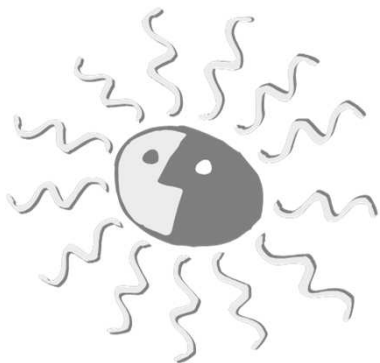




# **Lezione n.3**

## **I neutrini solari e da supernova**

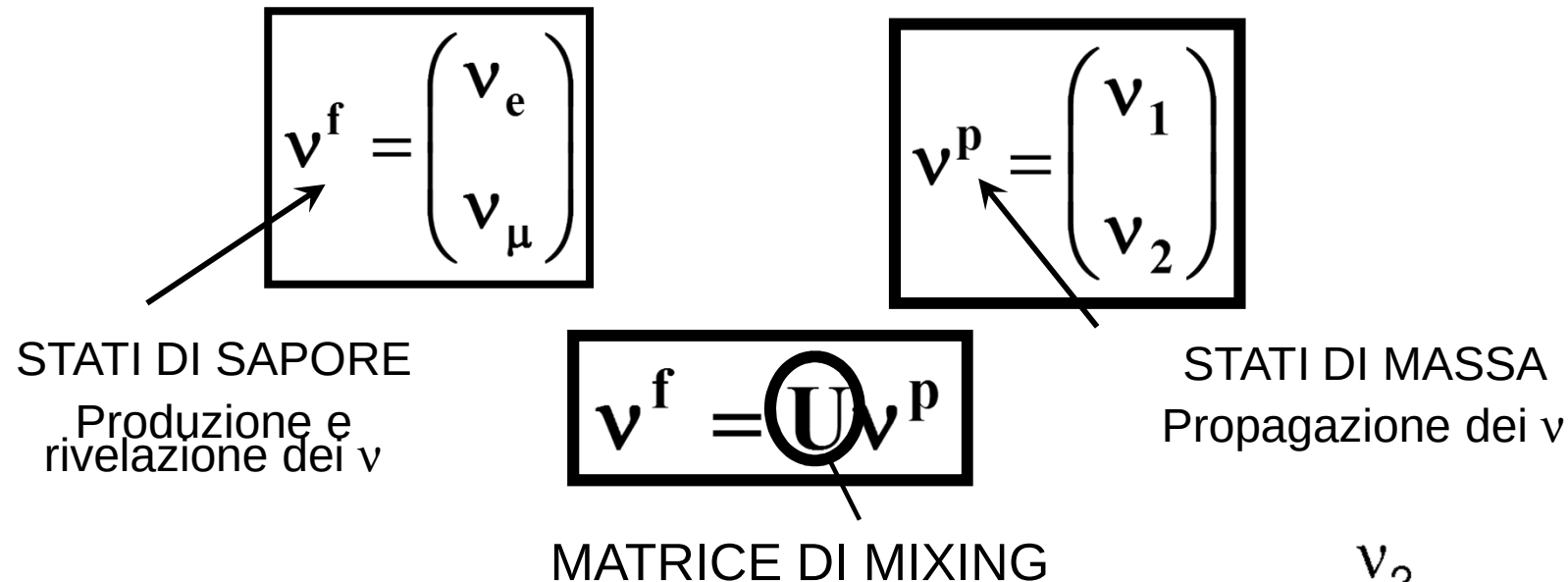
**Corso di Introduzione all'astrofisica (III parte)**

**Anno accademico 2011-2012**

**Barbara Caccianiga**

# La soluzione: oscillazioni di neutrino

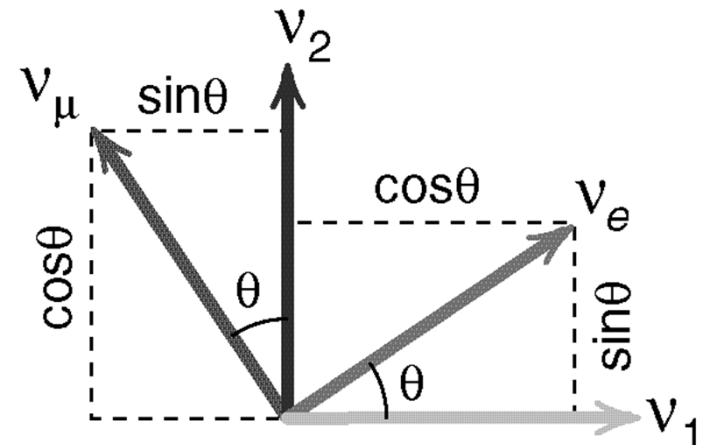
**CONCETTO BASE:** gli autostati di neutrino delle interazioni deboli NON sono autostati di massa;



CASO A DUE SAPORI:

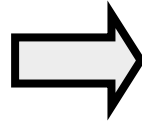
$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Angolo di mixing



# Propagazione nel vuoto

$$\mathbf{v}^f = \mathbf{U} \mathbf{v}^p$$



$$\begin{aligned} |v_e\rangle &= \cos \vartheta |v_1\rangle + \sin \vartheta |v_2\rangle \\ |v_\mu\rangle &= -\sin \vartheta |v_1\rangle + \cos \vartheta |v_2\rangle \end{aligned}$$

Suppongo di avere prodotto un  $v_e$  al tempo  $t=0$

$$|v_e\rangle = \cos \vartheta |v_1\rangle + \sin \vartheta |v_2\rangle$$

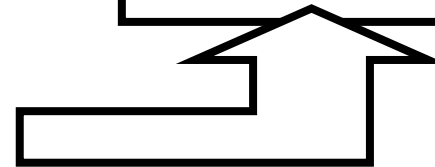
Dopo un tempo  $t$  avro':

$$|v_e, t\rangle = \cos \vartheta e^{-iE_1 t} |v_1\rangle + \sin \vartheta e^{-iE_2 t} |v_2\rangle$$

Noto che nell'ipotesi ultrarelativistica:

$$m_i \ll E_i \Rightarrow E_i \cong |\vec{p}| + \frac{m_i^2}{2|\vec{p}|}$$

Ecco dove entra la massa! E' quella che "disallinea" i due autostati. Se fosse =0 non si avrebbero oscillazioni!



Allora la probabilita' di avere un  $|v_e, t\rangle$  venga rivelato come  $v_\mu$  e' data da:

$$P(v_e \rightarrow v_\mu) = \left| \langle v_e, t | v_\mu, 0 \rangle \right|^2 = \langle v_e, t | v_\mu \rangle \langle v_e, t | v_\mu \rangle^*$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \langle \nu_e, t | \nu_\mu, 0 \rangle \langle \nu_e, t | \nu_\mu, 0 \rangle^* =$$

$$| \nu_e, t \rangle = \cos \theta e^{-iE_1 t} | \nu_1 \rangle + \sin \theta e^{-iE_2 t} | \nu_2 \rangle$$

$$| \nu_\mu, 0 \rangle = -\sin \theta | \nu_1 \rangle + \cos \theta | \nu_2 \rangle$$

$$= \left[ -\cos \theta \sin \theta e^{-iE_1 t} + \sin \theta \cos \theta e^{-iE_2 t} \right] \cdot \left[ -\cos \theta \sin \theta e^{+iE_1 t} + \sin \theta \cos \theta e^{+iE_2 t} \right] =$$

$$= 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left[ e^{-i(E_1 - E_2)t} + e^{+i(E_1 - E_2)t} \right] =$$

$$= 2 \left( \frac{\sin 2\theta}{2} \right)^2 - 2 \left( \frac{\sin 2\theta}{2} \right)^2 \cos(E_1 - E_2)t =$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos(E_1 - E_2)t] = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{(E_1 - E_2)t}{2} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta E}{2c} L$$

Ricordando che:

$$E_1 - E_2 = \Delta E = \sqrt{p^2 + m_1^2} - \sqrt{p^2 + m_2^2} = p \left( \sqrt{1 + \frac{m_1^2}{p^2}} - \sqrt{1 + \frac{m_2^2}{p^2}} \right) \approx$$

$$\approx p \left[ 1 - \frac{m_1^2}{2p^2} - 1 + \frac{m_2^2}{2p^2} \right] = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p^2} \approx \frac{\Delta m^2}{2E}$$

Si ottiene:

Usando le formule

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$$

$$\frac{e^{-i\alpha} + e^{+i\alpha}}{2} = \cos 2\alpha$$

$$\sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}} = \sin 2\alpha$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 2.48 \frac{\pi L}{E} \Delta m^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi L}{L_{\text{osc}}}$$

$$\text{dove } L_{\text{osc}} = 2.48 \left( \frac{E}{\text{MeV}} \right) \left( \frac{\text{eV}^2}{\Delta m^2} \right)$$

# Oscillazioni nel vuoto: riassumendo

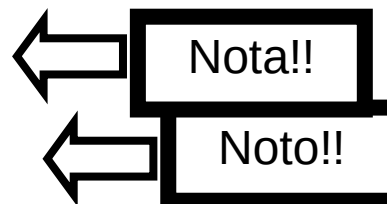
I neutrini elettronici prodotti all'interno del sole possono subire una trasformazione nel loro percorso verso la terra e trasformarsi in neutrini di altri sapori;

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi L}{L_{\text{osc}}}$$

dove  $L_{\text{osc}} = 2.48 \left( \frac{E}{\text{MeV}} \right) \left( \frac{\text{eV}^2}{\Delta m^2} \right)$

La probabilita' di oscillazione dipende da:

- L'angolo di mixing  $\theta$ ;
- L'energia del neutrino  $E$ ;
- Il percorso compiuto  $L$ ;
- La differenza del quadrato delle masse dei neutrini  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ ;



Nell'ipotesi di oscillazione nel vuoto, dai risultati sperimentali e' possibile ricavarsi l'angolo di mixing  $\theta$  e  $\Delta m^2$ !

# Oscillazioni nella materia

- Quando un neutrino si propaga nella materia e non nel vuoto il termine di propagazione degli autostati di massa cambia un po';
- Vale ancora che

Se ho prodotto un  $\nu_e$  al tempo  $t=0$

$$|\nu_e\rangle = \cos\vartheta |\nu_1\rangle + \sin\vartheta |\nu_2\rangle$$

Dopo un tempo  $t$  avro':

$$|\nu_e, t\rangle = \cos\vartheta e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin\vartheta e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle$$

In questo caso pero':

$$E_i \cong |\vec{p}| + \frac{m_i^2}{2|\vec{p}|} + U_{\text{int}}$$

- Dove  $U_{\text{int}}$  e' il potenziale che descrive le interazioni con la materia (in particolare con gli elettroni della materia);
  - Questo termine "disallinea" ancora di piu' i neutrini, in quanto il  $\nu_e$ , partner dell'elettrone, tendera' ad interagire maggiormente rispetto a  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$ ;
  - Si puo' dimostrare che esistono particolari condizioni di risonanza per le quali la probabilita' di oscillazione e' favorita;
  - La risonanza dipende dalla densita' del mezzo, dall'energia del neutrino e da  $\Delta m^2$ ;

# Oscillazioni nella materia: riassumendo

I neutrini elettronici prodotti all'interno del sole possono subire una trasformazione all'interno del sole stesso e trasformarsi in neutrini di altri sapori;

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_M \sin^2 \frac{\pi L}{L_M}$$

La probabilita' di oscillazione dipende da:

- L'angolo di mixing  $\theta$ ;
- L'energia del neutrino  $E$ ;
- Il percorso compiuto  $L$ ;
- La differenza del quadrato delle masse dei  $\nu$   
 $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ ;
- La densita'  $\rho$  all'interno del sole;

Nota!!

Noto!!

Nota!!

$$\sin 2\theta_M = \frac{\sin 2\theta}{\sqrt{1 - \frac{2L_{osc} \cos 2\theta}{K} + \left(\frac{L_{osc}}{K}\right)^2}}$$

$$L_M = \frac{L_{osc}}{\sqrt{1 - \frac{2L_{osc} \cos 2\theta}{K} + \left(\frac{L_{osc}}{K}\right)^2}}$$

$$K = \frac{2\pi}{\sqrt{2} G_F N_e} = \frac{1.7 \times 10^7}{\rho \frac{Z}{A}} \text{ m}$$

Nell'ipotesi di oscillazione nella materia, dai risultati sperimentali e' possibile ricavarsi l'angolo di mixing  $\theta$  e  $\Delta m^2$ !

# Riassumendo

- L'ipotesi di oscillazione del neutrino offre una elegante soluzione al problema del neutrino solare:

## I 3 problemi del neutrino solare

- 1) Tutti gli esperimenti vedono un flusso significativamente inferiore a quello previsto (1/2 o 1/3);
- 2) I risultati di SuperK e Homestake sono inconsistenti fra di loro;
- 3) Gallex misura un flusso consistente con la sola sorgente pp (e' quella prevista con maggiore precisione in quanto direttamente legata alla luminosita' solare): non c'e' spazio per gli altri tipi di neutrino;

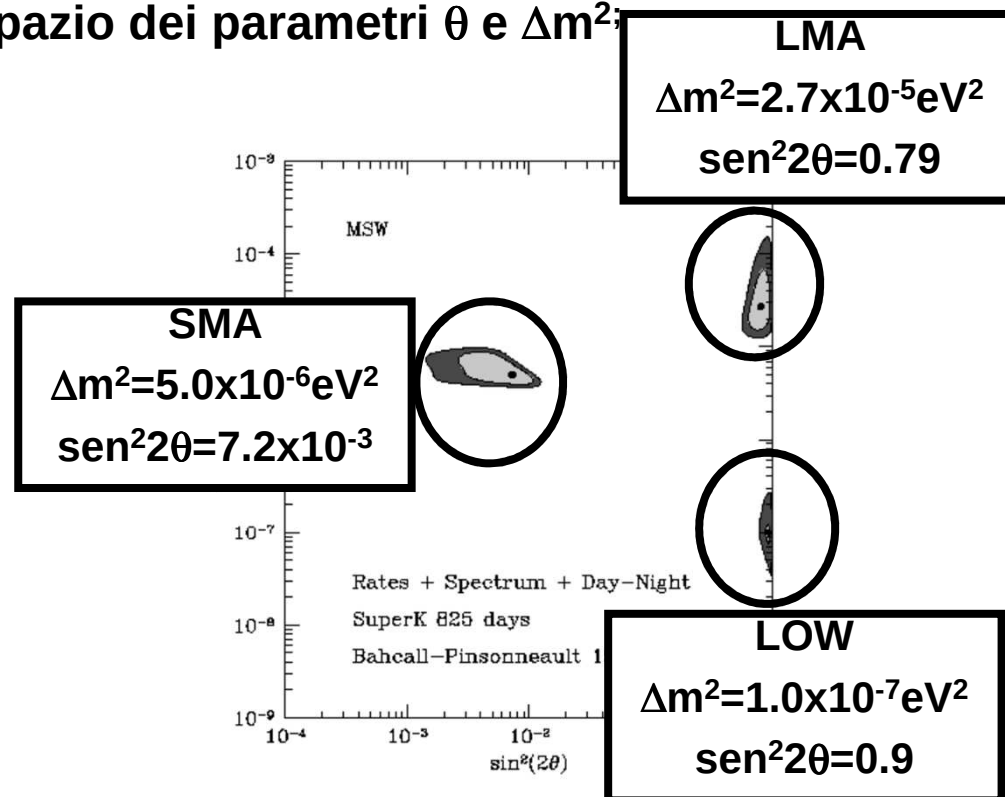
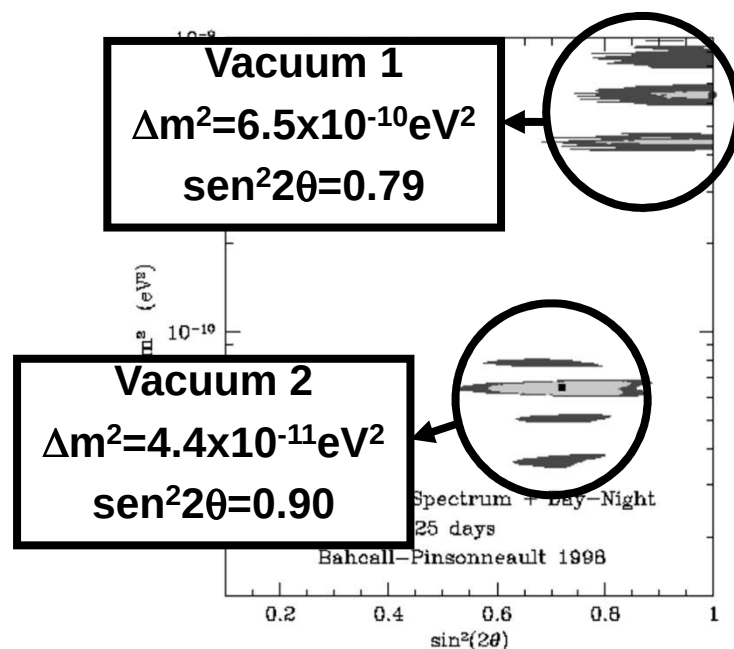
## Le soluzioni

