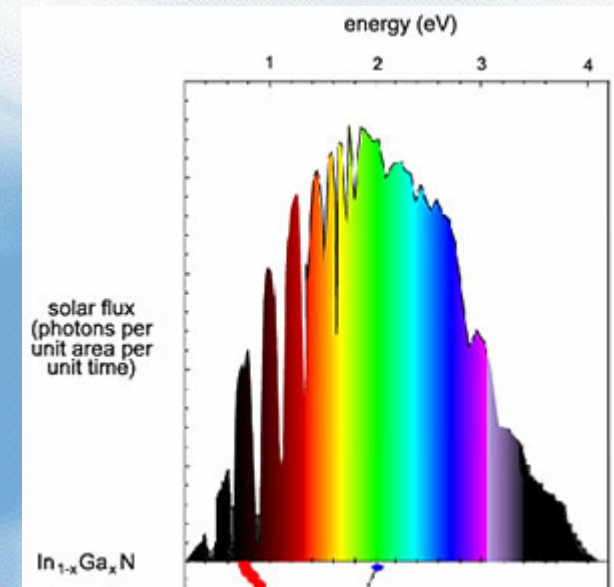


Il Big Bang



# 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...

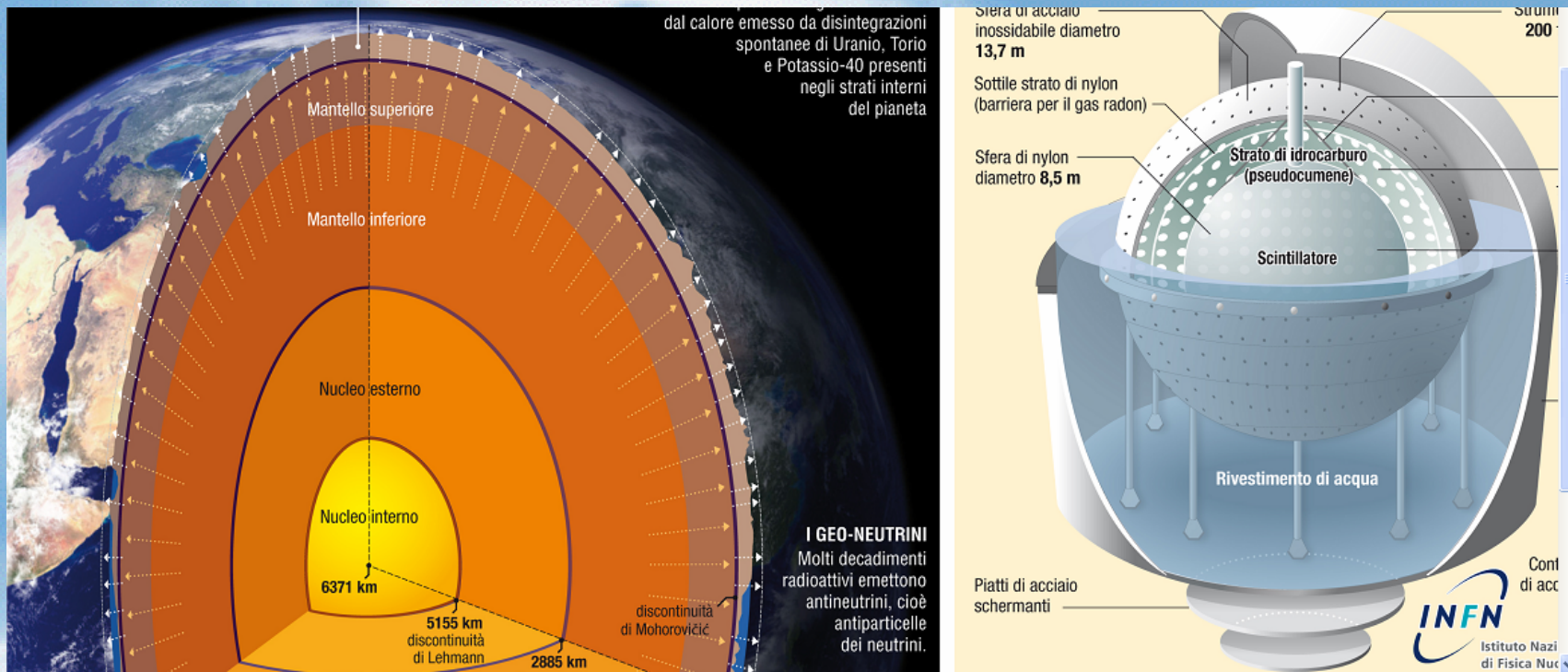


# I neutrini della Terra

- 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





