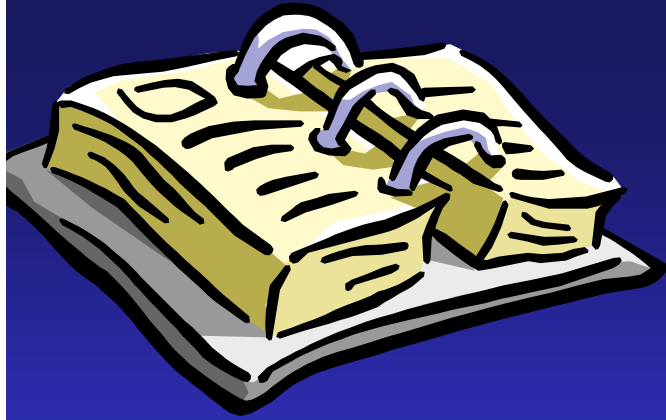


# ***-Fisica del sole -e neutrini solari***

Barbara Ricci  
Universita' di Ferrara & INFN-Ferrara  
ricci@fe.infn.it

Ferrara, 9 Aprile 2008,  
Corso di Eccellenza per studenti delle scuole superiori, a.s. 2007-2008



## Indice:

1. Le principali osservabili solari
2. Produzione dei neutrini solari
3. Rivelazione dei neutrini solari
4. Attività a Ferrara



50:50



5

|    |             |
|----|-------------|
| 15 | € 1.000.000 |
| 14 | € 300.000   |
| 13 | € 150.000   |
| 12 | € 70.000    |
| 11 | € 35.000    |
| 10 | € 16.000    |
| 9  | € 8.000     |
| 8  | € 4.000     |
| 7  | € 2.000     |
| 6  | € 1.000     |
| 5  | € 500       |
| 4  | € 300       |
| 3  | € 200       |
| 2  | € 100       |
| 1  | € 50        |

Chi misuro' per primo la massa del sole?

→ A: Galileo

→ B: Einstein

→ C: Cavendish

→ D: Ricci

A

3

# Massa Solare

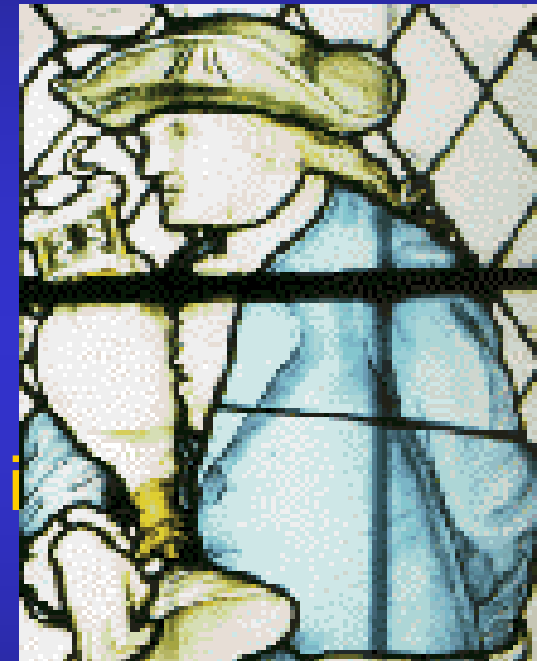
- Dal moto dei pianeti si ricava la costante di Gauss, cioè il prodotto tra la costante di gravitazione universale e la massa del sole ( $c_g = G_N M_S$ )
- Cavendish, con la sua bilancia a torsione misurò la costante di gravitazione universale ( $G_N$ ) e quindi si può ricavare:

$$M_S \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

- Circa 300 000 volte la massa della terra

Notazione esponenziale:

$10^{30} = 1\ 000\ 000\ \dots\ 000$  ← 30 zeri !



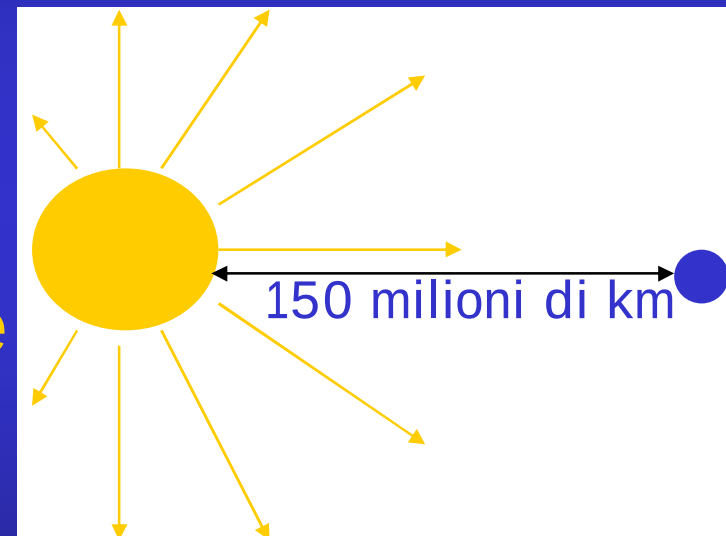
# Luminosita' solare



- Sulla terra arriva mediamente un flusso di energia di circa 1 KW per metro quadro (costante solare)
- Conoscendo la distanza terra-sole possiamo calcolare la potenza prodotta dal sole:

$$L_s \approx 4 \times 10^{26} \text{ Watt}$$

- Circa un miliardo di milioni ( $10^{15}$ ) di centrali elettriche!



**Raggio solare:**  
**distanza tra il centro del sole**  
**e la superficie visibile (fotosfera)**

$R_s \approx 700\,000\text{ km}$

A diagram of the Sun, a large glowing sphere with a dark center and a bright, multi-colored outer layer. A dashed white line with an arrow points from the center to the visible surface, labeled with the radius. A small yellow dot on the surface is labeled 'Terra' with a yellow arrow pointing to it.

