

I neutrini solari (Parte 2)

**Corso di Introduzione all'astrofisica
Anno accademico 2019-2020
Barbara Caccianiga**

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 ν_e oscillano in ν di altri sapori; gli esperimenti sono "ciechi" o "parzialmente ciechi" ai ν di altri sapori e quindi vedono un flusso minore del previsto;
- 2) Homestake e' "cieco" a ν_μ e ν_τ ; 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 normali

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

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

diverse regioni possibili nello spazio

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

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

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

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

LMA

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

$$\sin^2 2\theta = 0.79$$

Vacuum 1

$$\Delta m^2 = 6.5 \times 10^{-10} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.79$$

Vacuum 2

$$\Delta m^2 = 4.4 \times 10^{-11} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.90$$

SMA

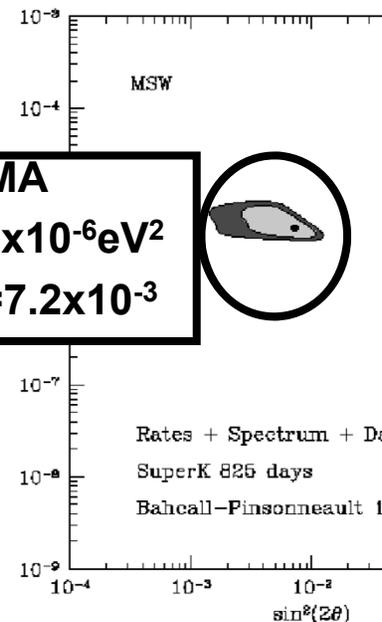
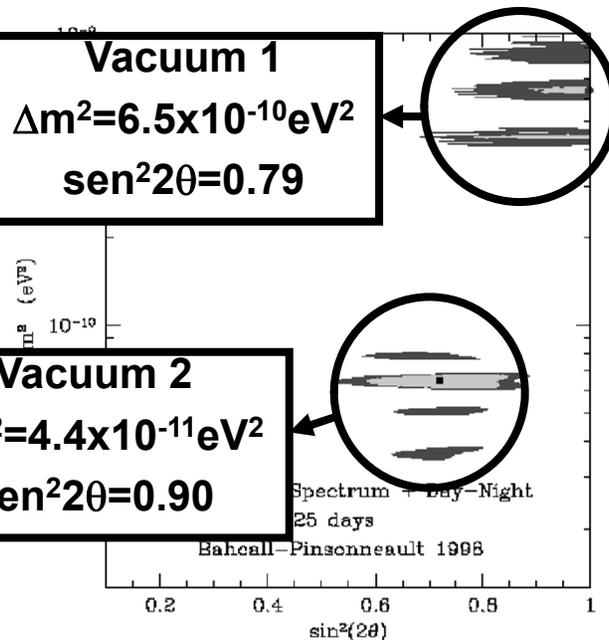
$$\Delta m^2 = 5.0 \times 10^{-6} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 7.2 \times 10^{-3}$$

LOW

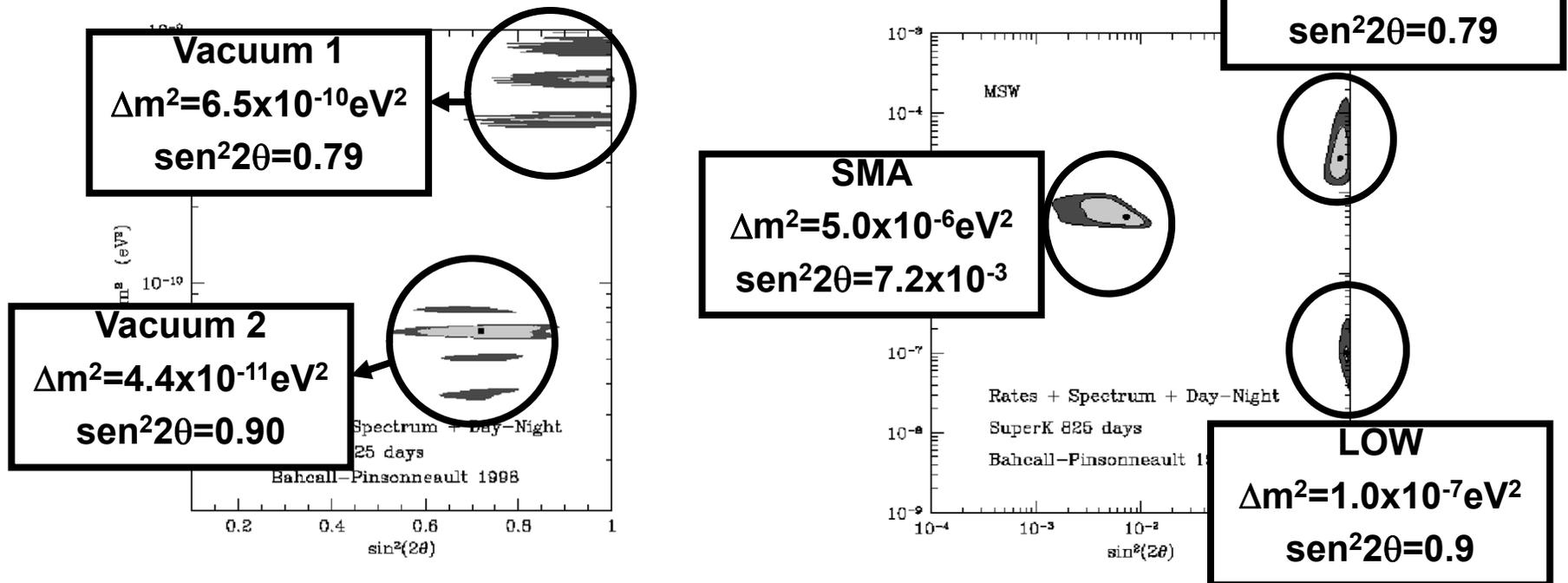
$$\Delta m^2 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 2\theta = 0.9$$



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 θ e da Δm^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 θ e Δm^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:**

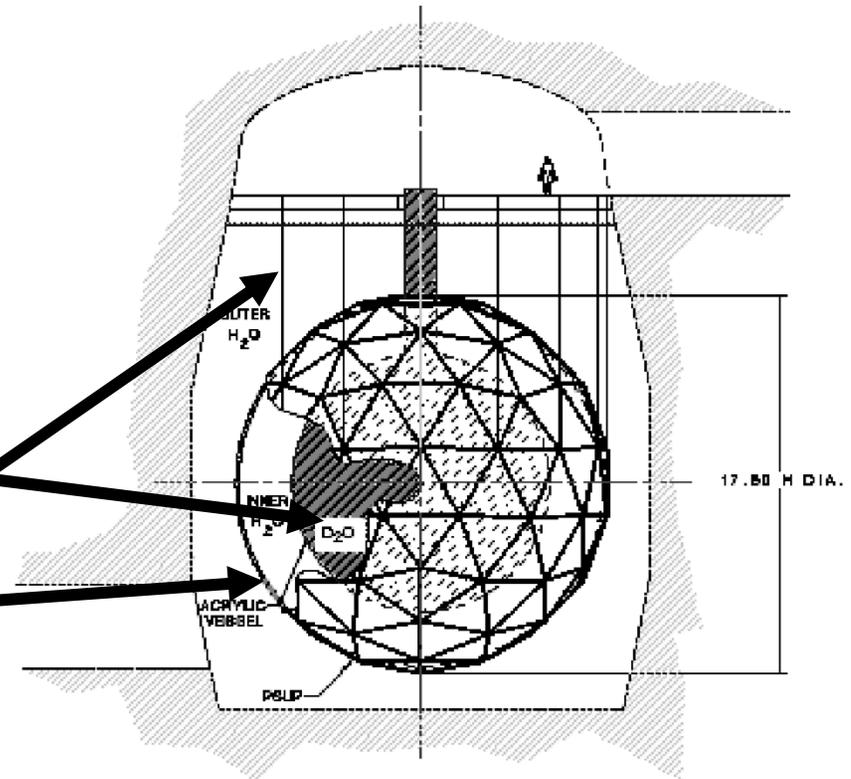
Conferma il Modello Solare Standard

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

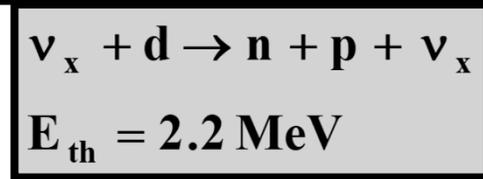
**Dimostra che c'e' una componente NON elettronica
nel flusso di neutrini proveniente dal sole**

SNO: Sudbury Neutrino Observatory

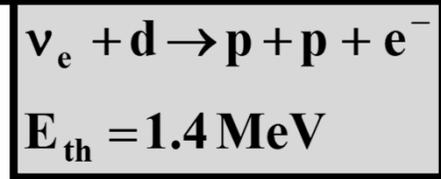
- Costruito in una miniera di Nichel (Creighton Mine) a Sudbury (Canada);
- 2000 m di profondita';
- Ha cominciato a prendere dati nel 1999;
- Sfrutta 1000 ton di acqua pesante (D₂O) contenute in un pallone sferico di Ø=12m;
- 10000 tubi fotomoltiplicatori montati su una struttura di 18m;
- Schermato da H₂O;
- Rivelatore di luce Cerenkov;



Per misurare il flusso TOTALE di ν :
Correnti Neutre (NC)

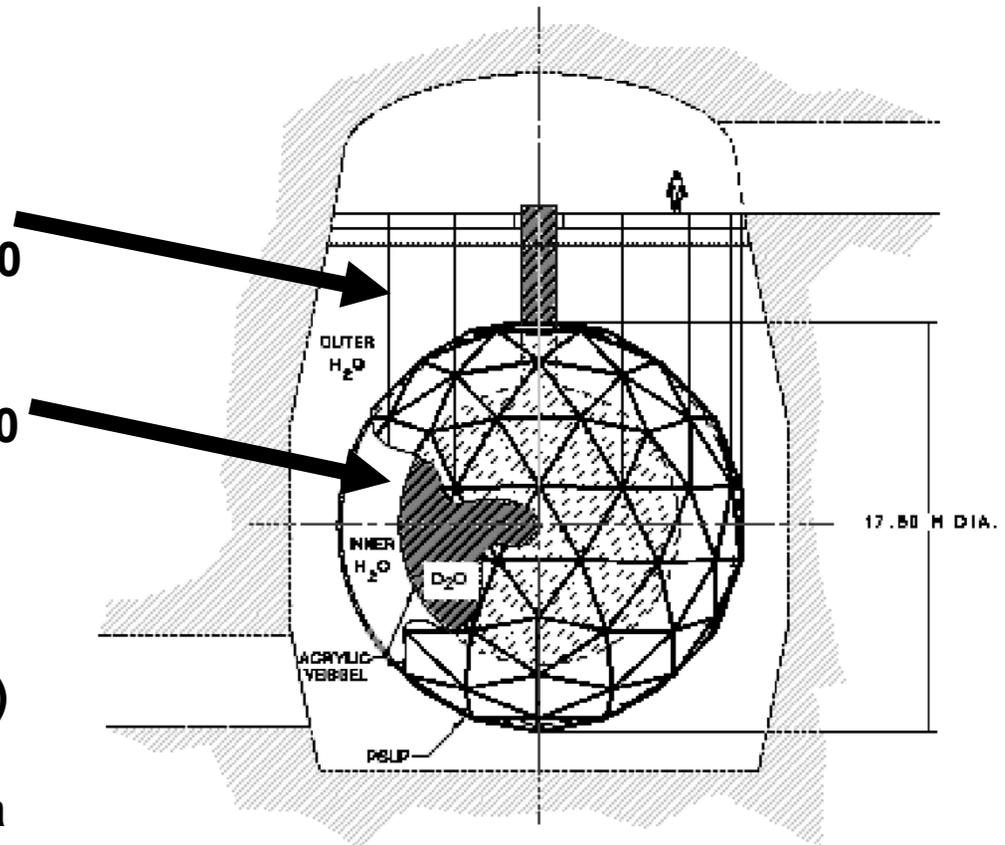


Per misurare il flusso di ν_e :
Correnti Cariche (CC)