# 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

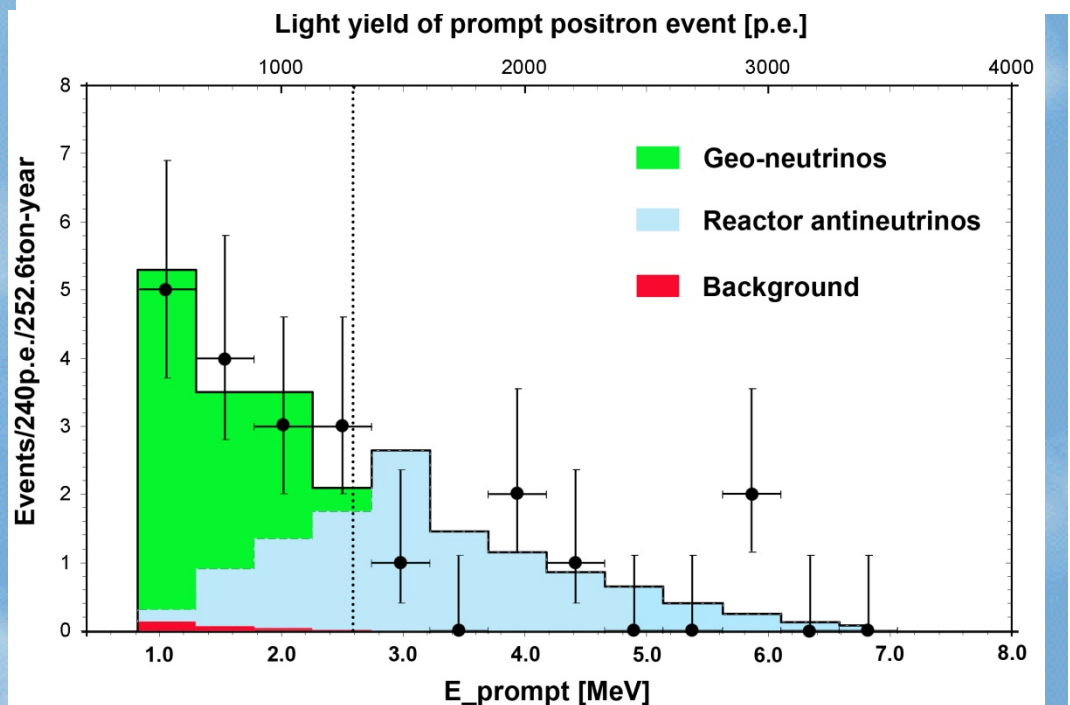
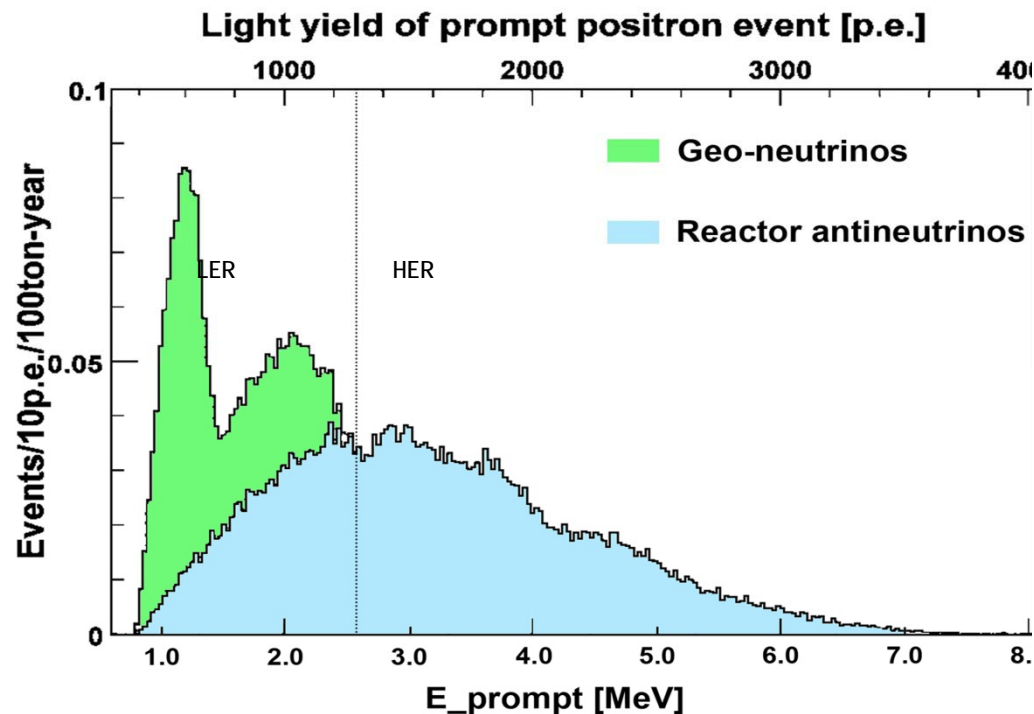
- Observe 21 events in 24 months, attributed to