Terra

$R_T \approx 6000\text{ km}$

10:42:00 U.T.  
11/08/99

# Eta' del sole



- Datazione radiochimica degli oggetti piu' vecchi nel sistema solare, meteoriti condritiche:

$t_s \approx 4,6$  miliardi di anni

- Ne vivra' ancora altrettanti prima di diventare una gigante rossa per poi spegnersi come nana bianca

$t_t \approx 4,5$  Miliardi di anni



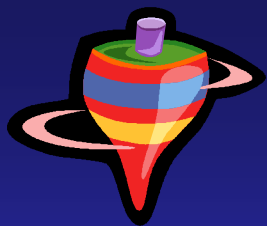
| periodi   | 1  | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7   | 8    | 9  | 10 | 11 | 12  | 13  | 14 | 15 | 16 | 17  | 18   |
|-----------|----|----|-----|----|----|----|-----|------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|-----|------|
| gruppi    | I  | II | III | IV | V  | VI | VII | VIII | IX | X  | XI | XII | III | IV | V  | VI | VII | VIII |
| 1         | H  |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |     |    |    |    |     | He   |
| 2         | Li | Be |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     | B   | C  | N  | O  | F   | Ne   |
| 3         | Na | Mg |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     | Al  | Si | P  | S  | Cl  | Ar   |
| 4         | K  | Ca | Sc  | Ti | V  | Cr | Mn  | Fe   | Co | Ni | Cu | Zn  | Ga  | Ge | As | Se | Br  | Kr   |
| 5         | Rb | Sr | Y   | Zr | Nb | Mo | Tc  | Ru   | Rh | Pd | Ag | Cd  | In  | Sn | Sb | Te | I   | Xe   |
| 6         | Cs | Ba | La  | Hf | Ta | W  | Re  | Os   | Ir | Pt | Au | Hg  | Tl  | Pb | Bi | Po | At  | Rn   |
| 7         | Fr | Ra | Ac  |    |    |    |     |      |    |    |    |     |     |    |    |    |     |      |
| lantanidi |    |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |     |    |    |    |     |      |
| attinidi  |    |    |     |    |    |    |     |      |    |    |    |     |     |    |    |    |     |      |

# Composizione chimica e Temperatura superficiale

- Circa il 70% della massa del sole è costituita da idrogeno, il 28% circa da elio\* e il restante 2% da atomi più pesanti, quali ossigeno, carbonio ecc.
- La Temperatura superficiale (fotosfera) e' di circa 6000 gradi Kelvin

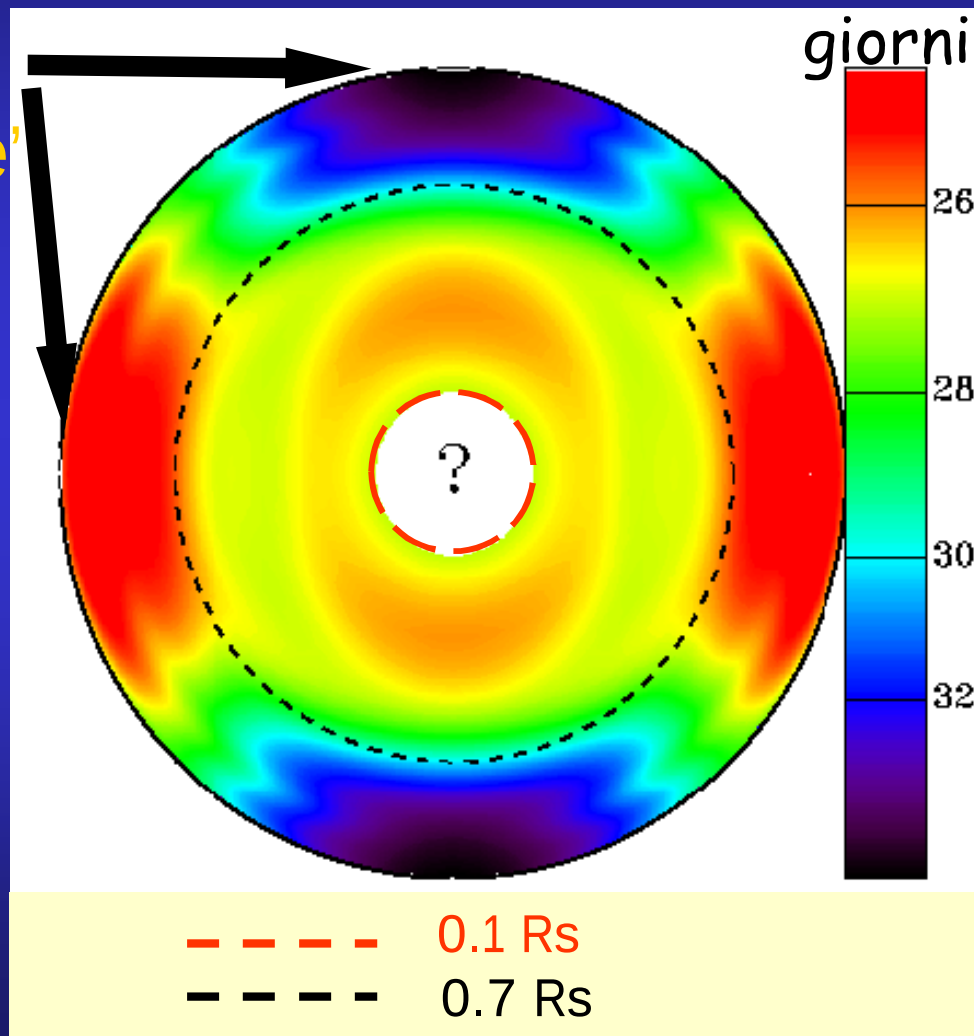
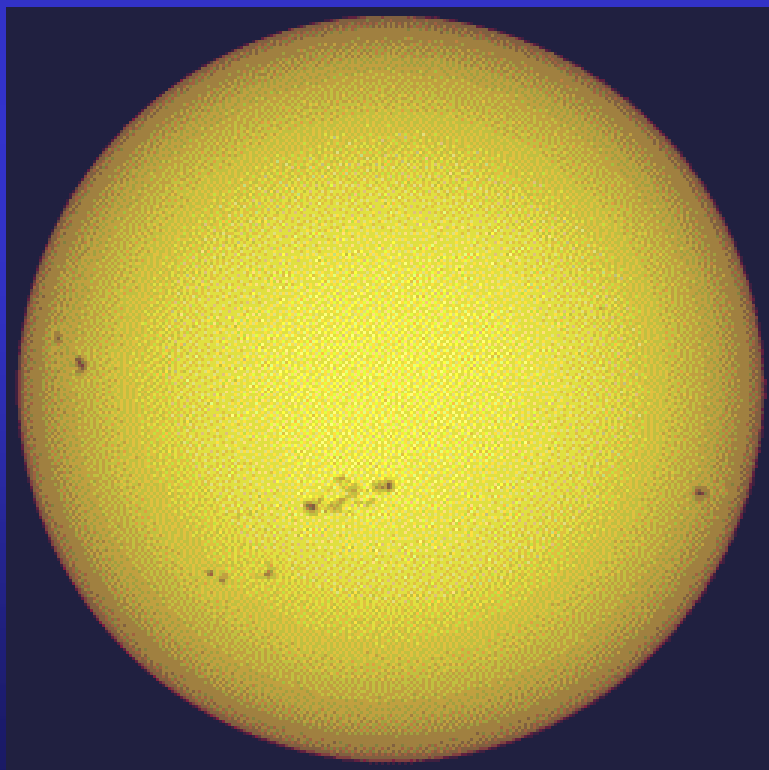


