



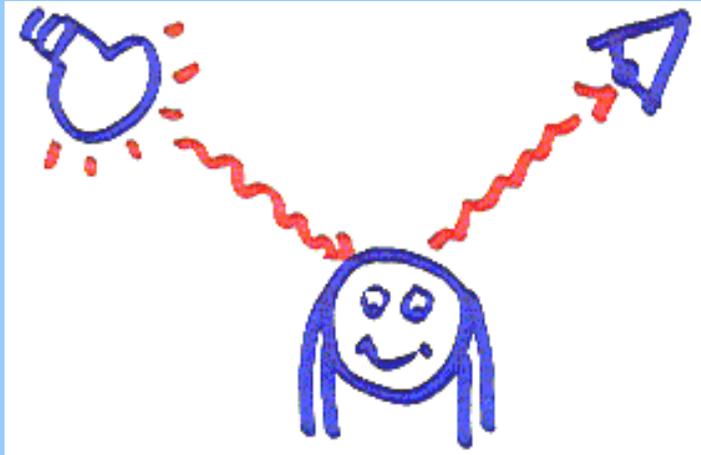
B. Ricci

L'Universo visto coi neutrini

- C'è modo e modo di vedere
- Carta di identità del neutrino
- La fonte di energia delle stelle
- Sottoterra per vedere le stelle: Il Gran Sasso
- Scomparsa e apparizioni: da Ginevra al Gran Sasso
- Che altro si può vedere coi neutrini?



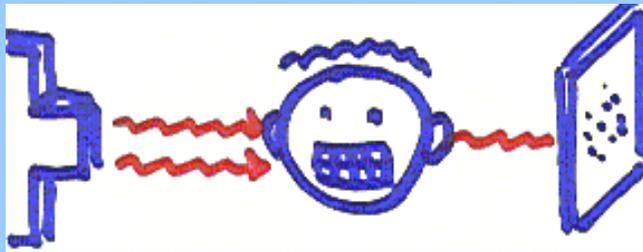
C'è modo e modo di vedere: la luce visibile



- Sorgente di radiazione
- Interazione
- Rivelatore (occhio)



C'è modo e modo di vedere: i raggi X

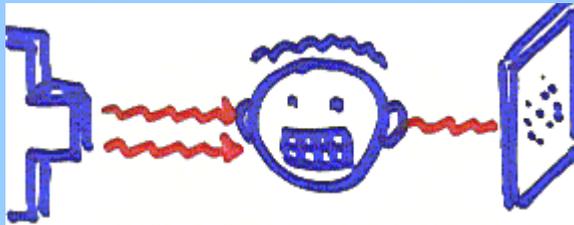


- Se voglio vedere all'interno uso una radiazione **più penetrante**



- ancora una radiazione e.m
- Rivelatore (lastraocchio)

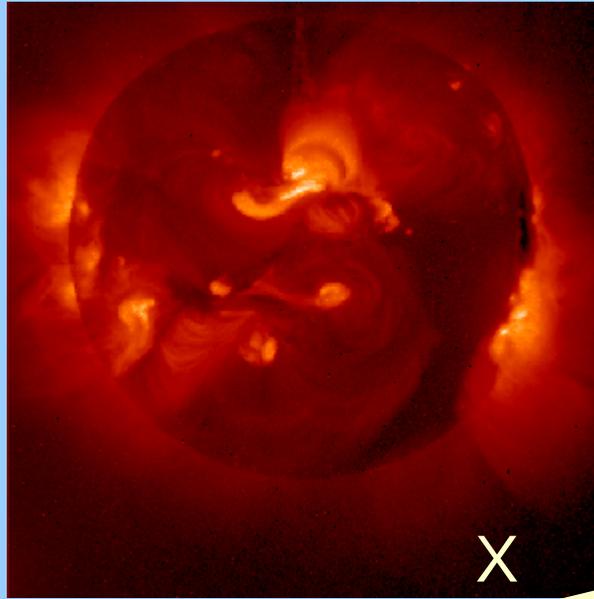
C'è modo e modo di vedere: gli ultrasuoni