- 1) Parte dei  $\nu_e$  oscillano in  $\nu$  di altri sapori; gli esperimenti sono "ciechi" o "parzialmente ciechi" ai  $\nu$  di altri sapori e quindi vedono un flusso minore del previsto;
- 2) Homestake e' "cieco" a  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$ ; SuperK invece e' parzialmente cieco". Inoltre vedono neutrini di energie diverse e la probabilita' di oscillazione dipende dall'energia!
- 3) La probabilita' di oscillazione dipende dall'E; se e' minore per basse energie i neutrini da pp sono meno soppressi degli altri;



# Confronto teoria/esperimenti

- Si noti che l'ipotesi di oscillazioni nel vuoto e oscillazioni nella materia sono in realta' due facce della stessa medaglia: si fondano sulla stessa base teorica e dipendono (seppur in modo diverso) dagli stessi parametri: dall'angolo di mixing  $\theta$  e da  $\Delta m^2$ ;
- L'analisi combinata dei risultati degli esperimenti descritti fino ad ora, Homestake, Gallex, Sage, Kamiokande e Superkamiokande seleziona diverse regioni possibili nello spazio dei parametri  $\theta$  e  $\Delta m^2$ ;



**Il primo esperimento che ha confermato l'ipotesi di oscillazioni e' SNO (Subdury Neutrino Observatory);  
I punti cruciali di questo esperimento sono:**

- **Misura il flusso di neutrini di tutti i sapori proveniente dal sole ;**
- **Lo trova in accordo con le previsioni teoriche:**



**Conferma il Modello Solare Standard**

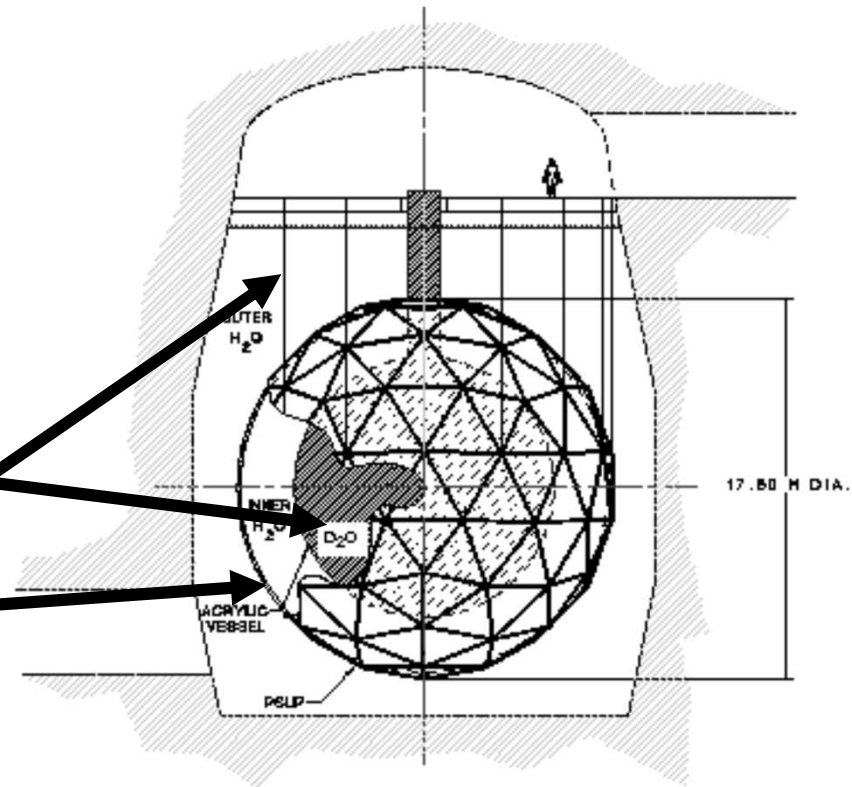
- **Misura il flusso di neutrini elettronici proveniente dal sole ;**
- **Lo trova piu' piccolo del flusso totale:**



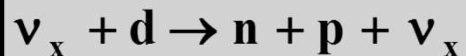
**Dimostra che c'e' una componente NON elettronica  
nel flusso di neutrini proveniente dal sole**

# SNO: Sudbury Neutrino Observatory

- Costruito in una miniera di Nichel (Creighton Mine) a Sudbury (Canada);
- 2000 m di profondita';
- Ha cominciato a prendere dati nel 1999;
- Sfrutta 1000 ton di acqua pesante ( $D_2O$ ) contenute in un pallone sferico di  $\varnothing=12m$ ;
- 10000 tubi fotomoltiplicatori montati su una struttura di 18m;
- Schermato da  $H_2O$ ;
- Rivelatore di luce Cerenkov;

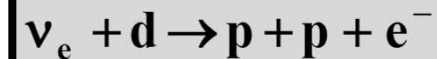


Per misurare il flusso TOTALE di  $\nu$ :  
Correnti Neutre (NC)



$$E_{th} = 2.2 \text{ MeV}$$

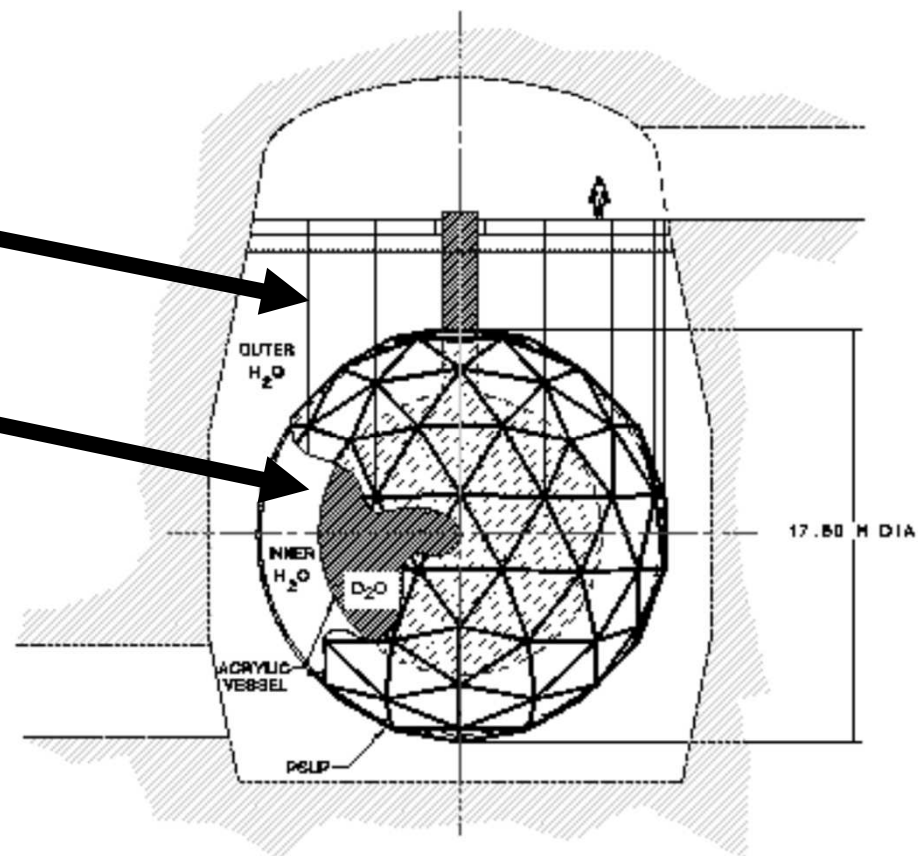
Per misurare il flusso di  $\nu_e$ :  
Correnti Cariche (CC)



$$E_{th} = 1.4 \text{ MeV}$$

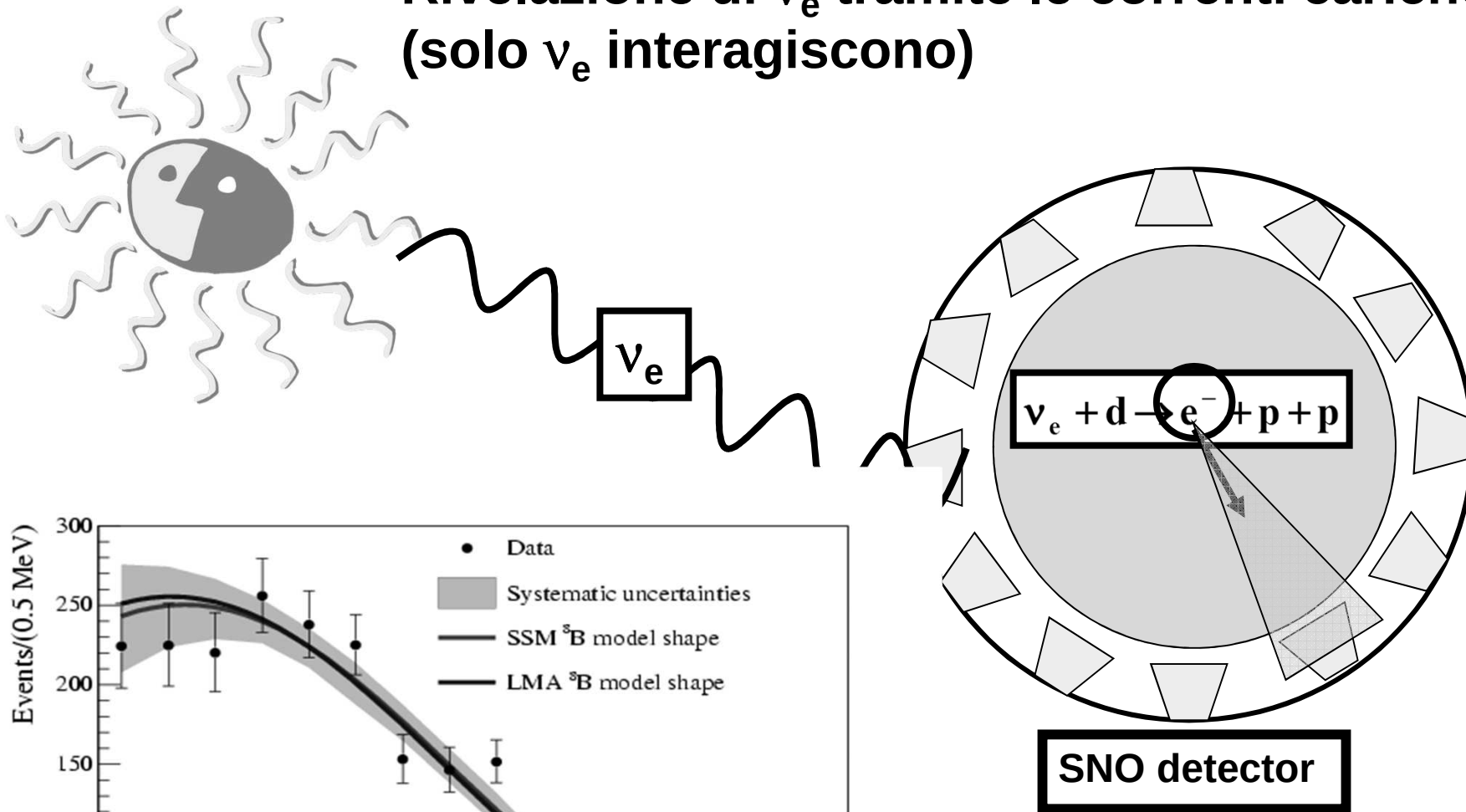
# La riduzione del fondo in SNO

- SNO si trova a circa 2000 m di profondità: il fondo dovuto a raggi cosmici e' trascurabile;
- Il fondo dovuto alla radioattivita' della roccia e' schermato da 5300 ton di  $H_2O$ ;
- Il fondo dovuto alla radioattivita' dei fototubi e' schermato da 1700 ton di  $H_2O$ ;
- Rimane comunque la radioattivita' dell'acqua pesante che produce luce Cerenkov che da un segnale di energia fra (0-6) MeV;
- E' necessario mettere una soglia sperimentale di  $\sim 5-6$  MeV;

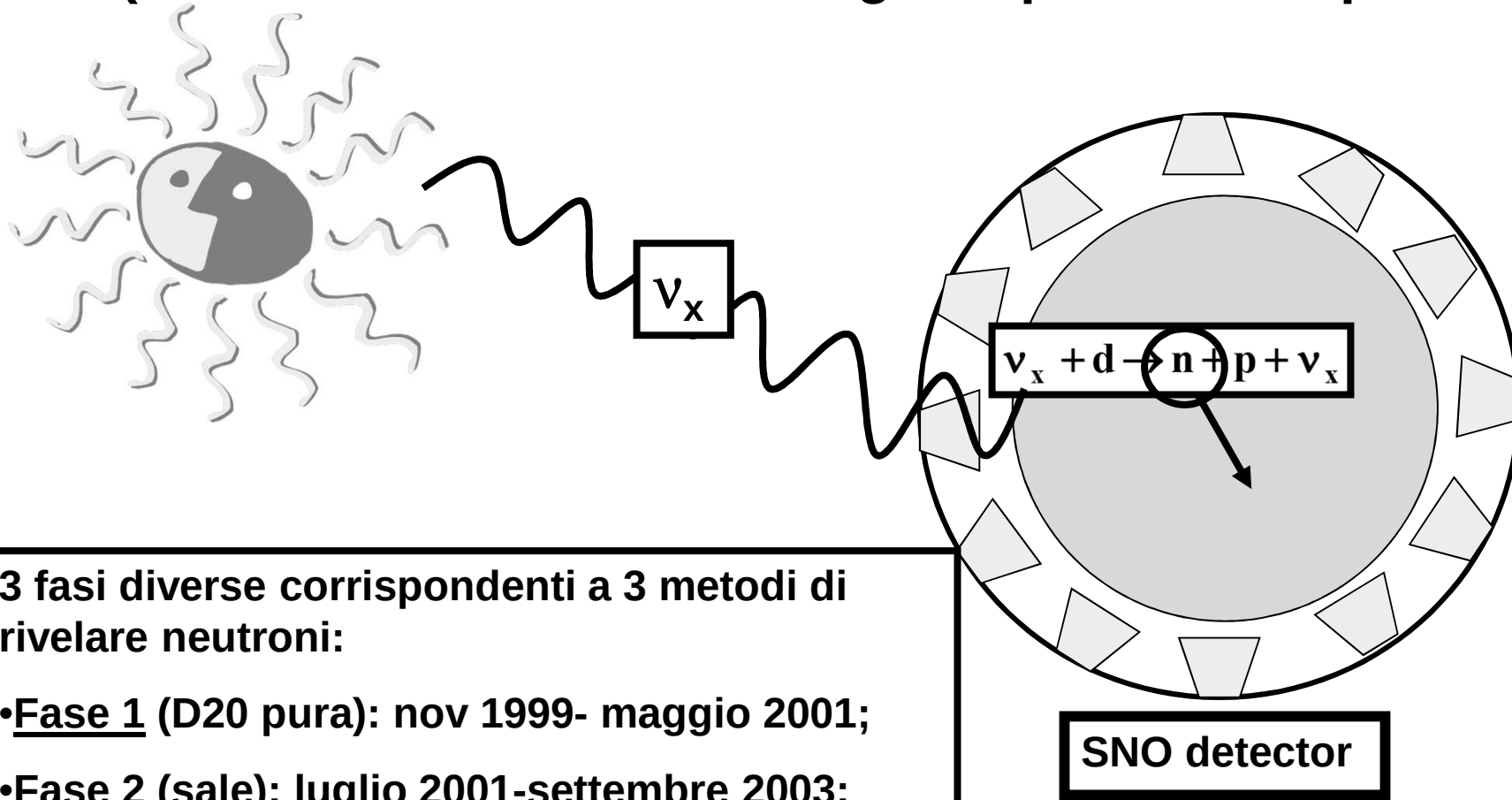


**SNO, come SUPERK, e' sensibile SOLO ai neutrini da  $^8B$**

## Rivelazione di $\nu_e$ tramite le correnti cariche (solo $\nu_e$ interagiscono)



## Rivelazione del flusso totale tramite le correnti neutre (la sezione d'urto di NC e' uguale per tutti i sapori di $\nu$ )