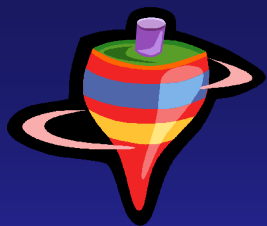
\*L'elio e' stato scoperto per la prima volta nel sole nel 1895



# Rotazione del sole

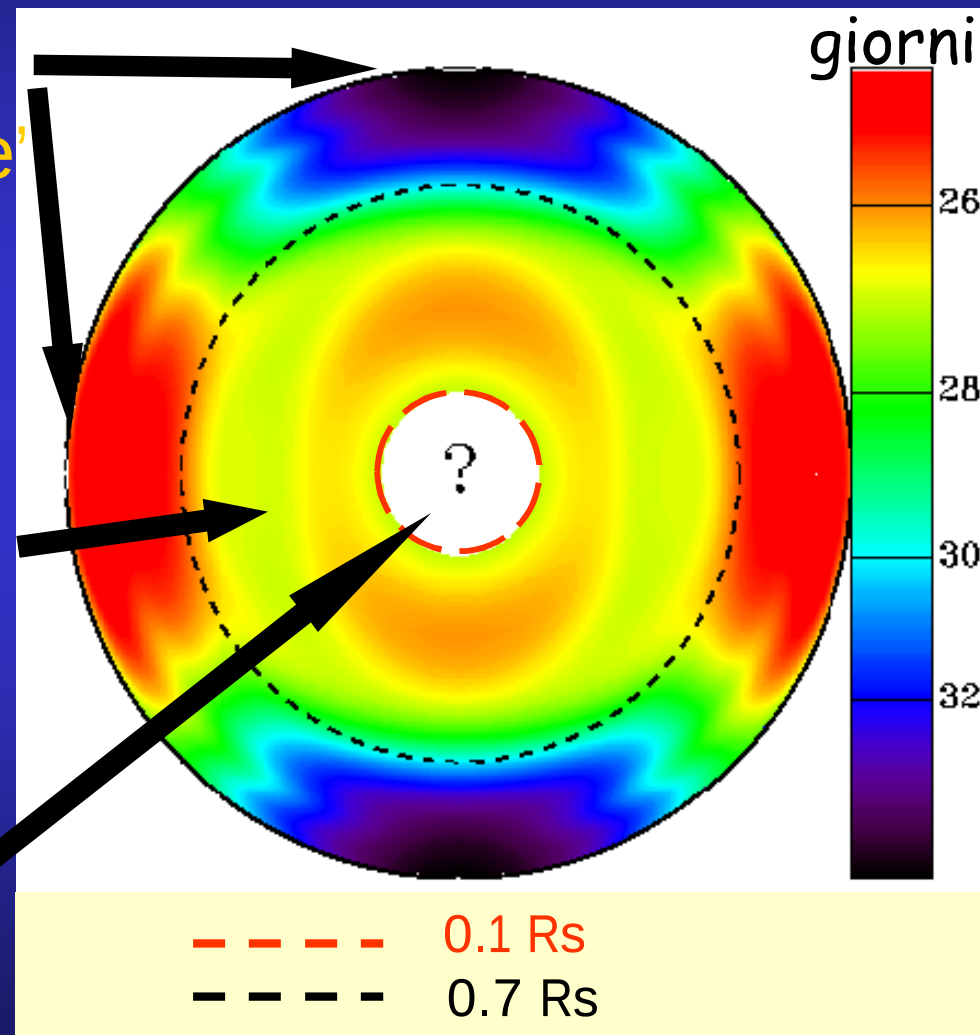
- Rotazione differente ai poli e all'equatore, non e' una novita'....





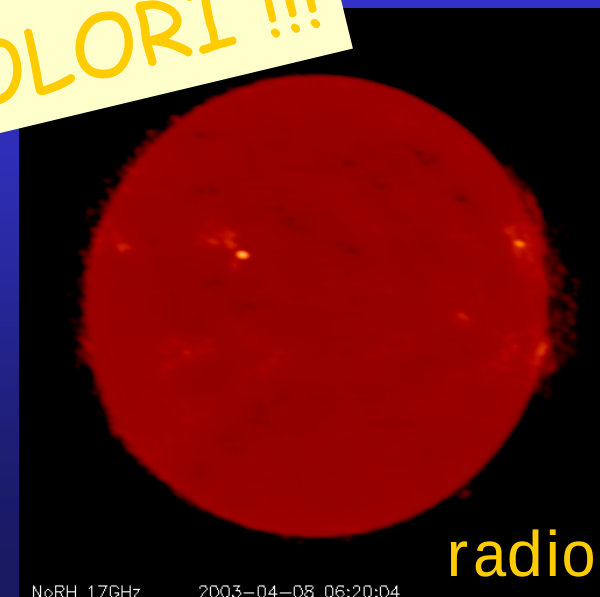
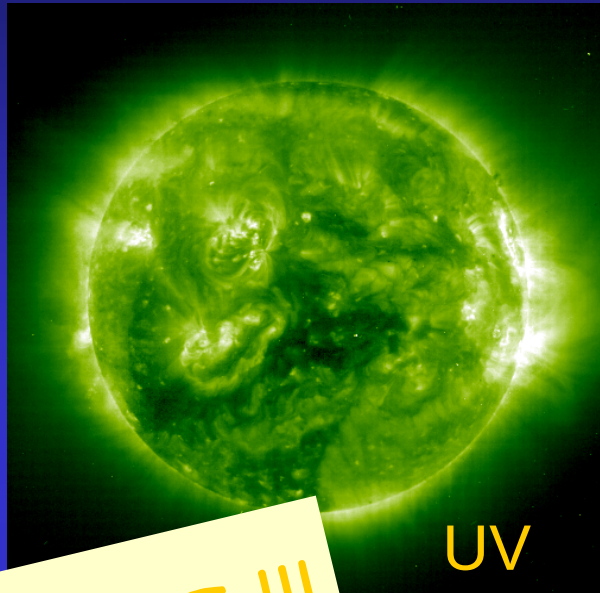
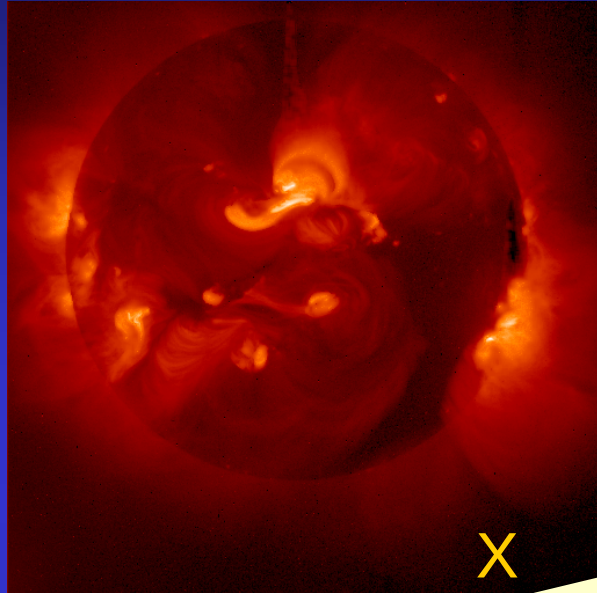
# Rotazione del sole