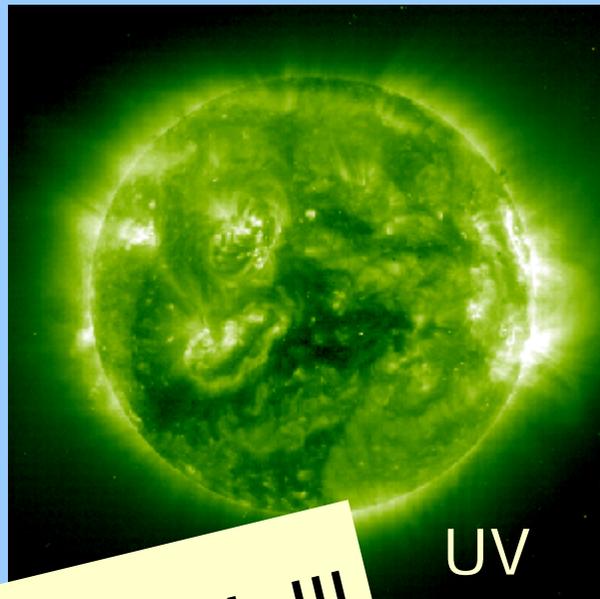
- Radiazione diversa (onde **acustiche**)
- Il rivelatore e' ancora più complicato...



Diversi modi di "vedere" il sole



X



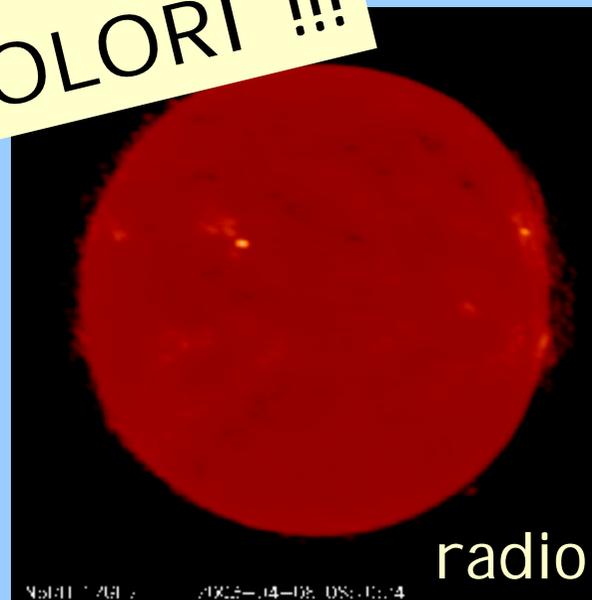
UV



visibile



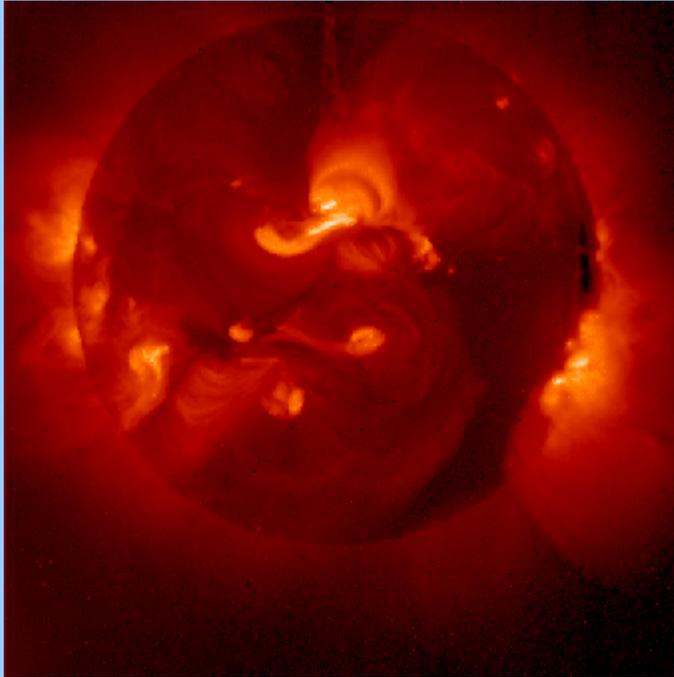
IR



radio

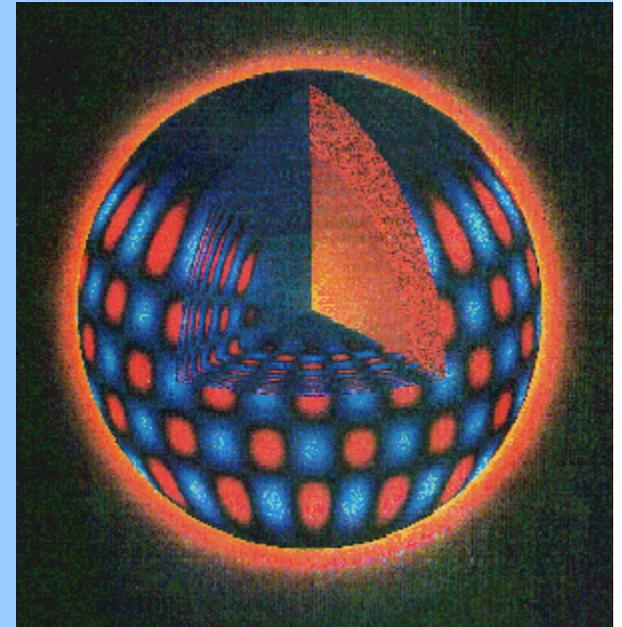
!!! FALSI COLORI !!!