**3 fasi diverse corrispondenti a 3 metodi di rivelare neutroni:**

- **Fase 1** (D20 pura): nov 1999- maggio 2001;
- **Fase 2** (sale): luglio 2001-settembre 2003;
- **Fase 3** (contatori He3): estate 2004-dic 2006;

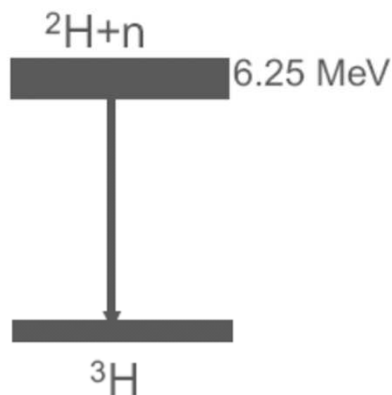
**Il rate atteso e' di circa 10 ev/giorno;**

# 3 metodi diversi per rivelare i neutroni

## Phase I (D<sub>2</sub>O)

Nov. 99 - May 01

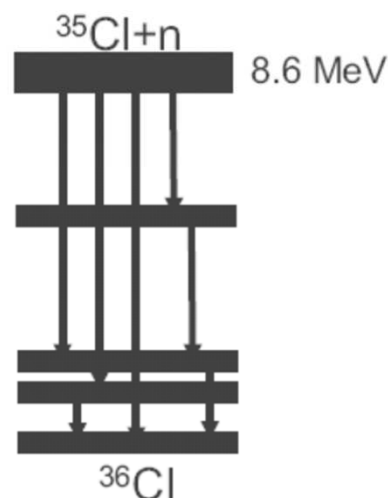
n captures on  
 $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$   
 $\sigma = 0.0005 \text{ b}$   
 Observe 6.25 MeV  $\gamma$   
 PMT array readout  
 Good CC



## Phase II (salt)

July 01 - Sep. 03

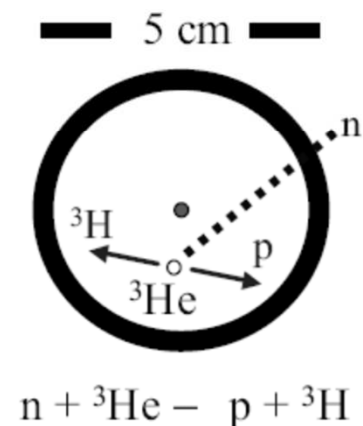
2 t NaCl. n captures on  
 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$   
 $\sigma = 44 \text{ b}$   
 Observe multiple  $\gamma$   
 PMT array readout  
 Enhanced NC



## Phase III ( $^3\text{He}$ )

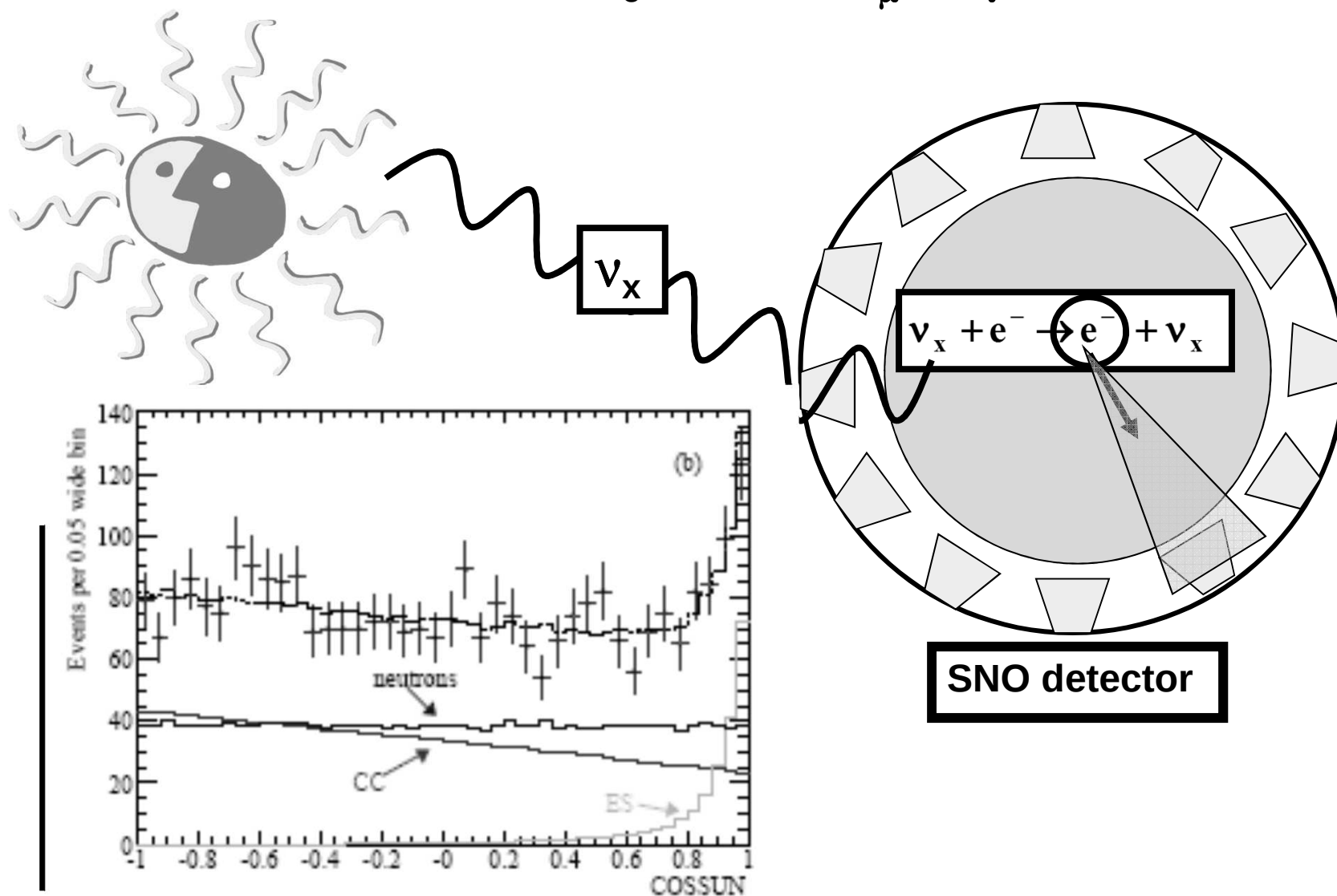
Summer 04 - Dec. 06

40 proportional counters  
 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$   
 $\sigma = 5330 \text{ b}$   
 Observe p and  $^3\text{H}$   
 PC independent readout  
 Event by Event Det.



Grazie all'uso di tre tecniche completamente diverse per rivelare i neutroni, SNO riesce ad avere un controllo molto forte sugli errori sistematici

**Rivelazione del flusso totale tramite scattering  
(stessa reazione di SuperK). La sezione d'urto e'  
maggiore per  $\nu_e$  che per  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$**





# Risultati di SNO

La potenza di questo esperimento sta nella ridondanza di informazioni: le quantità rilevanti vengono misurate in modi diversi per avere un cross-check delle sistematiche;

E' come se fossero tanti esperimenti in uno solo;

|    |                                                                     |                                                                                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NC | $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$<br>$E_{th} = 2.2 \text{ MeV}$ | $\phi_{NC} = 4.94^{+0.21}_{-0.21}(\text{stat.})^{+0.38}_{-0.34}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ |
|----|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

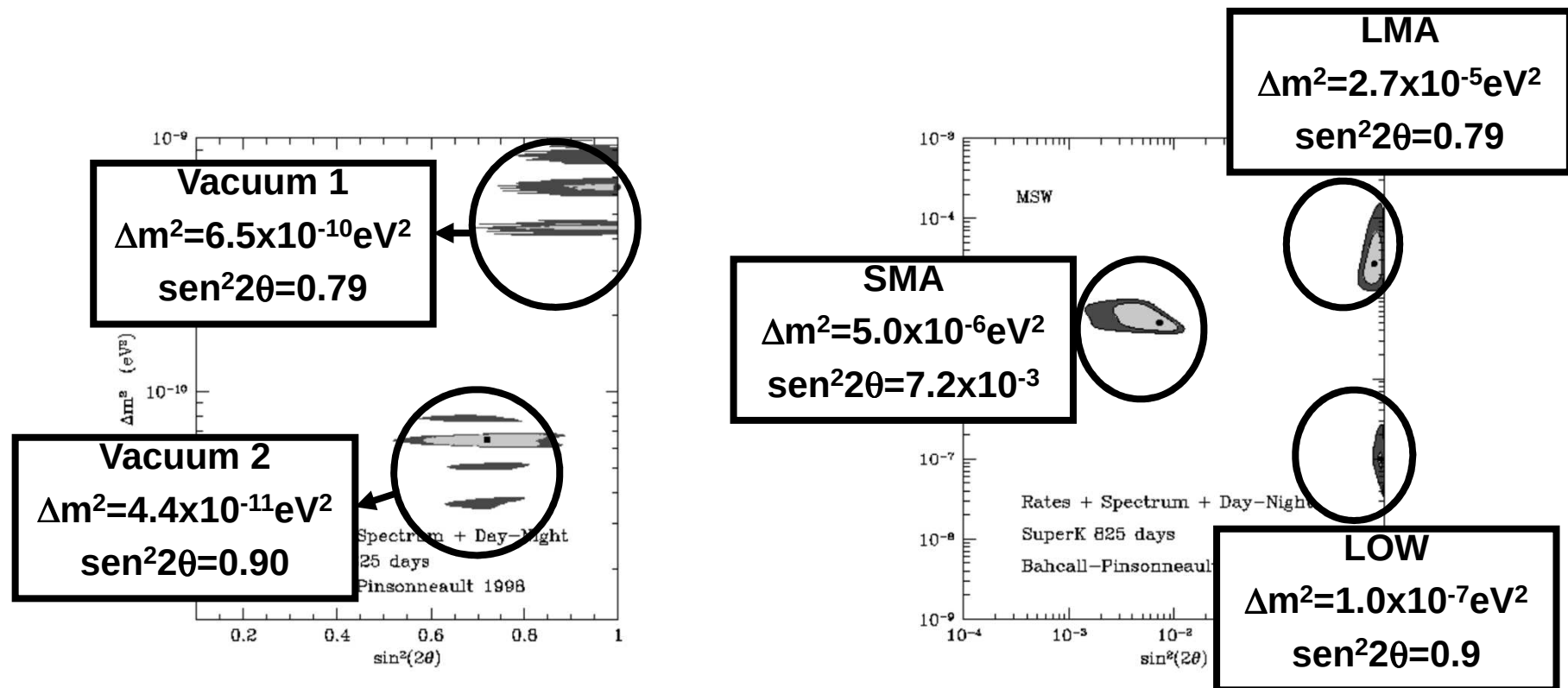
|    |                                                                   |                                                                                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CC | $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$<br>$E_{th} = 1.4 \text{ MeV}$ | $\phi_{CC} = 1.68^{+0.06}_{-0.06}(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.09}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ |
|----|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|    |                                                                   |                                                                                                                             |
|----|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ES | $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$<br>$E_{th} = 0 \text{ MeV}$ | $\phi_{ES} = 2.35^{+0.22}_{-0.22}(\text{stat.})^{+0.15}_{-0.15}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ |
|----|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi_{\text{Teorico}} = 5.82 \pm 1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------|

# Confronto teoria/esperimenti

- Dove eravamo rimasti?
- L'analisi dei dati di Homestake, Superk, Gallex, Sage portava a selezionare, nell'ipotesi di oscillazione, alcune regioni nello spazio dei parametri



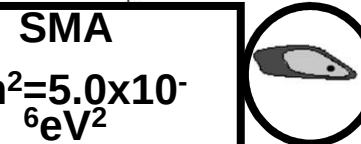
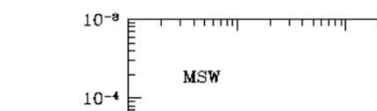
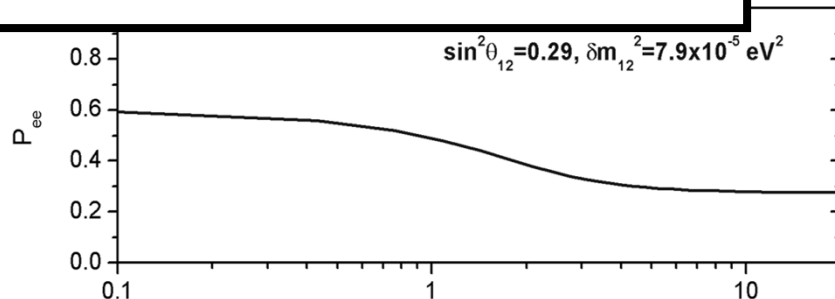
- I risultati di SNO hanno permesso di confermare l'ipotesi di oscillazione del neutrino come soluzione del problema del neutrino solare;
- Rimane il dubbio: oscillazioni della materia o oscillazioni nel vuoto? E con quali valori dei parametri?
- L'analisi combinata dei dati di SNO, di TUTTI gli altri esperimenti sul neutrino solare e dei dati di Kamland (un esperimento sui neutrini da reattore) ha permesso di rispondere a questa domanda;
- I dati favoriscono nettamente l'ipotesi di oscillazioni nella materia e in particolare la soluzione detta di Large Mixing Angle

Soluzione LMA (Large Mixing Angle)

$$\Delta m^2 = 7.9_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

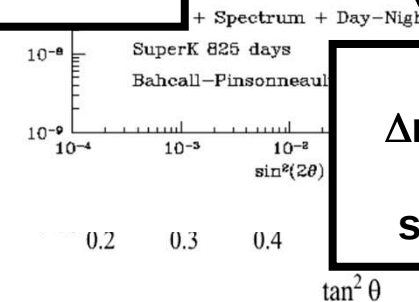
$$\tan^2 \theta = 0.40_{-0.07}^{+0.10}$$

Survival probability for LMA solution



SMA  
 $\Delta m^2 = 5.0 \times 10^{-6} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta = 7.2 \times 10^{-3}$

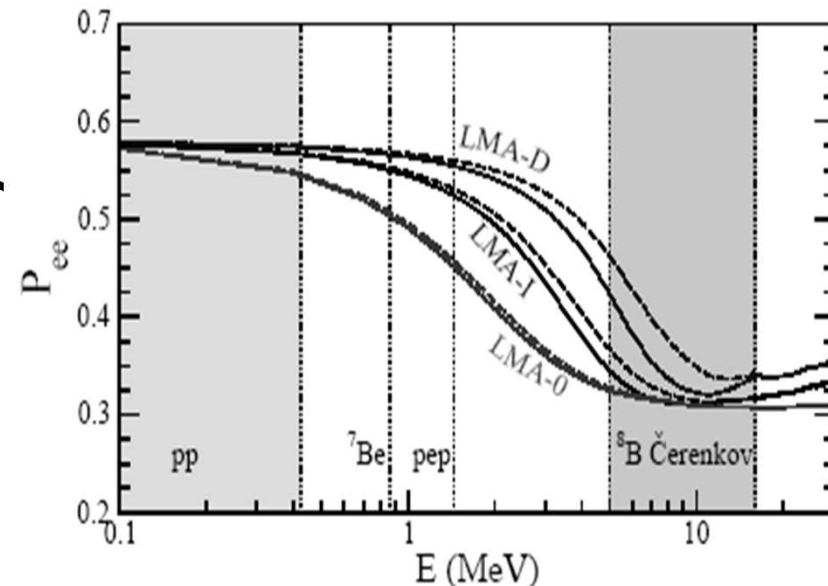
LMA  
 $\Delta m^2 = 2.7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta = 0.79$



LOW  
 $\Delta m^2 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ eV}^2$   
 $\sin^2 2\theta = 0.9$

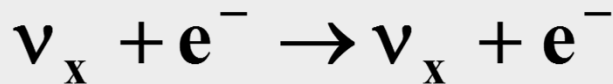
# Nuovi esperimenti sui neutrini solari: Borexino

