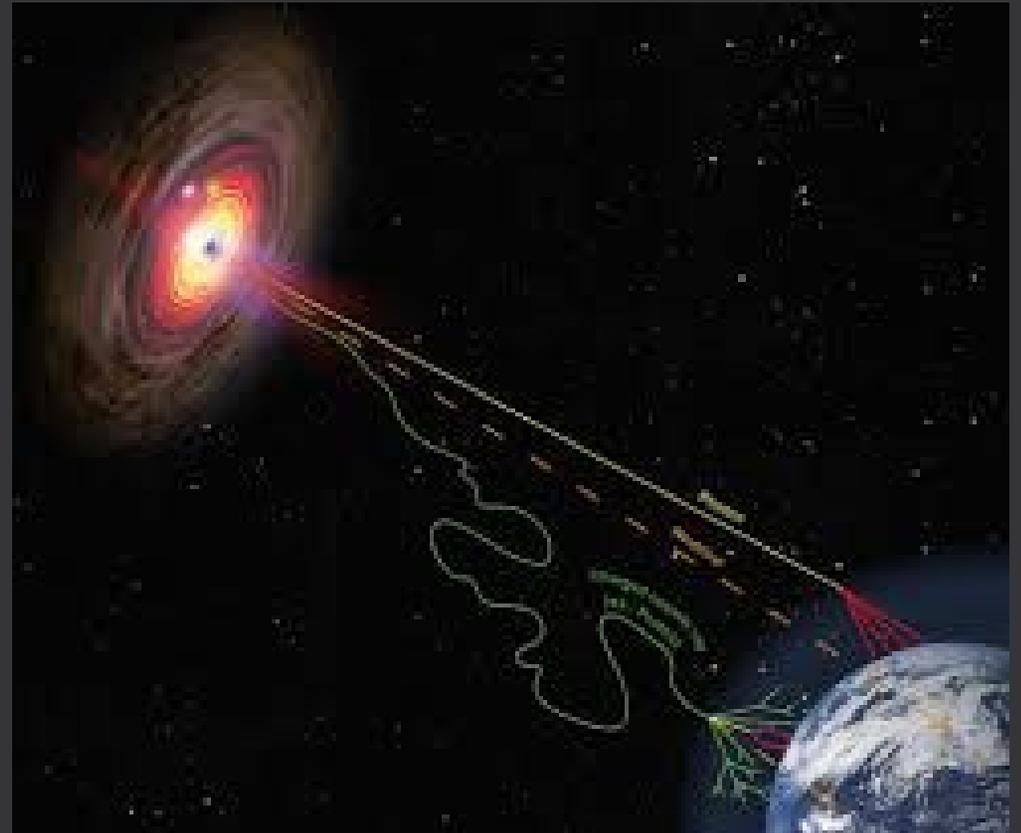




I neutrini

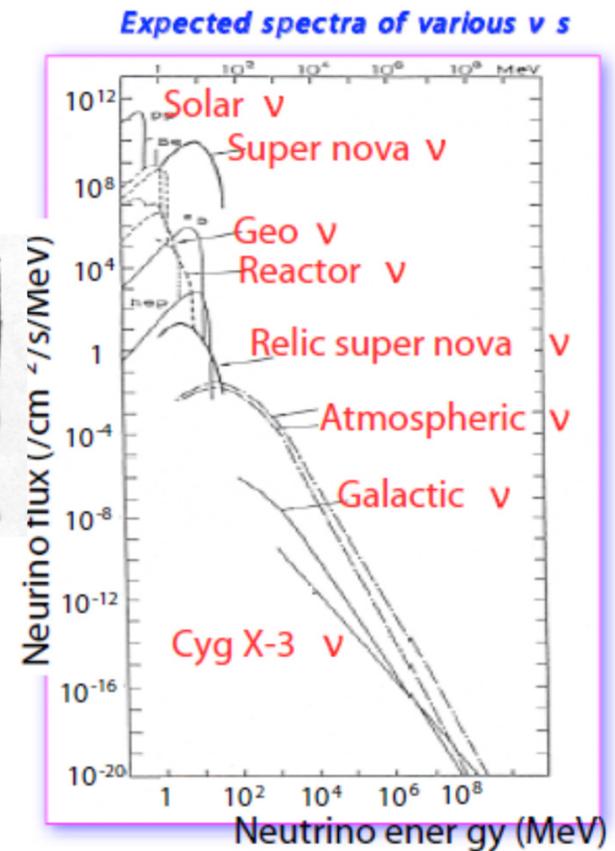
3 – Messaggeri da altri mondi



Inondati dai neutrini!

Flusso totale nel nostro corpo

- $\sim 10^7 \nu$ relici dal Big Bang
- $\sim 10^{14} \nu/s$ dal sole
- $\sim 5 \cdot 10^{10} \nu/s$ dalla radioattività naturale
- $\sim 10^{10} \nu/s$ dai reattori nucleari
- $\sim 10^3 \nu/s$ dai interazioni di raggi cosmici nell'atmosfera
- $\sim 4 \cdot 10^3 \nu/s$ dai decadimenti del Potassio 40 presente nel nostro corpo ($\sim 20 \text{ mg}$).



Neutrini solari

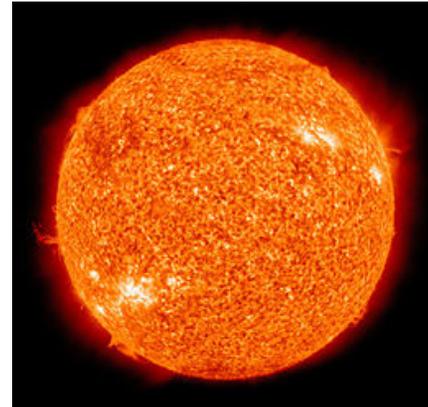
Neutrini: inizialmente osservati in presenza di reazioni nucleari in un reattore a *fissione*

Dove trovare in giro altre reazioni nucleari?

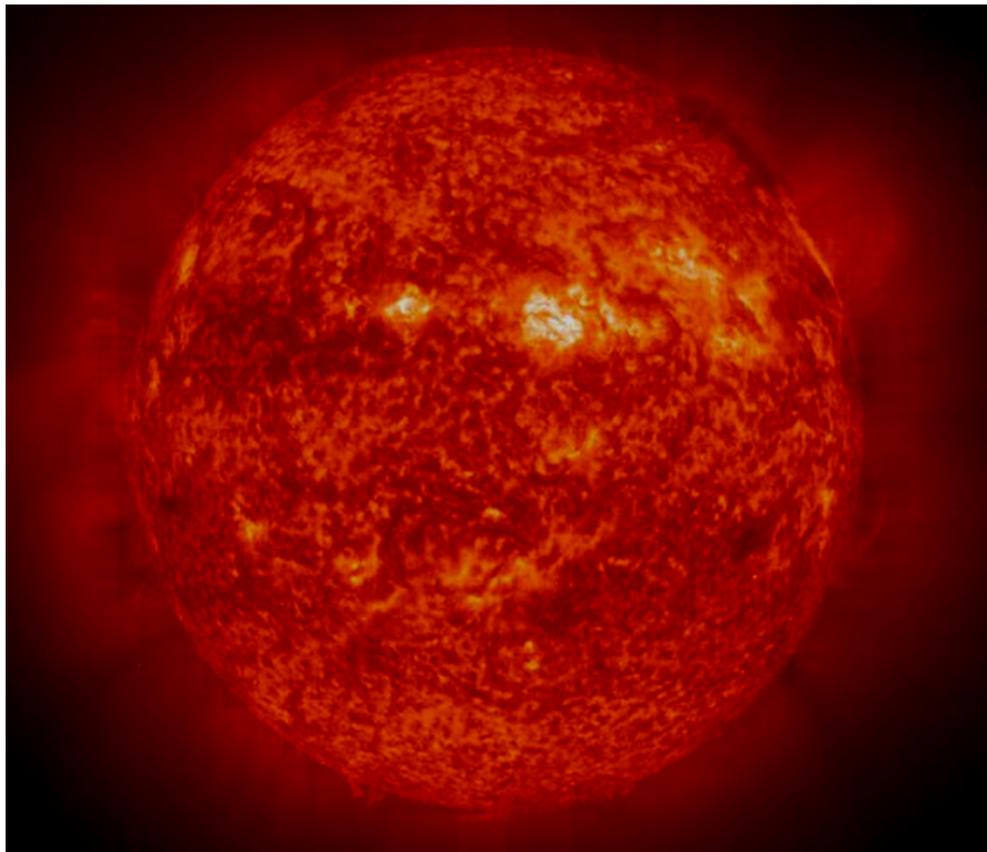
Nelle stelle: reazioni nucleari di *fusione*