Per vedere l'interno del sole....



- Le stelle producono ogni tipo di radiazione: visibile, X,....
- Per vedere al loro interno occorrono radiazioni **molto più penetranti** dei raggi X

• Per vedere l'interno del **sole** si usano: onde acustiche (Eliosismologia) e **i neutrini**



Carta di Identità del neutrino

- Particella, associata a un tipo di interazione (debole)
- Nascita: 1930
- Maternità/Paternità: Pauli, Fermi (Pontecorvo) ->1° divagazione
- Residenza: quasi ovunque
- Provenienza: stelle, reattori nucleari, acceleratori di particelle...
- Massa: "piccola, quasi zero"
- Segni particolari: Estremamente elusiva/penetrante
->2° divagazione

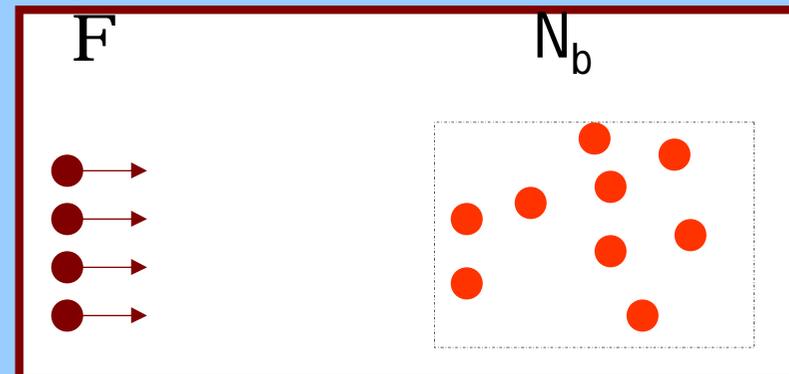
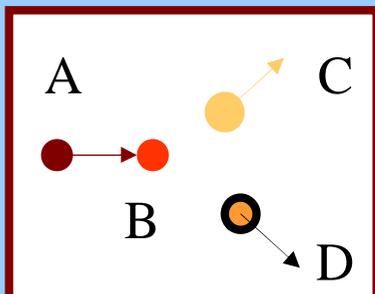


Cosa vuol dire "elusiva"? La sezione d'urto (1)

- La sezione d'urto è la principale osservabile che caratterizza la collisione.
- Supponiamo di voler studiare la reazione $A+B \rightarrow C+D$ mandando un fascio di particelle A contro un bersaglio di particelle B.
- Il fascio è caratterizzato dalla "flusso di particelle incidenti" F (numero di particelle prodotte per unità di tempo e per unità di superficie), dal tipo di particelle e dalla loro energia.
- Il bersaglio è caratterizzata dalla numero di particelle bersaglio N_b
- La quantità misurabile è il numero di reazioni per unità di tempo DN/Dt
- Il numero di reazioni che avvengono nell'unità di tempo è proporzionale al flusso ed al numero di bersagli:

$$DN / Dt = F N_b s.$$

- La costante di proporzionalità, che ha le dimensioni di $[L]^2$, si chiama sezione d'urto della reazione $A+B \rightarrow C+D$



La sezione d'urto (2): da chi può dipendere

- L'equazione $DN / Dt = F N_b s$. fornisce una definizione operativa di s . Si assegnano le caratteristiche dell'apparato ($F N_b$) e si misura il numero delle interazioni DN in un tempo Dt . In questo modo si determina s da:

$$s = DN / (Dt F N_b)$$

- Chiaramente s non dipende dall'apparato o dall'esperimento: se raddoppio il numero di bersagli, raddoppia il numero dei conteggi ma s è la stessa; analogamente se vario il flusso.
- È una caratteristica della reazione e dunque dipende dal tipo di particelle, dalla loro energia e dalle loro interazioni.
- C'è una sezione d'urto per ciascun tipo di reazione:

$$s = s(A+B \rightarrow C+D)$$

La sezione d'urto (3): ordini di grandezza delle sezioni d'urto di particelle subnucleari