- Rotazione differente ai poli e all'equatore, non è una novità....
- Al di sotto della zona convettiva il sole ruota quasi uniformemente\*
- Sulla rotazione del nucleo ancora non si riesce a dire niente



\* Importantissimo successo dell'eliosismologia

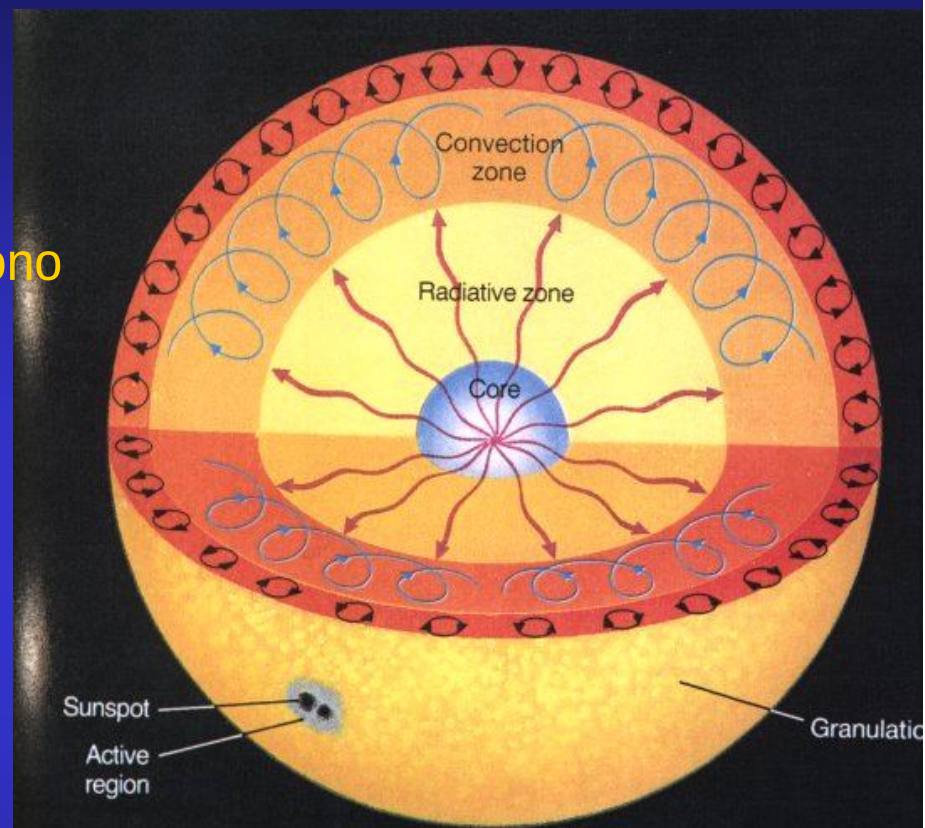
# Diverse immagini del sole



!!! FALSI COLORI !!!

# Un'occhiata all'interno

- Nucleo ( $1/3 M_S$ ):
  - reazioni di fusione nucleare:
  - in 1 sec 700.000.000 di ton di H sono convertite in He, liberando energia
  - $T \approx 16$  milioni di gradi
- Zona radiativa ( $2/3 M_S$ ):
  - l'energia è trasportata dai fotoni, cioè dalla rad. e.m.
- Zona convettiva ( $2\% M_S$ ):
  - l'energia è trasportata dalla convezione, cioè dalla materia
- Fotosfera:
  - sottile strato dal quale riceviamo la luce visibile.  $T \approx 6000$  gradi. Costituisce la "superficie" del Sole



## ATTENZIONE !

Il sole è opaco alla radiazione. La luce che arriva a noi proviene dalla superficie (fotosfera) e non direttamente dal centro

# Quale fonte di energia per le stelle?

- L'energia gravitazionale può sostenere la luminosità del sole solo per circa 30 milioni di anni:

$$E_G = GM_0^2/R_0 \approx 4 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

$$L_0 = 4 \cdot 10^{26} \text{ J/s}$$

$$t_0 = 4.57 \text{ Gyr}$$

$$E_{\text{tot}} = L_0 t_0 \approx 6 \cdot 10^{43} \text{ J}$$

- 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 miliardi di anni?