Produzione di neutrini

→ Neutrini dal Sole!



Il Sole



EP 2008

Alain Bellerive

Distanza media dalla Terra:

$1.5 \times 10^{11} \text{ m}$

Massa: $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

Raggio: $6.96 \times 10^8 \text{ m}$

Luminosità: $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$

Flussi astronomici

Sole: Stella piu' vicina

Cicli solari: copiosa emissione di neutrini

Naturale cercare neutrini provenienti dal Sole

Attesi sulla Terra:

$6.6 \cdot 10^{10}$ per cm^2 per secondo

con diverse energie

Stelle e neutrini

Da dove viene l'energia delle stelle?

Processi termonucleari

Reazioni di fusione richiedono temperature elevate per vincere la repulsione elettrostatica fra i nuclei

Le temperature elevate sono fornite dall'attrazione gravitazionale:

Compressione del plasma → Riscaldamento

Modello Solare Standard

SSM: Miglior descrizione *quantitativa* esistente del Sole

Sfera di idrogeno, tenuta assieme dalla forza gravitazionale

Densità e temperatura massime al centro, sufficienti a innescare reazioni di fusione nucleare

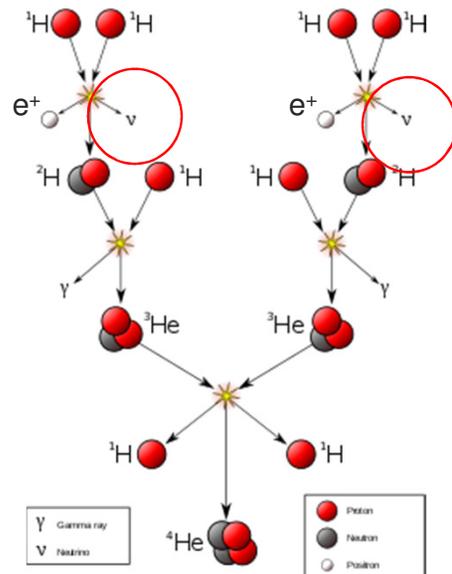
Produzione di grandi quantità di energia

Produzione di neutrini

Previsioni vs osservazioni: Confronto positivo, ma...

Ciclo dell'idrogeno

Sequenza di reazioni nucleari che parte da 2 nuclei di idrogeno e porta alla formazione di 1 nucleo di elio