- Consideriamo proiettili di tipo diverso (**p**, **g** e **n**) che urtino contro lo stesso bersaglio, un protone.
- Le sezioni d'urto dipendono dall'energia. La variabile fisicamente rilevante è l'energia nel centro di massa, consideriamo uno stesso valore di $E_{cm} = 10 \text{ GeV}$ per tre processi:
- Protone-protone ($E_p \gg 5 \text{ GeV}$): $S_{tot}(\mathbf{pp}) \gg 4 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2$ (FORTE)
- Fotone-protone ($E_g \gg 50 \text{ GeV}$): $S_{tot}(\mathbf{gp}) \gg 1 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2$ (E.M.)
- Neutrino-protone ($E_n \gg 50 \text{ GeV}$): $S_{tot}(\mathbf{np}) \gg 3.5 \cdot 10^{-37} \text{ cm}^2$ (DEBOLE)

NOTA BENE: il neutrino è la particella che interagisce più debolmente, la più "elusiva" (nel bene e nel male)

La fonte di energia delle stelle

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

$$E_G = GM_o^2/R_o \gg 4 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

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

->3° divagazione

- **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?



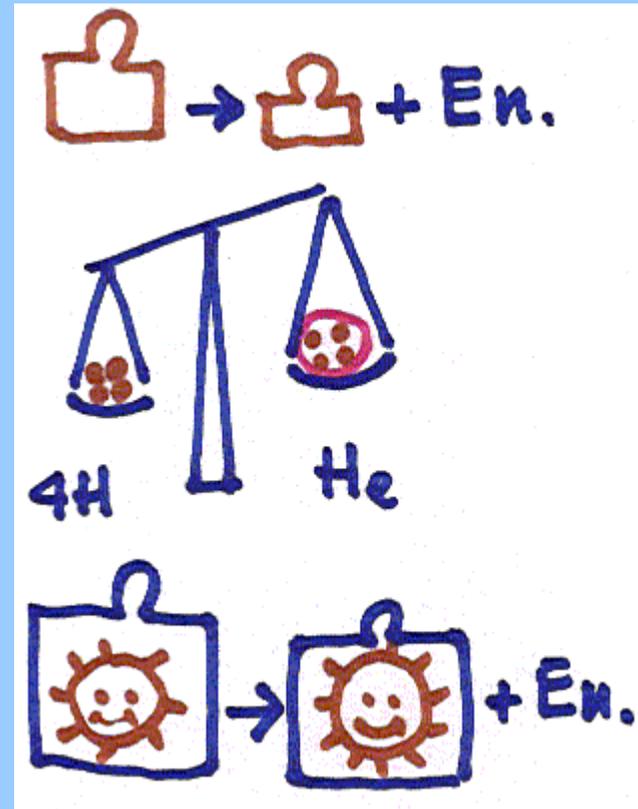
La nascita dell'astrofisica nucleare

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"



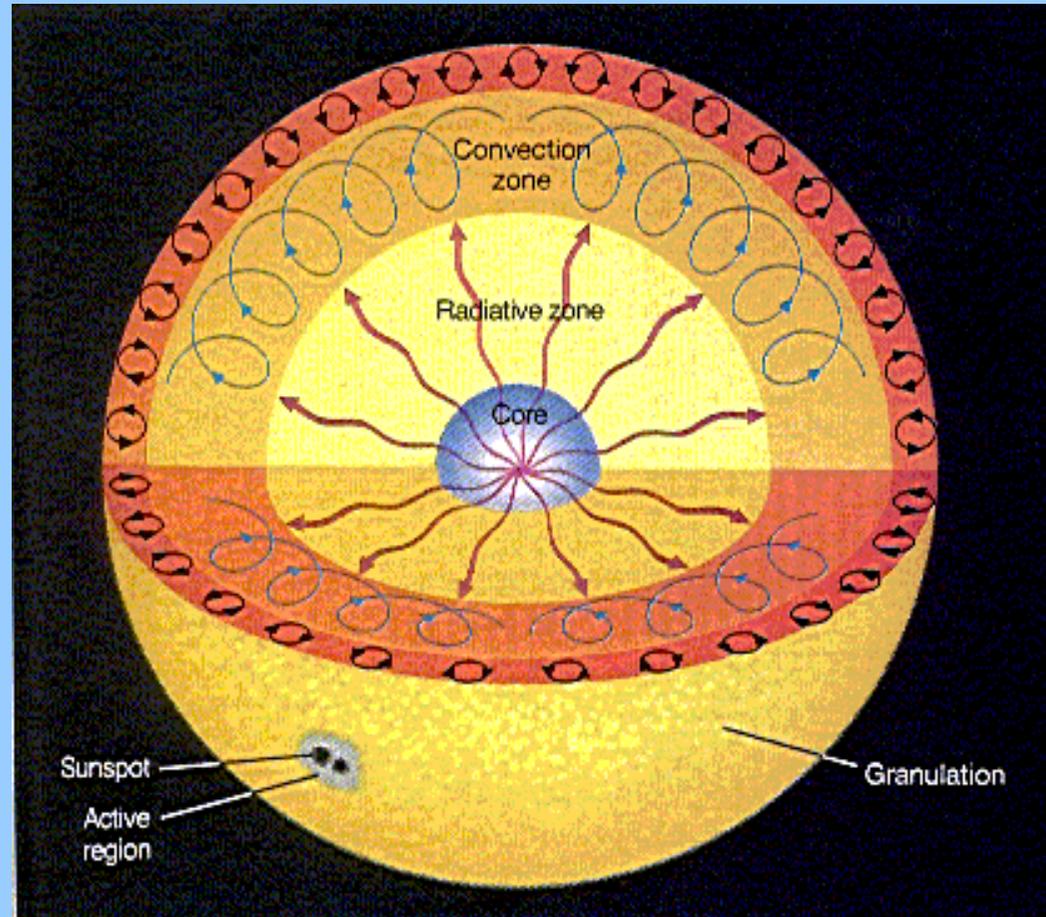
$$[5\%M_0c^2 \approx 9 \cdot 10^{45} \text{ J}]$$