- Fino ad oggi, gli unici esperimenti in grado di rivelare neutrini solari al di sotto di 1 MeV sono gli esperimenti radiochimici (Homestake, Gallex, Sage);
- Gli esperimenti in tempo reale (Kamiokande, SuperK, SNO) hanno tutti una soglia superiore ai 5 MeV;
- La maggior parte del flusso di neutrini solari (98%) e' al di sotto del MeV!! Vuol dire che fino ad oggi la conferma del Modello Solare Standard e' stata fatta osservando in tempo reale solo il 2 % dei neutrini solari;
- In particolare, il flusso di neutrini dovuti alla sorgente  ${}^7\text{Be}$  e' quello noto sperimentalmente con la maggiore incertezza;
- E' importante misurarlo direttamente in tempo reale con un esperimento dedicato;
- Borexino e' stato ideato per questo;



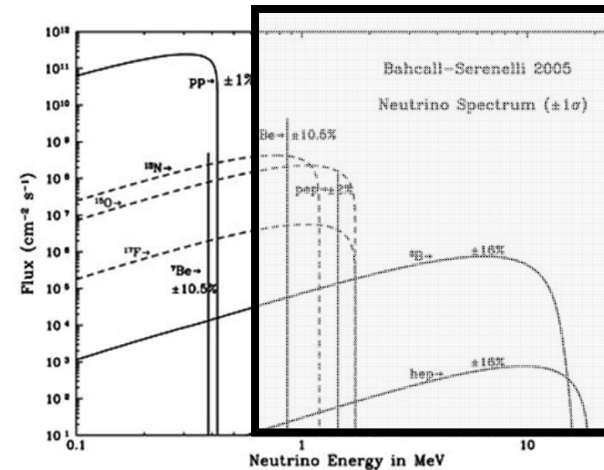
# Borexino

- Borexino e' stato costruito nei Laboratori sotterranei del Gran Sasso in Abruzzo (~1.5Km di profondita');
- E' composto da 300 tonnellate di scintillatore liquido (pseudocumene+PPO);
- Sfrutta la reazione:



$$\sigma \approx 10^{-44} \text{ cm}^2$$

- Si noti che:
- La reazione non ha soglia intrinseca;
- In realta' pero', il fondo dovuto al decadimento del  $^{14}\text{C}$  (vedi dopo) impone una soglia di ~ 250keV;



- La reazione e' sensibile a tutti i sapori di neutrino;
- La sezione d'urto e' maggiore per i neutrini elettronici;

# Borexino

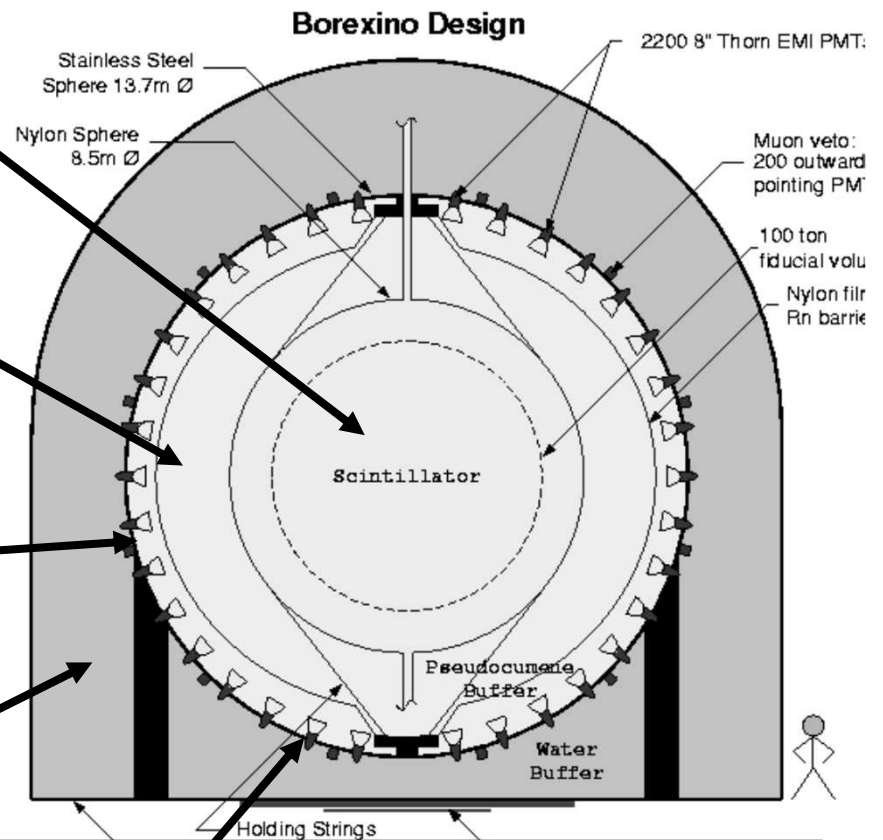
- Borexino si trova sotto la montagna del Gran Sasso che fornisce uno schermo contro il flusso di raggi cosmici (flusso residuo =  $1 \mu / \text{m}^2 \text{ h}$ );
- Il cuore del rivelatore e' schermato da strati di materiale sempre piu' puro andando dall'esterno verso l'interno;

Cuore del rivelatore: 300 tonnellate di liquido scintillatore contenute in un vessel sferico di nylon ( $r = 4.25 \text{ m}$ );

1<sup>st</sup> schermo: 1000 ton di liquido ultrapuro (pseudocumene) contenuto in una sfera di acciaio (SSS) ( $r = 7 \text{ m}$ );

2214 fotomoltiplicatori sono montati sulla sfera di acciaio e puntano verso il centro per vedere la luce di scintillazione;

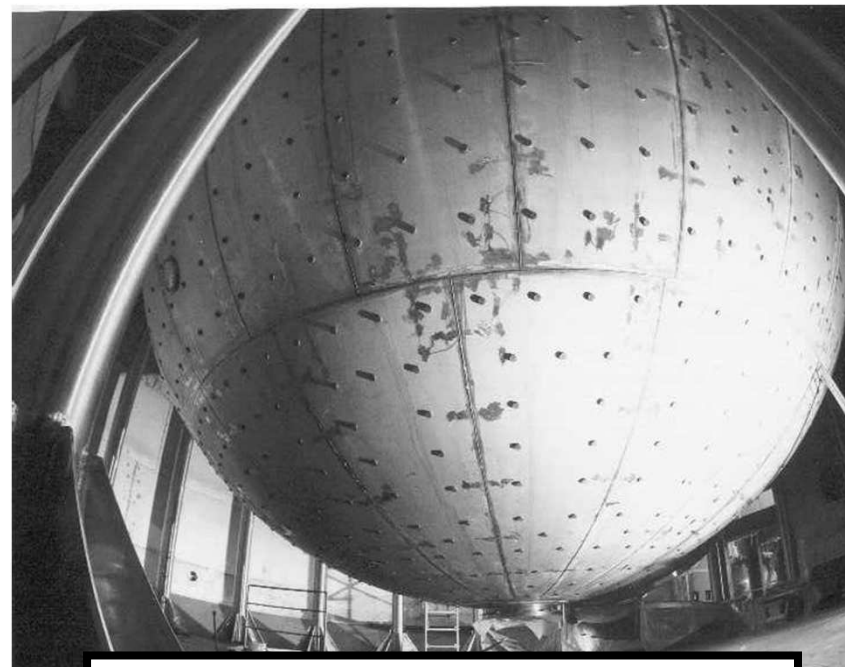
Secondo schermo: 1000 ton di acqua ultrapura contenute in una tanica cilindrica;



200 PMTs sono montati sulla parte esterna della sfera di acciaio per rivelare la luce Cerenkov emessa dai muoni cosmici che attraversano l'acqua di schermo;



Sala sperimentale al Gran Sasso (Hall C)



Sfera in acciaio (SSS)

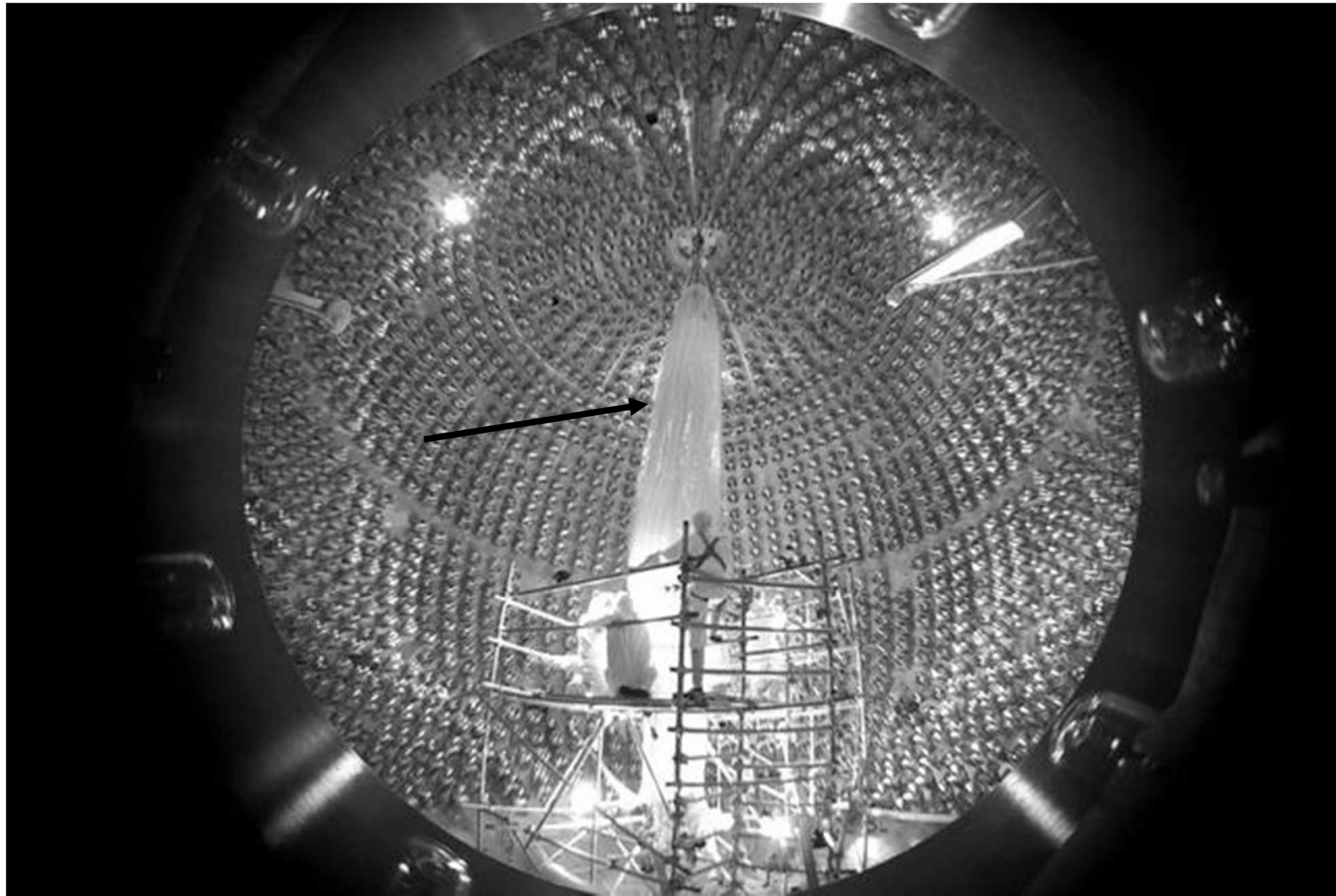


PMTs pronti per l'istallazione



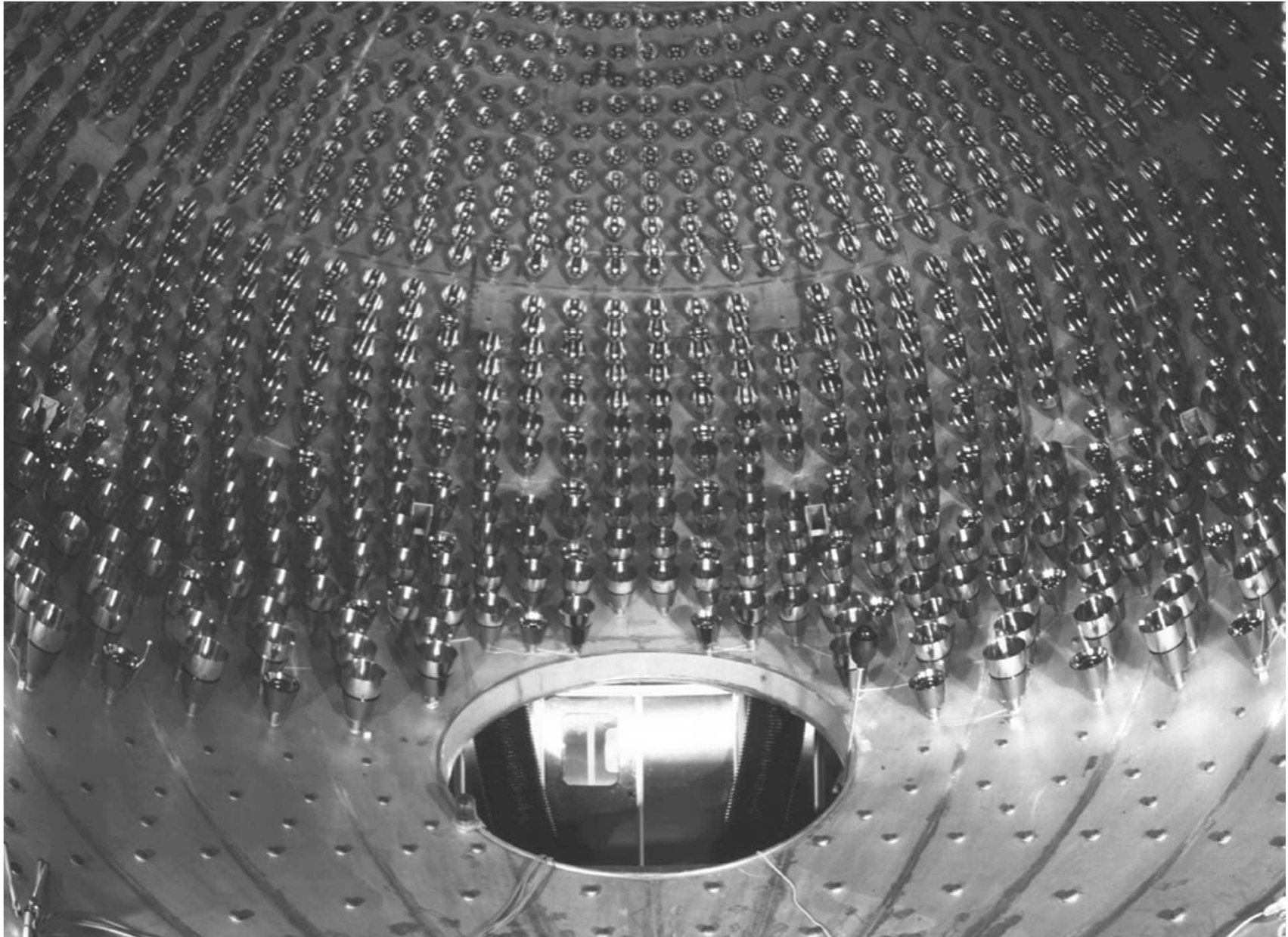
Istallazione delle fibre ottiche

# Istallazione dei vessel di nylon



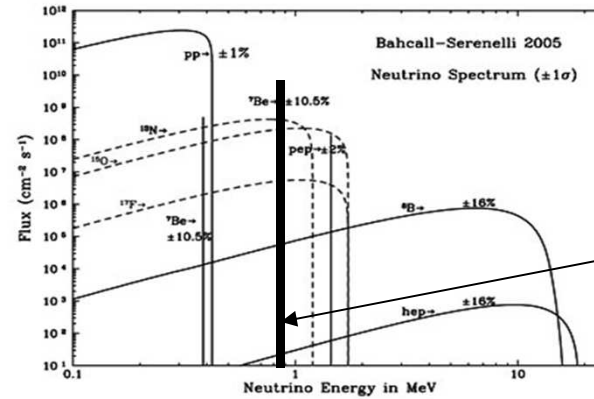
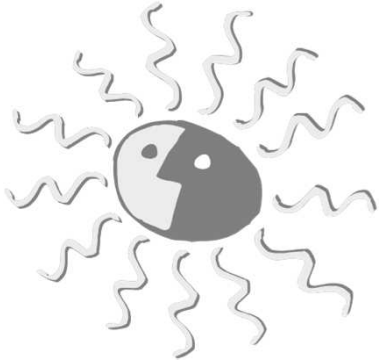