# La nascita dell'astrofisica nucleare

Einstein:

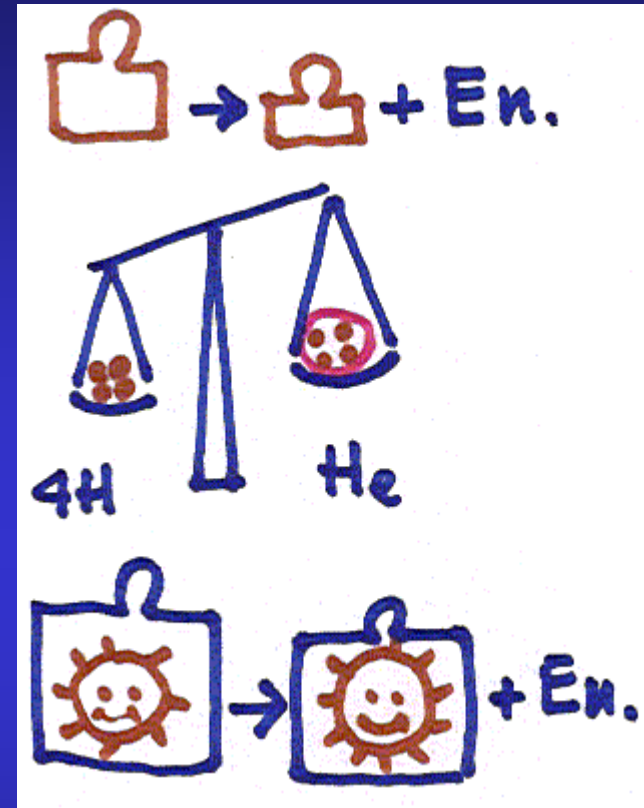
$$E=mc^2$$

Aston:

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

Eddington: "Certain physical investigations in the past year make it probable to my mind that some portion of sub-atomic energy is actually being set free in a star. ... If five per cent of a star's mass consists initially of hydrogen atoms, which are gradually being combined to form more complex elements, the total heat liberated will more than suffice for our demands, and we need look no further for the source of a star's energy..." (Nature 1920)

Poco oltre... "If indeed the sub-atomic energy in the stars is being freely used to maintain their great furnaces, it seems to bring a little nearer to fulfillment our dream of controlling this latent power for the well-being of the human race - or for its suicide"



$$[5\%M_0c^2 \approx 9 \cdot 10^{45} \text{ J}]$$

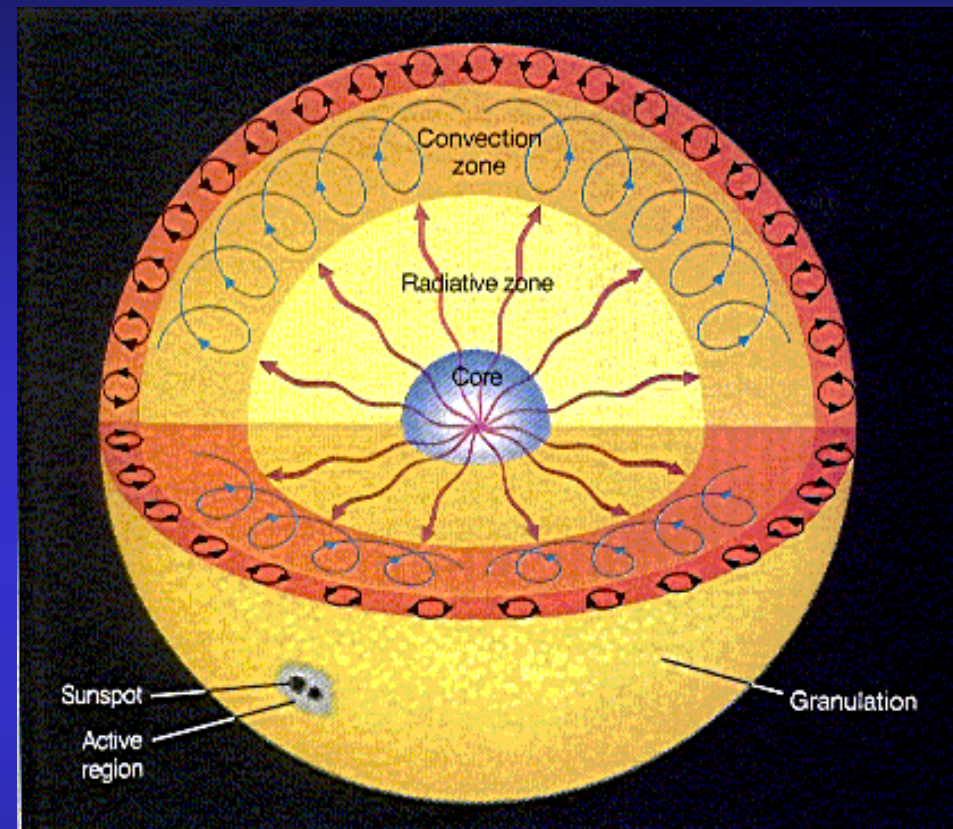
# Energia nucleare

- Si ritiene che nel nucleo del sole avvengano reazioni nucleari:



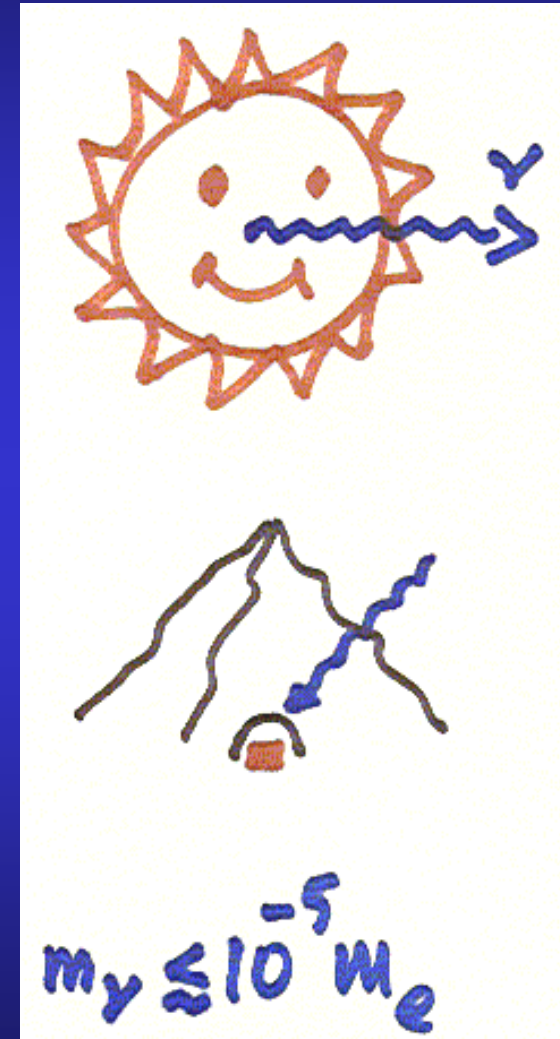
- Come dimostrarlo?  
I neutrini riescono ad attraversare la stella e giungono fino a noi.