La prova ?

Si ritiene che nel nucleo del sole avvengano reazioni nucleari:



Come dimostrarlo?



I neutrini, i costituenti della la radiazione più penetrante (elusiva), riescono ad attraversare la stella (Pontecorvo '47); occorre rivelarli per avere la prova della fonte di energia del sole

Come si rivelano i neutrini solari?

4° divagazione

- Quanti sono:
 - costante solare: $K_0 \gg 1 \text{KW/m}^2$
 - ogni 2 neutrini si libera: $Q=27\text{MeV}$
 - flusso di neutrini sulla terra: $F_n = 2 K_0 / Q \gg 6 \cdot 10^{10} \text{ neutrini/cm}^2/\text{s}^*$
- Il rivelatore:
 - Esempio: esperimento radiochimico: $n + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e$
 - consideriamo un "bidone" di 30 ton di Gallio
 - numero di nuclei ${}^{71}\text{Ga} \gg 10^{29}$
- La sezione d'urto:
 - i neutrini solari hanno: $\langle E_n \rangle \gg 1 \text{ MeV}$
 - a questa energia, per urto su gallio: $\sigma \gg 10^{-45} \text{cm}^2$
- Il numero di eventi:
 - $DN/Dt = N_p F_n \sigma \gg 0.5 \text{ eventi / giorno} \quad \text{!!!!!!}$

*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
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Gli uomini