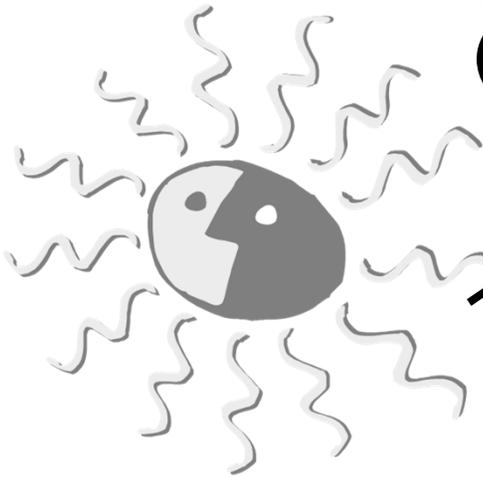
La riduzione del fondo in SNO

- 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 H₂O;
- Il fondo dovuto alla radioattivita' dei fototubi e' schermato da 1700 ton di H₂O;
- 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 ~5-6 MeV;

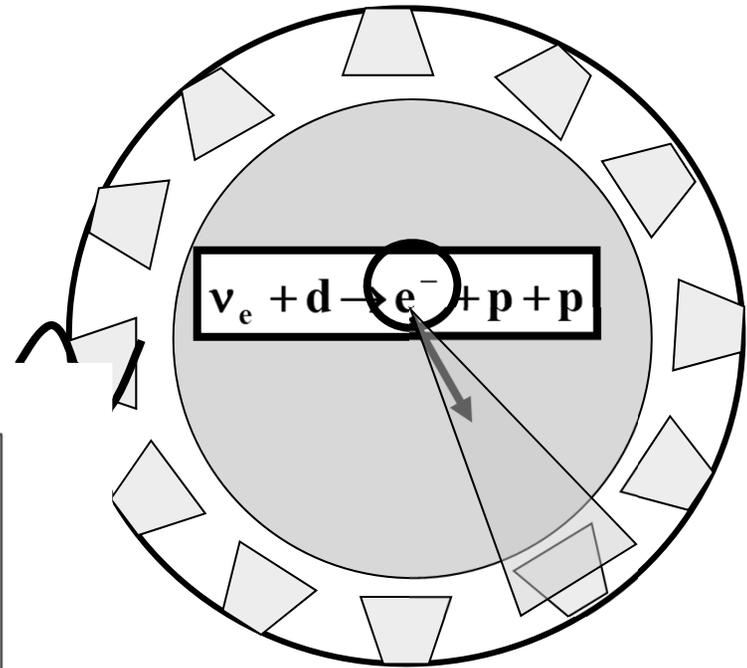


SNO, come SuperK, e' sensibile SOLO ai neutrini da ⁸B

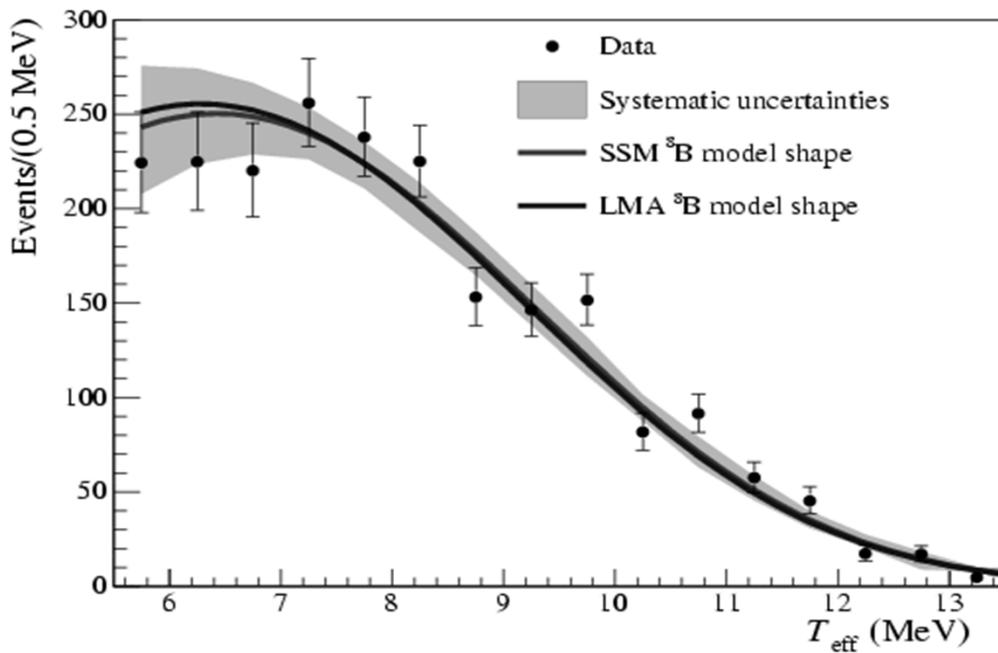
Rivelazione di ν_e tramite le correnti cariche (solo ν_e interagiscono)



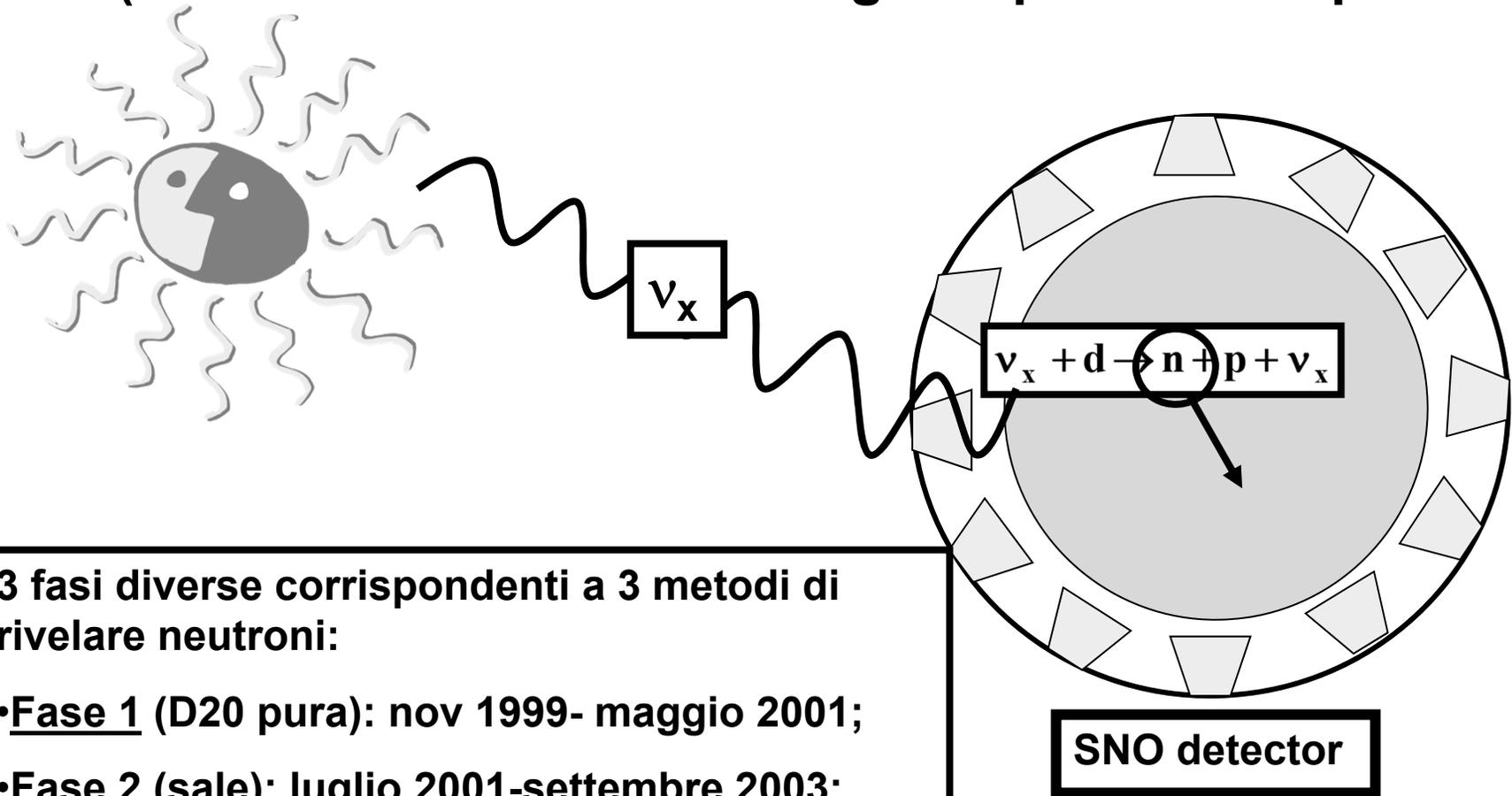
ν_e



SNO detector



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



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;

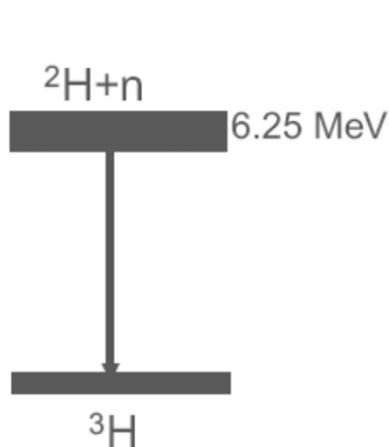
Il rate atteso e' di circa 10 ev/giorno;

3 metodi diversi per rivelare i neutroni

Phase I (D₂O)

Nov. 99 - May 01

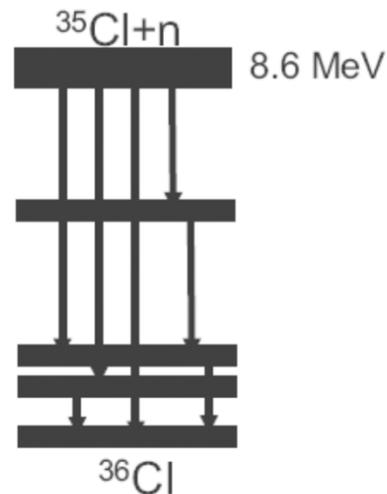
n captures on
 $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$
 $\sigma = 0.0005 \text{ b}$
 Observe 6.25 MeV γ
 PMT array readout
 Good CC



Phase II (salt)