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 !



# I neutrini da supernovae

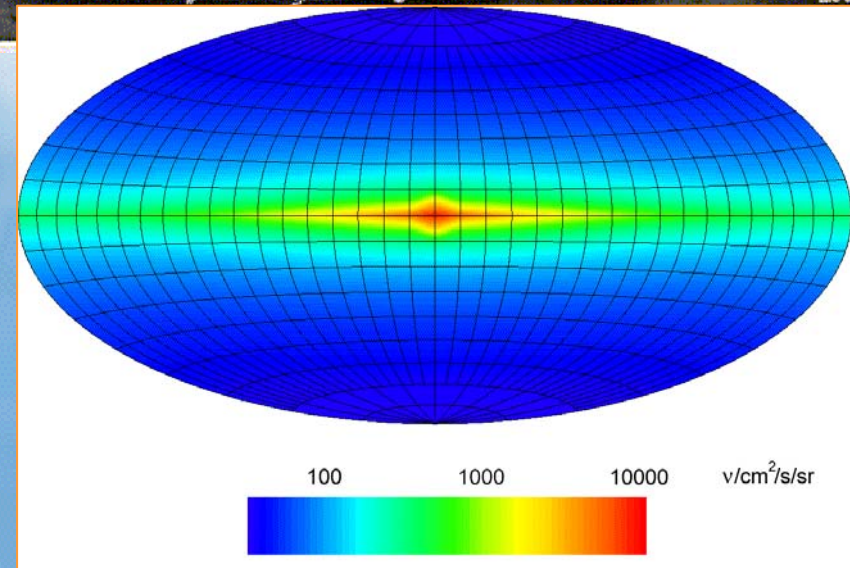
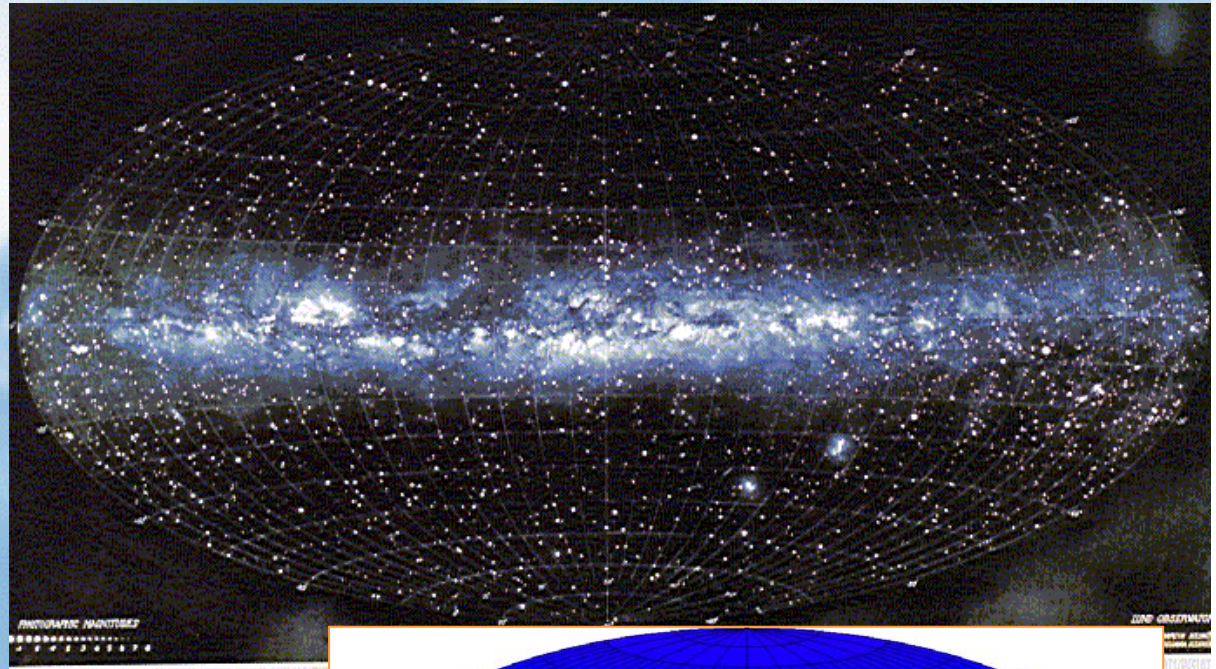
- Lo 0.1% dell'energia di una supernova e' in radiazione visibile, e il 99.9% e' trasportato da neutrini
- Nel 1987, per la prima volta sono stati rivelati neutrini da SN
- I neutrini da SN sono e saranno lo strumento per lo studio della struttura interna