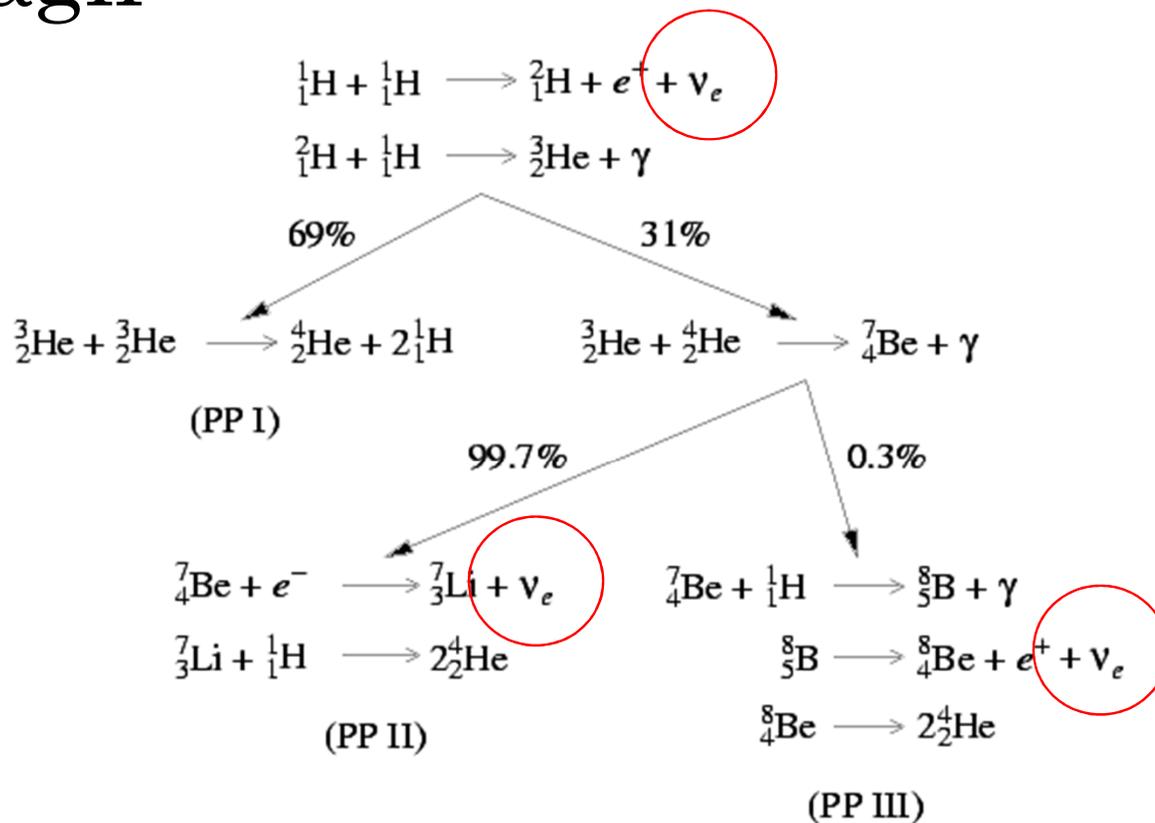
Esempio: Sequenza di tipo I

Resa energetica: $E = 26.7 \text{ MeV}$ per ciclo

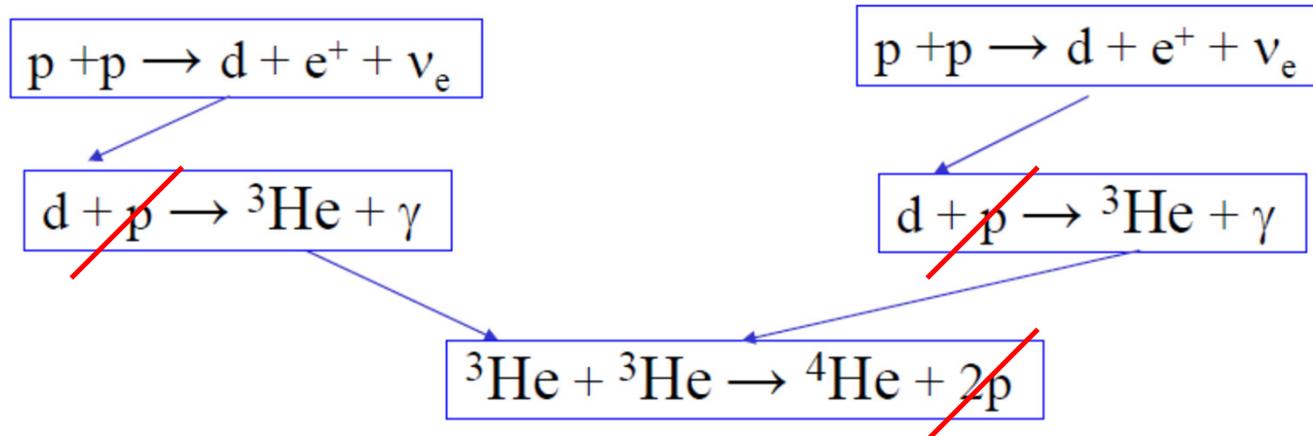
Emissione di 2 neutrini elettronici!

Totale dal Sole: $2 \cdot 10^{38}$ neutrini al secondo!

Dettagli



Sequenza Tipo I



$e^+ + e^- \rightarrow$ raggi γ , per entrambi gli e^+
 $\rightarrow 4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e + \text{energia}$

Flusso di neutrini

Costante solare : Energia che arriva sulla Terra per unità di tempo e superficie

$$K_0 \simeq 1.37 \text{ kW} / \text{m}^2 \simeq 8.5510^{15} \text{ MeV} / \text{m}^2 \text{ s}$$

Considerando solo il ciclo dell'idrogeno:

$$4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + Q_H \rightarrow \Phi_{tot} = \frac{2K_0}{Q_H}$$

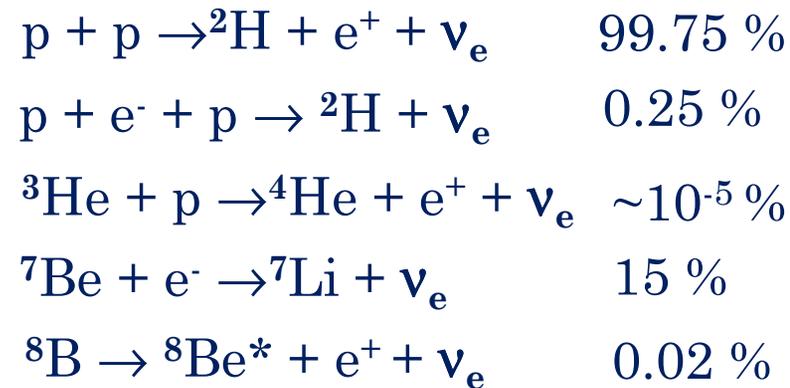
$$Q = Q_H + 2\langle E_\nu \rangle = 4m_p c^2 - m_{\text{He}} c^2 - 2m_e c^2 = 24.7 \text{ MeV}$$

$$\langle E_\nu \rangle = 0.2 \text{ MeV} \rightarrow Q_H = 24.3 \text{ MeV}$$

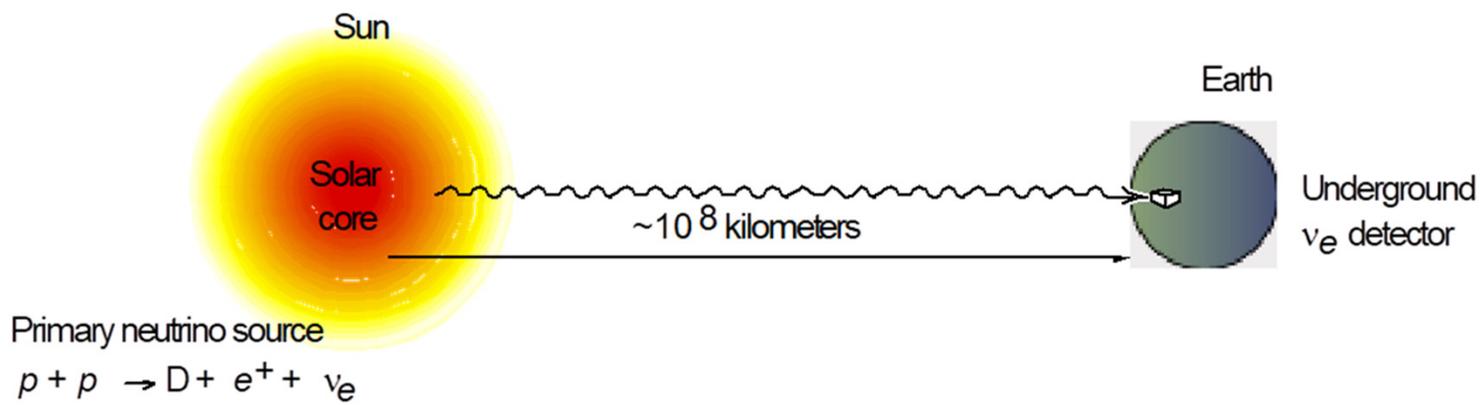
Includendo in Q_H il contributo da annichilazione dei $2 e^+ = 4m_e c^2 \approx 2.04 \text{ MeV}$:

$$\rightarrow \Phi_{tot} = \frac{2K_0}{Q_H} = \frac{2 \cdot 8.5510^{15}}{26.3} \simeq 0.6510^{15} \nu / \text{m}^2 \text{ s} = 6.510^{10} \nu / \text{cm}^2 \text{ s}$$

Produzione di neutrini nel Sole



Neutrini in viaggio



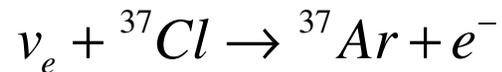
Acchiappafantasma

Prima osservazione dei neutrini solari:

Esperimento di Davis e collaboratori in una miniera d'oro a 1500 m di profondità a Homestake, SD (1968)

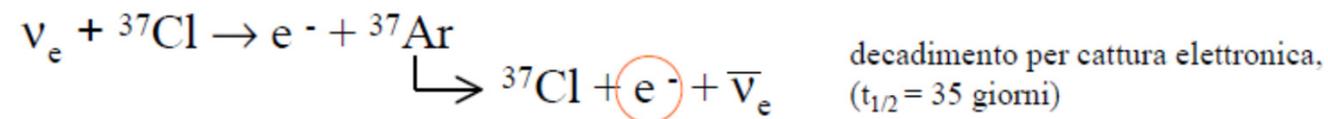
380 m³ di tetra**cloro**etilene – solvente organico usato per il lavaggio a secco

Reazione usata nel rivelatore:



Tecnologia e arte

^{37}Ar instabile:

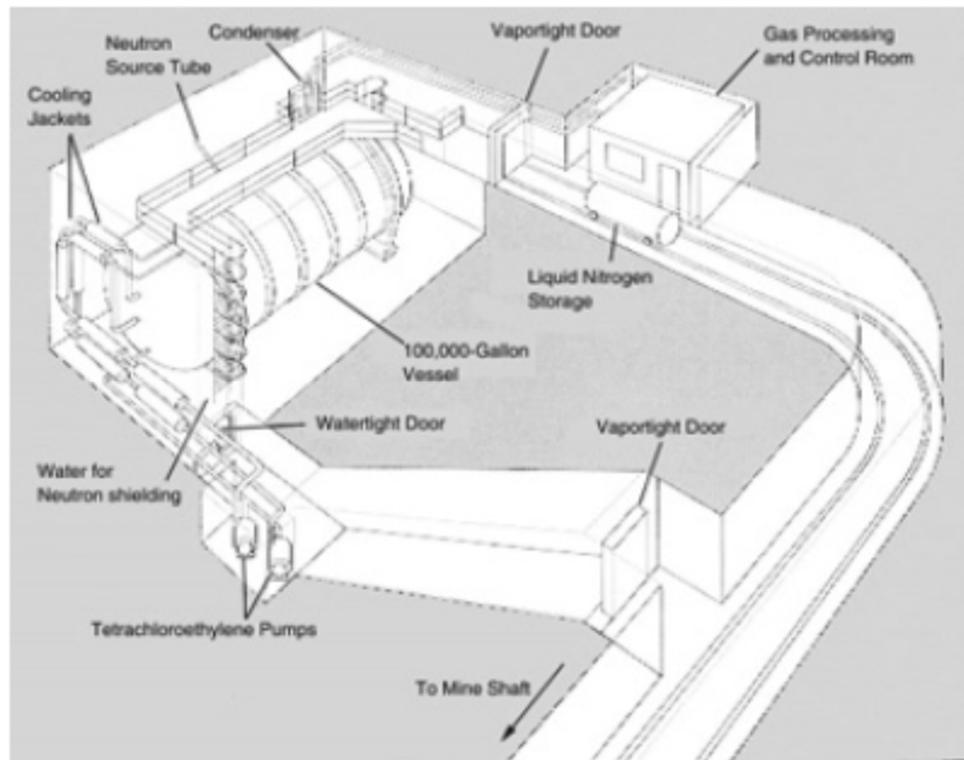


Raccolto allo stato gassoso ogni due settimane con uno speciale filtro

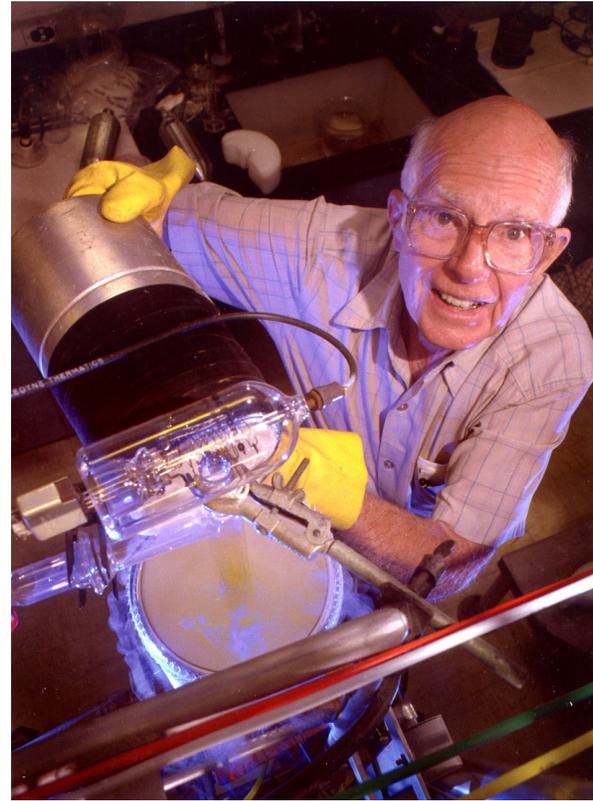
Identificato dal suo decadimento in $^{37}\text{Cl} + \text{elettrone}$ per mezzo di rivelatori miniaturizzati attraverso i quali veniva flussato

Circa 1 evento ogni 2 giorni

Primo rivelatore di ν solari



Ray Davis e il suo baby



Il mistero dei neutrini scomparsi

Homestake: 25 anni di presa dati 1970 -1995

Soglia di energia: 0.814 MeV

Sensibile ai ν da ${}^8\text{B}$ & ${}^7\text{B}$

Frequenza osservata (equivalenti solari)

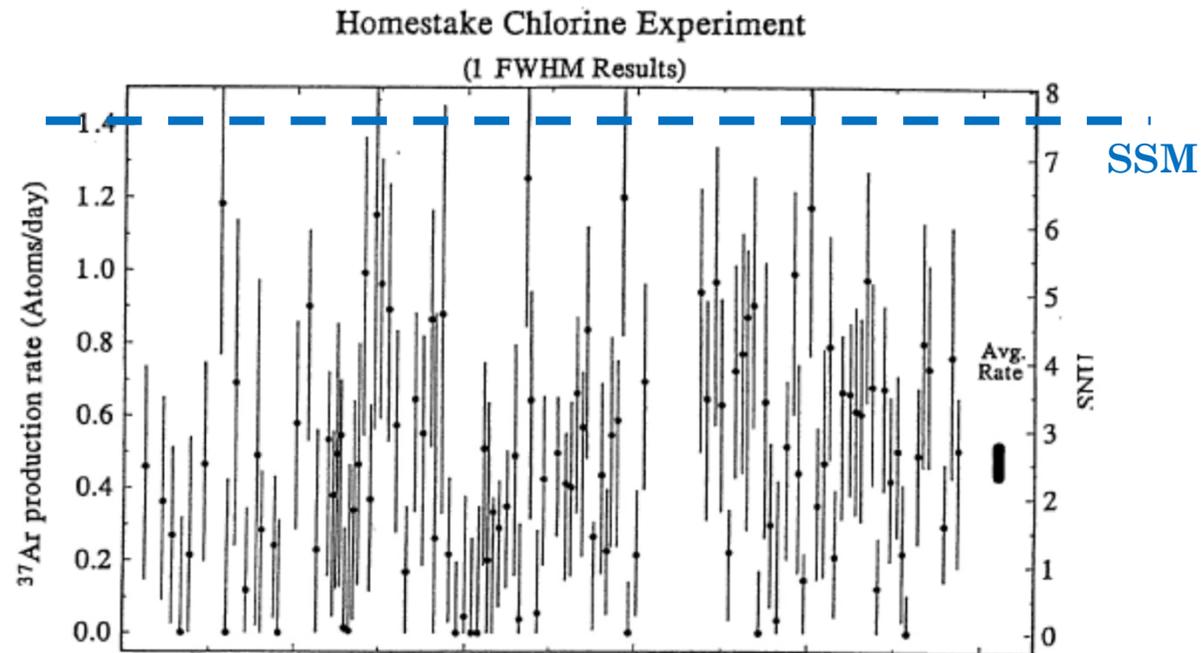
$$2.56 \pm 0.16 \quad \pm \quad 0.16$$

errore
statistico sistematico

Frequenza prevista (equivalenti solari)

7.6

Esempio di misura



$$R(\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.16 (\text{stat}) \pm 0.16 (\text{syst}) \text{ SNU} \leftrightarrow \text{SSM} : 7.7^{+1.2}_{-1.0} \text{ SNU}$$

???

Misure sbagliate?

Modello solare standard sbagliato?