July 01 - Sep. 03

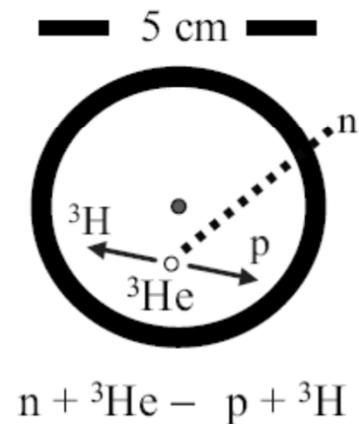
2 t NaCl. n captures on
 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$
 $\sigma = 44 \text{ b}$
 Observe multiple γ
 PMT array readout
 Enhanced NC



Phase III (^3He)

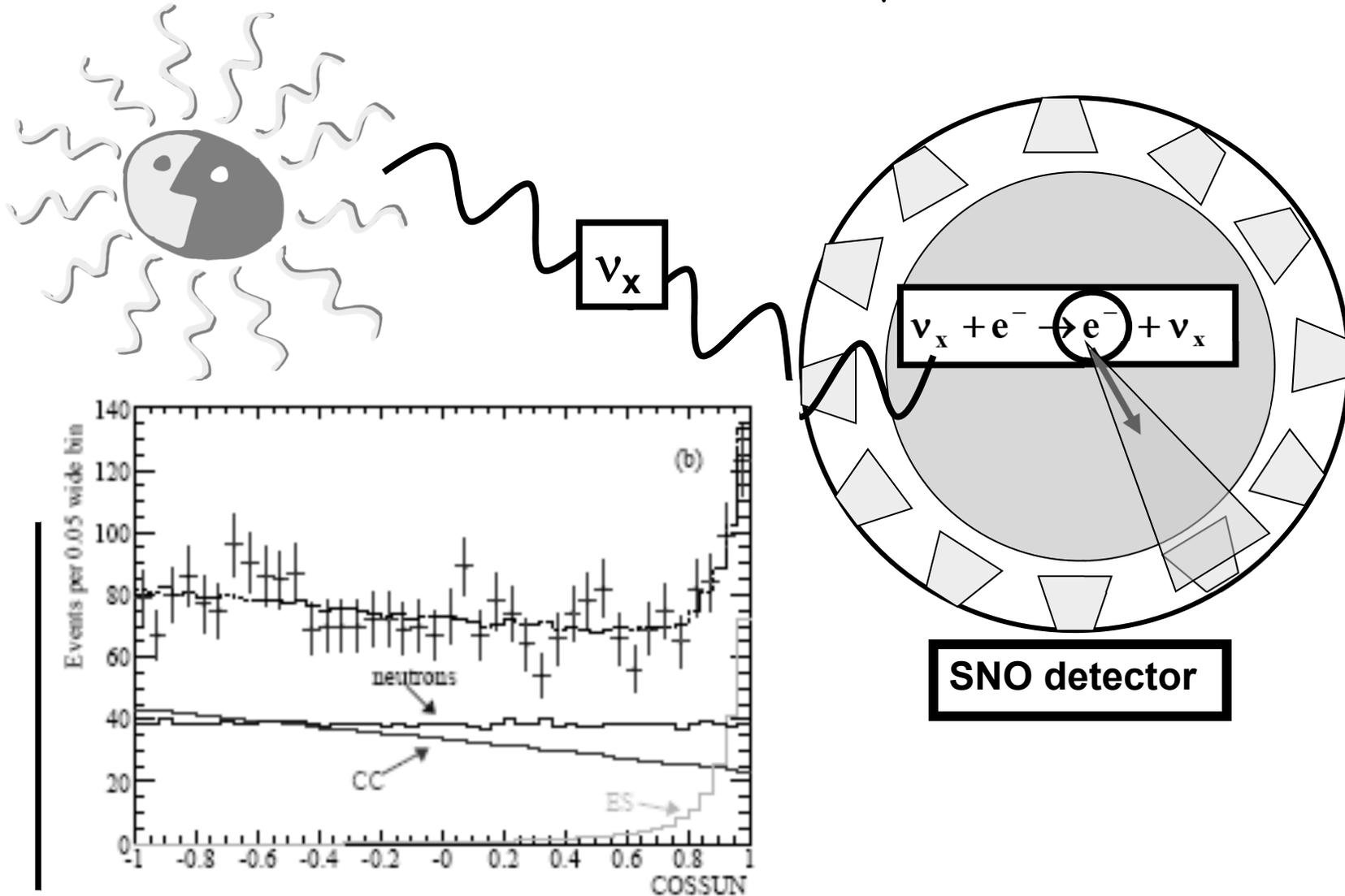
Summer 04 - Dec. 06

40 proportional counters
 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$
 $\sigma = 5330 \text{ b}$
 Observe p and ^3H
 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 ν_e che per ν_μ e ν_τ**



Risultati di SNO

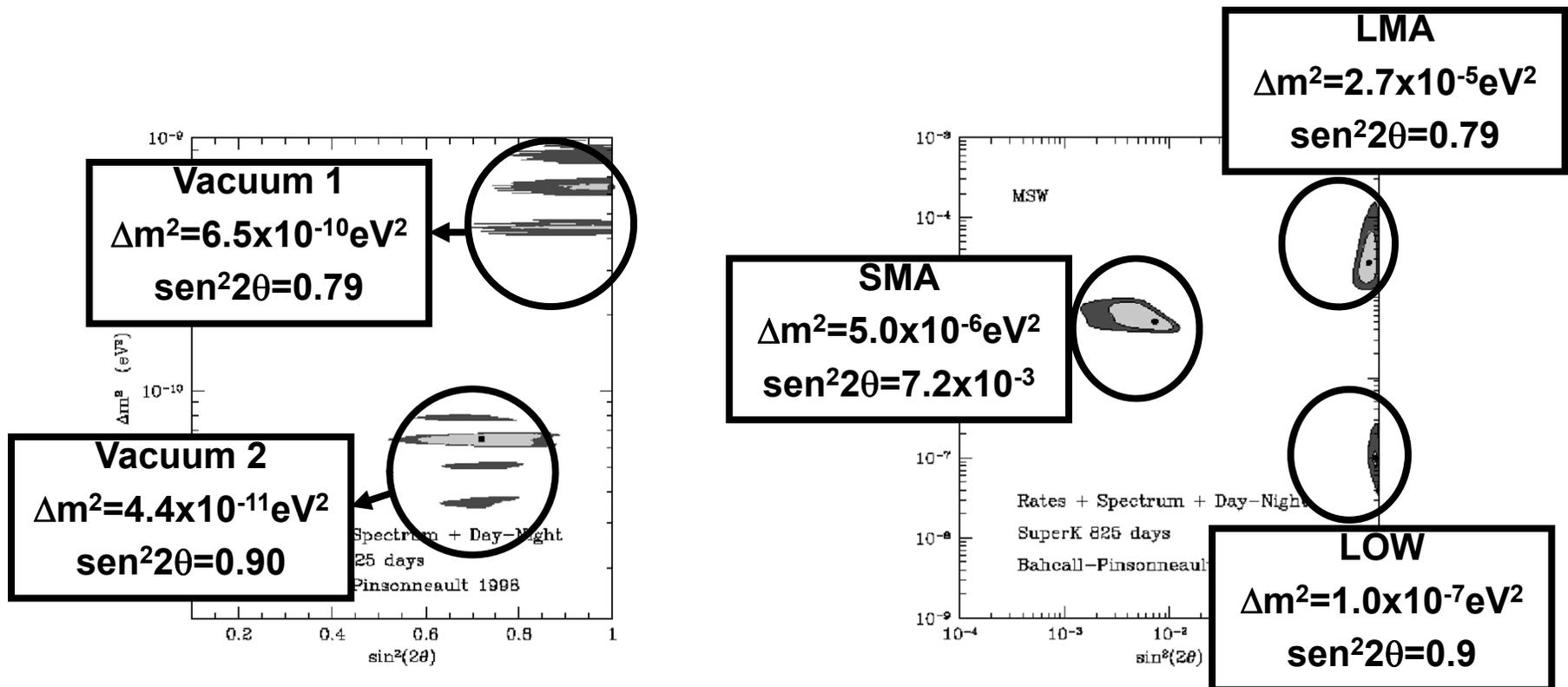
La potenza di questo esperimento sta nella ridondanza di informazioni: le quantità rilevanti vengono misurate in modi diversi per avere un cross-check delle sistematiche;

E' come se fossero tanti esperimenti in uno solo;

NC	$\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$ $E_{th} = 2.2 \text{ MeV}$	$\phi_{NC} = 4.94^{+0.21}_{-0.21}(\text{stat.})^{+0.38}_{-0.34}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
$\phi_{\text{Teorico}} = 5.82 \pm 1.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$		
CC	$\nu_e + d \rightarrow p + p + e$ $E_{th} = 1.4 \text{ MeV}$	$\phi_{CC} = 1.68^{+0.06}_{-0.06}(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.09}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$
ES	$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ $E_{th} = 0 \text{ MeV}$	$\phi_{ES} = 2.35^{+0.22}_{-0.22}(\text{stat.})^{+0.15}_{-0.15}(\text{syst.}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

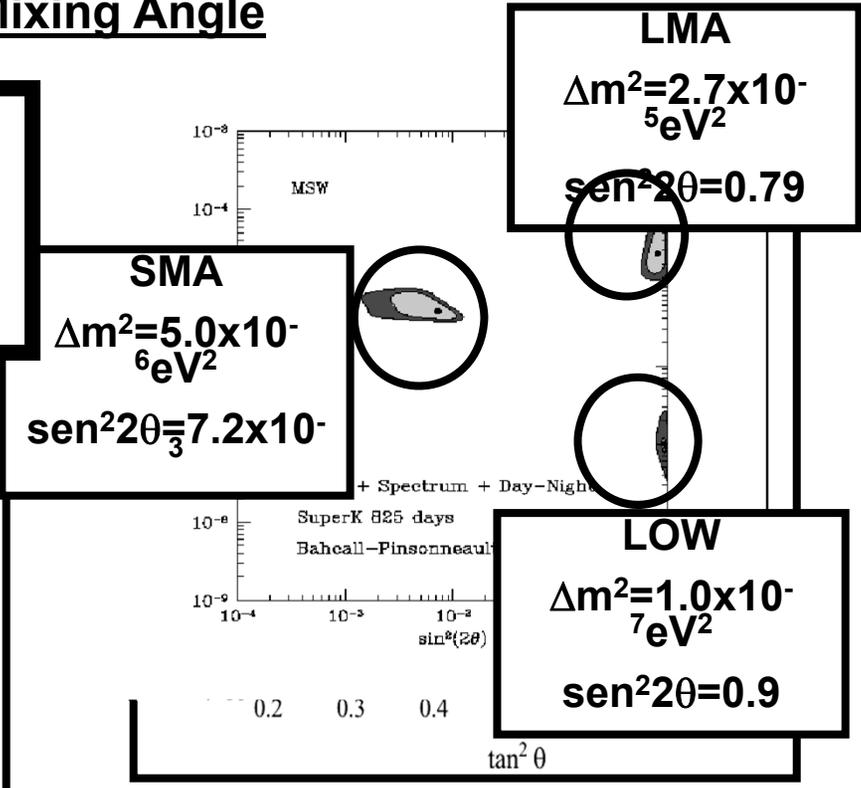
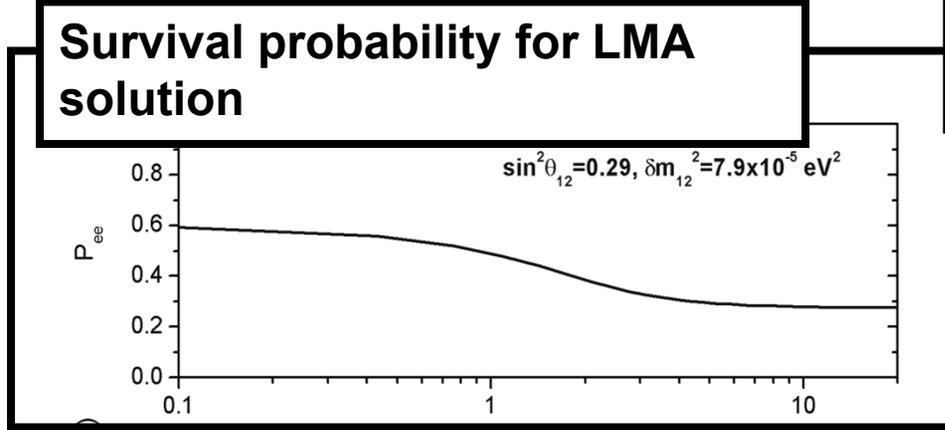
Confronto teoria/esperimenti