# 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 hanno massa, e dunque contribuiscono alla materia oscura.



**Potrebbero esserne il costituente principale, se la loro massa è sufficientemente grande**



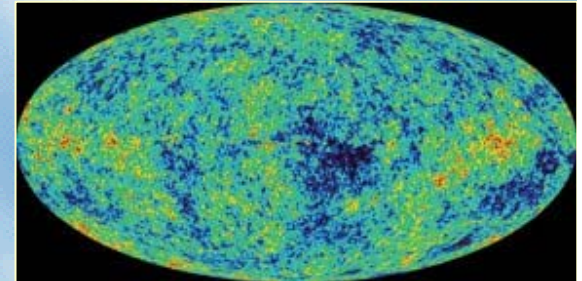
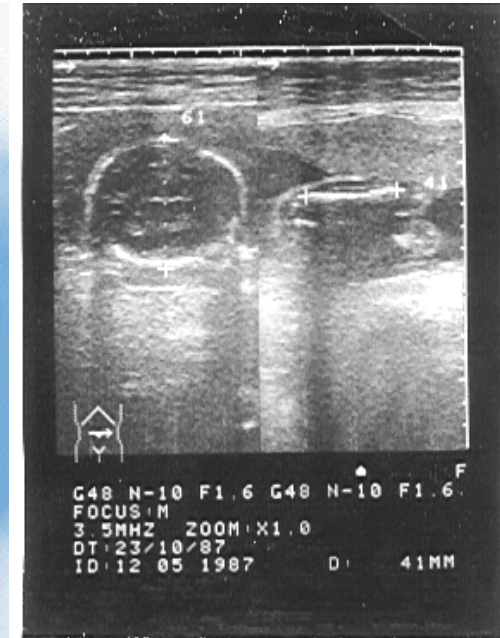
# Quanto pesano i neutrini?

- 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 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**





# Bruno Pontecorvo