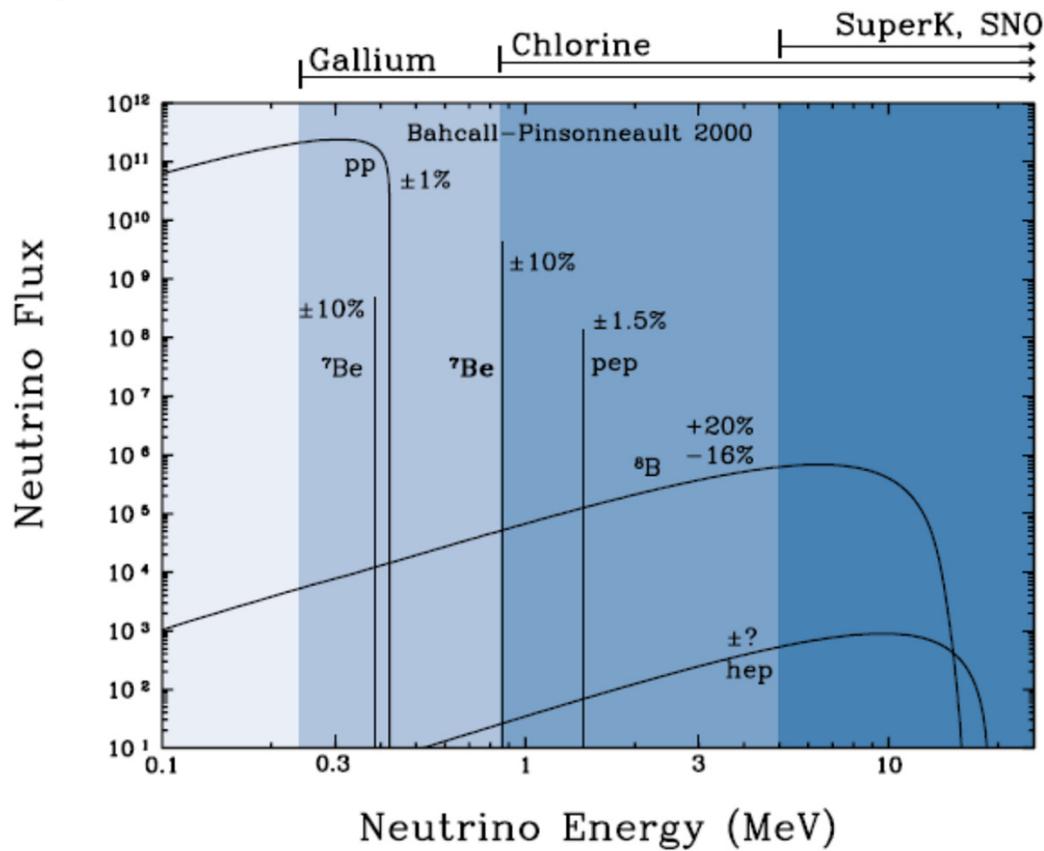
Fisica nucleare sbagliata?

...o manca qualcosa?

Per es,

Cosa succede ai neutrini fra il Sole e la Terra?

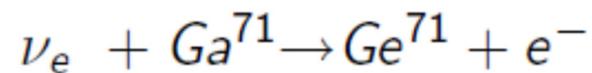
Energia dei neutrini solari



Gallio

La reazione dei ν_e sul ^{37}Cl avviene al di sopra di un'energia minima
Energia di soglia $\sim 0.9 \text{ MeV}$

Interessante misurare il flusso anche a energie inferiori:

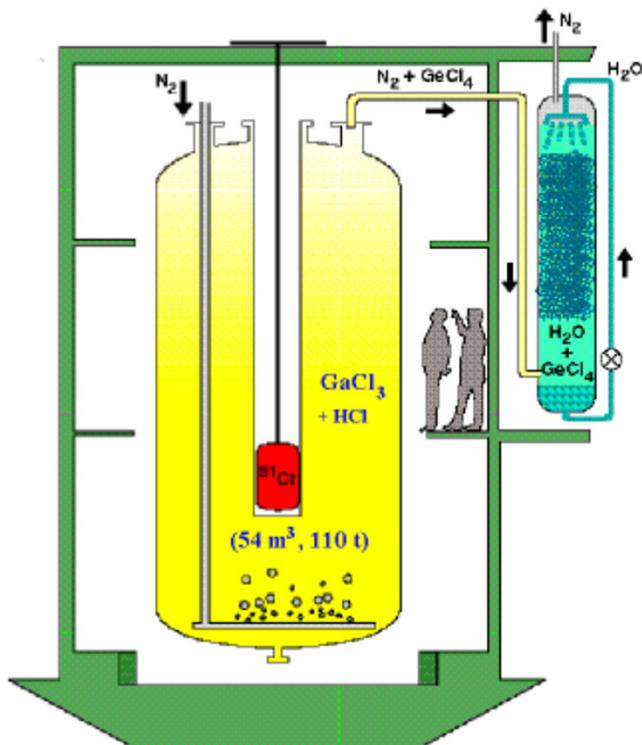


Energia di soglia $\sim 0.23 \text{ MeV}$

→ Possibile osservare i ν_e del ciclo dell'idrogeno

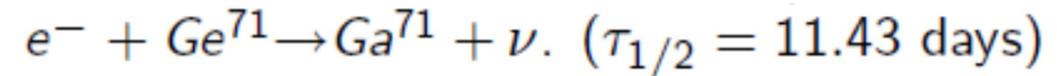
Molto interessante perché sono i più numerosi

GALLEX al Gran Sasso



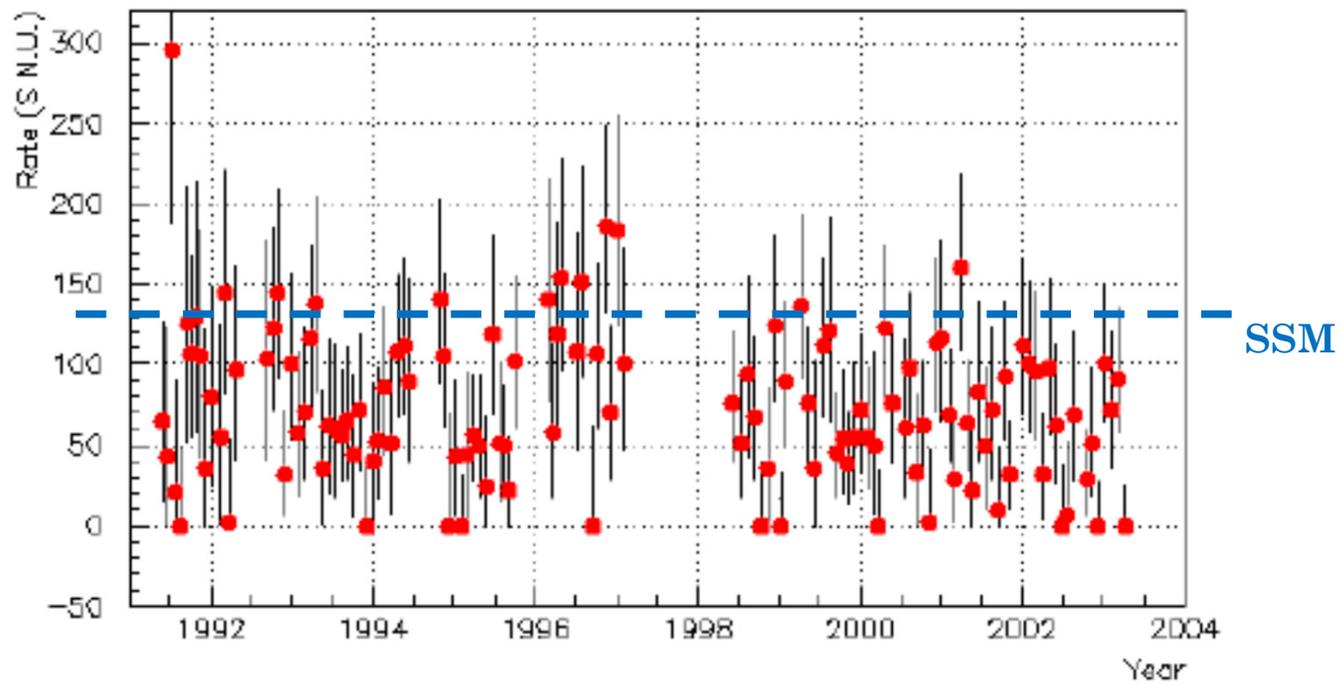
Separazione chimica del Ge dal Ga

Germanio rivelato tramite il processo



con emissione di raggi X caratteristici,
facilmente osservabili

Esperimento GALLEX



Misteri

Non si trovano evidenze in contrasto con le previsioni del SSM, tranne la forte riduzione del flusso di ν_e