- 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



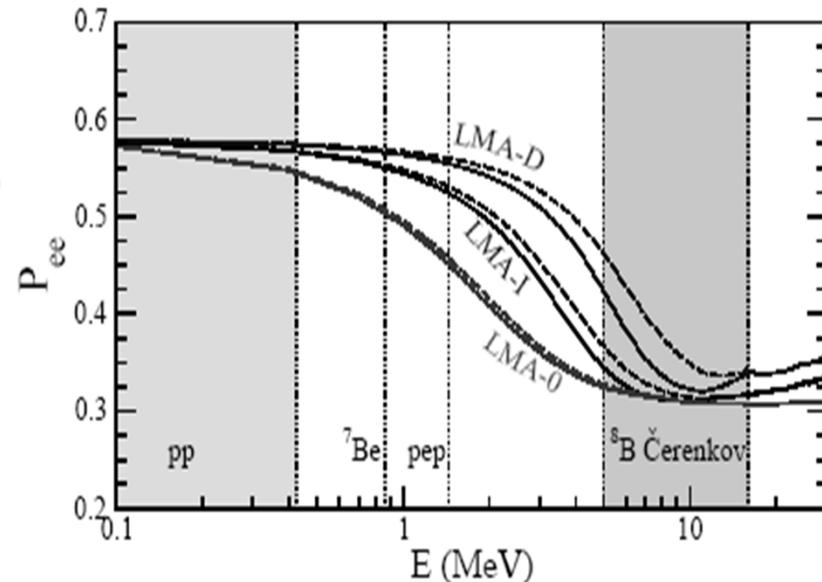
- I risultati di SNO hanno permesso di confermare l'ipotesi di oscillazione del neutrino come soluzione del problema del neutrino solare;
- Rimane il dubbio: oscillazioni della materia o oscillazioni nel vuoto? E con quali valori dei parametri?
- L'analisi combinata dei dati di SNO, di TUTTI gli altri 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)
 $\Delta m^2 = 7.9_{-0.5}^{+0.6} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 $\tan^2 \theta = 0.40_{-0.07}^{+0.10}$



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

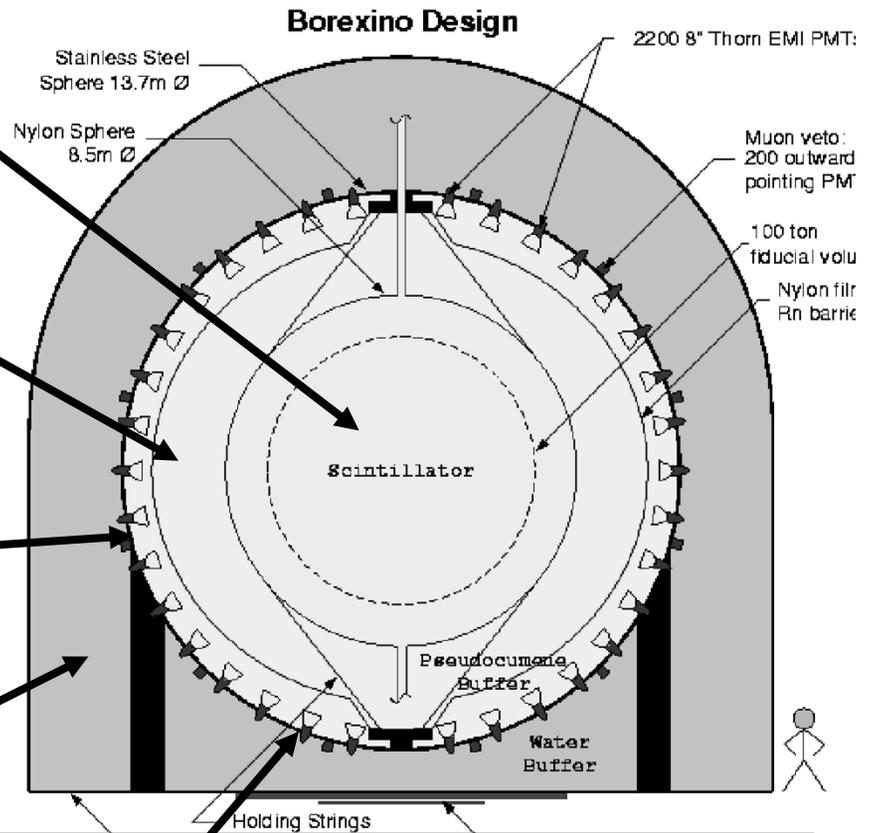
Cuore del rivelatore: 300 tonnellate di liquido scintillatore contenute in un vessel sferico di nylon ($r= 4.25 m$);

1st schermo: 1000 ton di liquido ultrapuro (pseudocumene) contenuto in una sfera di acciaio (SSS) ($r=7 m$);

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

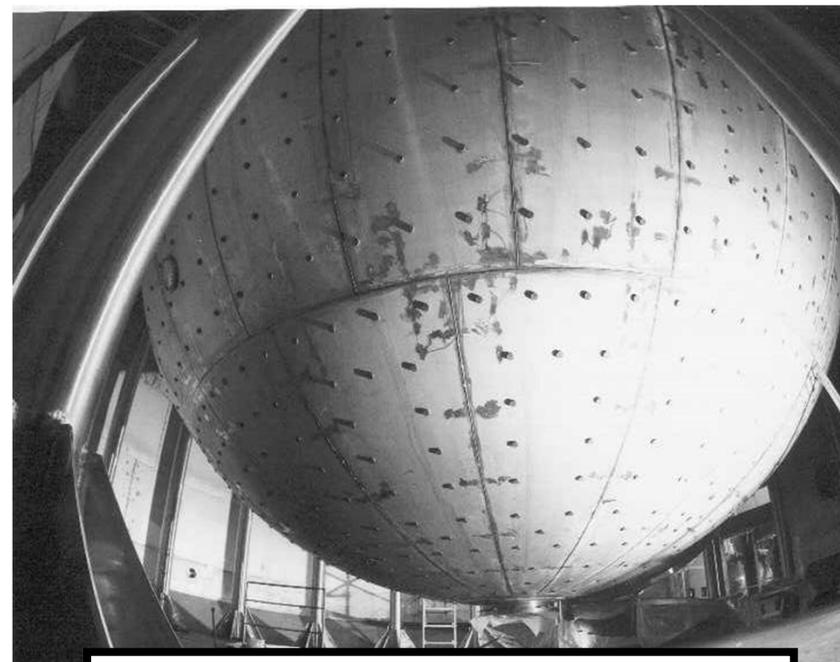
Secondo schermo: 1000 ton di acqua ultrapura contenute in una tanica cilindrica;

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)