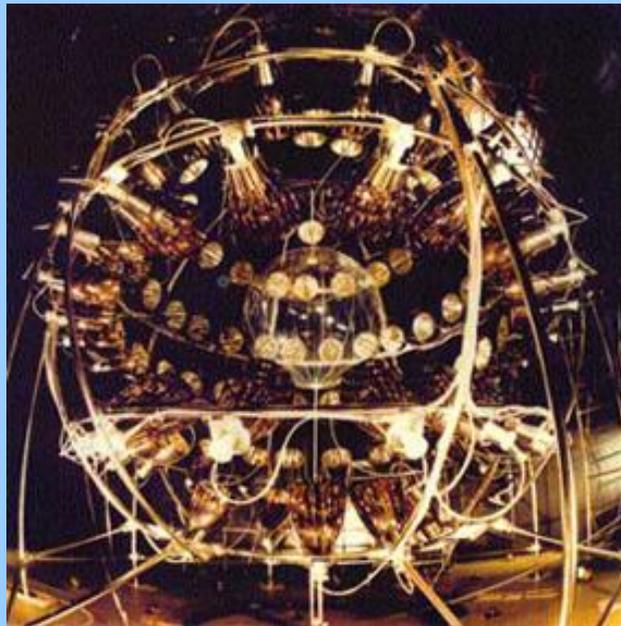
Gli scavi



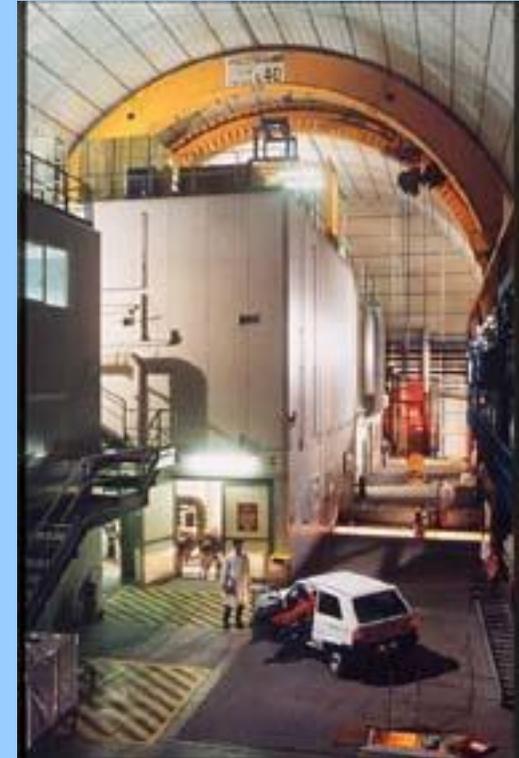
I rivelatori



M
A
C
R
O



BOREXINO

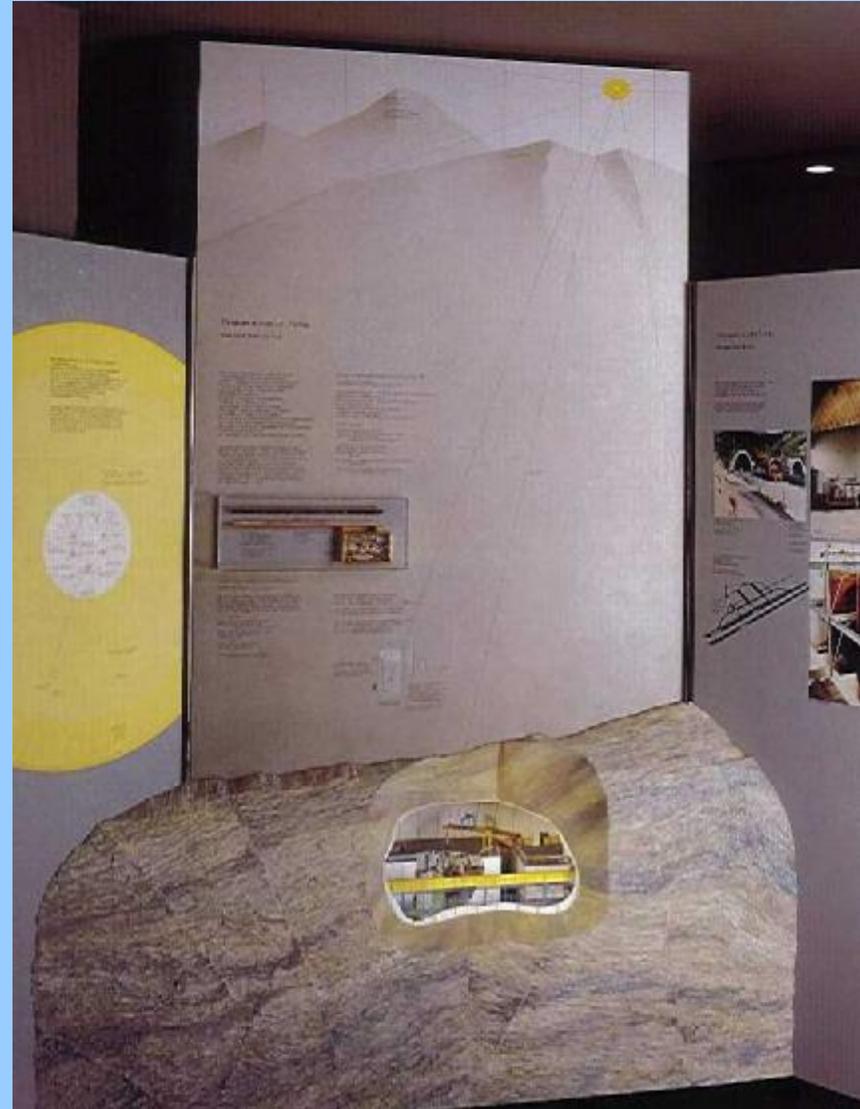


GALLEX

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

*insieme ad altri esperimenti:
Homestake (USA), KamioKANDE (Giappone),
SAGE (Russia),



Cose viste e non viste

- Il segnale osservato da Gallex è circa la **metà** di quello atteso
- Lo stesso è successo negli altri esperimenti
- Si pensa che i neutrini prodotti dal sole si siano **trasformati in altre particelle**, invisibili nei rivelatori attuali (Oscillazioni di Pontecorvo).