- Occorre rivelarli per avere la prova della fonte di energia del sole



# Carta di Identità del neutrino

- Particella, associata a un tipo di interazione (debole)
- Nascita: 1930
- Maternità/Paternità: Pauli, Fermi (Pontecorvo)
- Residenza: quasi ovunque
- Provenienza: stelle, reattori nucleari, acceleratori di particelle...
- Massa: "piccola, quasi zero"
- Segni particolari: Estremamente elusiva/penetrante



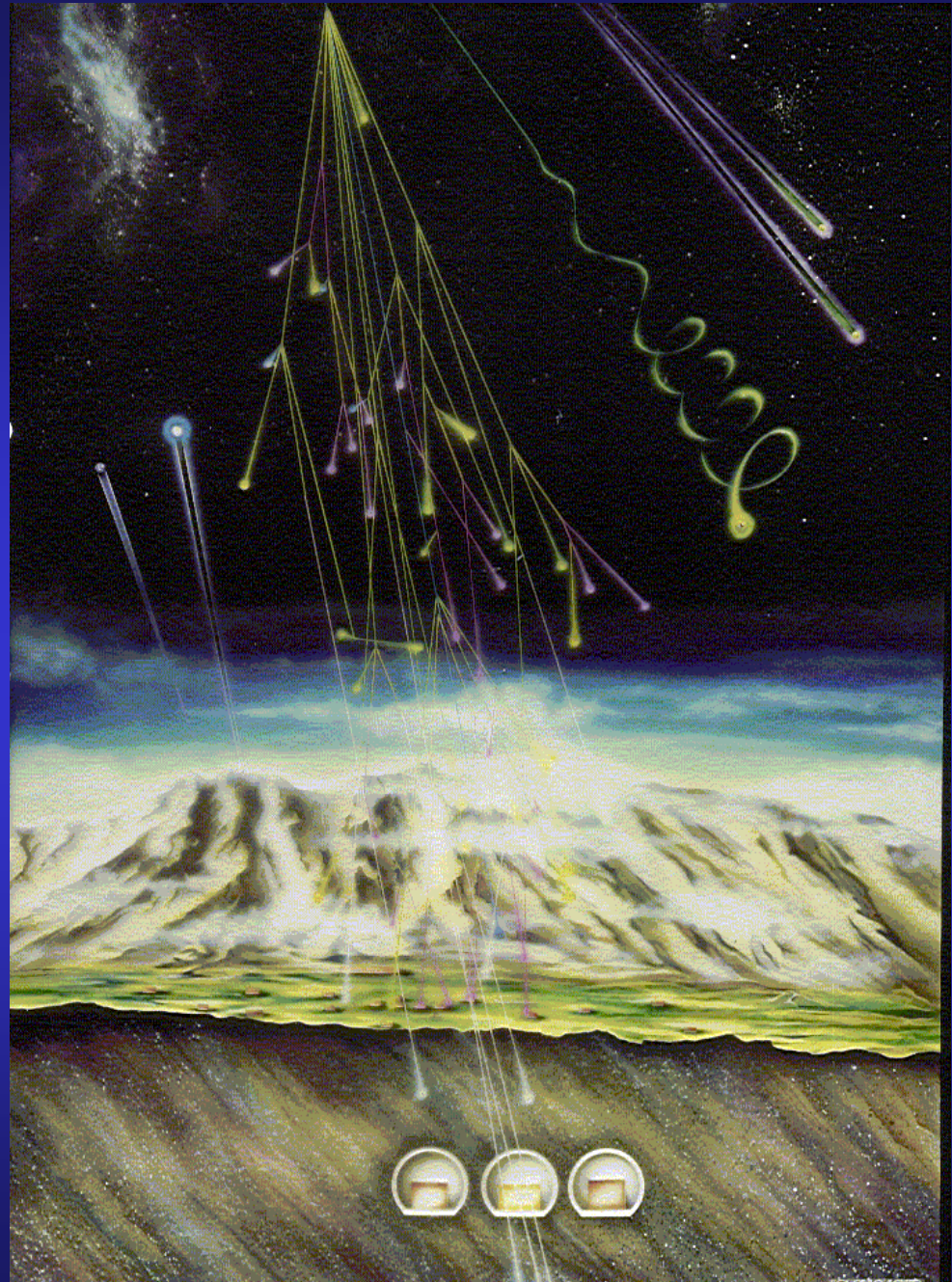
# Particelle molto “elusive”

- Quanti sono i neutrini solari:
  - costante solare:  $K_0 \approx 1\text{KW/m}^2$
  - ogni 2 neutrini si libera:  $Q=27\text{ MeV}$
  - flusso di neutrini sulla terra:  
 $\Phi_n = 2 K_0 / Q \approx 6 \cdot 10^{10} \text{ neutrini/cm}^2/\text{s} \quad *$
- Il rivelatore:
  - Esempio: consideriamo un “bidone” di 30 ton di Gallio
- Il numero di eventi: 0.5 eventi / giorno !