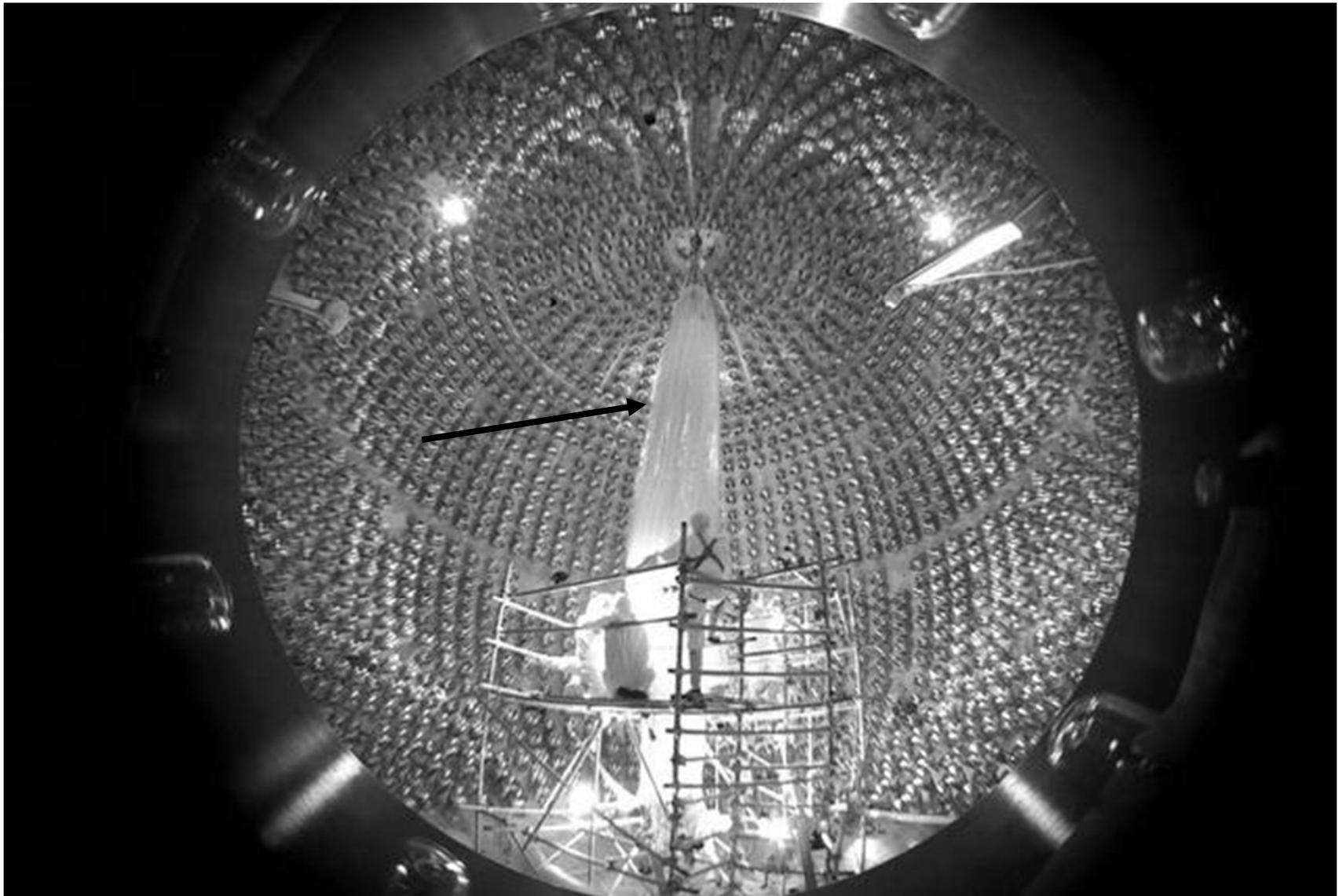


PMTs pronti per l'istallazione

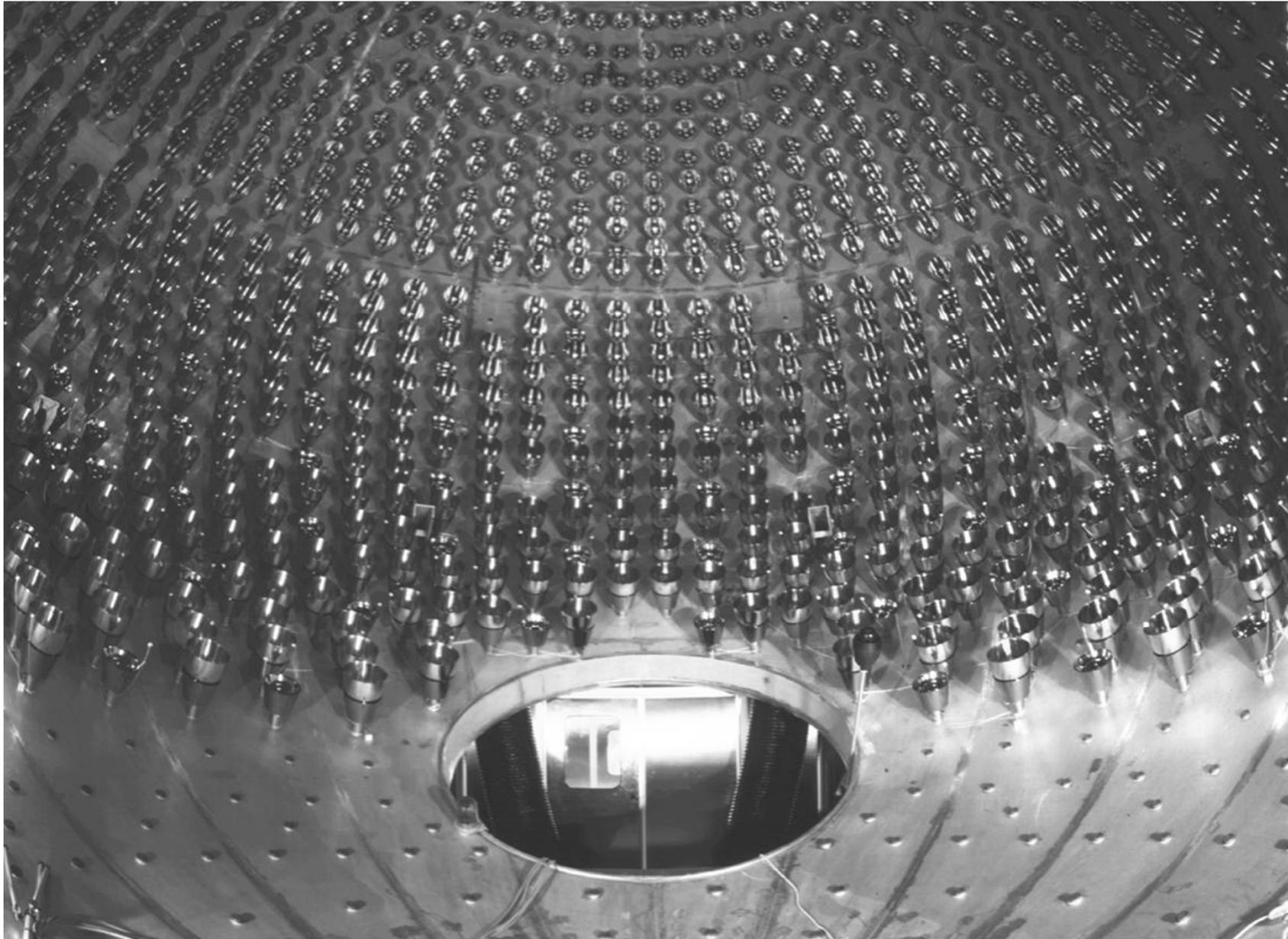


Istallazione delle fibre ottiche

Istallazione dei vessel di nylon

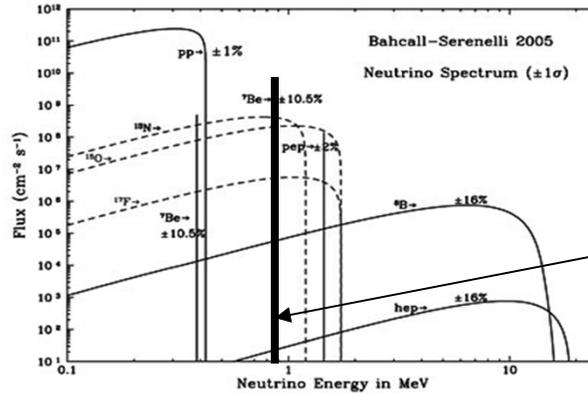
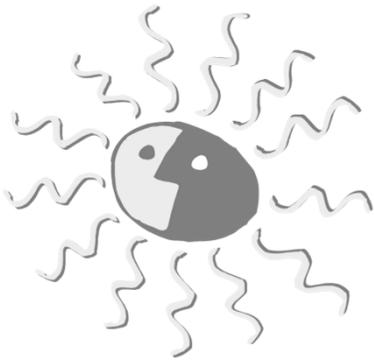


Istallazione dei fototubi



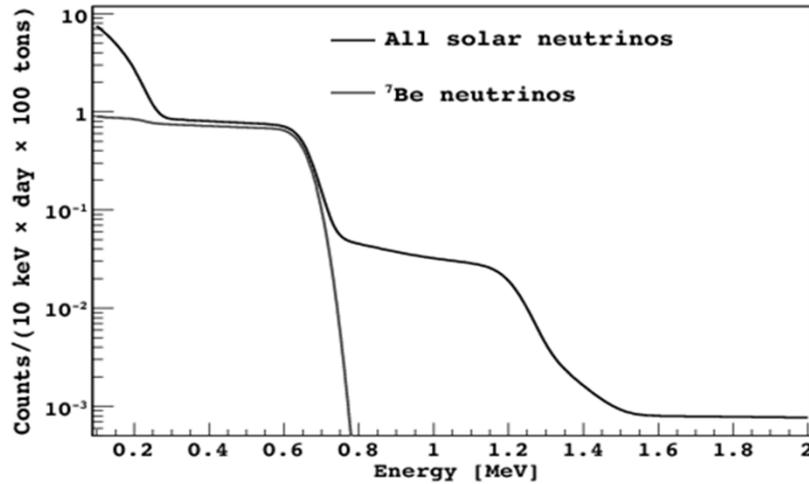
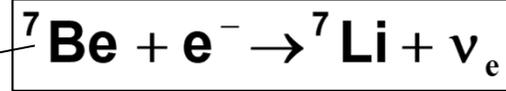
Chiusura finale della sfera di acciaio



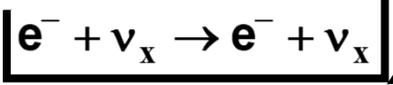


Monocromatica ! $E_\nu = 862 \text{ keV}$

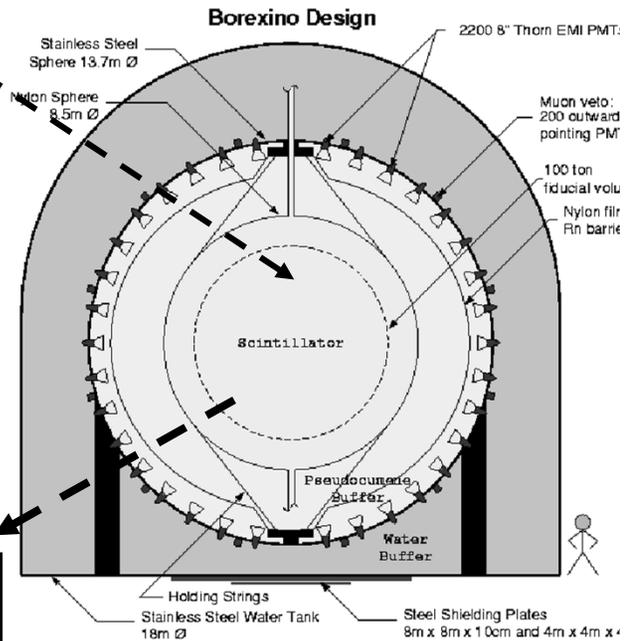
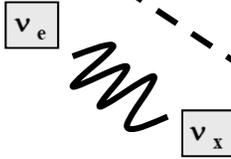
$$\Phi_{\text{SSM}} = 4.8 \times 10^9 \text{ v/sec/m}^2$$



Soglia = 0.25 MeV



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



Il numero di neutrini atteso se non ci fossero oscillazioni e' di ~ 70 ev/giorno

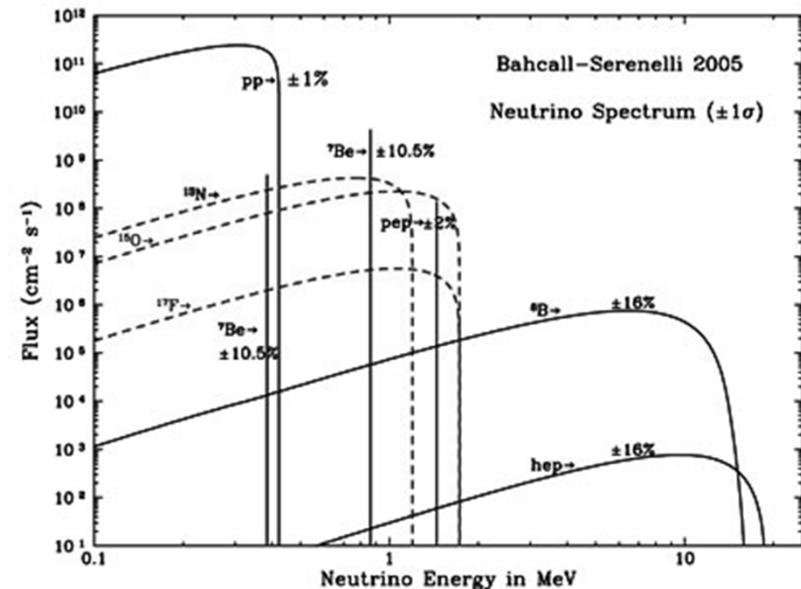
Il problema del fondo in Borexino

- **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;