# Istallazione dei fototubi



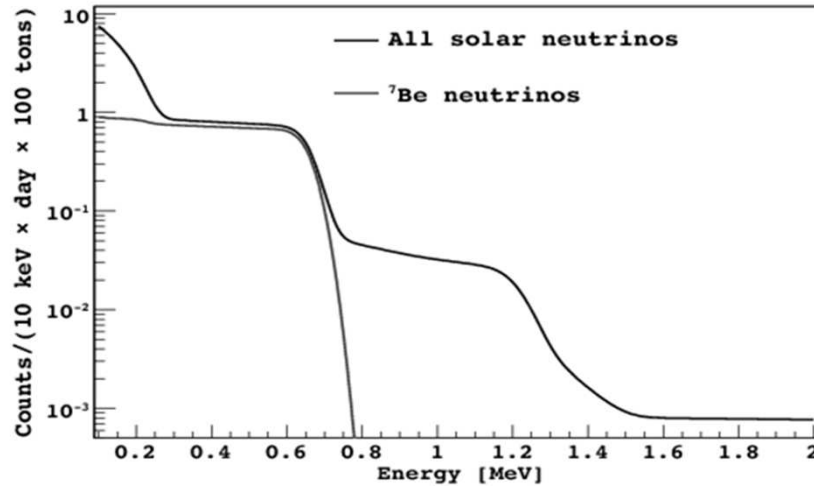
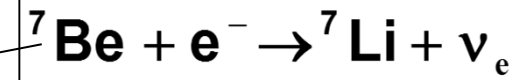
## Chiusura finale della sfera di acciaio





Monocromatica !  $E_\nu = 862 \text{ keV}$

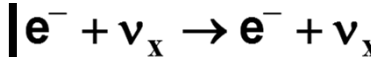
$$\Phi_{\text{SSM}} = 4.8 \times 10^9 \text{ v/sec/m}^2$$



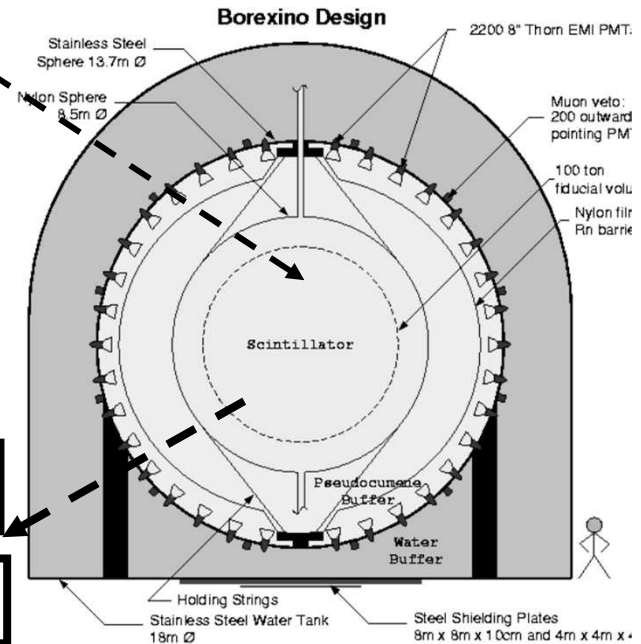
Soglia = 0.25 MeV

$\nu_e$

$\nu_x$



$$\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$$



Il numero di neutrini atteso se non ci fossero oscillazioni  $e'$   
 di  $\sim 70 \text{ ev/giorno}$

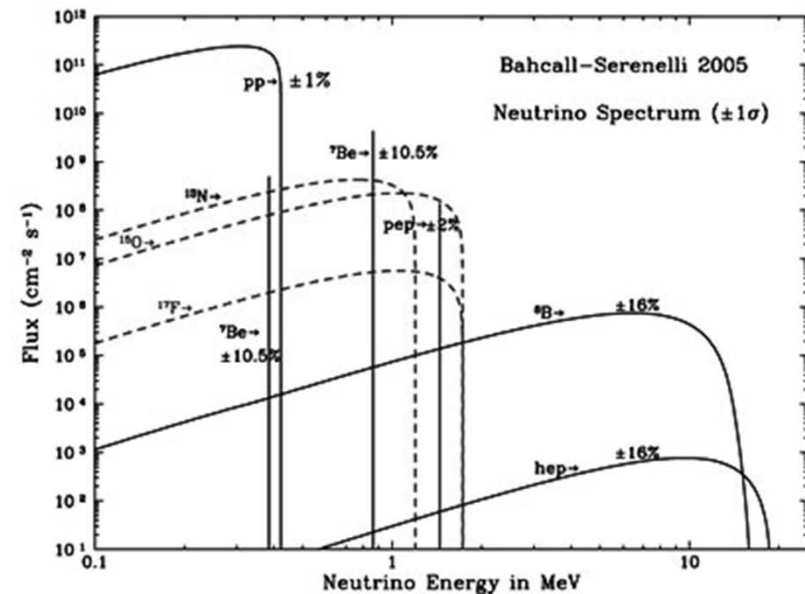
# **Il problema del fondo in Borexino**

- **N.B.: notiamo che la luce di scintillazione a differenza di quella Cerenkov NON e' direzionale, quindi Borexino non puo' avvalersi di questa informazione per accertarsi che il segnale che vede provenga dal sole;**
- **Questo rende ancora piu' critico il problema fondo;**
- **Possiamo classificare il fondo in due grandi categorie:**
  - FONDO ESTERNO: tutto cio' che proviene dalla regione esterna al cuore di scintillatore e che puo' provocare eventi che si confondono con eventi di neutrino; la strategia "a cipolla" con cui e' costruito Borexino serve proprio a ridurre questo tipo di fondo insieme alla collocazione in un laboratorio sotterraneo che lo scherma dai raggi cosmici;
  - FONDO INTERNO: radioattivita' dello scintillatore stesso;

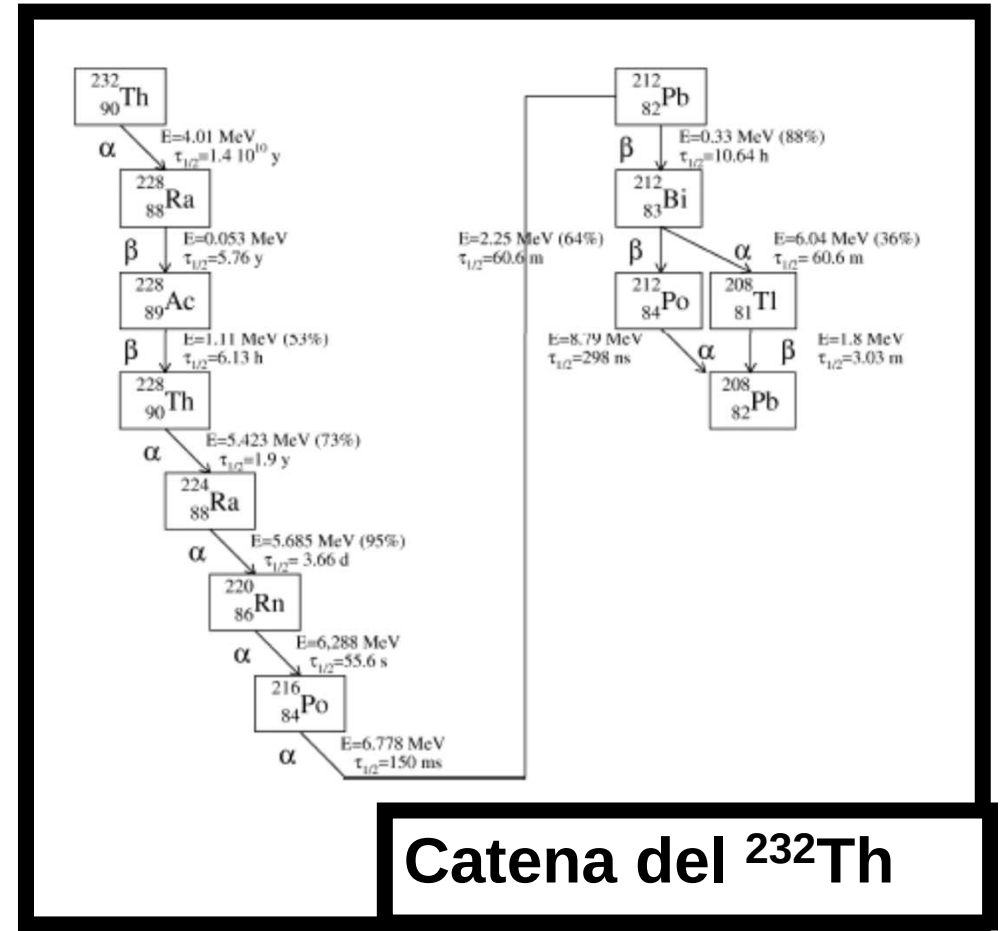
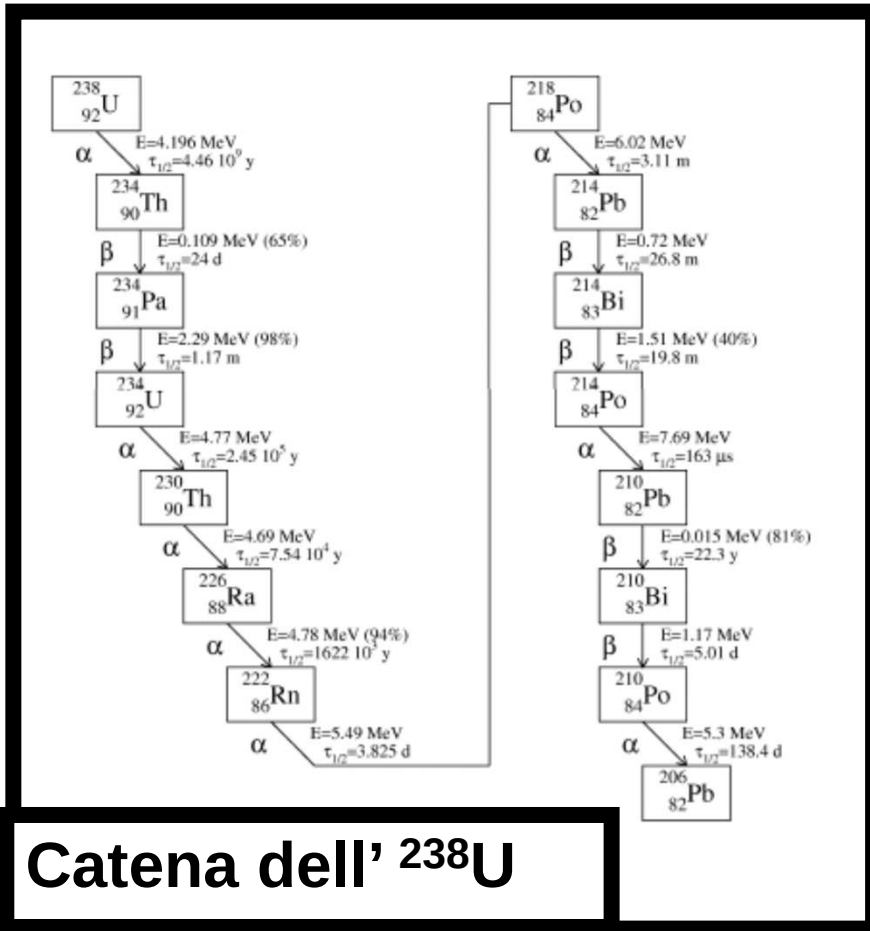
# Il problema del fondo interno in Borexino: $^{14}\text{C}$

- Dal momento che Borexino vuole osservare neutrini solari di bassa energia ( $E < 1 \text{ MeV}$ ) deve combattere con il fondo radioattivo che tenderebbe a oscurare il segnale;
- Un fondo radioattivo particolarmente fastidioso e' il  $^{14}\text{C}$  che decade  $\beta$  con un end-point di 156 keV e che produce qualche cosa come  $10^5$ - $10^6$  conteggi/giorno in Borexino!
- Questo fondo non e' riducibile perche' il C e' parte costituente della molecola di scintillatore usato in Borexino;

- il segnale di neutrino sarebbe molto inferiore al fondo da  $^{14}\text{C}$ ;
- Quindi si rinuncia a osservare eventi nella finestra di energia al di sotto di 250 keV;
- Per questo motivo Borexino non e' in pratica sensibile ai neutrini da pp;



# Il fondo radioattivo: $^{238}\text{U}$ e $^{232}\text{Th}$



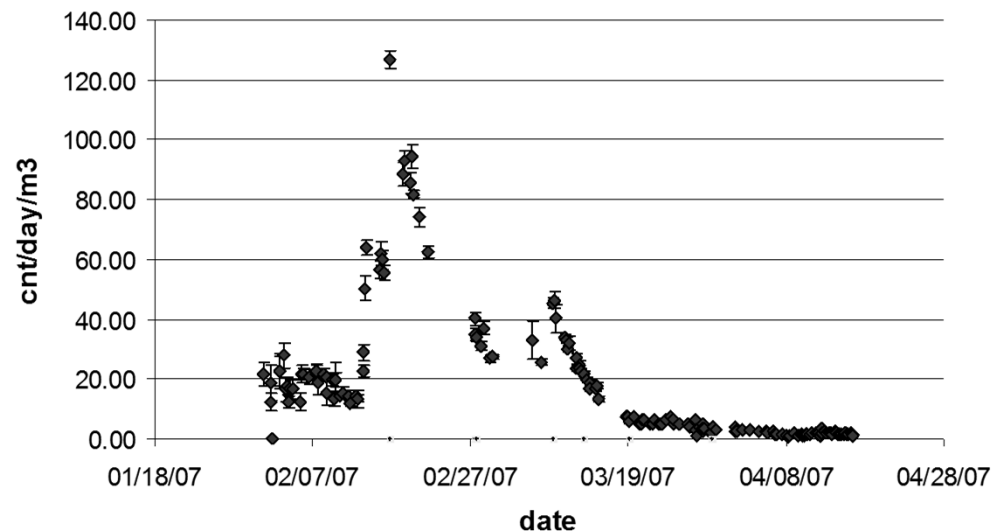
- Notiamo che la maggior parte degli isotopi radioattivi presenti nelle due catene, producono eventi nella regione di interesse per i neutrini solari!
- Persino i decadimenti con emissione di particelle α che sembrerebbero a piu' alte energie (5 MeV, 7 MeV) in realta' producono un'energia apparente nello scintillatore di ~500, 700 keV (fenomeno del quenching di luce)

# **Il fondo radioattivo: $^{238}\text{U}$ e $^{232}\text{Th}$**

- Perche' il fondo radioattivo dovuto alle catene dell'U e del Th non sia dominante sul segnale di neutrino, e' necessario che la contaminazione dello scintillatore sia non superiore a  $\sim 10^{-16}$  g/g;
- Per raggiungere questi livelli di radiopurezza e' stato necessario costruire degli impianti dedicati a purificare lo scintillatore "in-linea" ovvero poco prima di venire immesso nel rivelatore;
- Il processo di purificazione utilizzato e' la distillazione;
- Grazie a questo sforzo, lo scintillatore e' risultato addirittura piu' pulito in Uranio e Torio rispetto alle specifiche di progetto  $\sim 10^{-17}$  g/g;
- Questa contaminazione corrisponde a  $\sim 20$  conteggi al giorno di U e Th in BX;