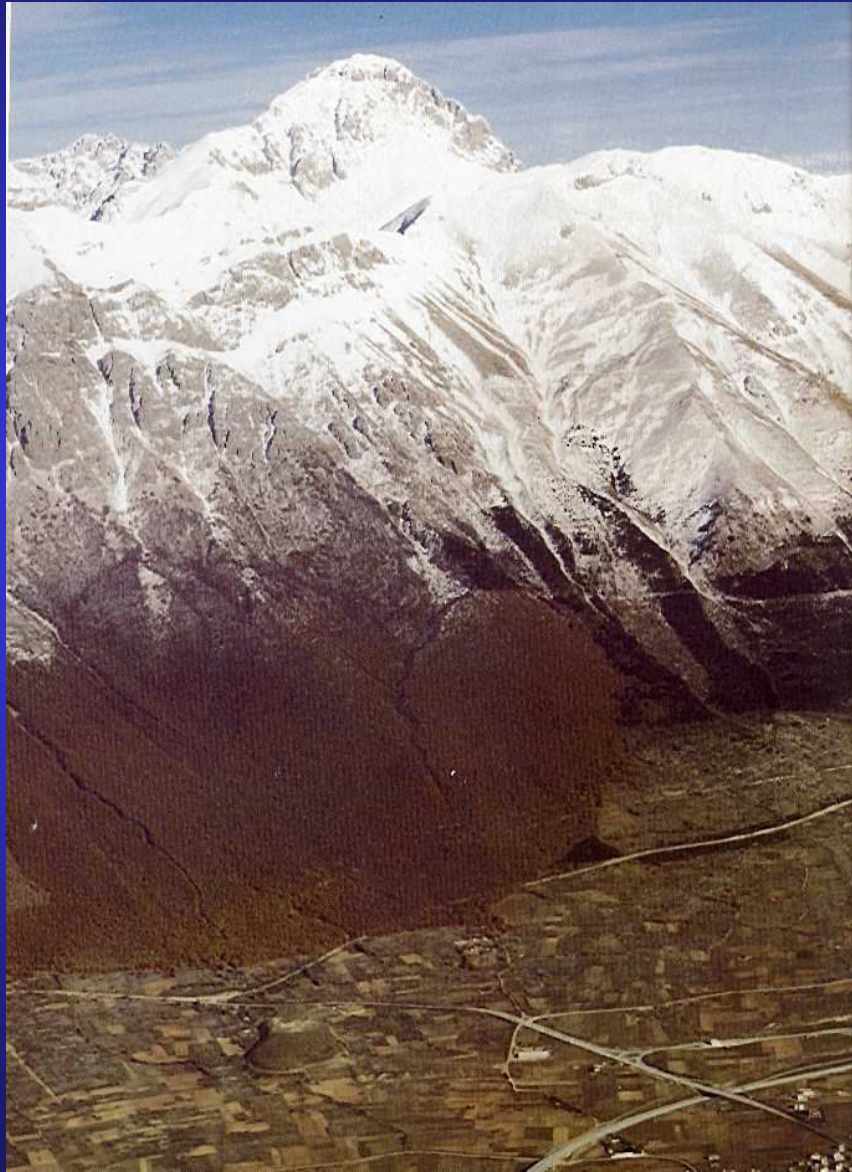
\*muoni cosmici a livello del mare:  $1/\text{dm}^2/\text{s}$

# “Underground physics”

- Per rivelare una radiazione così elusiva, penetrante, occorre “difendersi” dalle altre radiazioni (raggi cosmici, radioattività naturale)
- Bisogna andare sottoterra e in zone a bassa radioattività



# Laboratori Nazionali del Gran Sasso



**Il laboratorio del  
silenzio cosmico**

**La frontiera della  
radioattività zero**



**S.S. 17 BIS km. 18.910  
67010 Assergi L'Aquila  
tel. +39 0862 4371**

**[info@lngs.infn.it](mailto:info@lngs.infn.it)  
[www.lngs.infn.it](http://www.lngs.infn.it)**

# Laboratori Nazionali del Gran Sasso



**Gli uomini**

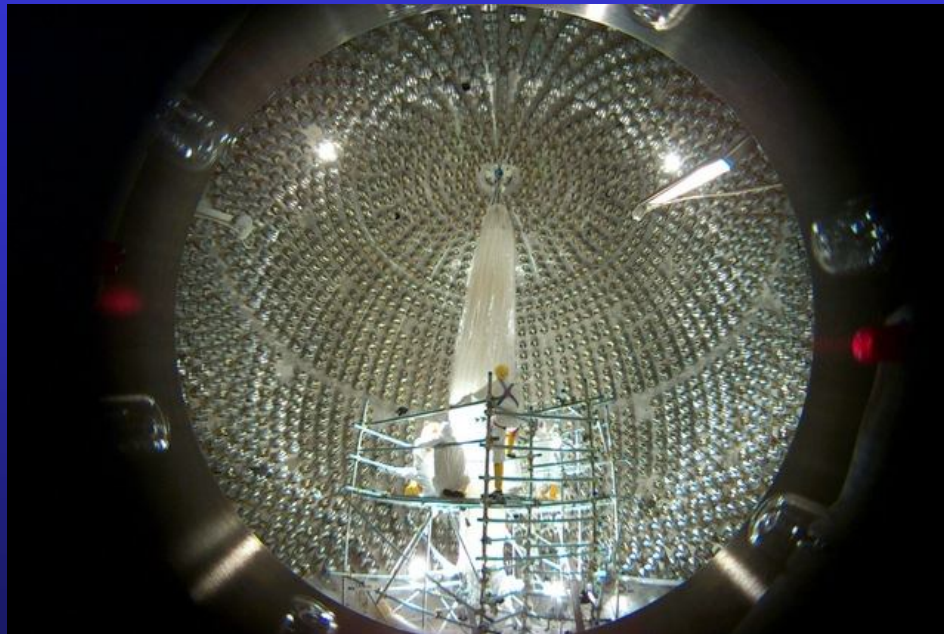
**Gli scavi**



# I rivelatori



M  
A  
C  
R  
O



B  
O  
R  
E  
X  
I  
N  
O



G  
N  
O

# **Il “problema dei neutrini solari”**

**Anni '70: L'esperimento di Davis (in USA) apre la questione: si osservano 2/3 dei neutrini predetti dai modelli teorici del sole**

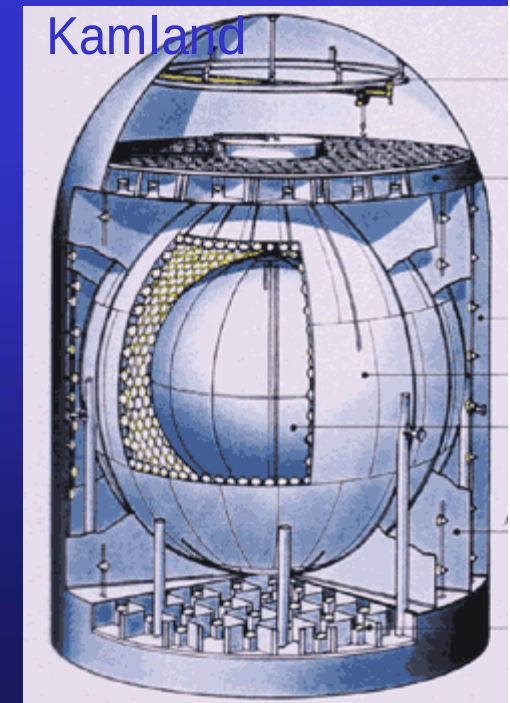
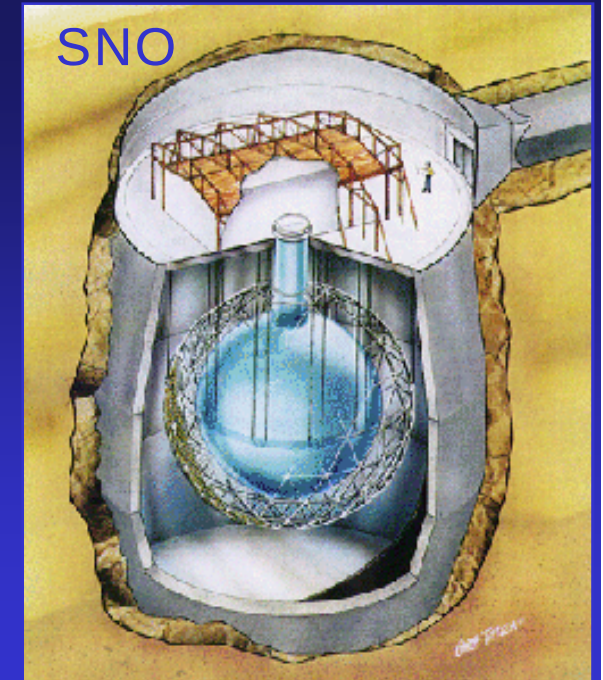
**Anni '80: Kamiokande e SuperKamiokande (in Giappone), confermano il problema**