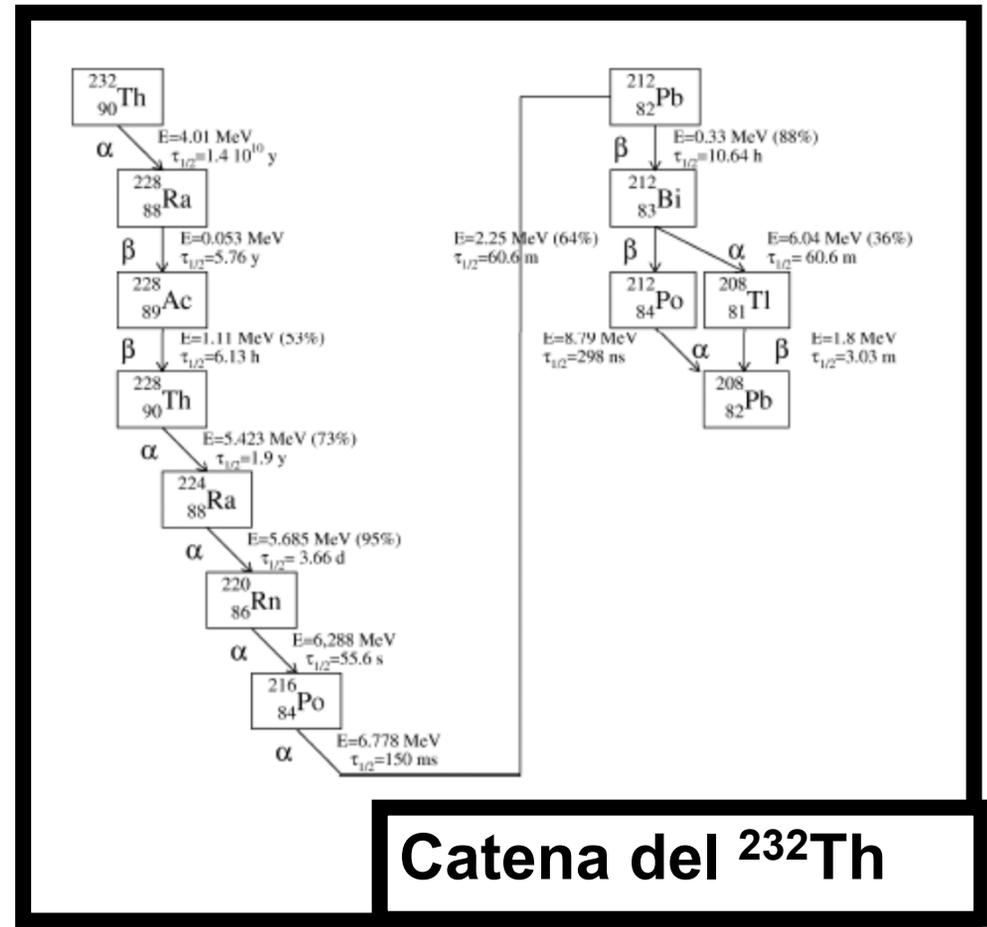
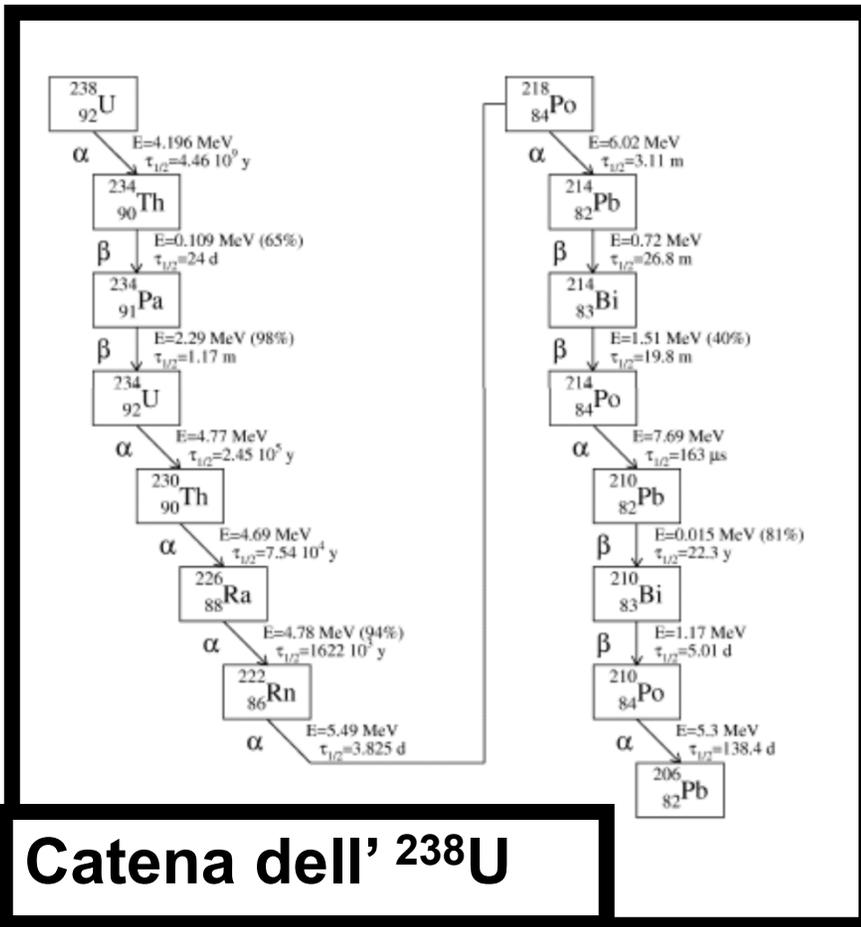
Il problema del fondo interno in Borexino: ^{14}C

- 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}C che decade β 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}C ;
- Quindi si rinuncia a osservare eventi nella finestra di energia al di sotto di 250 keV; (in realta' con un'analisi piu' raffinata siamo riusciti ad abbassare la soglia a 150 keV!)



Il fondo radioattivo: ^{238}U e ^{232}Th



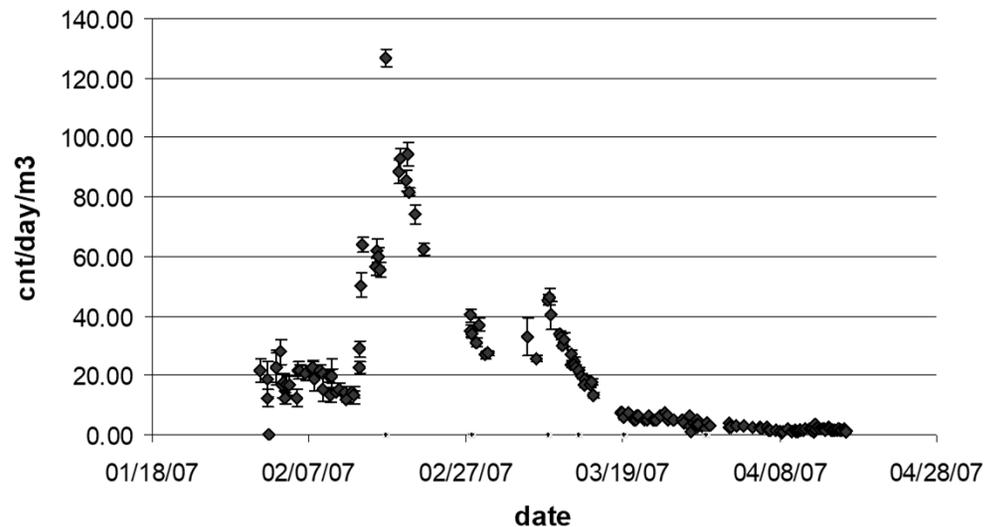
- Notiamo che la maggior parte degli isotopi radioattivi presenti nelle due catene, producono eventi nella regione di interesse per i neutrini solari!
- Persino i decadimenti con emissione di particelle α che sembrerebbero a piu' alte energie (5 MeV, 7 MeV) in realta' producono un'energia apparente nello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

Il fondo radioattivo: ^{238}U e ^{232}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 ~ 20 conteggi al giorno di U e Th in BX;**

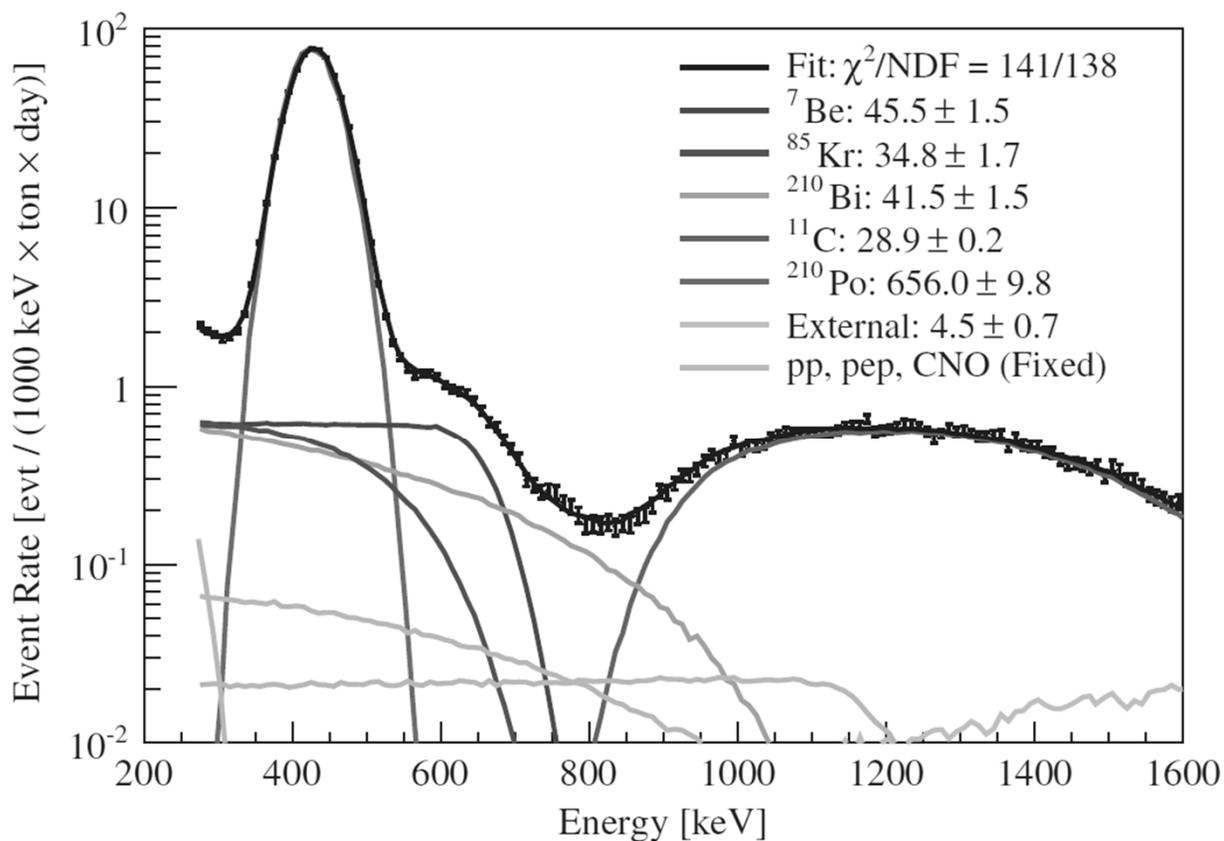
Il problema del Radon

- Il Radon e' presente ovunque nell'aria (e' un isotopo che fa parte della catena dell' ^{238}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 \rightarrow 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 ${}^7\text{Be}$ ν : $46 \pm 1.5_{\text{STAT}} \pm 1.5_{\text{SYS}}$ c/d/100 t