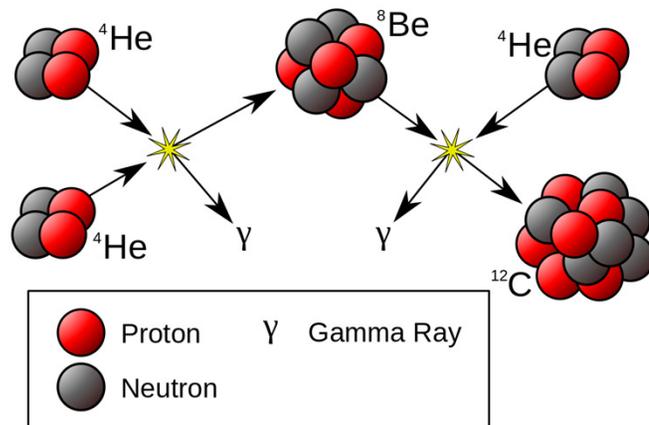
Quindi si può pensare che il problema non stia nel Sole, ma piuttosto in ciò che (non) sappiamo sui neutrini

E' vero che sono privi di massa?

Che succede loro viaggio fra il Sole e la Terra?

Oltre il ciclo dell' idrogeno

Ciclo dell'elio: Sequenza di reazioni di fusione che parte da 3 nuclei di elio e porta a un nucleo di carbonio



Resa energetica 7.275 MeV

Fine di ogni stella

Dopo alcuni altri cicli, produzione di nuclei di *Fe*

Fusione del *Fe*: processo *endotermico*

Evoluzione stellare si arresta per esaurimento combustibile

Possibili finali (a seconda della massa):

Nana bianca , non esplosiva

Supernova, esplosiva

Resto di supernova: *Stella di neutroni* o *Buco nero*

Neutrini da supernova

Esplosioni stellari conseguenti a esaurimento del combustibile nucleare

Includono una fase di elevata compressione del nucleo stellare → Innesco di reazioni come $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

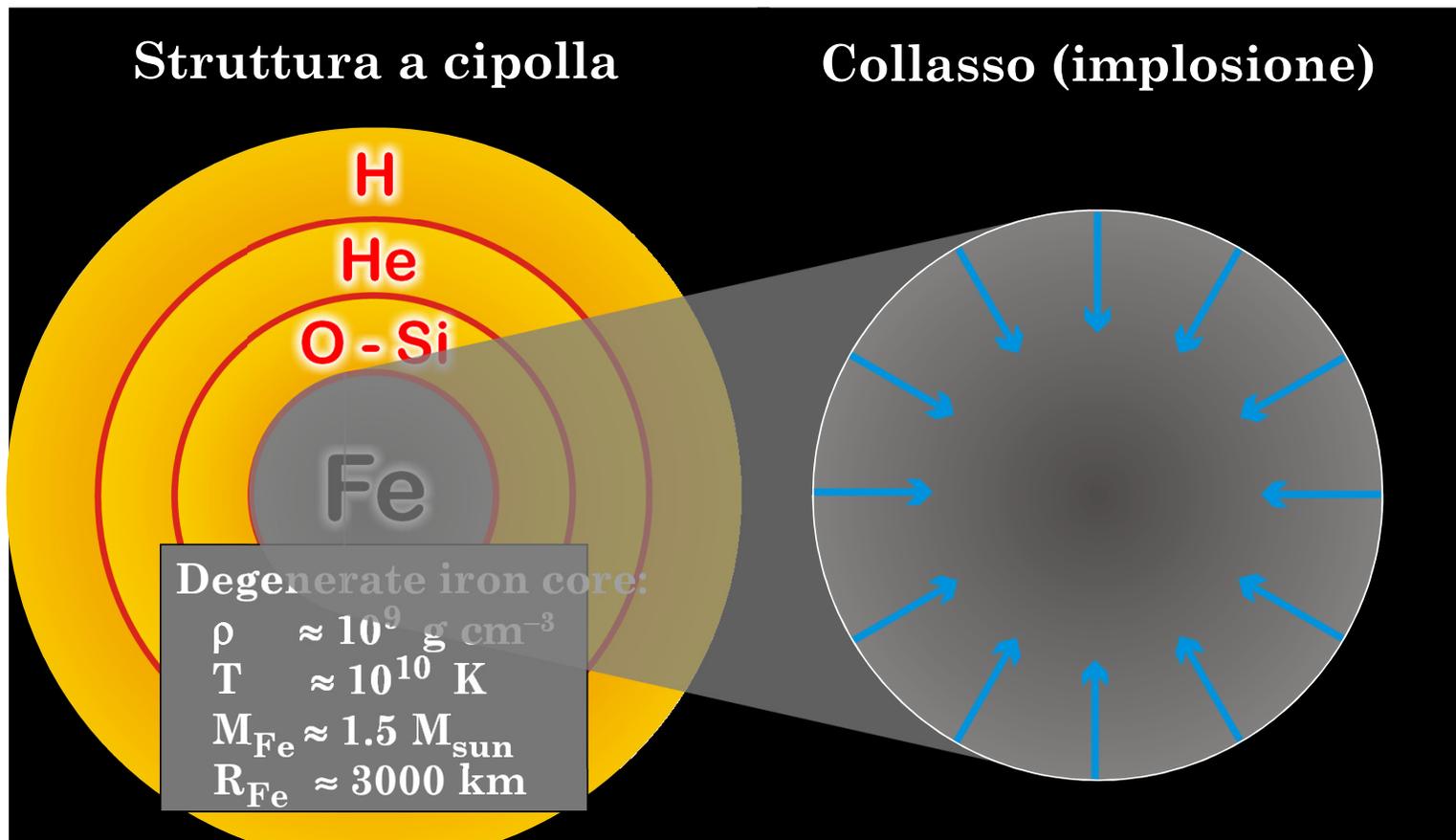
Densità elevate → Neutrini ‘intrappolati’