**Anni '90: Gallex e GNO (in Italia) e Sage (in Russia) confermano**

**Possibile soluzione: oscillazione di neutrino (Pontecorvo 1957); possibile solo se i neutrini hanno massa, anche se piccolissima**

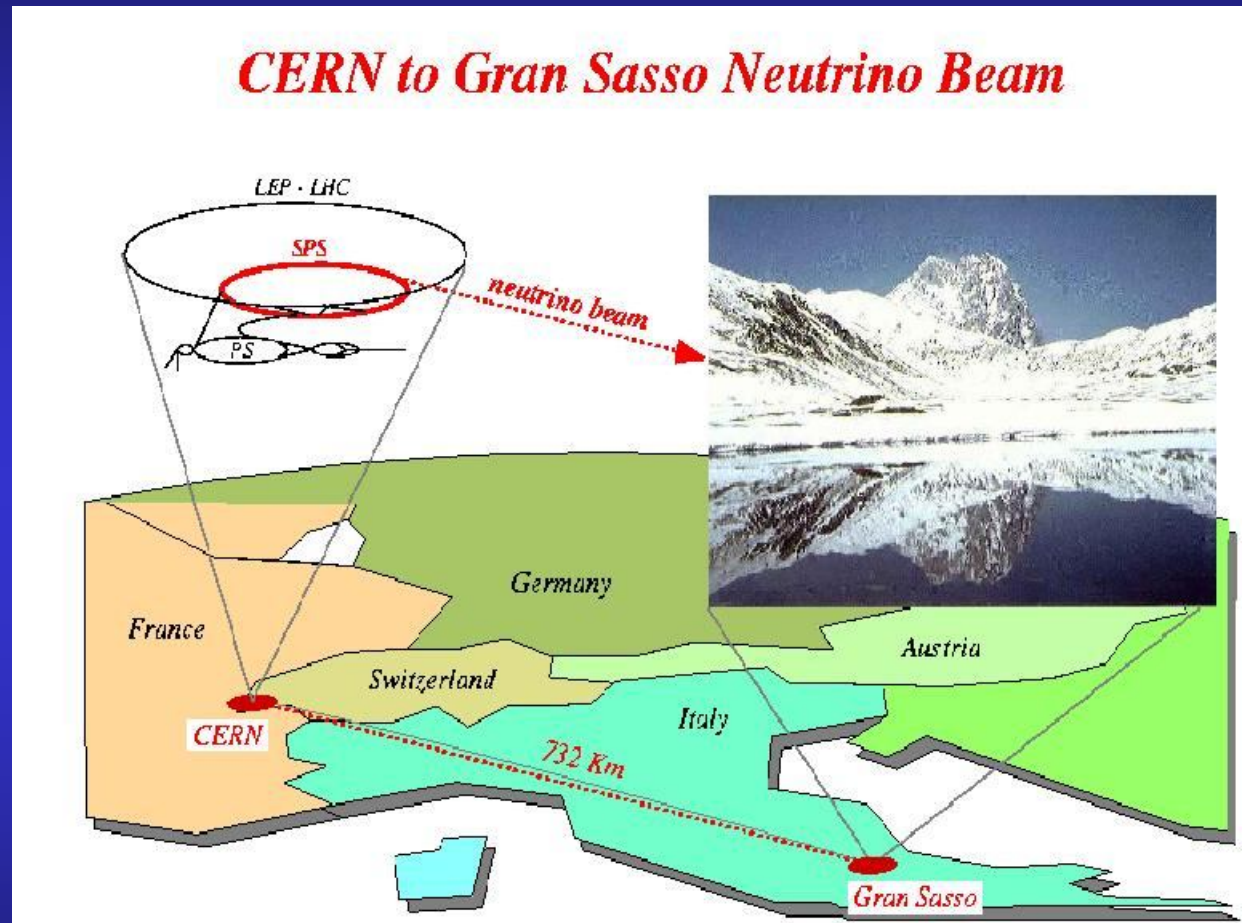
# I neutrini oscillano!

- Esperimento SNO (Canada):  
2/3 dei neutrini solari di alta energia oscillano durante il tragitto sole-terra
- Esperimento KamLAND (Giappone)  
con (anti)neutrini da reattori  
nucleari: meta' dei neutrini  
prodotti dai reattori "sopravvive"
- Neutrini "atmosferici": circa meta'  
dei neutrini prodotti dalla  
interazione dei raggi cosmici con  
l'atmosfera oscillano (esp. MACRO,  
Kamiokande, Superkamiokande)



# 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



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

# Cosa facciamo a Ferrara ?



- Usiamo il sole come “laboratorio” per lo studio teorico delle reazioni nucleari, come test di esistenza di possibili particelle esotiche
- Abbiamo proposto LUNA, acceleratore realizzato al Gran Sasso per lo studio delle reazioni nucleari in condizioni simili a quelle esistenti nelle sole
- Si studiano i neutrini prodotti all'interno del nostro pianeta a causa del decadimento dei nuclei di Uranio e Torio

# Conclusioni

- Il sole “funziona” ad energia nucleare: la rivelazione dei neutrini solari ne e' la prova.
- Problema dei neutrini solari risolto: i neutrini “oscillano”. Anche i neutrini da reattore e gli atmosferici oscillano.
- Futuro: determinare accuratamente i parametri dell'oscillazione ( ad es. CERN -> LNGS)