PRL 107 (2011)141302

Flusso previsto in assenza di oscillazioni: 74 ± 4 c/d/100 t

Risultati della Fase 1 di Borexino

- 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 Δm^2 - $\sin^2 2\theta$ che vengono fuori dal fit agli altri esperimenti sul neutrino solare

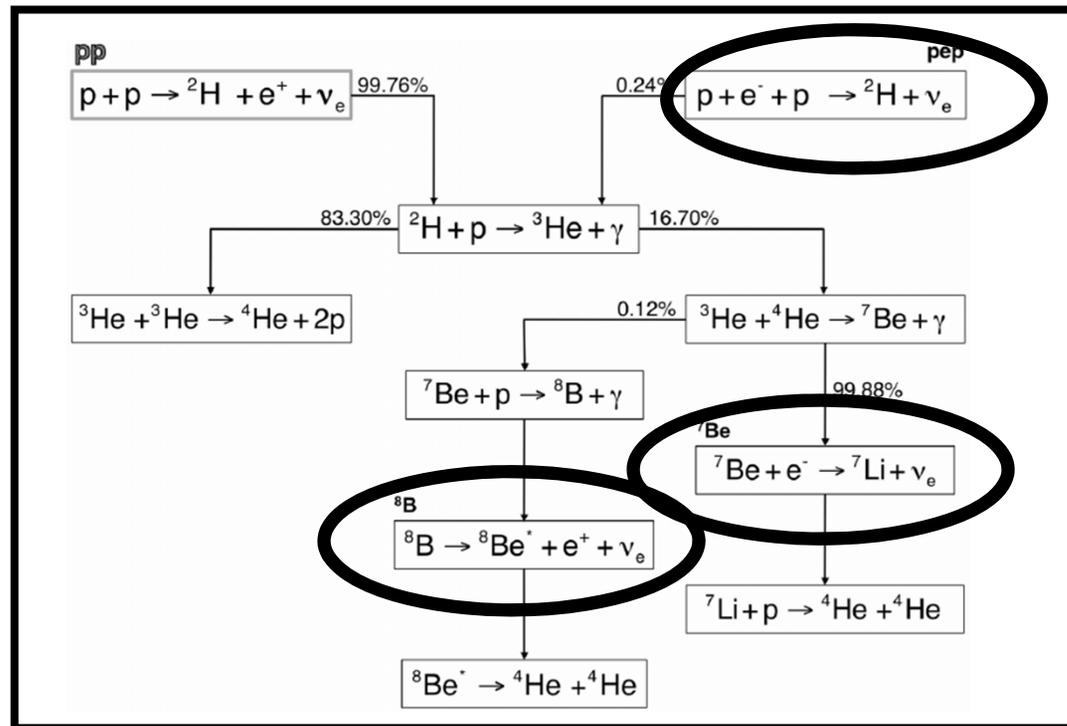
Soluzione LMA (Large Mixing Angle)

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

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

- 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;

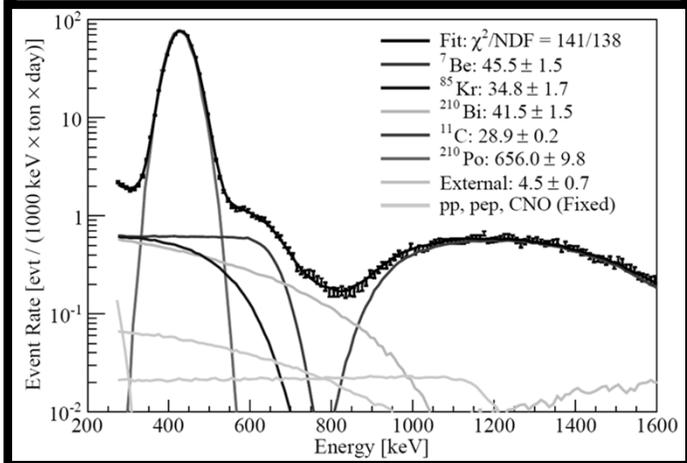
Borexino Phase 1 (2007-2010) results



Borexino Phase 1 (2007-2010) results

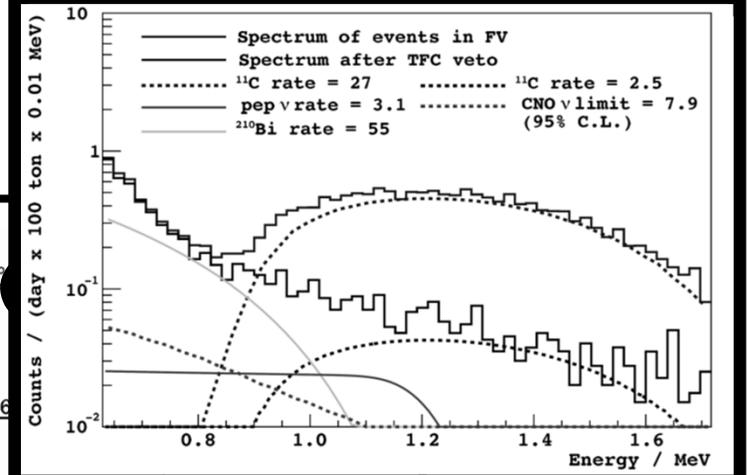
^7Be ν with 5% error

PRL 107, 1411302 (2011)



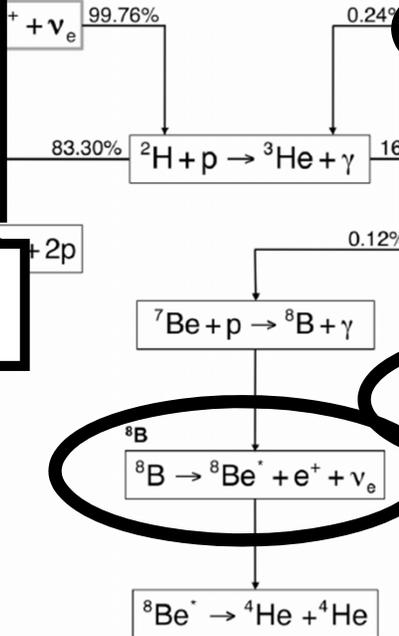
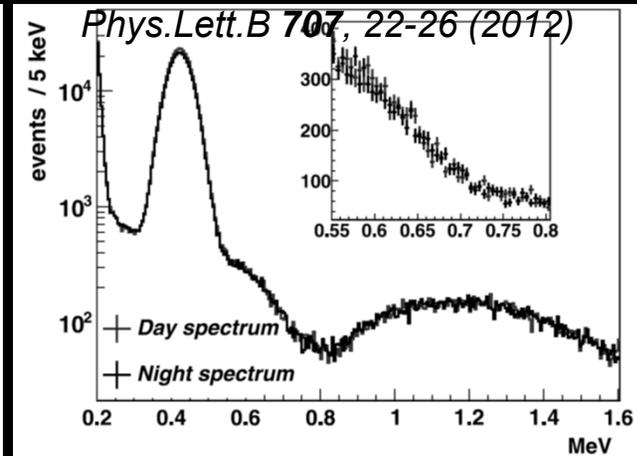
pep ν and limit on CNO ν

PRL 108, 051302 (2012)



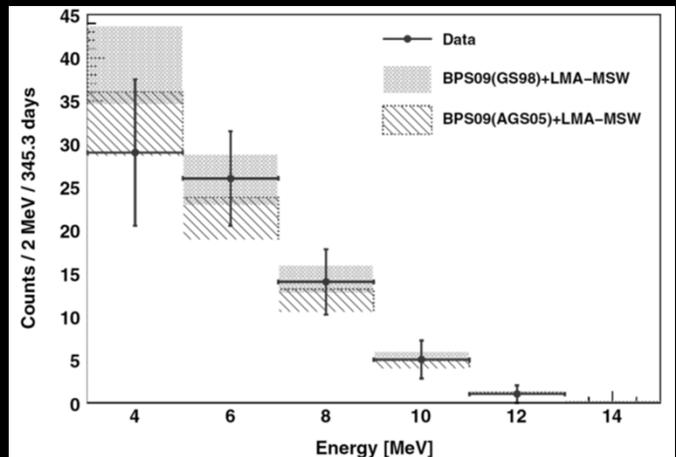
Absence of Day/Night asymmetry

Phys.Lett.B 707, 22-26 (2012)



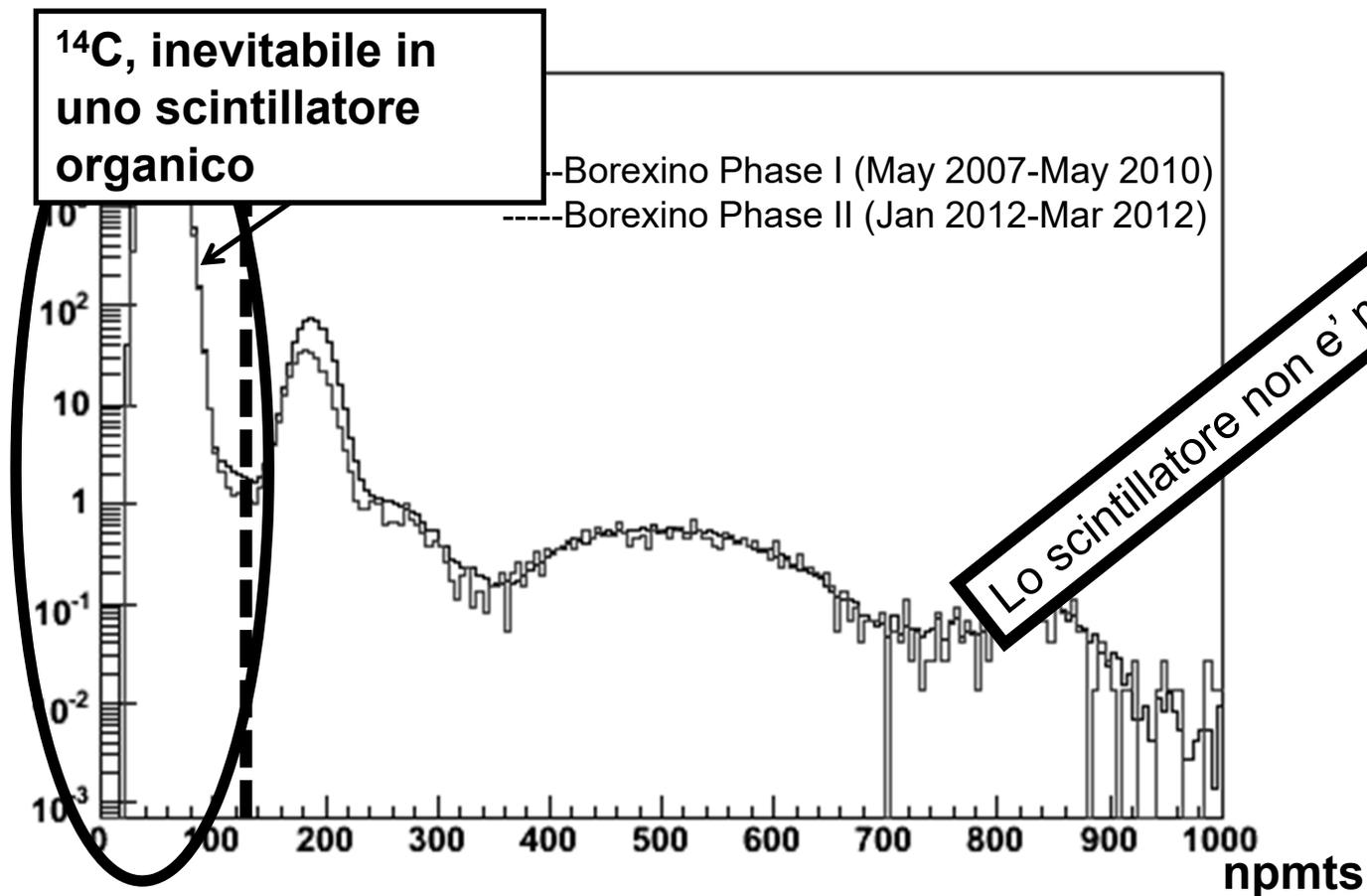
^8B ν

Phys.Rev.D 82, 0330066 (2010)



Borexino Phase 2: la nuova sfida

Confronto fra i dati di Fase 1 e fase 2



- Questo ha reso possibile abbassare la soglia e rivelare anche neutrini pp!