# Il problema del Radon

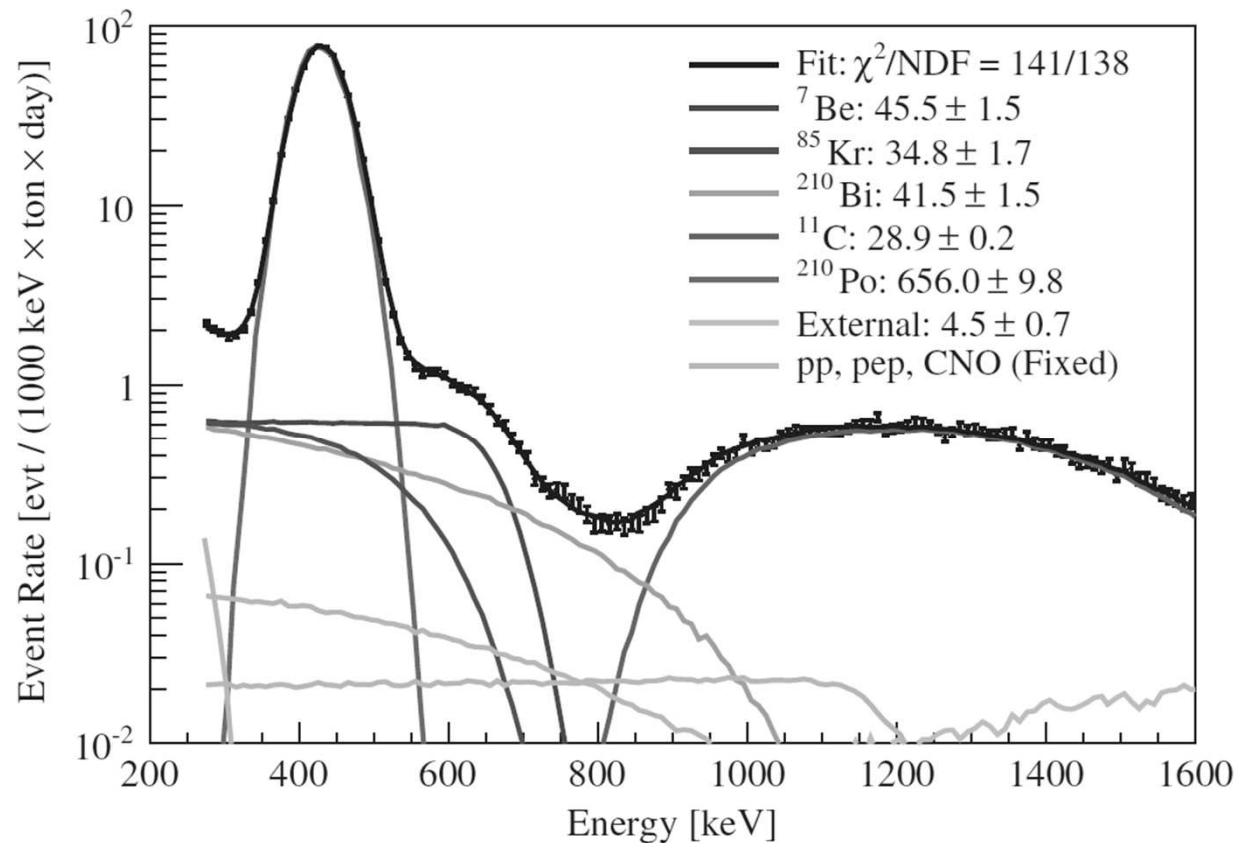
- Il Radon e' presente ovunque nell'aria (e' un isotopo che fa parte della catena dell' $^{238}\text{U}$ ) con un'attivita' tipica di  $\sim 10\text{Bq/l}$ ;
- Per fortuna il Rn decade in 5 giorni!;
- Se si infiltra nel rivelatore puo' comunque causare seri problemi di fondo alla misura del flusso di neutrini solari tutto deve essere rigorosamente a tenuta!



- Per rimuovere il radon e altri gas che possono essere presenti nello scintillatore (come Ar e Kr) si e' flussato tutto lo scintillatore con azoto ultra-puro;



# Risultati di Borexino



**Flusso da  $^7\text{Be}$   $\nu$ :  $46 \pm 1.5_{\text{STAT}} \pm 1.5_{\text{SYS}}$  c/d/100 t**

**PRL 107 (2011)141302**

**Flusso previsto in assenza di oscillazioni:  $74 \pm 4$  c/d/100 t**

# Risultati di Borexino dopo 4 anni

- Borexino e' il primo esperimento in tempo reale a vedere i neutrini solari da  ${}^7\text{Be}$ ;
- Borexino conferma le oscillazioni del neutrino nell'ipotesi di LMA con i parametri  $\Delta m^2$ - $\sin^2 2\theta$  che vengono fuori dal fit agli altri esperimenti sul neutrino solare

Soluzione LMA (Large Mixing Angle)

$$\Delta m^2 = 7.9_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta = 0.40_{-0.07}^{+0.10}$$

- Grazie al fatto che il livello di radiopurezza raggiunta e' persino meglio di quella di progetto, Borexino ha dato risultati interessanti anche su altre delle sorgenti di neutrino solare fino ad ora mai osservate in tempo reale: pep e CNO;
- Potra' forse dare risultati anche sul flusso da pp;
- E' in corso una nuova campagna di purificazione per migliorare ulteriormente le condizioni di radiopurezza dello scintillatore

# **Neutrini da Supernova**

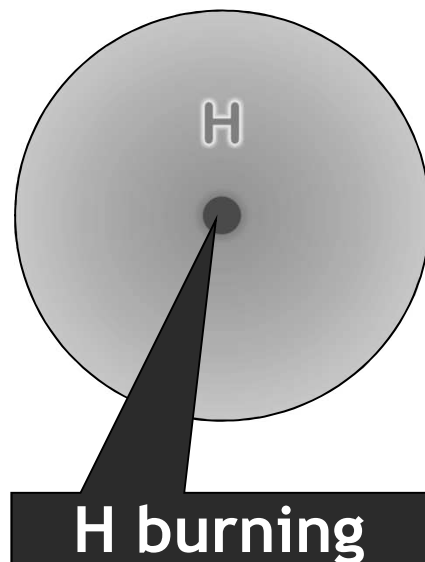
# Neutrini da Supernova

- Supernove di tipo I sono quelle che hanno origine da stelle poco massive ( $M \sim M_{\odot}$ );
- Supernove di tipo II sono quelle che hanno origine da stelle molto massive ( $M > 8M_{\odot}$ ) e che lasciano una stella di neutroni come residuo;
- Ci concentreremo sulle Supernove di tipo II;

# La vita (e la morte) di una stella... ( $M > 8M_{\odot}$ )

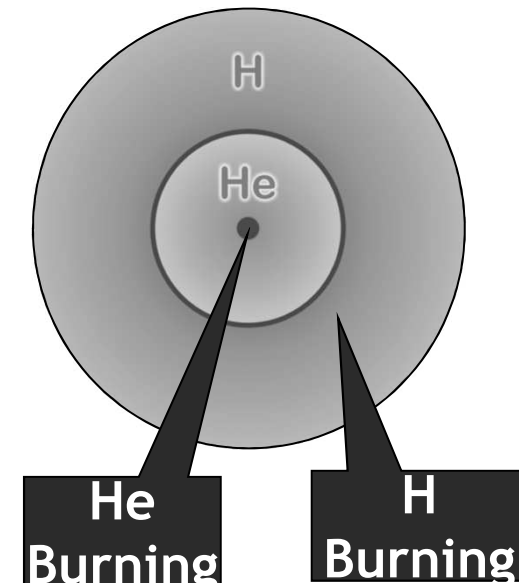
## Stella nella sequenza principale

- All'interno di grandi quantitativi di H gassoso si formano cluster più densi per effetto di fluttuazioni statistiche gravitazionali;
- $\rho = 10 \text{ g/cm}^3$     $T \sim 10^7 \text{ K}$
- Comincia ad aver luogo il ciclo pp;
- Durata di questa fase  $\sim 10^7$  anni



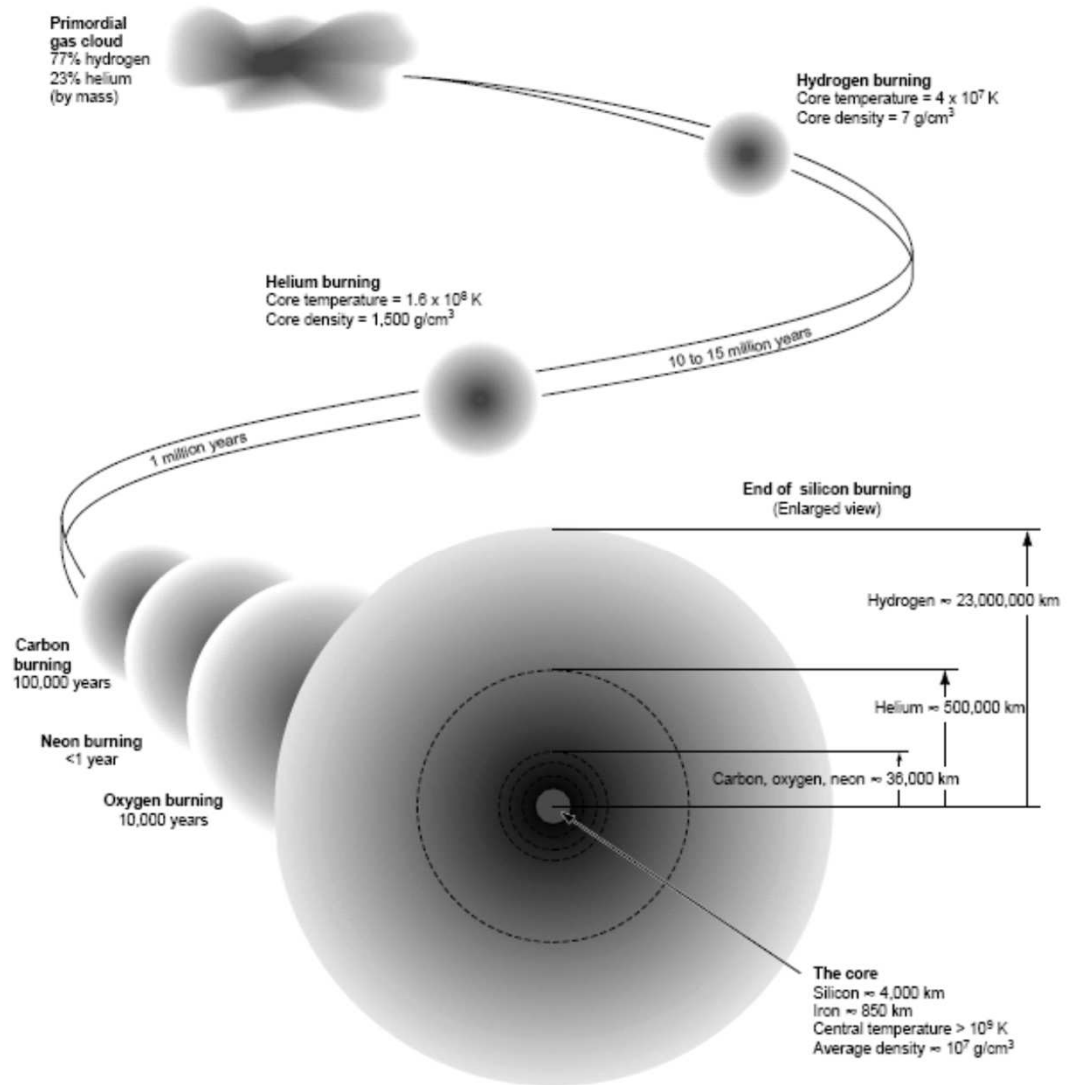
## Stella che brucia He

- Nel ciclo pp si produce He che “cade” verso il centro;
- Quando si esaurisce l'H la stella si contrae per la gravitazione;  
 $\rho = 10^5 \text{ g/cm}^3$     $T \sim 10^8 \text{ K}$   
Comincia a bruciare l'He;  
He produce C;
- Durata di questa fase  $\sim 10^6$  anni;



# La vita (e la morte) di una stella.. ( $M > 8M_{\odot}$ )

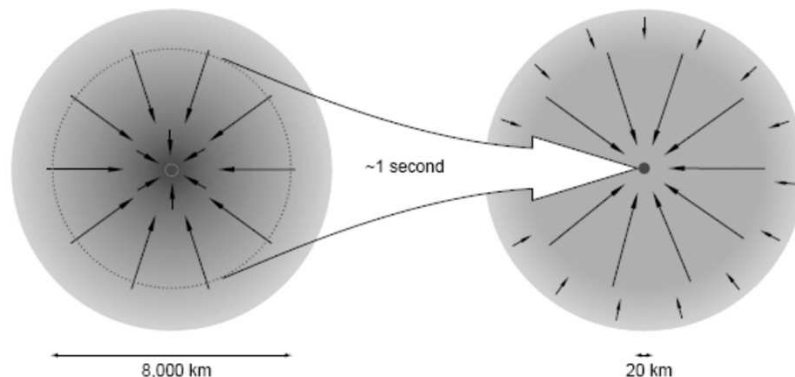
- Il processo continua: man mano che si esaurisce un carburante la contrazione gravitazionale innesca la reazione di elementi sempre piu' pesanti;
- La durata di ciascuna "fase" e' sempre piu' breve: per es. Carbonio brucia in  $\sim 10^5$  anni, Ossigeno in  $10^4$  anni, Si in 1 giorno!;
- Le reazioni di fusione proseguono fino alla formazione di elementi con  $A=60$  (gruppo del Fe);
- Le reazioni che coinvolgono il Fe non producono energia, ma la drenano;
- Quindi il processo si ferma quando tutto il Silicio viene bruciato



Struttura a "cipolla" della stella

# Il collasso (implosione) della stella

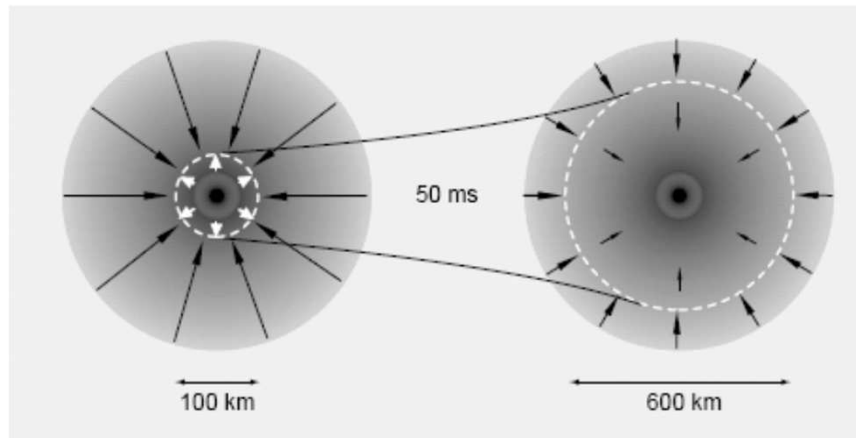
- Quando il Silicio finisce di bruciare, la regione centrale della stella (core d~ 8000 Km) collassa sotto la pressione gravitazionale;
- In meno di 1 sec ~ 1/3 della sua massa si condensa in una palla di 20 Km di diametro; la densita' passa da  $10^7 \text{ g/cm}^3$  a  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  ;
- A densita' cosi' elevate succedono due cose che rendono “incomprimibile” la materia:
  - la forza “forte” comincia a diventare repulsiva;
  - i protoni e neutroni della stella formano un “gas di Fermi completamente degenere” che “resiste” ad essere ulteriormente compresso (Principio di esclusione di Pauli);
- Di conseguenza una volta raggiunta questa densita' il collasso gravitazionale trova improvvisamente resistenza e il cuore della stella invece che venire ulteriormente compresso, “rimbalza” indietro, ovvero si ri-espande velocemente (10000 Km/sec);



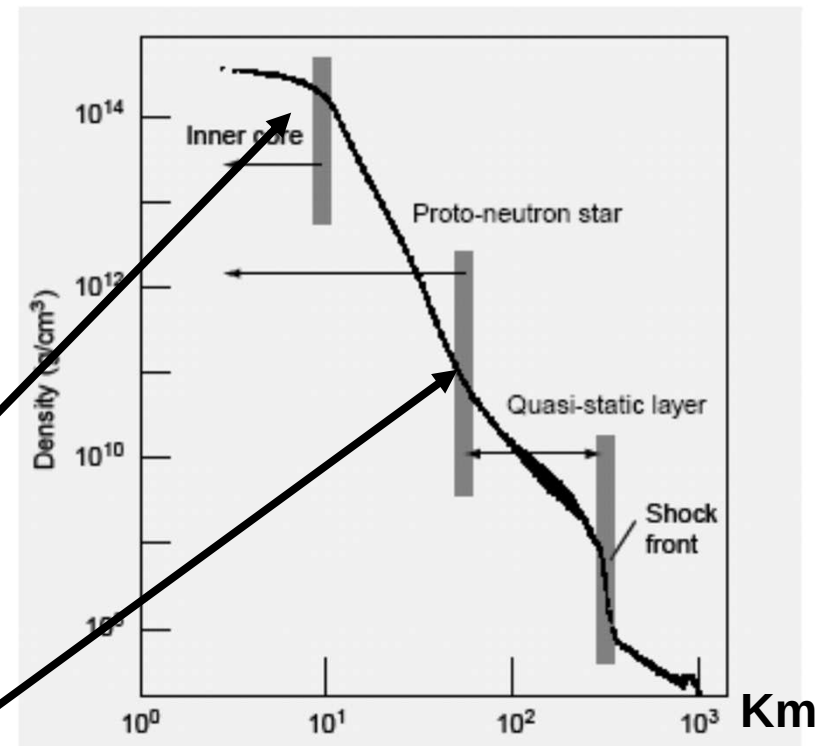
N.B.: questo succede, perche' la massa del core e' relativamente piccola: se  $M_{\text{core}} > 3M_{\odot}$  la gravitazione “vincerebbe” la resistenza del core e la compressione continuerebbe fino a produrre un buco nero;