- Ciò è possibile se i neutrini **hanno una massa, anche se piccolissima**

Cose viste e non viste

Una scomparsa non è una scoperta

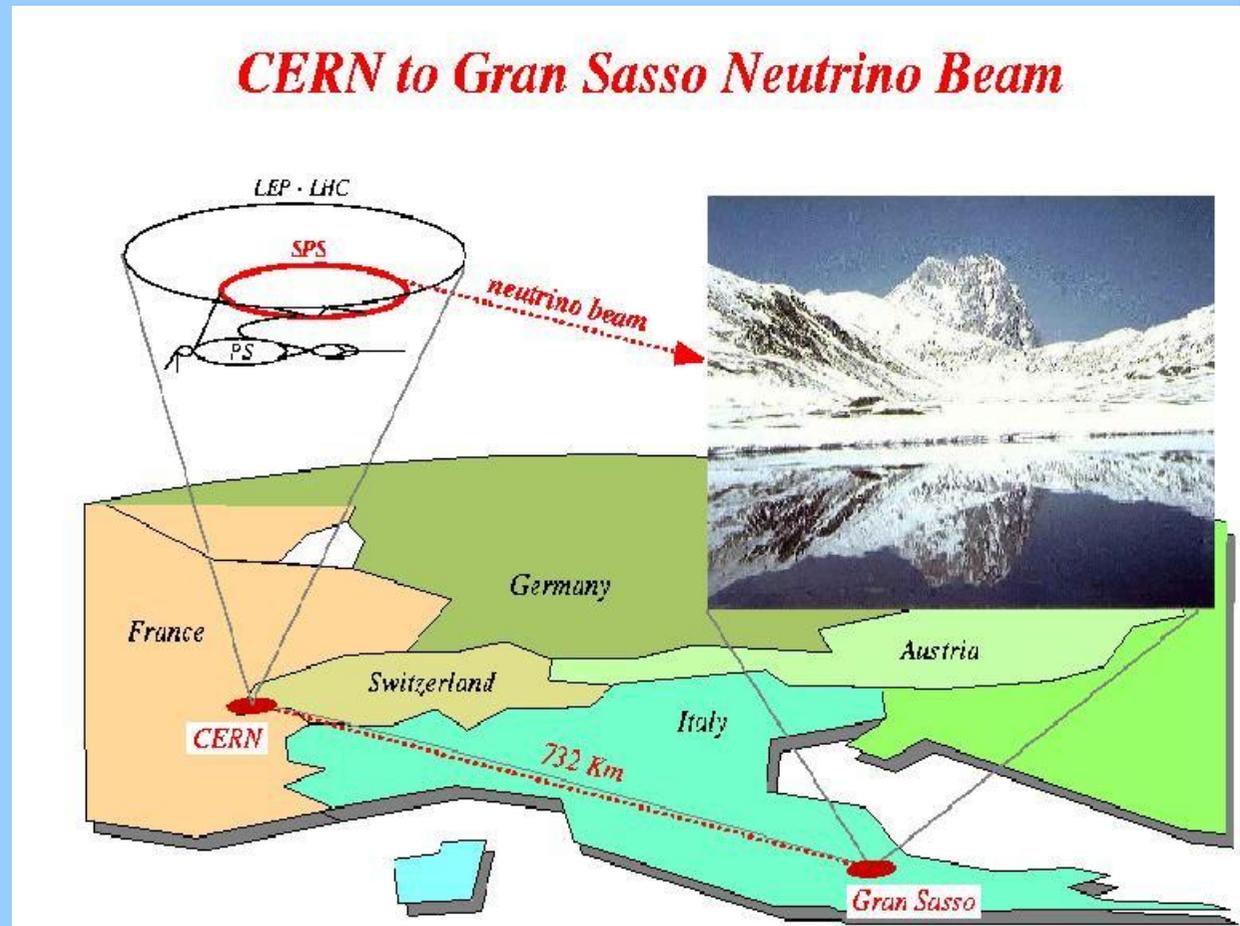
Per fare una scoperta occorre avere un segnale, fare un **esperimento di apparizione**

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



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

Che altro si puo' fare?



I neutrini terrestri



I neutrini da Supernovae



I neutrini della Galassia



La materia oscura nell'universo

I neutrini della Terra

- La terra è radioattiva
(^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)
- Quanto è il contenuto di elementi radioattivi all'interno della terra?
- Rivelare (anti) **neutrini prodotti dall'interno terrestre** è il modo per misurare la "radioattività" della terra.
- Il flusso di antineutrini terrestri è circa 10^6 neutrini/cm²/s
- L'esperimento KamLAND (**1 kton**) ha rivelato per la prima volta queste particelle (luglio 2005)