Densità decrescente → Emissione di neutrini

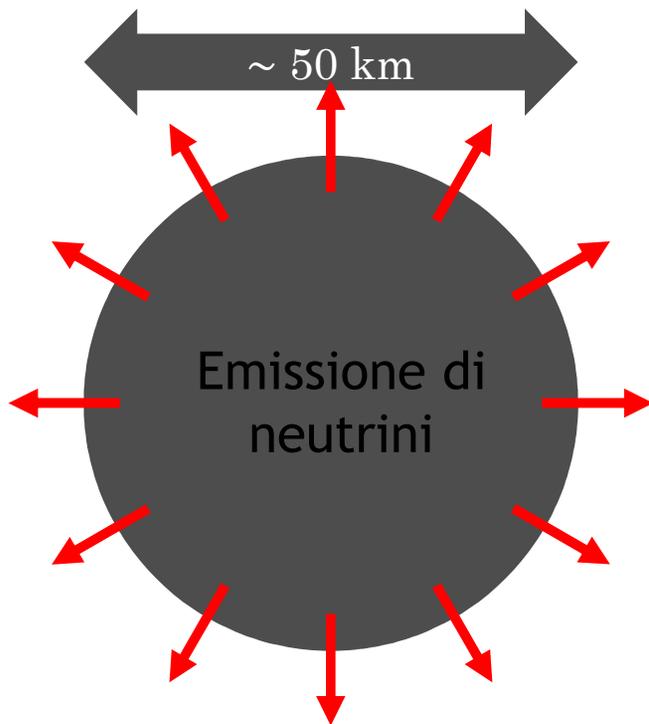
99% dell’energia totale liberata trasportata dai neutrini !

Emissione nel visibile ritardata rispetto a quella di neutrini

Collasso stellare e esplosione



Fine esplosione



Proto-Neutron Star

$$\rho \sim \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

Energia potenziale gravitazionale

$$E_b \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} \approx 17\% M_{\text{SUN}} c^2$$

...trasformata in:

99% Neutrini

1% En. cinetica

0.01% Fotoni

‘Luminosità’ neutrinica:

$$L_\nu \sim 3 \times 10^{53} \text{ erg} / 3 \text{ sec}$$

$$\sim 3 \times 10^{19} L_{\text{SUN}}$$

Cifre astronomiche

Numero totale neutrini emessi $\sim 10^{58}$

Durata 'flash neutrino' ~ 20 secondi

Energia tipica 10 – 20 MeV

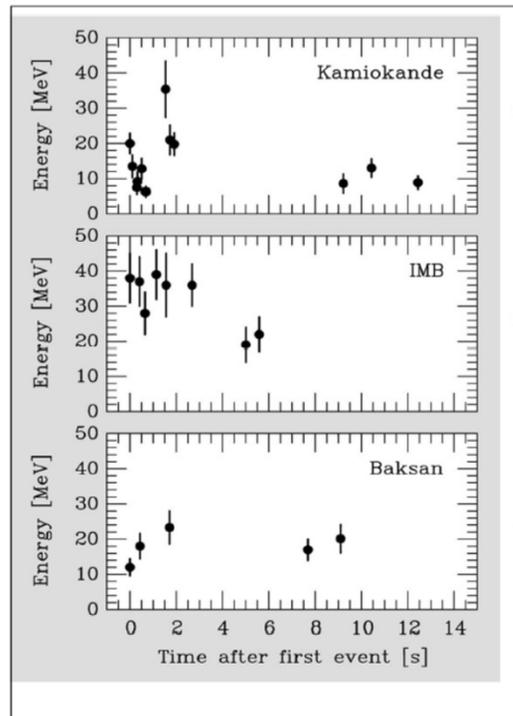
Nella nostra galassia 2 – 4 supernove al secolo

Per una supernova galattica distante ~ 35000 anni luce:

Neutrini che arrivano sulla Terra $\sim 5 \cdot 10^{11}$ per cm^2

SN1987A

23/2/1987: Supernova piu' brillante degli ultimi 4 secoli



Kamiokande (Giappone)
Rivelatore Cerenkov
Incertezza sul tempo ± 1 min

Irvine-Michigan-Brookhaven (US)
Rivelatore Cerenkov
Incertezza sul tempo ± 50 ms

Baksan (Unione Sovietica)
Scintillatore
Incertezza sul tempo $+2/-54$ s

I segnali sono contemporanei entro le incertezze sul tempo

Origine nella Grande Nube di Magellano, galassia nana a 168000 anni luce da noi

3 rivelatori in US, URSS e Giappone osservano in totale 24 neutrini entro 13 secondi, 3 ore prima dell'osservazione ottica!

Prima e dopo



Neutrini dal Big Bang

Formazione di enormi quantità di neutrini di bassa energia *entro il primo secondo dal Big Bang*

Poco interattivi → Presenti ancora adesso

Densità tipica 330ν per cm^3 , in tutto l'Universo !!

Molto difficili da osservare:

Energia *molto* bassa ~ 1 miliardesimo di quelli da SN

Fondo che copre il segnale

Nondimeno, progetti in corso...

Neutrini astrofisici

Nel cosmo: Acceleratori di particelle naturali

Potenti sorgenti di raggi cosmici

Fino ad energie $\approx 10^{20}$ eV!