## Dall'implosione all'esplosione della stella ...

- La parte piu' centrale della stella che ha gia' raggiunto il "muro" di massima densita', e' rimbalzato indietro e sta ri-espandendosi a  $\sim 10000 \text{ Km/sec}$ ;
- Le parti piu' esterne del core, stanno invece ancora collassando per effetto della gravita' a  $\sim 60000 \text{ Km/sec}$ ;
- L'espansione della parte centrale della stella viene quindi rallentata dalla caduta di materiale verso il centro della stella;



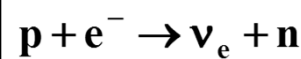
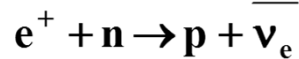
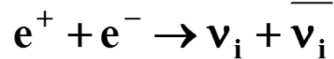
- 50 msec dopo il "rimbalzo" l'onda d'urto (curva bianca tratteggiata) si e' propagata faticosamente per 300 Km;
- Lascia dietro di se:
  - Core denso ( $d=10 \text{ Km}$ );
  - Proto-neutron star ( $d=40 \text{ Km}$ );





# Dall'implosione all'esplosione della stella ...

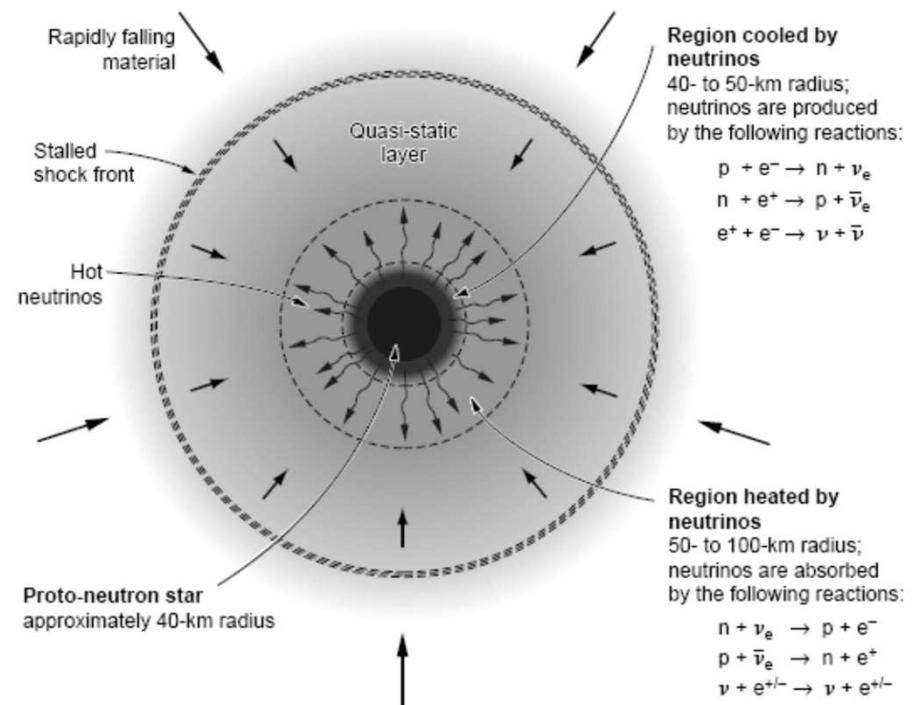
- L'onda d'urto che segue il “rimbalzo” del core finirebbe per perdere energia, rallentare fino ad andare in stallo e tutto ricollapserebbe formando in ultima analisi un buco nero SE non esistessero i neutrini!
- I neutrini vengono prodotti nelle reazioni:



• Per densità  $\rho > 10^{11} \text{ g/cm}^3$  persino i neutrini rimangono intrappolati nella materia (fanno scattering su nucleoni e su elettroni);

• Questo fa sì che la densità di neutrini all'interno di una “proto-neutron star” sia molto elevata;

• Insieme agli elettroni, i neutrini formano un gas di Fermi totalmente degenere che fornisce l'energia necessaria a sostenere il fronte d'onda dopo il rimbalzo che ha seguito il collasso;



# Esplosione della stella !

- L'onda d'urto originata dal “rimbalzo” del core viene sostenuta e spinta verso l'esterno dal gas di neutrini ed elettroni presenti nella “proto-neutron star”;
- L'esplosione di SuperNova puo' cosi' avere luogo!
- L'onda d'urto raggiunge le regioni piu' esterne della stella (che si estende fino a  $R=10^7 - 10^9$  Km !) espellendo materiale nello spazio circostante;
- Dopo  $\sim 10$  sec la “proto-neutron star” si raffredda e si trasforma in una stella a neutroni che e' il residuo delle SuperNove di tipo II;
- L'energia liberata dalla SN e' pari all'energia di legame della stella a neutroni

Energia gravitazionale di legame

$$E_b \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} = 3 \times 10^{46} \text{ Joule} \approx 17\% M_{\text{Sole}} c^2$$

Questa energia si distribuisce cosi':

99% neutrini

1% energia cinetica dell'esplosione  
(della quale, 1% va in raggi  
cosmici)

0.01% fotoni

Luminosita' dei neutrini

$$L_v = E/t \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} / 3 \text{ sec} \\ \approx 3 \times 10^{19} L_{\text{Sole}}$$

**Stella di neutroni**

**Explosion**

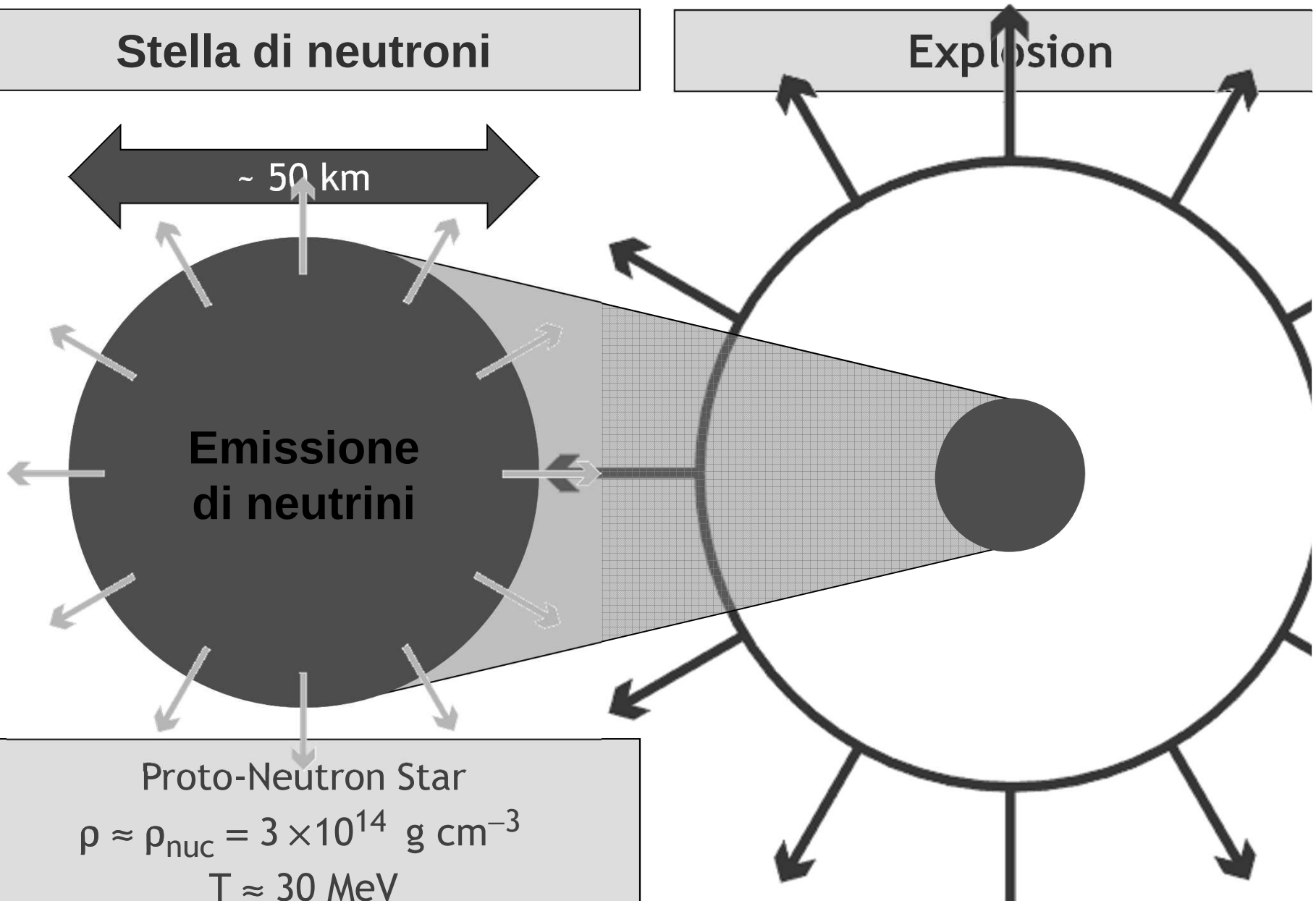
**~ 50 km**

**Emissione  
di neutrini**

**Proto-Neutron Star**

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

$$T \approx 30 \text{ MeV}$$

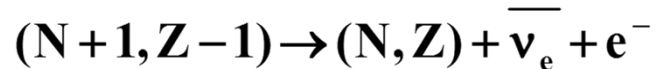


# Meccanismi di produzione di $\nu$ in una SN

- Urca process: durante le ultime fasi di vita della stella



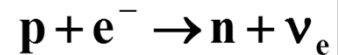
Cattura elettronica nucleare



Decadimento  $\beta$

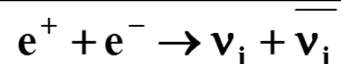
Produce coppie di  $\nu_e$  e anti- $\nu_e$  che sfuggono al core portando via energia: accelerano il collasso del core;

- Neutronizzazione: durante le fasi di contrazione del core



Solo l'1% circa dell'energia totale viene portata via da questi  $\nu$

- Produzione di coppie: durante le fasi di raffreddamento del core residuo



La maggior parte dell'energia viene portata via da questo processo

**Da quanto detto si vede che i neutrini sono cruciali nella dinamica dell'esplosione di una supernova in due maniere:**

1. Drenano energia alla stella nelle fasi finali della sua vita tramite i processi di Urca e di neutronizzazione e quindi ne accelerano la morte;
2. Dopo il collasso della stella, forniscono energia all'onda d'urto provocata dal "rimbalzo" del core sostenendo così l'esplosione (che altrimenti verrebbe rallentata o addirittura fermata dal materiale che continua a cadere verso il centro della stella);

- Come abbiamo detto i neutrini prodotti hanno difficoltà a sfuggire dal core perché la loro probabilità di scattering su nucleo è così alta da intrappolarli;
- Questo è vero fino a che  $\rho > 10^{11} \text{ g/cm}^3$ ;
- Per  $\rho \sim 10^{10} \text{ g/cm}^3$  i neutrini sono in grado di sfuggire; il raggio a cui questo avviene è chiamato *neutrinosfera*;
- Il raggio R della neutrinosfera è diverso per i diversi tipi di neutrino, perché hanno diverse probabilità di interagire: in particolare i  $\nu_e$  e gli anti- $\nu_e$ , hanno più probabilità di interagire con la materia e quindi sfuggono più tardi;

Vale che:

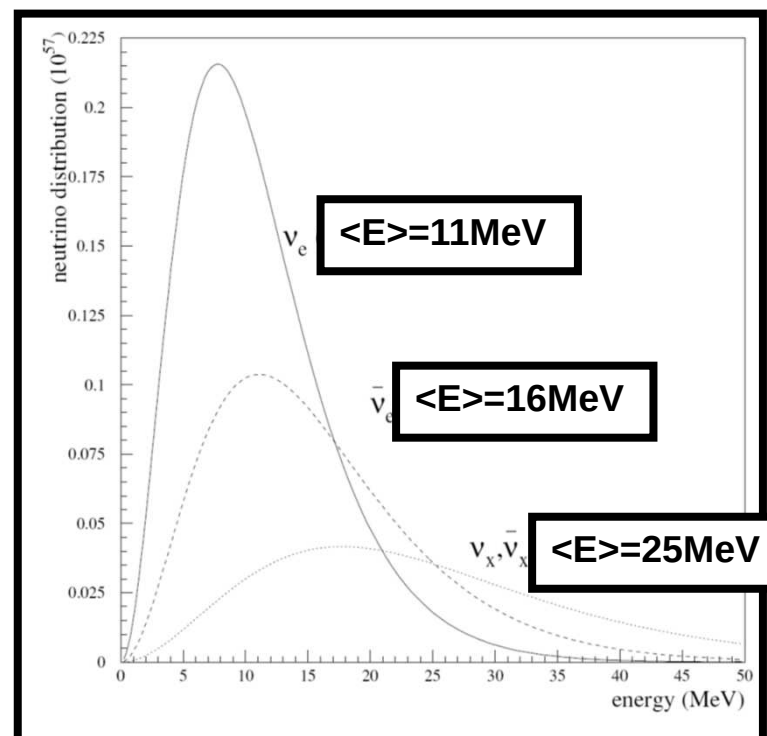
$$R(\nu_\mu, \nu_\tau) < R(\nu_e) < R(\text{anti-}\nu_e)$$

Di conseguenza vale anche che:

$$E(\nu_\mu, \nu_\tau) > E(\text{anti-}\nu_e) > E(\nu_e)$$

- Vale un principio di equiripartizione per cui i diversi tipi di  $\nu$  vengono emessi con uguale luminosità ( $E/t$ );
- Ne segue che:  

$$N(\nu_\mu, \nu_\tau) < N(\text{anti-}\nu_e) < N(\nu_e)$$



# Quanti neutrini da SuperNova ci aspettiamo?

Per il principio di equiripartizione →

$$E(\text{tot})_{\nu_i} = \frac{\varepsilon_B}{6}$$

Trasformando in MeV l'energia  $\varepsilon_B$  →

$$\varepsilon_B = 3 \times 10^{53} \text{ erg} = 3 \times 10^{46} = 1.9 \times 10^{59} \text{ MeV}$$

Per  $\nu_e \langle E \rangle = 11 \text{ MeV}$  →

$$N_{\nu_e} = \frac{\varepsilon_B}{6 \langle E_{\nu_e} \rangle} = \frac{1.9 \times 10^{59}}{6 \times 11} = 2.9 \times 10^{57}$$

Per  $\nu_{\mu,\tau} \langle E \rangle = 16 \text{ MeV}$  →

$$N_{\nu_{\mu,\tau}} = \frac{\varepsilon_B}{6 \langle E_{\nu_e} \rangle} = \frac{1.9 \times 10^{59}}{6 \times 25} = 1.3 \times 10^{57}$$

Per  $\bar{\nu}_e \langle E \rangle = 25 \text{ MeV}$  →

$$N_{\bar{\nu}_e} = \frac{\varepsilon_B}{6 \langle E_{\nu_e} \rangle} = \frac{1.9 \times 10^{59}}{6 \times 16} = 2.0 \times 10^{57}$$

Se consideriamo una SuperNova galattica, distante per es.  $d=10 \text{ kparsec}$

Ricordando che:

1parsec  $\sim 3.3$  anni luce

1anno luce  $\sim 10^{16} \text{ m}$

$$N_{\nu_e} (\text{sulla terra}) = \frac{N_{\nu_e}}{4\pi d^2} = 2.7 \times 10^{11} \frac{\nu_e}{\text{cm}^2}$$

$$N_{\nu_{\mu,\tau}} (\text{sulla terra}) = 1.2 \times 10^{11} \frac{\nu_{\mu,\tau}}{\text{cm}^2}$$

$$N_{\bar{\nu}_e} (\text{sulla terra}) = 1.8 \times 10^{11} \frac{\nu_e}{\text{cm}^2}$$