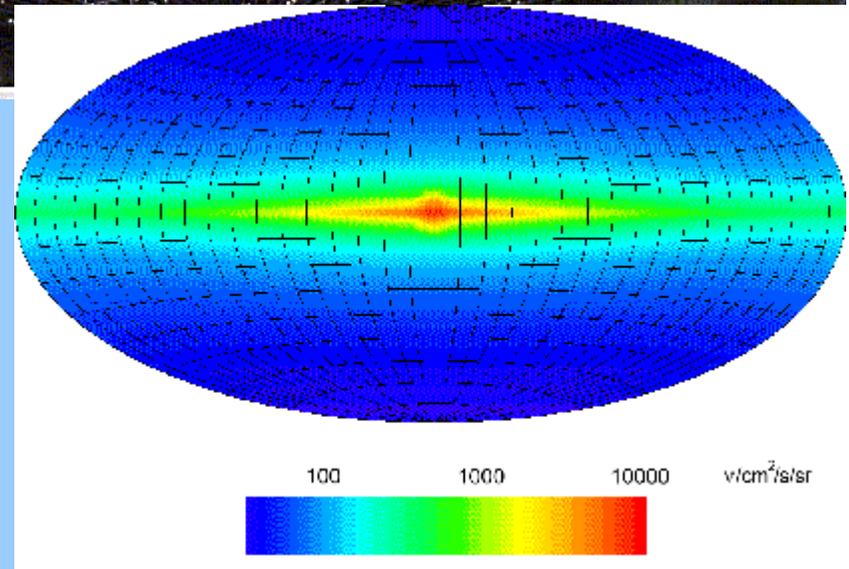
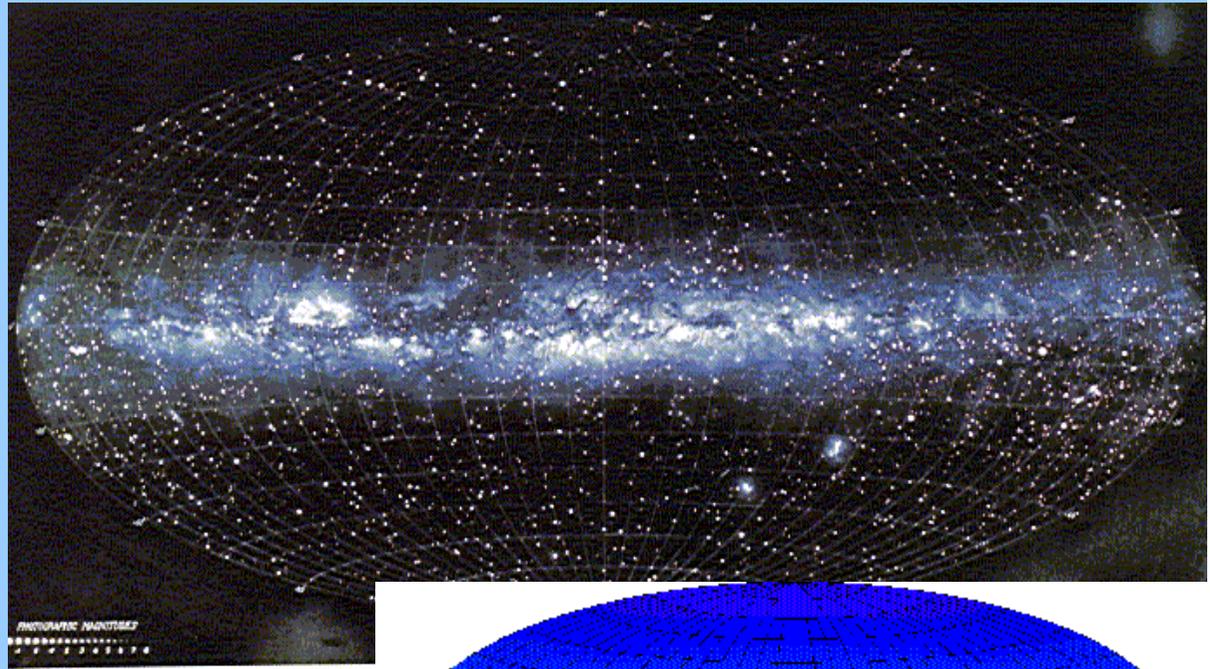
I neutrini da supernovae

- Dopo un'esplosione di supernova, può restare una stella di neutroni ($M \gg 1.3M_{\odot}$, $R \gg 20\text{km}$)
- Energia liberata in una esplosione di supernova: $E \gg GM^2/R = 3 \cdot 10^{46} \text{ J}$
- Solo 0.01% di questa energia e' in radiazione visibile, il 99.9% e' trasportato da neutrini e antineutrini, in un "burst" di circa 3 secondi.
- Nel 1987, per la prima volta sono stati rivelati (anti)neutrini da SN
- I neutrini da SN sono 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 cosa sia fatta.



- **La materia oscura potrebbe essere fatta di i neutrini primordiali, se i neutrini hanno una piccola massa**
[$m(n) = 10^{-6}m(e)$]