L'osservazione dei neutrini pp in Borexino

ARTICLE

doi:10.1038/nature13702

Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun

Borexino Collaboration*

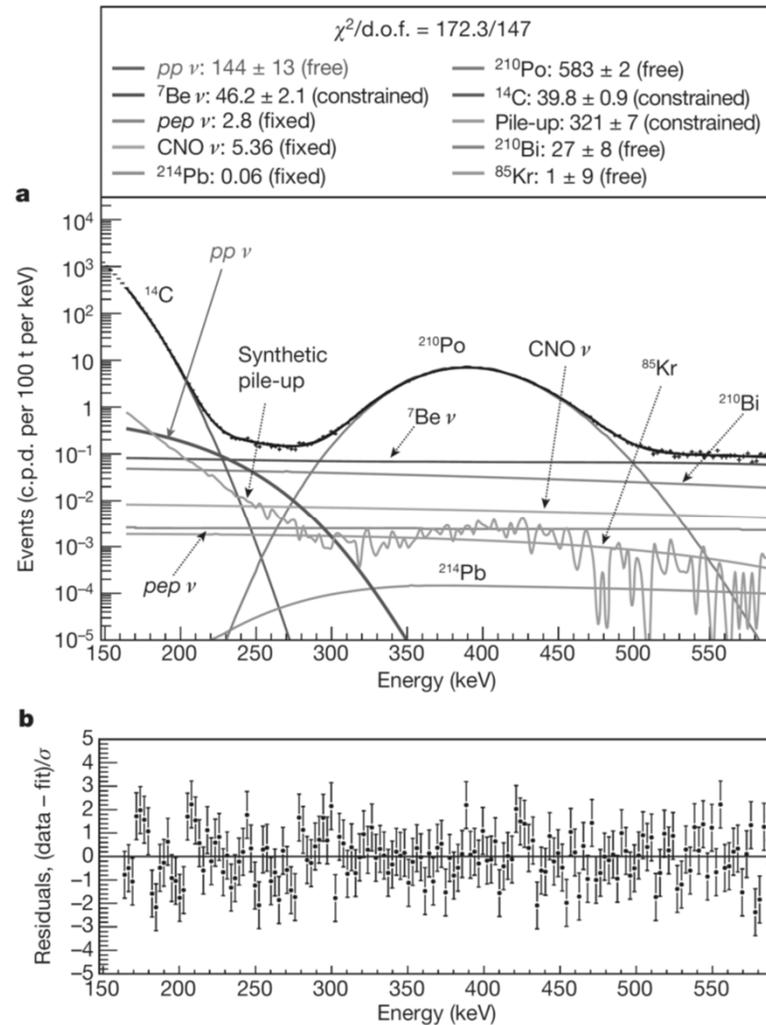
In the core of the Sun, energy is released through sequences of nuclear reactions that convert hydrogen into helium. The primary reaction is thought to be the fusion of two protons with the emission of a low-energy neutrino. These so-called *pp* neutrinos constitute nearly the entirety of the solar neutrino flux, vastly outnumbering those emitted in the reactions that follow. Although solar neutrinos from secondary processes have been observed, proving the Sun's energy and contributing to the discovery of neutrino oscillations, those from proton–proton fusion have eluded direct detection. Here we report spectral observations of *pp* neutrinos, demonstrating that a portion of the power of the Sun, 3.84×10^{33} ergs per second, is generated by the proton–proton fusion process.



Published on Nature 512, 383-386 (2014)

• Barbara Caccianiga INFN Milano 50th Rencontres de Moriond- La Thuile, March 14th 2014

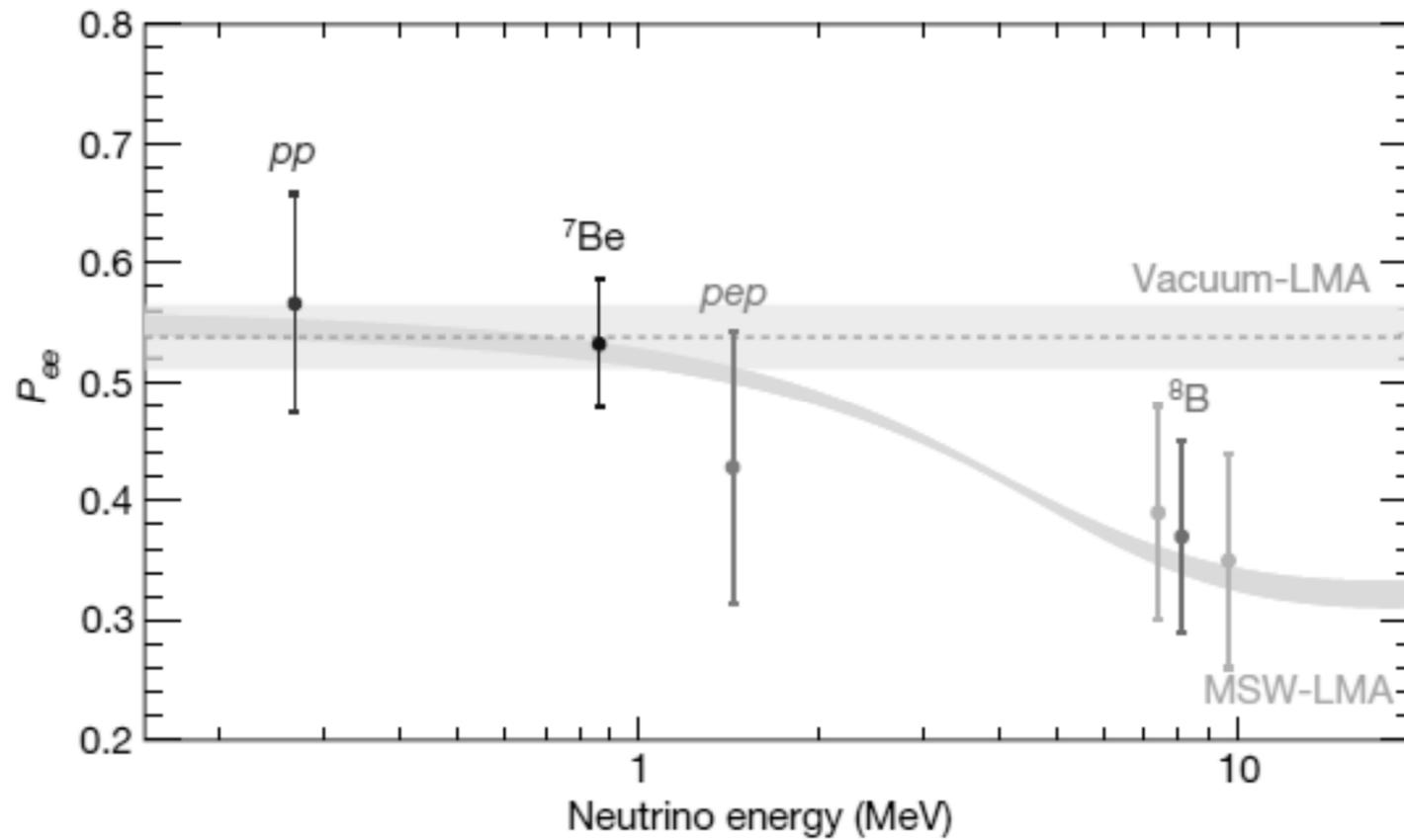
I risultati sui neutrini pp



pp- ν rate = 144 ± 13 (stat) ± 10 (sys) cpd/100tons

Rate previsto dal SSM (High Metallicity) + MSW-LMA = 131 ± 2 cpd/100tons

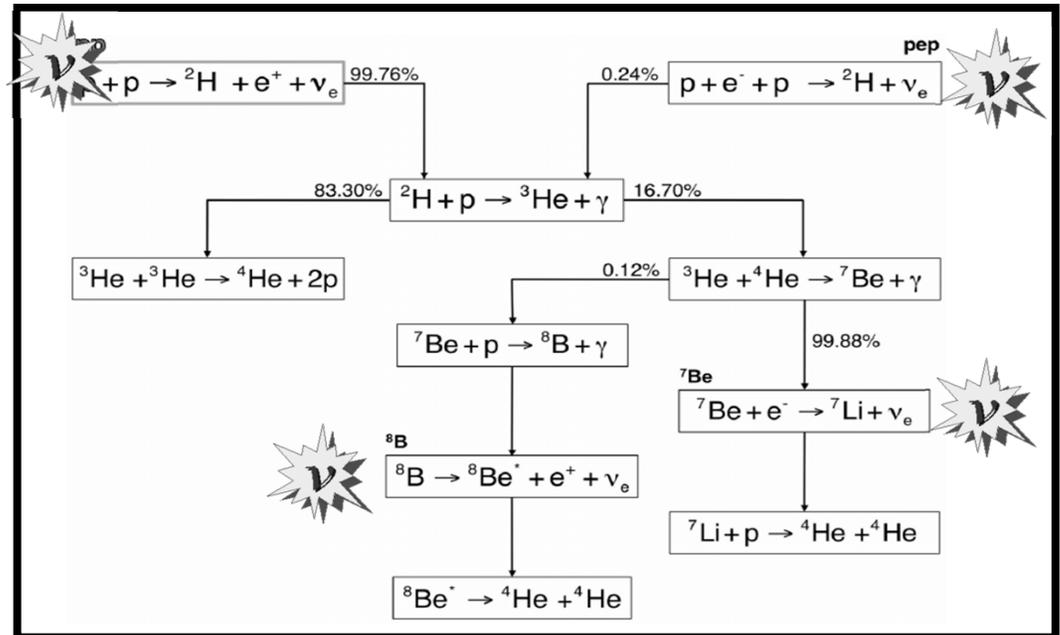
La probabilita' di sopravvivenza dei neutrini solari misurata da Borexino



e adesso?

Phase-3: I neutrini dal ciclo CNO

I neutrino solari osservati finora appartengono al ciclo protone-protone che e' dominante nel sole (99% dell'energia solare)



Esiste un altro ciclo di reazioni che fornisce <1% dell'energia solare, ma che si prevede essere dominante in stelle piu' massive del Sole: il ciclo CNO