Burst di neutrini che arriva in  $\sim 20 \text{ sec}$

# Reazioni per rivelare neutrini da SN

1)  $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$  Sensibile a tutti i  $\nu$ ;  $\sigma(E=10\text{MeV}) \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$

2)  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  Sensibile solo agli anti- $\nu_e$ ;  $\sigma(E=10\text{MeV}) \sim 10^{-41} \text{ cm}^2$

3)  $\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$   $E_{\text{Soglia}} = 17 \text{ MeV}$   
 ${}^{12}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e$   $\tau = 11 \text{ m sec}$

4)  $\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+ + \nu_e$   $E_{\text{Soglia}} = 13 \text{ MeV}$   
 ${}^{12}\text{B} \rightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e$   $\tau = 20 \text{ m sec}$

5)  $\nu_x + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_x$   $E_{\text{Soglia}} = 15 \text{ MeV}$   
 ${}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$   $E_\gamma = 15 \text{ MeV}$

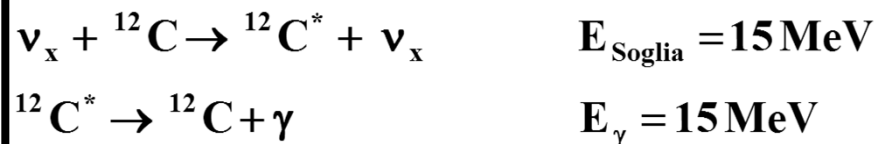
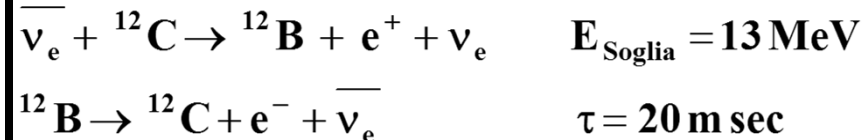
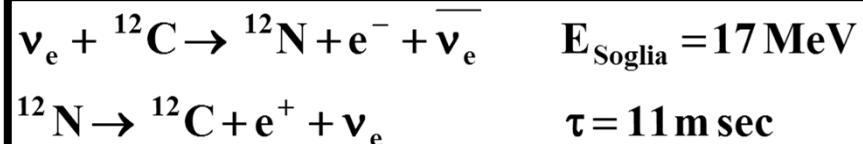
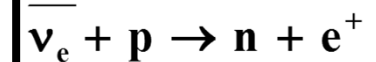
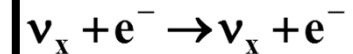
$\sigma(E=10\text{MeV}) \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$

6)  $\nu_x + n \rightarrow \nu_x + n$  Sensibile a tutti i  $\nu$ ;  $\sigma(E=10\text{MeV}) \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$

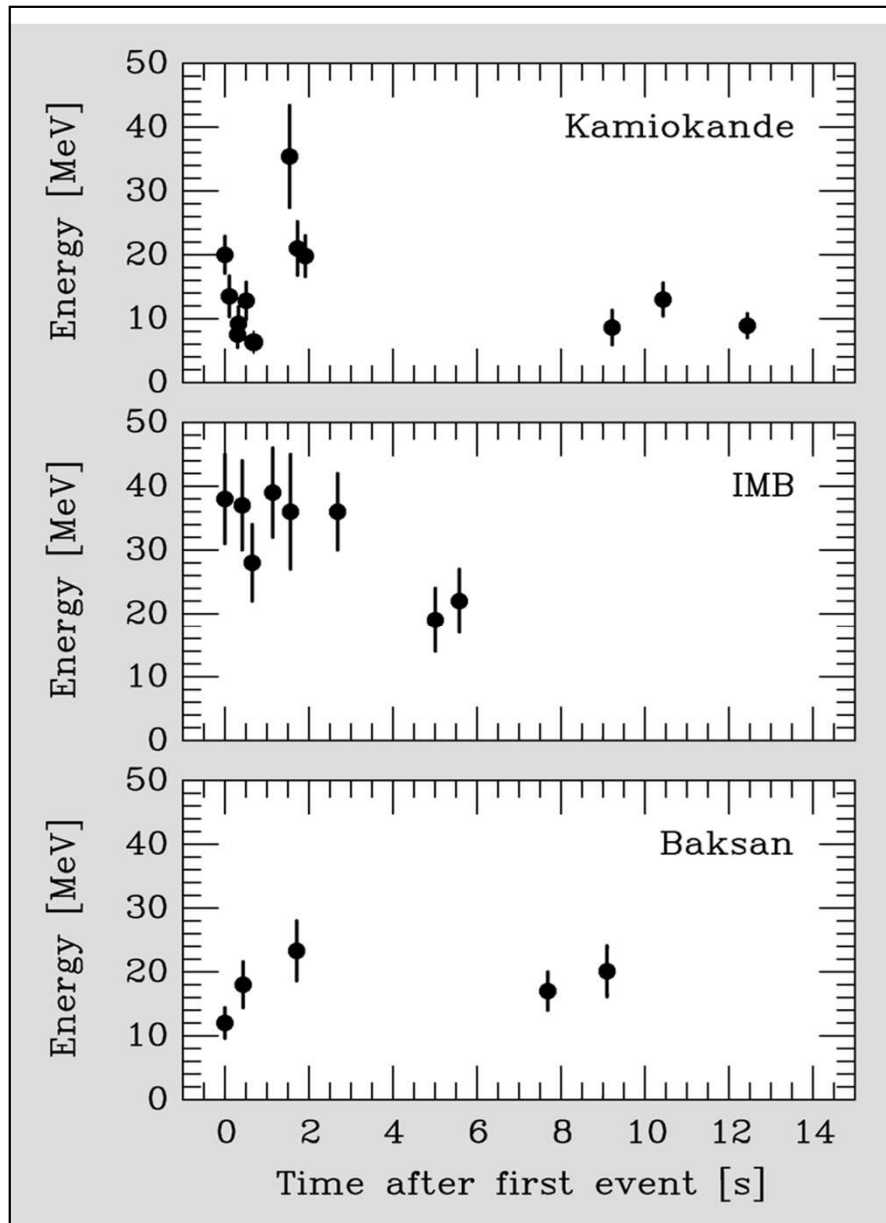


# Rivelatori di neutrini da SN

- Tutti i rivelatori di neutrini solari in tempo reale hanno la possibilita' di rivelare anche neutrini da SN;
- In particolare SuperK puo' rivelarli tramite la reazione 1) ;
- I rivelatori a scintillatore liquido, come Borexino o eventualmente Kamland possono anche sfruttare le reazioni 3), 4), 5) di interazione sui nuclei di  $^{12}\text{C}$ ;
- La reazione con sezione d'urto maggiore e' comunque la 2)



# E' gia' successo! Supernova 1987A



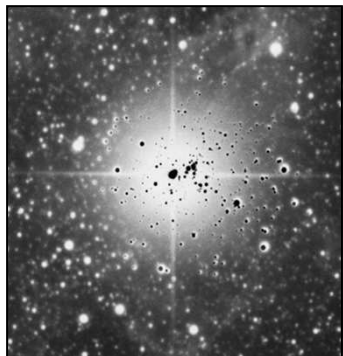
Kamiokande (Giappone)  
Rivelatore Cerenkov  
Incertezza sul tempo  $\pm 1$  min

Irvine-Michigan-Brookhaven (US)  
Rivelatore Cerenkov  
Incertezza sul tempo  $\pm 50$  ms

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

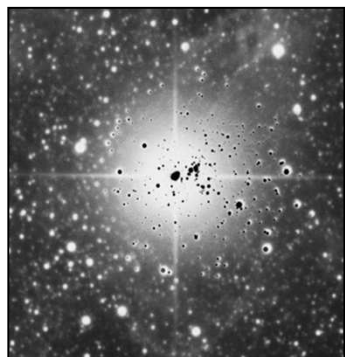
I segnali sono contemporanei entro  
le incertezze sul tempo

# Alla caccia dei Neutrini da Supernova



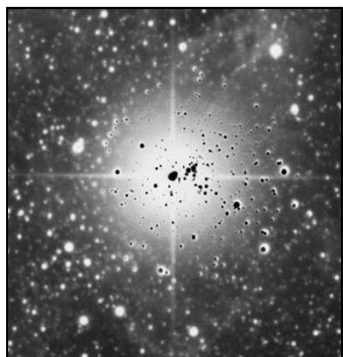
Neutrini da Supernove galattiche ( $D \sim 10$  kpc)

- Segnali ad alta statistica in diversi esperimenti
  - Test della fisica della supernova
  - Test di fisica delle particelle, per es. Oscillazioni di  $\nu$
- Purtroppo il rate di SN galattiche e' piccolo ( $\sim 3$  al secolo!)



Neutrini da Supernove da galassie vicine ( $D < 10$  Mpc)

- Segnali di solo 1-2 eventi per SN in un rivelatore di grandi dimensioni ( $\sim 1$  Mtonnellata!)
- Il rate di SN maggiore di  $\sim 1$  all'anno
- Studio del flusso e dello spettro di neutrini da SN



Neutrini da SN extragalattiche

- Sorgente "garantita"
- Diversi eventi all'anno in un rivelatore come SuperK;
- Bisogna ridurre il fondo: non facile!
- Studio del rate di formazione delle stelle

# Importanza di rivelare neutrini da SN

## Test di fisica delle particelle:

### Massa dei neutrini;

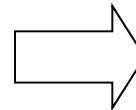
- Siccome i vari sapori di neutrino hanno masse diverse dovrebbero arrivare a terra in tempi leggermente diversi;
- Per fissare le idee, consideriamo solo due famiglie di neutrini, di cui uno massivo e l'altro no; si avra' che:

$\nu$  con massa 0

$$v = c \quad t_0 = \frac{L}{c}$$

$\nu$  con massa  $m_\nu$

$$v = \frac{pc^2}{E} \quad t = \frac{L}{v} = \frac{LE}{pc^2}$$

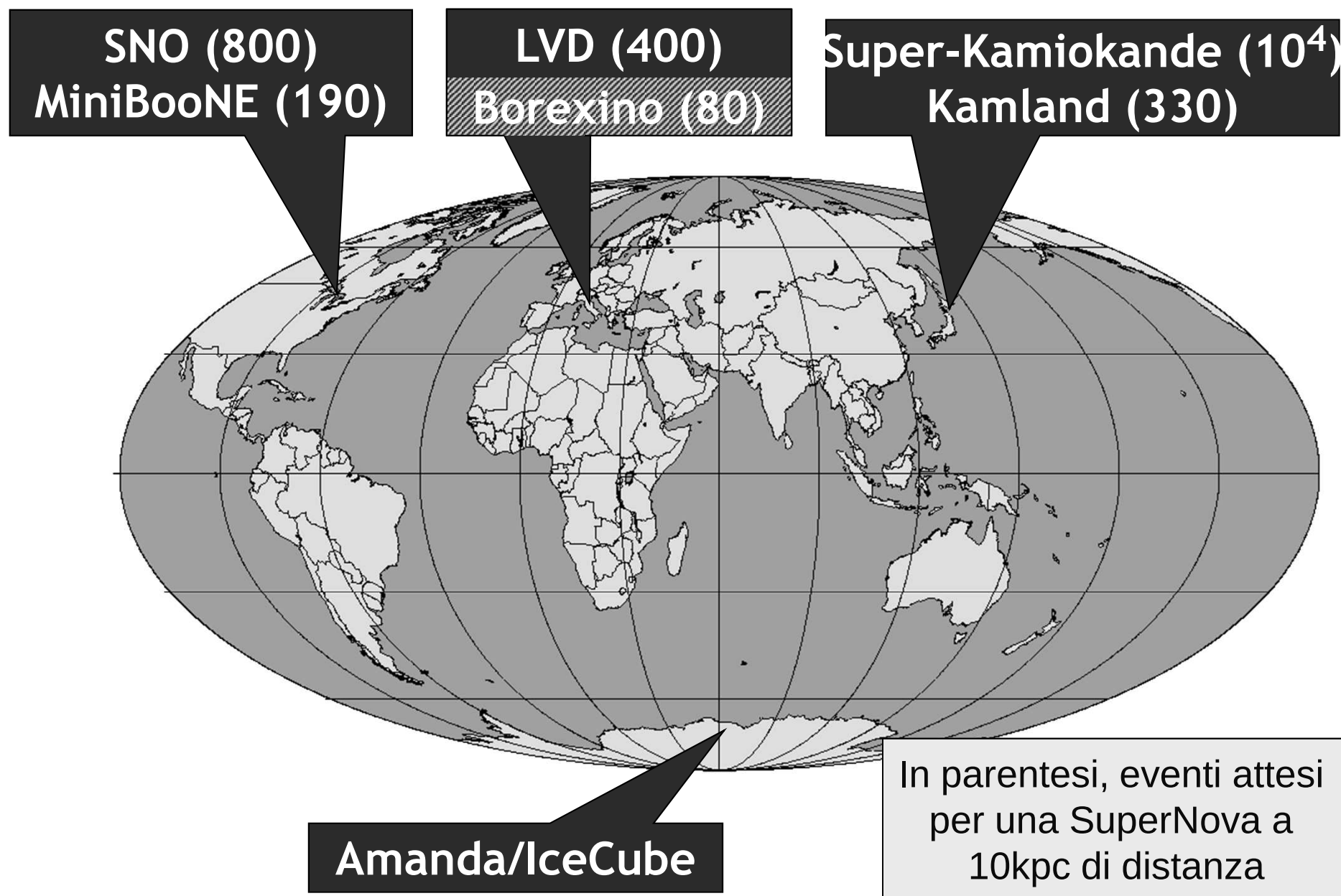


$$\Delta t = \frac{L}{2c} \left( \frac{m_\nu}{E_\nu} \right)^2$$

### Oscillazione dei neutrini;

- Il confronto fra il numero di eventi previsti e quello effettivamente rivelato, puo' dare importanti informazioni sul valore di  $\sin^2 2\theta$ ;

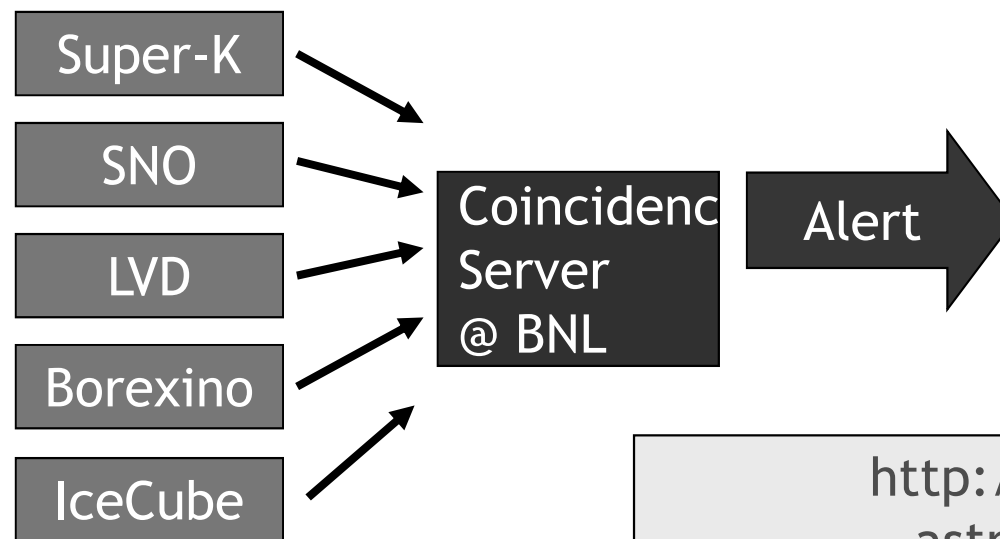
# Rivelatori nel mondo per neutrini da SN



# SuperNova Early Warning System (SNEWS)

Il SuperNova Early Warning System (SNEWS) e' un network di esperimenti esistenti o in fase di istallazione;

- Lo scopo di questo network e' quello di rivelare il burst di neutrini provenienti dall'eventuale esplosione di una SuperNova e che precede di diverse ore il burst di fotoni provenienti dalla stessa SuperNova;
- In questa maniera si mettono in “pre-allarme” gli astronomi sullo scoppio di una SuperNova;
- Per evitare falsi allarmi, si richiede che almeno due esperimenti diano un segnale di “allarme”



<http://snews.bnl.gov/astro-ph/0406214>



# Diagramma di Hertzsprung-Russel