Probabili sorgenti di neutrini di energia elevatissima

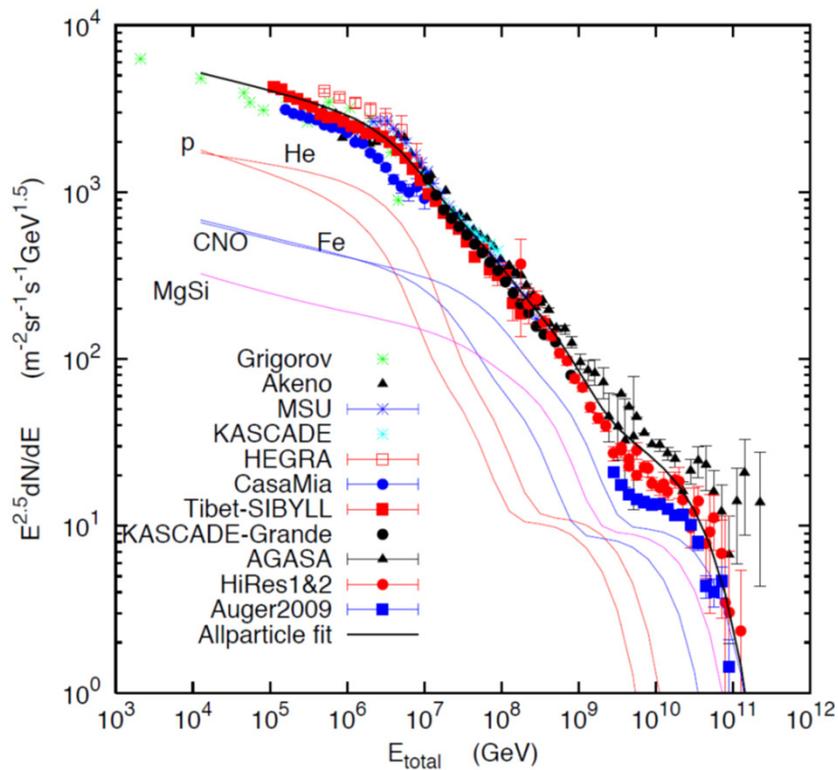
Resti di supernova

Nuclei galattici attivi

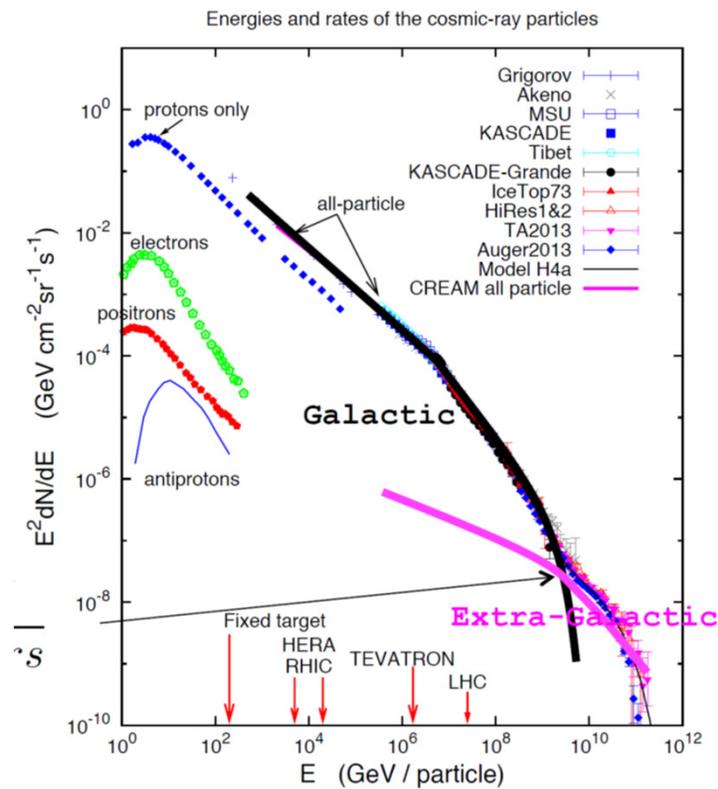
Gamma ray burst

Grande interesse astrofisico

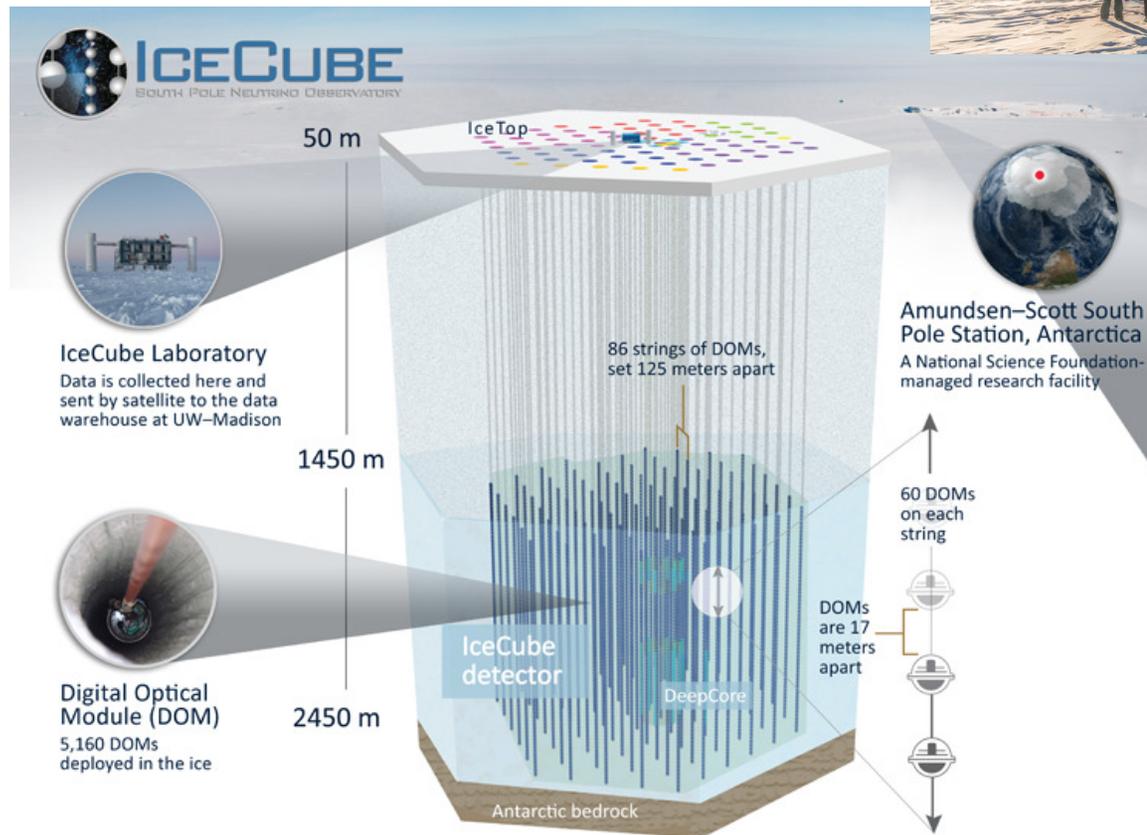
Raggi cosmici



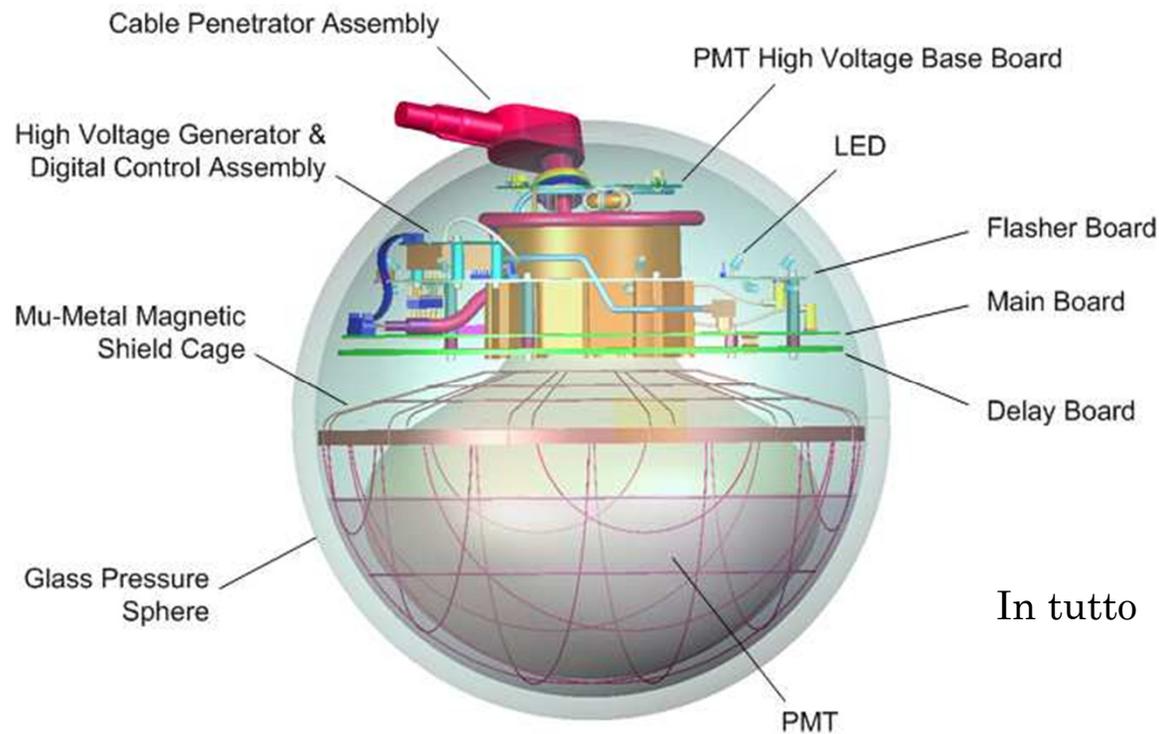
All-particle spectrum



IceCube



Modulo ottico di IceCube



In tutto 5160 !

Neutrini in IceCube

